

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
Луцький національний технічний університет

**ПЕРСПЕКТИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ПРИЛАДИ**

**DOI 10.36910/6775-2313-5352-2020-16**

Збірник наукових праць

Випуск 16  
(червень, 2020)

Луцьк 2020

УДК 006, 537, 538, 546, 620, 621, 681

Рекомендовано до друку Вченою радою Луцького національного технічного університету, протокол № 10 від 25 червня 2020 р.

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 червень 2020р. – Луцьк: Луцький НТУ, 2020.-165 с.

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, технологічний факультет, кафедра приладобудування.

Телефон: (0332) 26-49-43

Факс: (0332) 74-48-40

e-mail: confkptm@gmail.com

© Луцький національний технічний університет, 2020 р.

<b>ГОЛОВНИЙ РЕДАКТОР ВИДАННЯ</b>	
Марчук Віктор Іванович, доктор технічних наук, професор, професор кафедри приладобудування, Луцький національний технічний університет, Україна.	
<b>РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ</b>	
1.	Савчук Петро Петрович, доктор технічних наук, професор, професор, Луцький національний технічний університет, Україна.
2.	Ткачук Анатолій Анатолійович, кандидат технічних наук, доцент кафедри електроніки та телекомунікацій, Луцький національний технічний університет, Україна.
3.	Ларшин Василь Петрович, доктор технічних наук, професор, професор кафедри технології машинобудування, Одеський національний політехнічний університет, Україна.
4.	Ляшук Олег Леонтійович, доктор технічних наук, доцент, завідувач кафедри автомобілів, Тернопільський національний університет імені Івана Пулюя, Україна.
5.	Скоропад Пилип Ізидорович, доктор технічних наук, професор, професор кафедри інформаційно-вимірвальних технологій, Національний університет «Львівська політехніка», Україна.
6.	Захаров Ігор Петрович, доктор технічних наук, професор, професор кафедри метрології та технічної експертизи, Харківський національний університет радіоелектроніки, Україна.
7.	Лебедєв Володимир Георгійович, доктор технічних наук, професор, професор кафедри матеріалознавства та технології матеріалів, Одеський національний політехнічний університет, Україна.
8.	Заблоцький Валентин Юрійович, кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри електроніки та телекомунікацій, Луцький національний технічний університет, 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, Щецинська морська академія, Польща.
11.	Марцін Штепанек (Marcin Szczepanek), PhD, доцент, факультет морської інженерії, Щецинська морська академія, Польща.
12.	Станіслав Іван (Stanislaw Iwan), доктор технічних наук, професор, факультет транспортної інженерії та економіки, Щецинська морська академія, Польща.
13.	Збігнев Матушак (Zbigniew Matuszak), доктор технічних наук, професор, факультет транспортної інженерії та економіки, Щецинська морська академія, Польща.
14.	Андрушак Ігор Євгенович, доктор технічних наук, професор, декан факультету фінансів, обліку, лінгвістики та права, Луцький національний технічний університет, Україна.
15.	Антонюк Віктор Степанович, доктор технічних наук, професор, професор кафедри виробництва приладів, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені І. Сікорського», Україна.
16.	Гайдук Мікулас (Hajduk Mikuláš), доктор технічних наук, професор, професор кафедри робототехніки, Технічний університет Кошице, Словаччина.
17.	Гераїмчук Михайло Дем'янович, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри приладобудування, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені І. Сікорського», Україна.
18.	Гулай Любомир Дмитрович, доктор хімічних наук, професор, завідувач кафедри екології та охорони навколишнього середовища, Східноєвропейський національний університет імені Лесі Українки, Україна.
19.	Денисюк Віктор Юрійович, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри приладобудування, Луцький національний технічний університет, Україна.
20.	Кайдик Олег Леонтійович, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри приладобудування, Луцький національний технічний університет, Україна.
21.	Коломієць Леонід Володимирович, доктор технічних наук, професор, ректор, Одеська державна академія технічного регулювання та якості, Україна.
22.	Куц Юрій Васильович, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри інформаційно-вимірвальних систем, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені І. Сікорського», Україна.
23.	Лапченко Юрій Сергійович, кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри приладобудування, Луцький національний технічний університет, Україна.

24.	<b>Луцький Сергій Валентинович</b> , кандидат фізико-математичних наук, доцент, доцент кафедри фундаментальних наук, Луцький національний технічний університет, Україна.
25.	<b>Луцький Ігор Володимирович</b> , доктор технічних наук, професор, професор кафедри конструювання верстатів, інструментів та машин, Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Україна.
26.	<b>Марек Опеляк (Marek Opielak)</b> , доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри харчового машинобудування, Люблінська політехніка, Польща.
27.	<b>Мірослав Пайор (Miroslaw Pajor)</b> , доктор технічних наук, професор, декан факультету механічної інженерії та мехатроніки, Західнопоморський технічний університет, Польща.
28.	<b>Пастернак Ярослав Михайлович</b> , доктор фізико-математичних наук, доцент, завідувач кафедри прикладної математики та механіки, Луцький національний технічний університет, Україна.
29.	<b>Пермяков Олександр Анатолійович</b> , доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри технології машинобудування та металоріжучі верстати, Національний технічний університет України «Харківський політехнічний інститут», Україна.
30.	<b>Пташенчук Віталій Віталійович</b> , кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри приладобудування, Луцький національний технічний університет, Україна.
31.	<b>Середюк Орест Євгенович</b> , доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри метрології та інформаційно-вимірювальної техніки, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, Україна.
32.	<b>Симонюк Володимир Павлович</b> , кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри приладобудування, Луцький національний технічний університет, Україна.
33.	<b>Тимчик Григорій Семенович</b> , доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри приладобудування, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені І. Сікорського», Україна.
34.	<b>Ткачук Роман Андрійович</b> , доктор технічних наук, професор, професор кафедри біотехнічних систем, Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Україна.
35.	<b>Тонконогий Володимир Михайлович</b> , доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри технології машинобудування, Одеський національний політехнічний університет, Україна.
36.	<b>Федосов Сергій Анатолійович</b> , доктор хімічних наук, професор, завідувач експериментальної фізики та інформаційно-вимірювальних технологій, Східноєвропейський національний університет імені Лесі Українки, Україна.
37.	<b>Четвержук Тарас Іванович</b> , кандидат технічних наук, старший викладач кафедри прикладної механіки, Луцький національний технічний університет, Україна.
38.	<b>Шваб'юк Василь Іванович</b> , доктор фізико-математичних наук, професор, професор кафедри прикладної математики та механіки, Луцький національний технічний університет, Україна.
39.	<b>Яворський Богдан Іванович</b> , доктор технічних наук, професор, професор кафедри радіотехнічних систем, Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Україна.
40.	<b>Ярошевич Микола Павлович</b> , доктор технічних наук, професор, професор кафедри галузевого машинобудування та лісового господарства, Луцький національний технічний університет, Україна.
41.	<b>Марчук Ірина Вікторівна</b> , кандидат технічних наук, доцент кафедри приладобудування, Луцький національний технічний університет, Україна.



<b>ЗМІСТ</b>	
Бережний М.О., Лактіонов І.С., Лебедєв В.А. Інформаційно-вимірювальна система моніторингу й керування автоматичним поливом рослин у теплицях на базі нечіткої логіки	6
Боднар Р.Т., к.т.н. Дослідження моделей визначення об'єму рідини в нахилених резервуарах	14
Витвицька Л.А., Лаврук Х.З., Чуйко М.М., Витвицький З.Я. Удосконалений метод еластографії кровоносних судин	22
Григор'єва Н.С., д.т.н., проф., Шабайкович В.А., д.т.н., проф., Марчук І.В., к.т.н. доц. Агрегативання складального виробництва в приладобудуванні	28
Марчук В.І., Гринюк С.В., Марчук І.В., Сачковська Л.О. Динамічна модель процесу шліфування переривчастими кругами	33
Денисюк В.Ю., к.т.н., Симонюк В.П., к.т.н., Лапченко Ю.С., к.т.н., Новосад Б.І. Метрологічне забезпечення точності приладів активного контролю в процесі обробки	38
Кокошко Р.В., Кріль Б.А. к.т.н., Кріль О.В. Експериментальне дослідження структурних схем систем керування мультикомпресорними установками для одержання стисненого повітря	48
Криницький О.С., Дакус С.В. Удосконалений метод та пристрій для вимірювання електропровідності і коефіцієнта термо-ерс для термоелектричних матеріалів	57
Малісевич Н., аспірантка, Середюк О.Є., д.т.н. Моделювання впливу теплоти згоряння природного газу на вимірювання його витрати торцевими соплами	63
Мащенко В.А., Квасніков В.П. Фізичні принципи та методи вимірювання коефіцієнта Пуассона в'язкопружних полімерних матеріалів	73
Никируй Л.І., Замуруєва О.В., Урбан О.А., Федосов С.А. Вплив наукових досліджень на розвиток відновлювальної енергетики	82
Новиков Ф. В., д. т. н. Определение условий высокопроизводительного низкотемпературного шлифования	92
Perederko A., Ph.D. Signal phase shifts during the measurement of vibration parameters	100
Сахацкий В.Д., Скомороха В.Ю. Устройство сопряжения волноводной линии передачи в системе измерения пространственного положения прокалывающей головки механизма подземной прокладки коммуникационных трасс	105
Сачковська Л.О. Моделювання температурних процесів переривчастого шліфування поверхонь обертання кілець роликотішлипників	112
Сергеев А. С., Андилахай В. А., к. т. н. Высокоэффективная технология финишной обработки отверстий цилиндров	118
Sereda V.P. <sup>1</sup> , Voloh V.I. Formation of structure of hooks of loading lifts in conditions of shs	123
Стасюк В.М., к.т.н., Андросчук І.В., к.с.-г.н. Вплив окремих конструктивних параметрів приводу із пневмомеханічною системою повітророзподілу на робочі характеристики віброударних машин	129
Субботіна В.В., Білозеров В.В., Соболев О.В. Електрична міцність оксидних покриттів, сформованих методом мікродугового оксидування	134
Удовицька Ю.А., Луньов С.В., Кашицький В.П., Назарчук П.Ф. Розрахунок втрат енергії швидких електронів при проходженні через епоксикомпозит	141
Чеховський С.А., Піндус Н.М., Клочко Н.Б., Піндус О.В. Дистанційні технології навчання як організація навчально-методичної співпраці вищих закладів освіти України	149

<b>Шинкарук Х.М., Чеховський С.А. Особливості роботи термокаталітичного давача в середовищі природного газу</b>	155
<b>Dzhuguryan T.G., Marchuk V.I., Marchuk I.V. Calculation oscillations of various elements of the elastic system of the center-free grinding machine SASL 5AD</b>	160

УДК 53.083:681.5.07:635.1/.8

DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2313-5352-2020-16-1>

Бережний М.О., студент, Лактіонов І.С., к.т.н., доц., доц. каф. електронної техніки,  
Лебедєв В.А., ас. каф. електронної техніки  
ДВНЗ «Донецький національний технічний університет», м. Покровськ, Україна

## ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНА СИСТЕМА МОНІТОРИНГУ Й КЕРУВАННЯ АВТОМАТИЧНИМ ПОЛИВОМ РОСЛИН У ТЕПЛИЦЯХ НА БАЗІ НЕЧІТКОЇ ЛОГІКИ

*У статті наведено результати аналітичного огляду й критичного аналізу, а також створення інформаційно-вимірювальної системи автоматичного поливу тепличних культур із використанням теорії нечіткої логіки. Під час проведення досліджень було проаналізовано існуючі системи зрошення захищених ґрунтів та виявлено їх недоліки й переваги. Було розроблено алгоритм роботи створеної системи та її структурну схему. На базі пакету програмного забезпечення MATLAB & SIMULINK та підсистеми розширення Fuzzy Logic Toolbox створено базу правил керування системою та її імітаційну модель, а також проведено її тестування. На базі програмного забезпечення Proteus було створено комп'ютерну модель системи з еквівалентною заміною основних елементів та виконано її тестування з обліком реальних умов експлуатації. Встановлено, що створена система має наступні перспективи модернізації: бездротовий зв'язок з оператором та відображення стану системи та ґрунту, збереження інформації на хмарному сховищі, розширення функціоналу з моніторингу та внесення інших параметрів до взаємодії у базі правил.*

**Ключові слова:** крапельний полив, інформаційно-вимірювальна система, моніторинг, керування, нечітка логіка, вологість, температура.

**Вступ.** Автоматизація технологічних процесів є необхідною умовою на сучасному етапі розвитку виробництва. Сільське господарство доволі сильно потребує знаходження оптимальних, універсальних і економічно обґрунтованих способів автоматичного моніторингу й керування технологічними процесами вирощування. На теперішній час існує дві найбільш розповсюджені системи поливу в тепличних умовах, а саме: дощування та крапельне зрошення. Ці системи мають різні конструкції та способи реалізації. Система крапельного поливу має такі переваги: відносно низька ціна на закупівлю необхідних витратних матеріалів; незначні витрати на електроенергію; невеликий робочий тиск, що попереджує надмірний полив ґрунту, вимивання ґрунту з під кореня та не пошкоджує листя через попадання води на нього; надходження води здійснюється біля кореня рослини, що сприяє точному потраплянню вологи в необхідному для певних типів і періодів вегетації рослин об'ємі.

На сьогодні існує доволі багато науково-технічних рішень із побудови систем автоматичного та автоматизованого крапельного поливу, проте вони відрізняються технологіями керування поливом, наявністю або відсутністю підсистем моніторингу поточного стану рослин та можливістю дистанційного вимірювального контролю [1–4]. Попри це, у результаті проведеного аналізу існуючих систем, встановлено, що більшість із них працюють на базі двохпозиційних алгоритмів. Основою роботи таких систем є мікроконтролер, який залежно від отриманої інформації з датчиків вмикає / вимикає подачу води з насоса або вмикається залежно від стану вбудованого таймера. Звертаючи увагу на недоліки існуючих систем, виникає необхідність в удосконаленні системи шляхом обліку співвідношення основних факторів, що впливають на вологість ґрунту, та в залежності від цього керувати потужністю насоса в автоматичному режимі. Таким чином, науково-технічна задача удосконалення існуючих систем автоматичного поливу тепличних культур за рахунок створення й впровадження адаптивних алгоритмів моніторингу й керування є актуальною.

**Мета та об'єкт дослідження.** Основна мета роботи полягає в удосконаленні технологічних режимів вирощування тепличних культур шляхом розробки інформаційно-вимірювальної системи моніторингу й керування автоматичним поливом рослин у теплицях на базі нечіткої логіки. **Об'єкт дослідження** – нестационарні процеси автоматичного моніторингу й керування параметрами крапельного поливу тепличних культур.

**Базова структура та алгоритм функціонування системи.** Система автоматичного поливу створена на базі теорії нечіткої логіки, яка дає змогу розробити систему множин

варіантів керування системою. Вона складається з блоків вхідних сигналів, бази правил керування та блоку вихідного сигналу. За допомогою пакету програмного забезпечення MATLAB & SIMULINK та підпрограми розширення Fuzzy Logic Toolbox створено автоматичну та повністю автономну систему керування поливом ґрунту. Ця система залежить від двох вхідних параметрів, що поділені на п'ять рівнів трикутних та трапецеїдальних вхідних функцій вологості та температури ґрунту, а також п'ять рівнів вихідних функцій ШІМ-керування насосом, що подає воду до систему поливу. Рівні поділяються згідно з актуальними державними нормами вирощування сільськогосподарських культур у теплицях [5, 6].

Блок вхідних даних поділяється на дві частини:

- вхідні дані з виходу сенсора температури в діапазоні від 10 до 30 °С;
- вхідні дані з виходу сенсора вологості в діапазоні від 50 до 95 %.

Поділ вищевказаних діапазонів вимірювання фізичних параметрів на відповідні піддіапазони наведено в таблиці 1. Результати налаштування параметрів блоків вхідних даних для сенсорів температури й вологості наведено на рис. 1 і 2, відповідно.

Таблиця 1

Піддіапазони вхідних сигналів					
Рівень	Minimum	Less than normal	Normal	More than normal	Maximum
Температура ( $T_{soil}$ , °C)	10 – 14	12 – 19	17 – 24	22 – 28	26 – 30
Вологість ( $H_{soil}$ , %)	50 – 58	55 – 68	65 – 80	77 – 90	87 – 95

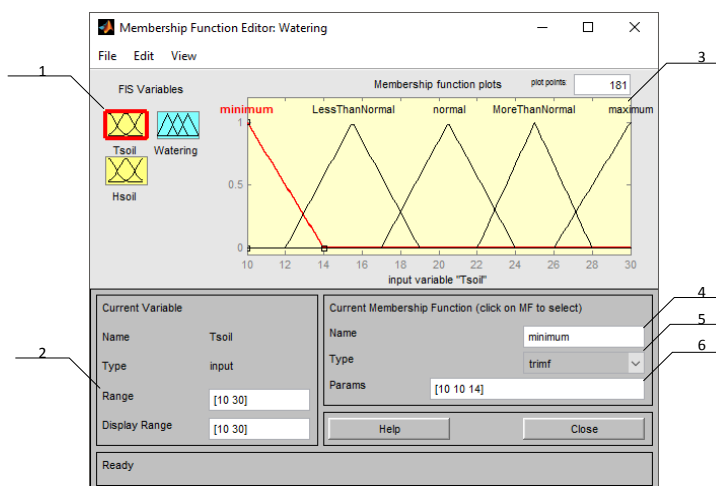


Рис. 1. Блок вхідних даних для датчика температури

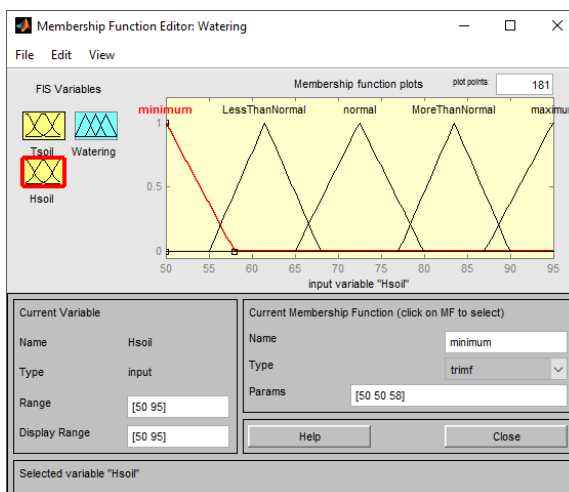


Рис. 2. Блок вхідних даних для датчика вологості

На рис. 1 введено наступні позначення: 1 – кнопка за допомогою якої обирається вікно налаштування вхідного сигналу з датчика температури; 2 – діапазон можливих вхідних сигналів; 3 – вікно відображення створених рівнів за якими буде реалізовуватись розподілення за значеннями сигналу; 4 – вікно перейменування функції рівня; 5 – кнопка для вибору типу функції рівня; 6 – вікно діапазону рівня функції.

Блок вихідних даних складається з однієї частини. В ньому задаються функції керування вихідним сигналом, а саме діючим значенням напруги вихідного сигналу на базі широтно-імпульсної модуляції. За допомогою зміни напруги змінюється інтенсивність роботи насоса поливу ґрунту у теплиці. Напруга змінюється в діапазоні від 0 до 5 В. У самому діапазоні, як і в блоці вхідних даних є п'ять рівнів, як показано в таблиці 2.

Таблиця 2

Рівень	Рівні вихідного сигналу				
	Off	Low	Medium	Fast	Intensely
Інтенсивність роботи	0 – 1	0,75 – 2	1,75 – 3,25	3 – 4,25	4 – 5

Для більш плавного переключення між рівнями використовується накладання крайніх значень відрізків, як показано на рис. 3.

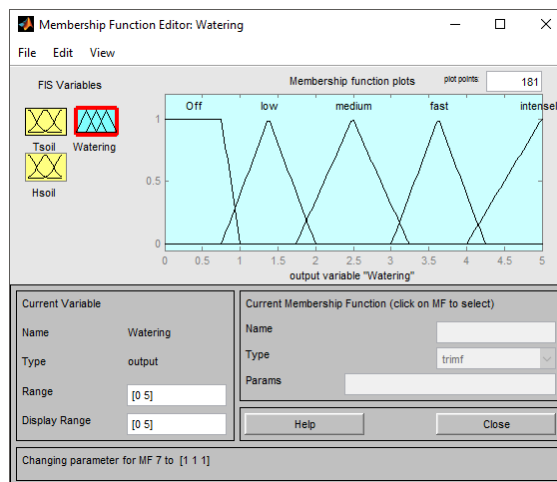


Рис. 3. Блок вихідного сигналу для керуванням насосом

Основним виконуючим блоком даної системи є блок бази правил. За його допомогою створено сукупність функцій залежності вихідного сигналу від вхідних сигналів. У залежності від миттєвих значень вхідних сигналів у редакторі правил (див. рис. 4) обирається відповідне рівняння функції керування. Для підвищення ергономічності уявлення принципів роботи системи керування наведено матрицю відповідності правил до функцій належності параметрів, як показано в таблиці 3.

Таблиця 3

Матриця відповідності правил до функцій належності параметрів					
$T_{soils}$ , °C					
	10 – 14	12 – 19	17 – 24	22 – 28	26 – 30
$W_{soils}$ , %					
50 – 58	<i>fast</i>	<i>intensely</i>	<i>intensely</i>	<i>intensely</i>	<i>intensely</i>
55 – 68	<i>medium</i>	<i>fast</i>	<i>fast</i>	<i>fast</i>	<i>intensely</i>
65 – 80	<i>OFF</i>	<i>OFF</i>	<i>OFF</i>	<i>OFF</i>	<i>low</i>
77 – 90	<i>OFF</i>	<i>OFF</i>	<i>OFF</i>	<i>OFF</i>	<i>low</i>
87 – 95	<i>OFF</i>	<i>OFF</i>	<i>OFF</i>	<i>OFF</i>	<i>low</i>

1. If (Tsoil is minimum) and (Hsoil is minimum) then (Watering is fast) (1)
2. If (Tsoil is minimum) and (Hsoil is LessThanNormal) then (Watering is medium) (1)
3. If (Tsoil is minimum) and (Hsoil is maximum) then (Watering is Off) (1)
4. If (Tsoil is minimum) and (Hsoil is normal) then (Watering is Off) (1)
5. If (Tsoil is minimum) and (Hsoil is MoreThanNormal) then (Watering is Off) (1)
6. If (Tsoil is minimum) and (Hsoil is maximum) then (Watering is Off) (1)
7. If (Tsoil is LessThanNormal) and (Hsoil is minimum) then (Watering is intensely) (1)
8. If (Tsoil is LessThanNormal) and (Hsoil is LessThanNormal) then (Watering is fast) (1)
9. If (Tsoil is LessThanNormal) and (Hsoil is normal) then (Watering is Off) (1)
10. If (Tsoil is LessThanNormal) and (Hsoil is MoreThanNormal) then (Watering is Off) (1)
11. If (Tsoil is LessThanNormal) and (Hsoil is maximum) then (Watering is Off) (1)
12. If (Tsoil is normal) and (Hsoil is minimum) then (Watering is intensely) (1)
13. If (Tsoil is normal) and (Hsoil is LessThanNormal) then (Watering is fast) (1)
14. If (Tsoil is normal) and (Hsoil is normal) then (Watering is Off) (1)
15. If (Tsoil is normal) and (Hsoil is MoreThanNormal) then (Watering is Off) (1)
16. If (Tsoil is normal) and (Hsoil is maximum) then (Watering is Off) (1)
17. If (Tsoil is MoreThanNormal) and (Hsoil is minimum) then (Watering is intensely) (1)
18. If (Tsoil is MoreThanNormal) and (Hsoil is LessThanNormal) then (Watering is fast) (1)
19. If (Tsoil is MoreThanNormal) and (Hsoil is normal) then (Watering is Off) (1)
20. If (Tsoil is MoreThanNormal) and (Hsoil is MoreThanNormal) then (Watering is Off) (1)
21. If (Tsoil is MoreThanNormal) and (Hsoil is maximum) then (Watering is Off) (1)
22. If (Tsoil is maximum) and (Hsoil is minimum) then (Watering is intensely) (1)
23. If (Tsoil is maximum) and (Hsoil is LessThanNormal) then (Watering is intensely) (1)
24. If (Tsoil is maximum) and (Hsoil is normal) then (Watering is low) (1)
25. If (Tsoil is maximum) and (Hsoil is MoreThanNormal) then (Watering is low) (1)
26. If (Tsoil is maximum) and (Hsoil is maximum) then (Watering is Off) (1)

Рис. 4. Синтезована база правил обробки вхідних сигналів

З метою тестування та оцінки адекватності функціонування розробленої системи авторами статті було створено імітаційну модель у ППП MATLAB & SIMULINK, як показано на рис. 5. В якості вхідних сигналів було використано генератори випадкового сигналу, амплітуда яких відповідає діапазону температур та відносної вологості на відповідних сенсорах. Для більшого наближення отриманих результатів моделювання до реальних умов до кожного із сигналів додатково додано генератор шуму, сигнал якого відповідає допустимій випадковій похибці вимірювання відповідних фізичних параметрів. Вхідні сигнали надходять до мікроконтролера зі встановленим програмним забезпеченням нечіткої логіки. Сигнали оброблюються та мікроконтролер генерує відповідний вихідний ШІМ-сигнал [7, 8].

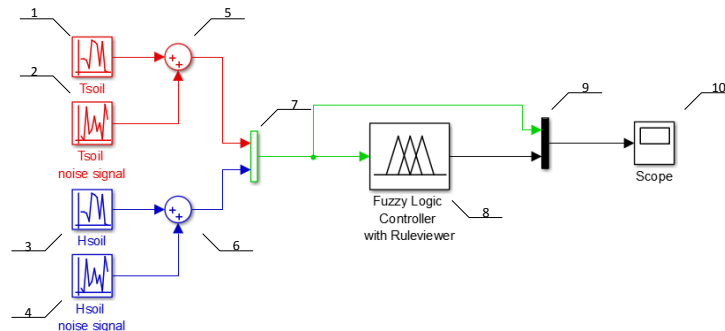


Рис. 5. Імітаційна модель системи керування крапельним зрошенням

На рис. 5 введено наступні позначення: 1, 3 – генератори випадкового сигналу; 2, 4 – генератори шуму; 5, 6 – суматори сигналів; 7 – мультиплексор вхідних сигналів; 8 – контролер нечіткої логіки; 9 – мультиплексор вхідних і вихідного сигналу; 10 – осцилограф.

Результати імітаційного тестування розробленої моделі системи наведено на рис. 6 і 7.

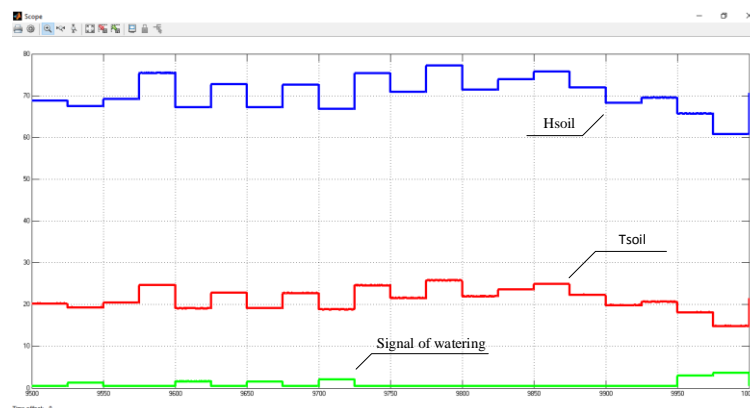


Рис. 6. Динаміка вхідних і вихідного сигналів розробленої системи



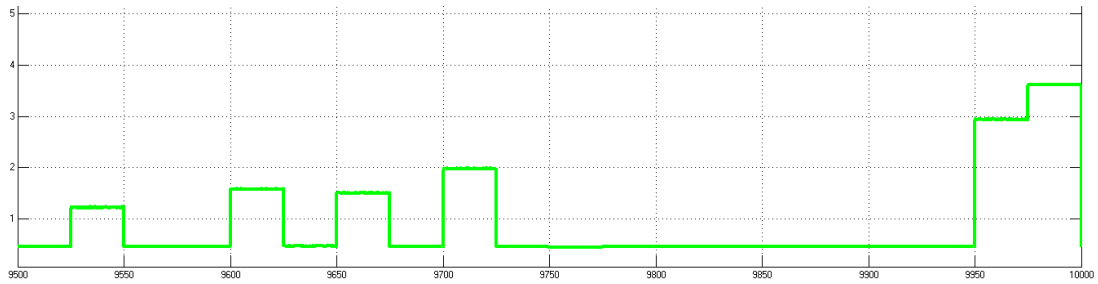


Рис. 7. Фрагмент осцилограми вихідного сигналу системи

**Результати комп'ютерного тестування.** Задля тестування розробленої моделі з обліком реальних умов експлуатації було використано принцип імітаційного моделювання в середовищі Proteus. Базове апаратне забезпечення, яке використано під час побудови моделі, наведено в таблиці 4. Результати розробки та тестування моделі системи наведено на рис. 8 і 9.

Таблиця 4

Елементи моделі системи керування автоматичним поливом		
Складовий елемент системи		Функції та призначення
Фізичний рівень	Імітаційний рівень	
Arduino UNO	Arduino UNO	база для підключення датчиків, додаткового облаштування та опрацювання вхідної і вихідної інформації
датчик вологості DFRobot	потенціометр	зчитування відносної вологості в ґрунті діелькометричним методом та передача контролеру
датчик температури DS18B20	потенціометр	зчитування температури ґрунту та передача контролеру
мембранний насос	DC-мотор	підкачка води в систему з потужністю, яка залежить від вихідного сигналу
осцилограф	осцилограф та СОМ-порт	візуалізація вхідних сигналів з датчиків та вихідного сигналу керування насосом

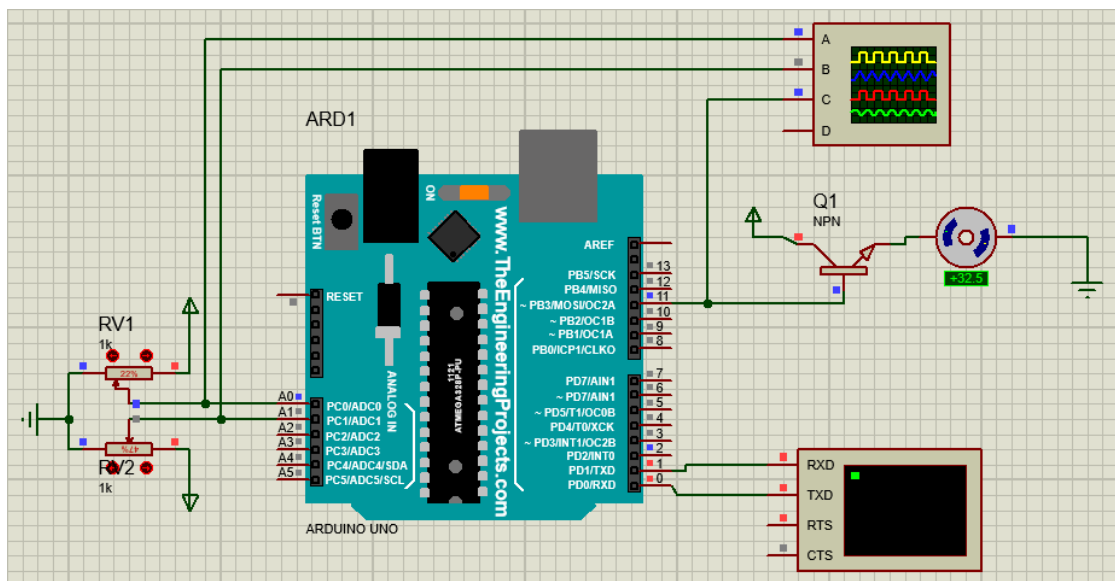


Рис. 8. Загальна структура системи в програмі Proteus

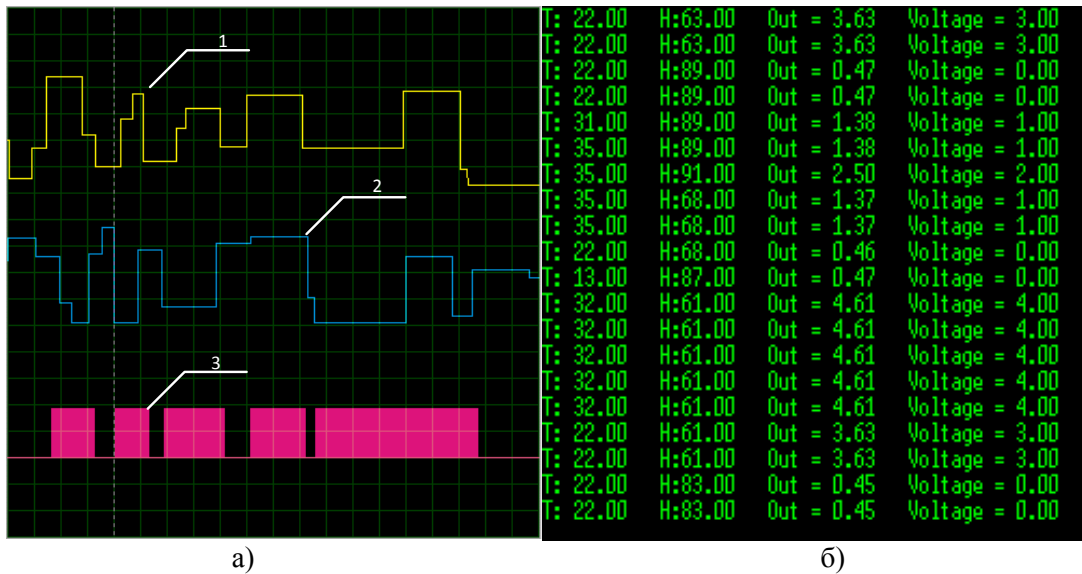


Рис. 9. Осцилограма (а) та результати зчитування інформації з послідовного порту (б)

На рис. 9 введено наступні позначення: 1 – сигнал з сенсора температури, 2 – сигнал з сенсора вологості, 3 – ШІМ-сигнал керування насосом.

На підставі аналізу отриманих результатів моделювання встановлено, що синтезована модель відпрацьовує розроблені алгоритми функціонування та може бути використана в якості базової під час розробки й проектування макетного зразка системи.

**Перспективні шляхи подальших досліджень системи.** Основний перелік облаштування не передбачає відображення та запис інформації для оператора, а тим паче можливість віддалено впливати на систему. Для цього запропоновано можливий варіант розширення функціоналу системи. Розширення стає можливим за допомогою переліку додаткового облаштування. В цей перелік входять: модуль годинника реального часу DS3231 [9]; модуль додаткової обробки й передачі інформації NodeMCU на базі ESP8266 [10].

Платформа на основі ESP8266 призначена для створення різних пристроїв інтернету речей (IoT). Модуль призначено для відправки й отримання інформації в локальній або глобальній мережі за Wi-Fi технологією. В даному випадку цей модуль необхідний для:

- передачі інформацію з датчиків на онлайн платформу ThingSpeak;
- організації передачі даних оператору на android-додаток Blynk [11];
- керування системою поливу через Blynk-додаток.

За допомогою цього додатку існує можливість створити підсистему онлайн відстеження поточного стану системи, стану ґрунту та віддаленого керування системою. Запропоновану структурну й функціональну схеми подальших досліджень системи наведено на рис. 10 і 11.

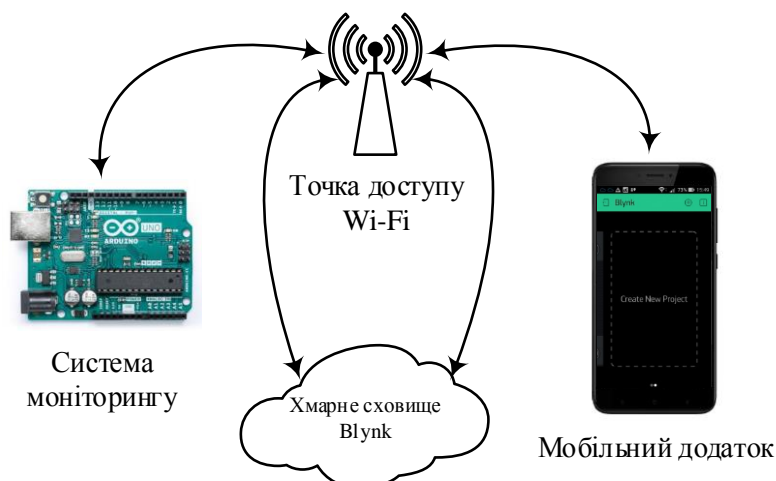


Рис. 10. Структурна схема зв'язку системи моніторингу та мобільного додатку





Рис. 11. Алгоритм роботи взаємодії системи з платформою Vlynk

Отже, запропоновані перспективні шляхи удосконалення системи моніторингу й керування технологічним процесом крапельного зрошення тепличних ґрунтів дозволять обґрунтувати рекомендації з впровадження розробленого вимірювача до реальних умов.

**Висновки.** Під час проведення досліджень з удосконалення технологічних режимів вирощування тепличних культур шляхом розробки інформаційно-вимірювальної системи моніторингу й керування автоматичним поливом рослин у теплицях на базі нечіткої логіки було отримано наступні основні результати:

– встановлено основні недоліки існуючих систем автоматичного керування технологічним процесом крапельного зрошення тепличних ґрунтів, які обмежують їх впровадження до реальних умов експлуатації;

– розроблено сукупність логічних правил, яка базується на результатах вимірювального моніторингу вологості та температури тепличних ґрунтів з обліком актуальних вимог до технологічних процесів вирощування культур в умовах захищеного ґрунту;

– протестовано створену імітаційну модель системи, що довело первинну можливість її використання під час розробки експериментального зразка вимірювача;

– обґрунтовано перспективні напрямки подальших досліджень системи задля розширення її функціональних можливостей.

### Інформаційні джерела

1. Обладнання для крапельного зрошення. [Електронний ресурс]: Контролер автополиву ELC-401i-e Hunter. – Режим доступу: <https://agras.com.ua/p553610663-kontroller-avtopoliva-els.html>. – Назва з титул. екрана.

2. ТМ "Рідна Роса". [Електронний ресурс]: Крапельний полив в теплиці. – Режим доступу: <https://gtconcept.com.ua/greenhouses/oborudovanie-teplic/poliv-teplicity.html>. – Назва з титул. екрана.

3. Izzuddin, T.A. Smart irrigation using fuzzy logic method / T.A. Izzuddin, M.A. Johari, M.Z.A. Rashid, M.H. Jali // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. – Islamabad, 2018. – Vol. 13 (2). – P. 517 – 522.

4. Ceballos, M. Fuzzy System of Irrigation to Applied to the Growth of Habanero Pepper (Capsicum chinese Jacq.) under Protected Conditions in Yucatan – Mexico / M. Ceballos, J.L. Gorricho, O. Palma, M. Huerta, D. Rivas, M. Erazo // International Journal of Distributed Sensor Networks. – Geneva, 2015. – Vol. 11 (6). – P. 1 – 17.

5. ВНТП АПК–19–07. Тепличні і оранжерейні підприємства. Споруди захищеного ґрунту для фермерських (селянських) господарств: Відомчі норми технологічного проектування / М-во аграр. політ. України. – К.: «ХІК», 2007. – 140 с.

6. Both, A.J. Guidelines for measuring and reporting environmental parameters for experiments in greenhouses / A.J. Both, L. Benjamin, J. Franklin et al. // Plant Methods. – Melbourne, 2015. – Vol. 11 (43). – P. 1 – 18.

7. Лактіонов, І.С. Комп'ютеризована система комплексного моніторингу й керування мікрокліматом промислових теплиць на базі нечіткої логіки / І.С. Лактіонов, О.В. Вовна, М.О. Бережний, В.А. Лебедев // Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського. – Кременчук, 2019. – № 3 (116). – С. 120–129.

8. Вовна, О.В. Комп'ютеризована технологія моніторингу й керування системою автоматичного поливу рослин у теплицях на базі нечіткої логіки / О.В. Вовна, І.С. Лактіонов, М.О. Бережний, В.А. Лебедев // Перспективні напрямки сучасної електроніки, інформаційних і

комп'ютерних систем: тези доповідей на Всеукр. наук.-практ. конф. MEICS-2019. – К. : м. Дніпро 2019 – С. 77 – 78.

9. Arduino модулі [Електронний ресурс]: Годинник реального часу. – Режим доступу: <https://3d-diy.ru/wiki/arduino-moduli/chasy-realnogo-vremeni-ds3231/>. – Назва з титул. екрана.

10. Arduino Master [Електронний ресурс]: ESP8266 Node MCU. – Режим доступу: <https://arduino-master.ru/platy-arduino/esp8266-nodemcu-v3-lua>. – Назва з титул. екрана.

11. Офіційний сайт додатку Blynk [Електронний ресурс]: Blynk.io. – Режим доступу: <https://blynk.io/>. – Назва з титул. екрана.

**Бережной М.О.**, студент, **Лактионов И.С.**, к.т.н., доц., доц. каф. електронної техніки, **Лебедев В.А.**, асс. каф. електронної техніки  
ГВУЗ «Донецкий национальный технический университет», г. Покровск, Украина

### **ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА МОНИТОРИНГА И УПРАВЛЕНИЯ АВТОМАТИЧЕСКИМ ПОЛИВ РАСТЕНИЙ В ТЕПЛИЦАХ НА БАЗЕ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ**

В статье приведены результаты аналитического обзора и критического анализа, а также создания информационно-измерительной системы автоматического полива тепличных культур с использованием теории нечеткой логики. При проведении исследований были проанализированы существующие системы орошения защищенных почв и выявлены их недостатки и преимущества. Был разработан алгоритм работы созданной системы и ее структурная схема. На базе программного пакета MATLAB & SIMULINK и подсистемы расширения Fuzzy Logic Toolbox создана база правил управления системой и ее имитационная модель, а также проведено ее тестирование. На базе программного обеспечения Proteus была создана компьютерная модель системы с эквивалентной заменой основных элементов и выполнено ее тестирование с учетом реальных условий эксплуатации. Установлено, что созданная система имеет следующие перспективы модернизации: беспроводная связь с оператором и отображения состояния системы и почвы, сохранение информации на облачном хранилище, расширение функционала мониторинга и внесение ряда информативных параметров к взаимодействию в базе правил.

**Ключевые слова:** капельный полив, информационно-измерительная система, мониторинг, управление, нечеткая логика, влажность, температура.

**M. Berezhnyi, I. Laktionov, Ph.D., V. Lebediev**  
SHEI 'Donetsk National Technical University', Pokrovsk, Ukraine

### **INFORMATION-MEASURING SYSTEM OF MONITORING AND CONTROL OF THE GREENHOUSES PLANTS AUTOMATIC IRRIGATION BASED ON FUZZY LOGIC**

The results of an analytical review and critical analysis, as well as the creation of the information-measuring system of monitoring and control of the greenhouses plants automatic irrigation based on fuzzy logic have been described in the article. During the research, the existing irrigation systems of protected soils have been analyzed and their disadvantages and advantages have been identified. The algorithms of the created system and its block diagram have been developed. The system control rule base has been created on the basis of the MATLAB & SIMULINK software package and Fuzzy Logic Toolbox extension subsystem. A simulation model of the software component has been designed and tested. A computer model of the system with an equivalent replacement of the main elements has created on the basis of Proteus software. The system has been tested taking into account actual operating conditions. Promising areas for further research have been established, namely: wireless communication with the operator and displaying the state of the system and soil, saving information on a cloud storage, expanding the monitoring functionality and introducing a number of informative parameters for interaction in the rule base.

**Keywords:** drip irrigation, information-measuring system, monitoring, control, fuzzy logic, humidity, temperature.

УДК 532.61

DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2313-5352-2020-16-2>

Боднар Р.Т., к.т.н.

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газ

## ДОСЛІДЖЕННЯ МОДЕЛЕЙ ВИЗНАЧЕННЯ ОБ'ЄМУ РІДИНИ В НАХИЛЕНИХ РЕЗЕРВУАРАХ

**Анотація.** В роботі проведено аналіз існуючих методів та засобів визначення об'єму рідини в резервуарах. Встановлено, що в основному всі публікації стосуються тільки резервуарів з горизонтальною основою і вертикальними стінками. Для врахування непоодиноких випадків негоризонтального розміщення основи резервуара встановлено найбільш ймовірні варіанти їх встановлення враховуючи їхню геометричну форму.

Виходячи із канонічних формул для обчислення об'ємів тіл різної геометричної форми (прямокутна призма, круговий циліндр, еліптичний циліндр) і, використовуючи методи аналітичної геометрії, вищої алгебри та інтегрального числення, виведено аналітичні моделі для визначення об'єму рідин в нахилених відносно горизонтальної площини резервуарах вищевказаних геометричних форм. Вимірюваними параметрами є кути нахилу резервуарів в ортогональних площинах відносно горизонтальної площини та відстань по вертикалі від центра горловини резервуара до поверхні рідини. Відомими параметрами вважаються форма та геометричні розміри резервуарів. Для визначення об'ємів нахилених резервуарів типу круговий циліндр і прямокутна призма, нахилена відносно одного ребра основи, отримано відносно прості вирази. Для обчислення об'єму рідини в інших резервуарах за отриманими виразами рекомендовано використовувати методи обчислювальної математики.

**Ключові слова:** об'єм рідини, форма резервуару, нахилені резервуари, рівень рідини, кут нахилу.

**Актуальність задачі.** Збереження енергоресурсів є досить актуальним в нашій країні. В цю проблему входить і питання точного обліку кількості рідин, зокрема, нафти і нафтопродуктів. При транспортуванні і зберіганні рідин, особливо нафтопродуктів, виникає проблема контролю кількості рідини в резервуарах. Встановлюються такі резервуари переважно з горизонтальним розміщенням основи. Визначення кількості рідини в таких резервуарах в даний час є достатньо опрацьованим і не становить ніяких проблем. Але на практиці часто зустрічаються випадки відхилення від горизонтального розміщення, що може призвести до неправильного контролю кількості рідини і до значних економічних втрат для підприємства.

**Постановка проблеми.** Термін служби стаціонарних резервуарів становить від 10 до 50 років. За цей час, внаслідок руху ґрунтів, відбувається нерівномірне просідання резервуарів. Ще одним досить суттєвим фактором є недотримання правил встановлення резервуарів, що може спричинити зміну положення резервуару в процесі його експлуатації, внаслідок значного збільшення його маси, а також ряду інших факторів.

Коли днище резервуара знаходиться в негоризонтальному положенні практикам важко встановити точну кількість рідини в резервуарах. Особливо актуальною проблема контролю об'єму рідини в нахилених резервуарах є в Україні, так як більшість резервуарів на українських підприємствах експлуатуються досить довго.

Навіть незначне відхилення осі резервуара від вертикального чи горизонтального положення призводить до значного зростання похибки вимірювання кількості рідини. Тому слід визначати об'єм рідини методом, який враховує просторову орієнтацію резервуарів.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Основним параметром, який необхідно знати для визначення кількості рідини в ємностях є значення рівня рідини в резервуарі, і, звичайно, розміри та геометрична форма самого резервуару. Для визначення рівня рідини можна використовувати будь-який рівнемір: вмонтований чи переносний.

Тепер у світі існує досить багато засобів для контролю рівня та визначення об'єму рідини в резервуарах. Найпоширенішими з них є візуальні (за допомогою водомірного скла); гідростатичні, в яких рівень визначають за значенням тиску рідини на дно резервуара з наступним вимірюванням різниці даного тиску та атмосферного за допомогою диференціального манометра; електромеханічні та механічні, зокрема поплавкові та буйкові;

електричні, в яких рівень перетворюється в зміну електричного опору (кондуктометричні) або в зміну ємності (ємнісні), безконтактні (оптичні) [1–3].

Але в усіх розглянутих способах і засобах розглядаються тільки горизонтально чи вертикально розташовані пристрої. Вимірювання об'єму рідини в нахиленому резервуарі розроблено тільки для циліндричного резервуару, але розміщеного відносно землі по твірній, а не на круглій основі [4].

**Викладення основного матеріалу.** Оскільки, в силу певних обставин, основа резервуару може розташовуватись не в горизонтальному чи вертикальному положенні, а під певним кутом, то в такому випадку використання традиційних методів визначення об'єму рідини є недоцільним, так як вимірюваний рівень рідини в резервуарі не буде відображати істинне значення об'єму рідини, тобто вноситиме значну похибку вимірювання. Для вирішення поставленої проблеми треба встановити залежність значення об'єму рідини в резервуарі від його просторової орієнтації відносно горизонтальної площини з врахуванням типу резервуару та його розмірних параметрів.

На сьогоднішній час створено декілька типів резервуарів для зберігання в них речовин в рідкому стані. Це, насамперед, резервуари циліндричної, призматичної та еліпсоїдної форм.

Для найбільш поширеного типу циліндричного резервуару у випадку відхилення його осі від вертикалі на кут  $\alpha$  об'єм рідини у резервуарі буде рівний [5]:

$$V = \frac{\pi D^2}{4} \cdot h_c, \quad (1)$$

де  $D$  – діаметр резервуару  $h_c$  – висота рівня рідини по осі резервуару.

Оскільки у більшості центр люка (горловини) для заливання рідини знаходиться не в центрі кругової кришки, а на відстані  $d$  від краю (рис. 1), то вимірювання можуть проводитись тільки висоти  $h_e$  від центра люка до рівня рідини, а не по осі резервуару.

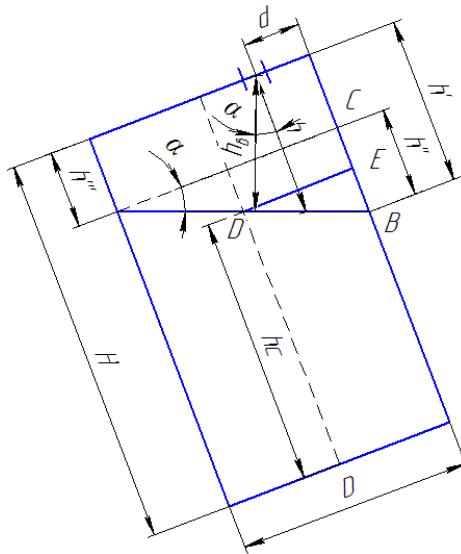


Рис. 1. Рідина в нахиленому резервуарі циліндричної форми ( $AB$  – лінія рівня поверхні рідини)

Тоді висота  $h_c$  визначиться з виразу:

$$h_c = H - \frac{h' + h'''}{2}. \quad (2)$$

Виразимо  $h'$  як суму  $h''$  та  $h'''$ , звідки

$$h_c = H - \frac{h''' + h'' + h'''}{2} = H - \left( h''' + \frac{h''}{2} \right). \quad (3)$$

З прямокутного трикутника  $ABC$  виражаємо  $h''$  через тангенс кута  $\alpha$ , тобто

$$h_c = H - \left( h''' + \frac{1}{2} D \cdot \operatorname{tg} \alpha \right). \quad (4)$$

В залежності (2)  $h'''$  виразимо як різницю  $h'$  і  $h''$  та проведемо певні математичні перетворення, отже,  $h_c$ , буде рівне:

$$h_c = H - \frac{h'+h''}{2} = H - \frac{1}{2}(h'+h'-h'') = H - \frac{1}{2}(2h'-h'') = H - h' + \frac{1}{2}h''; \quad (5)$$

$$h' = h + BE, \quad (6)$$

$$BE = \left(\frac{D}{2} - d\right) \cdot \operatorname{tg} \alpha. \quad (7)$$

Звідки:

$$h' = H - h + \left(\frac{D}{2} - d\right) \cdot \operatorname{tg} \alpha. \quad (8)$$

Отже, підставивши (8) в (5) і виразивши  $h''$  через  $\operatorname{tg} \alpha$  отримаємо

$$h_c = H - h + \left(\frac{D}{2} - d\right) \cdot \operatorname{tg} \alpha + \frac{1}{2}D \cdot \operatorname{tg} \alpha = H - h + \operatorname{tg} \alpha(D - d). \quad (9)$$

Перейдемо від  $h$  до вимірюваної відстані від центра люка до поверхні рідини  $h_b$ :

$$h = \frac{h_b}{\cos \alpha}. \quad (10)$$

Тоді, підставивши (2.10) в (2.9) отримаємо

$$h_c = H - \frac{h_b}{\cos \alpha} + \operatorname{tg} \alpha(D - d). \quad (11)$$

Помірявши кут нахилу  $\alpha$  циліндричного резервуара та визначивши висоту рівня рідини по осі  $h_c$  можна підставляти всі величини в (1) та підраховувати об'єм рідини.

Визначення об'єму рідини в резервуарі з прямокутною основою, нахиленому відносно одного ребра основи (рис. 2), визначається з залежності:

$$V_p = a \cdot b \cdot h_c, \quad (12)$$

де  $a, b$  – сторони основи.

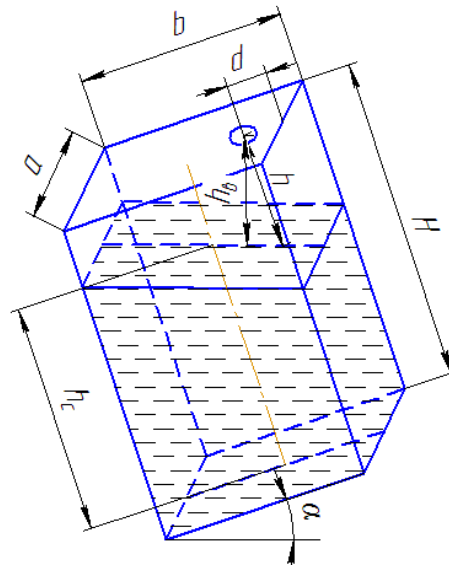


Рис. 2. Рідина в резервуарі з прямокутною основою, нахиленому відносно ребра основи

Висота рівня рідини по осі резервуара  $h_c$  визначається аналогічно як у циліндричному резервуарі, отже

$$h_c = H - \frac{h_b}{\cos \alpha} + \operatorname{tg} \alpha \cdot (b - d), \quad (13)$$

де  $H$  – висота резервуара,  $d$  – відстань від центра люка до краю.

Досить поширеним типом резервуара є це резервуар з овальною основою. Для визначення об'єму рідини в такому резервуарі застосуємо потрійне інтегрування.

За область, на яку поширюється потрійний інтеграл, приймається замкнута просторова область, обмежена зверху і знизу плоскими еліптичними поверхнями, а з боків – циліндричною поверхнею з твірними, паралельними осі  $Oz$  (рис. 3).

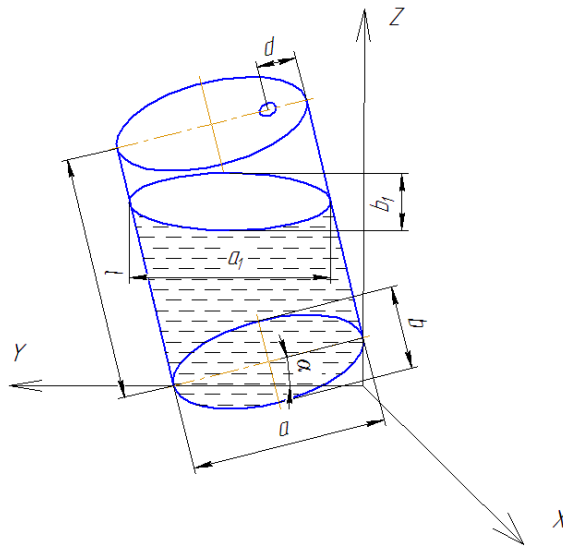


Рис. 3 Рідина в нахиленому резервуарі з овальною основою

Використаши рівняння еліпса [6]

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1, \quad (14)$$

об'єм в такому резервуарі визначається з формули [5]

$$V = \iiint \left( \frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} - 1 \right) dx dy dz. \quad (15)$$

Межі інтегрування будуть відповідно від 0 до  $b_1/2$ , та від 0 до  $a/2$  по  $dx$  та  $dy$  і від 0 до  $H - \left( \frac{h_e}{\cos \alpha} - d \cdot \operatorname{tg} \alpha \right)$  по  $dz$ :

$$V = \int_0^{H - \left( \frac{h_e}{\cos \alpha} - d \cdot \operatorname{tg} \alpha \right)} 4 \int_0^{b_1/2} \int_0^{a/2} \left( \frac{x^2}{a_1^2} + \frac{y^2}{b_1^2} - 1 \right) dx dy dz, \quad (16)$$

де  $b_1 = b \cdot \cos \alpha$ ,  $a_1 = a$ .

Визначимо об'єм рідини в резервуарі в овальною основою, але коли він розташований під кутом до горизонту по твірній (рис. 4).

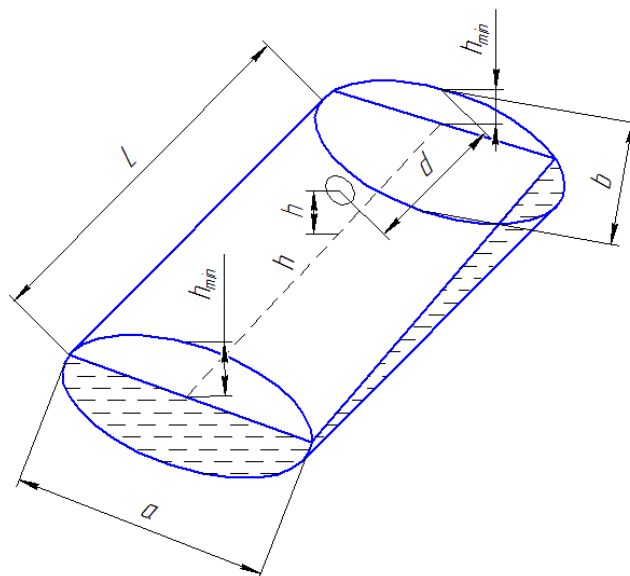


Рис. 4. Рідина в резервуарі з овальною основою, що нахилений по твірній

Об'єм незаповненої частини резервуару визначається за формулою [7]:

$$V_{нез} = L \cdot S_{сеп}, \quad (17)$$

де  $L$  – довжина резервуару,  $S_{сеп}$  – площа середнього перерізу незаповненої частини резервуару.

Перерізом резервуару є еліпс (14). З рівняння (14) виразимо  $x$ , який буде рівний:

$$x = a \sqrt{1 - \frac{y^2}{b^2}}. \quad (18)$$

Площа середнього перерізу незаповненої частини резервуару визначається з формули:

$$S_{сеп} = \frac{1}{2} (S_{min} + S_{max}), \quad (19)$$

де  $S_{min}$  та  $S_{max}$  – мінімальна та максимальна площа перерізу незаповненої частини резервуару.

Площі  $S_{min}$  та  $S_{max}$  визначають проінтегрувавши рівняння площин по осі ординат, що їх утворюють. Межі інтегрування визначають з контура, що їх обмежує.

$$S_{min} = a \int_{b - \frac{h_0}{\cos \alpha} + d \operatorname{tg} \alpha}^b \sqrt{1 - \frac{y^2}{b^2}} dy, \quad (20)$$

$$S_{max} = a \int_{b - (L-d) \operatorname{tg} \alpha + \frac{h_0}{\cos \alpha}}^b \sqrt{1 - \frac{y^2}{b^2}} dy. \quad (21)$$

Підставивши (20) та (21) в (19) отримаємо:

$$S_{сеп} = \frac{a}{2} \left( \int_{b - \frac{h_0}{\cos \alpha} + d \operatorname{tg} \alpha}^b \sqrt{1 - \frac{y^2}{b^2}} dy + \int_{b - (L-d) \operatorname{tg} \alpha + \frac{h_0}{\cos \alpha}}^b \sqrt{1 - \frac{y^2}{b^2}} dy \right). \quad (22)$$

Виходячи із (17) формула для обчислення об'єму рідини в резервуарі наступна:

$$V = aL \left( 2 \int_0^b \sqrt{1 - \frac{y^2}{b^2}} dy - \frac{1}{2} \left( \int_{b - \frac{h_0}{\cos \alpha} + d \operatorname{tg} \alpha}^b \sqrt{1 - \frac{y^2}{b^2}} dy + \int_{b - (L-d) \operatorname{tg} \alpha + \frac{h_0}{\cos \alpha}}^b \sqrt{1 - \frac{y^2}{b^2}} dy \right) \right). \quad (23)$$

Розглянемо випадок, в якому резервуар з прямокутною основою буде нахилений так, що одна з його сторін основи  $MN$  буде нахилена під кутом  $\alpha$ , а інша сторона  $MK$  – під кутом  $\beta$  (рис. 5). Дані кути будуть визначатися за допомогою будь-якого вимірювача кутів, що задовольняє вимоги точності.

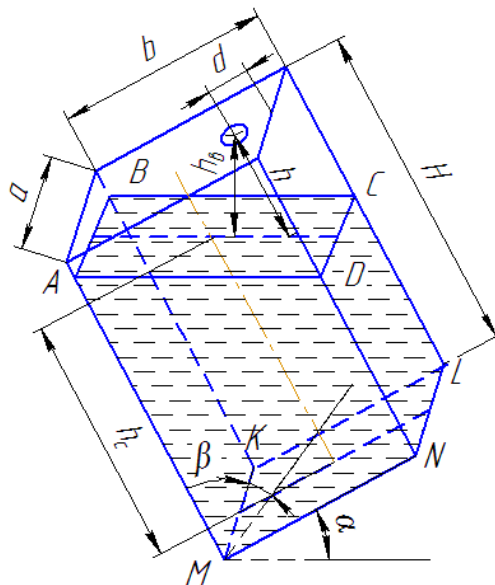


Рис. 5. Резервуар з прямокутною основою з відхиленням ребер основи під різними кутами від горизонталі

Для початку визначимо об'єм фігури, утвореної днищем резервуара та його проекцією на площину  $XOY$  (рис. 6).

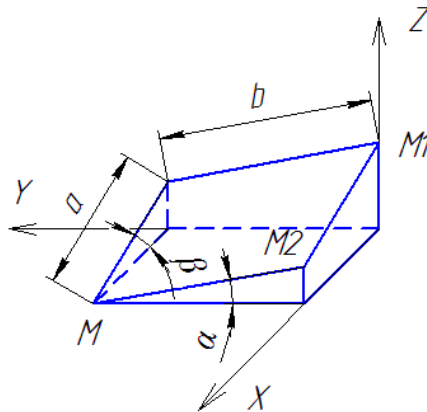


Рис. 6 . Фігура, утворена днищем нахиленого резервуара та його проекцією на горизонтальну поверхню

Розглянемо три точки, що лежать в площині  $P$  (і не лежать на одній прямій):  $M(x_0, y_0, z_0)$ ,  $M_1(x_1, y_1, z_1)$ ,  $M_2(x_2, y_2, z_2) \in P$  [6].

Очевидно, що вектори  $MM_1 = (x_1 - x_0, y_1 - y_0, z_1 - z_0)$ ,  $MM_2 = (x_2 - x_0, y_2 - y_0, z_2 - z_0)$  також будуть лежати в площині  $P$ . Тоді довільна точка  $N(x, y, z)$  буде належати цій площині, коли вектор  $MN = (x - x_0, y - y_0, z - z_0)$  буде лежати в площині. Якщо три вектори компланарні, то їх змішаний добуток дорівнює нулю.

Записавши змішаний добуток трьох векторів в координатній формі, одержимо:

$$\begin{vmatrix} x - x_1 & y - y_1 & z - z_1 \\ x_2 - x_1 & y_2 - y_1 & z_2 - z_1 \\ x_3 - x_1 & y_3 - y_1 & z_3 - z_1 \end{vmatrix} = 0 \quad (24)$$

Отримане рівняння (24) є рівнянням площини, що проходить через три заданих точки.

Знайдемо рівняння площини в якій знаходиться днище за трьома точками  $M$ ,  $M_1$  та  $M_2$  [6]. Значення координат точок отримано внаслідок проектування цих точок на відповідні осі координат:  $M_1(0, 0, (b \sin \alpha + a \sin \beta))$ ;  $M_2(a \cos \alpha, 0, b \sin \beta)$ ;  $M(a \cos \beta, b \cos \alpha, 0)$ .

Отже, рівняння площини матиме вигляд

$$\begin{vmatrix} x - 0 & y - 0 & z - (b \sin \alpha + a \sin \beta) \\ a \cos \beta - 0 & 0 - 0 & b \sin \beta - b \sin \alpha + a \sin \beta \\ a \cos \beta - 0 & b \cos \beta - 0 & 0 - (b \sin \alpha + a \sin \beta) \end{vmatrix} = 0. \quad (25)$$

Зведемо рівняння площини до загального вигляду, знайшовши визначник матриці (25).

$$\Delta = \begin{vmatrix} x - 0 & y - 0 & z - (b \sin \alpha + a \sin \beta) \\ a \cos \beta - 0 & 0 - 0 & b \sin \beta - b \sin \alpha + a \sin \beta \\ a \cos \beta - 0 & b \cos \beta - 0 & 0 - (b \sin \alpha + a \sin \beta) \end{vmatrix} =$$

$$= \begin{vmatrix} x & y & z - (b \sin \alpha + a \sin \beta) \\ a \cos \beta & 0 & b \sin \beta - b \sin \alpha + a \sin \beta \\ a \cos \beta & b \cos \beta & (b \sin \alpha + a \sin \beta) \end{vmatrix} \quad (26)$$

Введемо такі позначення: якщо  $a_{ij}$  – елемент визначника  $d$ , то через  $M_{ij}$  позначимо доповнюючий мінор цього елемента, тобто мінор  $(n-1)$ -го порядку, який одержуємо після викреслення з визначника  $i$ -го рядка та  $j$ -го стовпця. Далі, через  $A_{ij}$  позначимо алгебраїчне доповнення елемента  $a_{ij}$ , тобто

$$A_{ij} = (-1)^{i+j} M_{ij}. \quad (27)$$



Визначник матриці, яка одержується викреслюванням всіх рядків та стовпців, окрім вибраних, є мінором  $k$ -го порядку, розташованим в рядках з номерами  $i_1, i_2, \dots, i_k$  та стовпцях з номерами  $j_1, j_2, \dots, j_k$  [6]:

$$M_{j_1, \dots, j_k}^{i_1, \dots, i_k} = \det \begin{pmatrix} a_{i_1 j_1} & a_{i_1 j_2} & \dots & a_{i_1 j_k} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{i_k j_1} & a_{i_k j_2} & \dots & a_{i_k j_k} \end{pmatrix}. \quad (28)$$

Визначник  $\Delta$  рівний сумі добутків всіх елементів довільного його рядка на їх алгебраїчні доповнення.

$$\Delta = a_{i_1} A_{i_1} + a_{i_2} A_{i_2} + \dots + a_{i_n} A_{i_n} \quad (29)$$

Замінюючи у виразі (27) алгебраїчні доповнення відповідними мінорами зі знаками плюс чи мінус, зведемо обчислення визначника  $n$ -го порядку до обчислення кількох визначників  $(n-1)$ -го порядку.

Застосуємо формулу (29) для визначення визначника матриці (26):

$$\Delta = (ab \cos \beta \sin \alpha + a^2 \sin \beta \cos \beta - b^2 \cos \alpha \sin \beta + b^2 \cos \alpha \sin \alpha - ab \sin \beta \cos \alpha) x + (ab \sin \beta \cos \beta - ab \sin \alpha \cos \beta + a^2 \sin \beta \cos \beta) y + a \cos \beta z - a \cos \alpha (b \sin \alpha + a \sin \beta). \quad (30)$$

Позначимо коефіцієнти при  $x, y, z$  і вільний член відповідно  $A, B, C, D$ , тоді отримаємо рівняння площини:

$$Ax + By - Cz - D = 0, \quad (31)$$

де  $A = ab \cos \beta \sin \alpha + a^2 \sin \beta \cos \beta - b^2 \cos \alpha \sin \beta + b^2 \cos \alpha \sin \alpha - ab \sin \beta \cos \alpha$ ;

$B = ab \sin \beta \cos \beta - ab \sin \alpha \cos \beta + a^2 \sin \beta \cos \beta$ ;  $C = a \cos \beta$ ;  $D = a \cos \alpha (b \sin \alpha + a \sin \beta)$ .

Об'єм резервуара отримаємо, взявши потрібний інтеграл від рівняння площини:

$$V = \int_0^m \int_0^n \int_0^k (Ax + By - Cz - D) dx dy dz, \quad (32)$$

де  $m = b \sin \alpha + a \sin \beta$  – верхня межа інтегрування по  $dz$ ;  $n = b \cos \beta$  – верхня межа інтегрування по  $dy$ ;  $k = a \sin \beta$  – верхня межа інтегрування по  $dx$ .

Для обчислення визначених інтегралів існує ряд методів: Ньютона, Сімпсона, Гауса, Чебишева, метод трапецій та інші. Всі ці методи дають наближене значення розв'язку визначеного інтеграла, однак найточнішим вважається метод Сімпсона, тому його доцільно застосувати в цьому випадку, використовуючи сучасні засоби обчислювальної техніки. Наступні дослідження в цьому напрямку будуть спрямовані на розроблення алгоритмів обчислень та компактних засобів вимірювання.

**Висновки.** В роботі проведено аналіз існуючих методів визначення об'єму рідин у резервуарах, їх переваг та недоліків. Виведено формули для визначення об'єму рідин в нахилених відносно горизонтальної площини резервуарах довільної орієнтації та різної форми через вимірювані параметри, а саме кути нахилу резервуара та відстань від центра люка до поверхні рідини при відомих розмірах резервуара.

Вищенаведений метод дозволяє підвищити точність визначення об'єму рідин як для стаціонарних, так і для мобільних резервуарів.

### Інформаційні джерела

1. Поліщук Є.С. Метрологія та вимірювальна техніка: Підручник / Є.С. Поліщук, М.М. Дорожовець, В.О. Яцук, В.М. Ванько, Т.Г. Бойко; За ред. проф. Є.С. Поліщука. – Львів: Видавництво “Бескид Біт”, 2003. – 544 с.

2. Спосіб визначення об'єму рідини у резервуарі / Гаврилович І. О., Дашківський В. О., Дюлович Я. Л.: пат. **32385** А Україна. Оpubліковано: 15.04.2003. бюл №7 2000 МПК G01F17/00 23/00 МПК 99052928

3. Вимірювач рівня та об'єму рідини / Божок А. М., Понеділок В. Ф., Кримський В. П.: пат. 12214 У Україна. Оpubліковано: 16.01.2006 бюл №1 2006, МПК G01F 23/04 (2006.01) U 200508390.

4. Пристрій для визначення об'єму зрідженого газу / Білинський Й. Й., Книш Б. П.: пат. 86552 У Україна. Оpubліковано: 10.01.2014, бюл №1 МПК G01N21/81

5. Федорчук В.В. Аналітична геометрія і лінійна алгебра / В.В. Федорчук. – М.: Наука, 1977, 288 с. 6. Каплан І.А. Практичні заняття по вищій математикі / І.А. Каплан. – Харків: Видавництво Харківського університету, 1965. – 375 с. 7. Овчинников П.П. Вища математика: Підручник. У 2 ч. Ч. 1: Лінійна і векторна алгебра. Аналітична геометрія. Вступ до

математичного аналізу. Диференціальне і інтегральне числення / П.П. Овчинников. – К.: Техніка, 2003. – 600 с.

**Боднар Р.Т., к.т.н.**

Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа

### **ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕЛЕЙ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОБЪЕМА ЖИДКОСТИ В НАКЛОНЕННЫХ РЕЗЕРВУАРАХ**

Аннотация. В работе проведен анализ существующих методов и средств определения объема жидкости в резервуарах. Установлено, что в основном все публикации касаются только резервуаров с горизонтальным основанием и вертикальными стенками. Для учета неоднократных случаев негоризонтального размещения основы резервуара установлены наиболее вероятные варианты их установки учитывая их геометрическую форму..

Исходя из канонических формул для вычисления объемов тел различной геометрической формы (прямоугольная призма, круговой цилиндр, эллиптический цилиндр) и, используя методы аналитической геометрии, высшей алгебры и интегрального исчисления, выведены аналитические модели для определения объема жидкостей в наклоненных относительно горизонтальной плоскости резервуарах вышеуказанных геометрических форм. Измеряемыми параметрами являются углы наклона резервуаров в ортогональных плоскостях относительно горизонтальной плоскости и расстояние по вертикали от центра горловины резервуара к поверхности жидкости. Известными параметрами считаются форма и геометрические размеры резервуаров. Для определения объемов наклонных резервуаров типа круговой цилиндр и прямоугольная призма, наклонена относительно одного ребра основания, получено относительно простые выражения. Для вычисления объема жидкости в других резервуарах по полученным выражениям рекомендуется использовать методы вычислительной математики.

**Ключевые слова:** объем жидкости, форма резервуара, наклонены резервуары, уровень жидкости, угол наклона.

**Bodnar R.T., Ph.D.**

Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas

### **RESEARCH OF MODELS FOR DETERMINATION OF LIQUID VOLUME IN TILT TANKS**

Abstract. In the paper analyzes the existing methods and means of determining the volume of liquid in tanks. It is established that basically all publications concern only tanks with a horizontal basis and vertical walls. To take into account the frequent cases of non-horizontal placement of the tank base, the most probable options for their installation are established, taking into account their geometric shape.

Based on canonical formulas for calculating the volumes of bodies of different geometric shapes (rectangular prism, circular cylinder, elliptical cylinder) and using methods of analytical geometry, higher algebra and integral calculus, analytical models are derived to determine the volume of liquids inclined relative to the horizontal tanks of the above geometric shapes. The measured parameters are the angles of inclination of the tanks in the orthogonal planes relative to the horizontal plane and the vertical distance from the center of the neck of the tank to the surface of the liquid. Known parameters are the shape and geometric dimensions of the tanks. To determine the volumes of inclined tanks such as a circular cylinder and a rectangular prism inclined relative to one edge of the base, relatively simple expressions are obtained. It is recommended to use the methods of computational mathematics to calculate the volume of liquid in other tanks from the obtained expressions.

**Keywords:** volume of liquid, shape of the tank, inclined tanks, liquid level, angle of inclination.

УДК 006.91: 620.179.16

DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2313-5352-2020-16-3>

<sup>1</sup>Витвицька Л.А., <sup>2</sup>Лаврук Х.З., <sup>1</sup>Чуйко М.М., <sup>2</sup>Витвицький З.Я.

<sup>1</sup>Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

<sup>2</sup>Івано-Франківський національний медичний університет

## УДОСКОНАЛЕНИЙ МЕТОД ЕЛАСТОГРАФІЇ КРОВОНОСНИХ СУДИН

**Анотація** Проведено аналіз існуючих методів ультразвукового контролю людського організму. Обґрунтовано доцільність проведення еластографії сонних артерій з метою діагностики атеросклерозу і ступеня нерухомості атеросклеротичних бляшок у судинах. Теоретично обґрунтовано доцільність проведення еластографії з використанням зсувних хвиль, які виникають при застосуванні радіаційного тиску сильного сфокусованого ультразвукового імпульсу. Розроблено конструкцію електронного ультразвукового сканера, який забезпечує високу чутливість прийнятих сигналів на різних глибинах з високою роздільною здатністю. Визначено параметри ультразвукових датчиків, розроблена методика проведення дослідження, яка забезпечує проведення контролю на різних глибинах, показано приклад проведення еластографії сонних артерій.

**Ключові слова:** ультразвукові коливання, еластографія, атеросклеротичні бляшки, зсувна хвиля

**Вступ та постановка проблеми.** На даний час широке застосування знаходять ультразвукові методи діагностики людського організму. Це пояснюється як нешкідливістю проникаючих ультразвукових коливань (надалі УЗК) в порівнянні з рентгенівськими, так і з їх високою інформативністю щодо стану окремих структур організму. Поряд із використанням класичних ультразвукових методів, основаних на визначенні амплітуди, швидкості, зміни по фазі УЗК, відбитих і заломлених від структур з різним акустичним опором, на даний час все ширше використовуються методи візуалізації пружних характеристик м'яких тканин людського організму, які, в загальному, носять назву методів еластографії. Ці методи базуються на створенні деформацій досліджуваних тканин організму і визначенні характеристик відбитої хвилі в залежності від пружності цих тканин. Пружна реакція середовища на об'ємну і зсувну деформацію призводить до появи зворотніх сил, які прагнуть повернути тіло в початковий стан. За інерцією тіло проходить положення рівноваги і деформується в іншу сторону. Подібним чином виникають і коливання об'єму, і коливання форми, які поширюються в середовищі у вигляді хвиль.

Зараз еластографія вважається третьою ультразвуковою технологією. Завдяки їй відбувся значний якісний стрибок у диференціальній діагностиці вогнища патології поверхнево розташованих тканин. Інформативність еластографії обумовлена тим, що більшість злоякісних утворень, як правило, мають більш щільну структуру, ніж навколишні тканини і доброякісні пухлини. У той же час на звичайному ультразвуковому зображенні їх іноді практично неможливо розрізнити [1].

**Мета роботи.** На даний час еластографія найбільше використовується для діагностики щитовидної залози та печінки. Однак виникає необхідність контролю стану кровоносних судин, діагностика яких еластографічними методами затруднена в силу постійного руху крові, пульсації кров'яного тиску і складності отримати пружну зсувну хвилю, яка б не залежала від швидкості кровотоку. Особливо необхідним на даний час є діагностика атеросклерозу. Що таке атеросклероз? Це поширене і небезпечне захворювання, що спричиняє інфаркти та інсульты. Небезпека полягає у тому, що хвороба розвивається безсимптомно. Механізм розвитку атеросклерозу полягає в накопиченні холестерину, який у вигляді бляшок відкладається у великих і середніх судинах. Це призводить до зниження кровотоку, підвищення артеріального тиску. Симптоматика конкретного випадку залежить від локалізації бляшки і її розмірів, точніше, ступеня закриття нею просвіту судини. При цьому необхідним є встановлення структури бляшок, від якої залежить можливість її відриву, що призводить до утворення тромбів і тромбоемболії. Саме еластографія дозволяє визначити ступінь затвердіння бляшок і її нерухомість у судині. Найбільш доцільно досліджувати стан сонних артерій, які є поверхневими і в яких часто утворюються атеросклеротичні бляшки [2]. Завдання визначення пружних характеристик стінок судин, включаючи атеросклеротичних включень в них,

пов'язана з діагностикою “периферійної артеріальної хвороби” і з визначенням небезпеки відриву тромбу. Вважається, що найбільшу небезпеку представляють м'які вclusions з ліпідним ядром і тонкою фіброзною капсулою.

Більшість сучасних клінічних підходів до оцінки стану судин нижніх кінцівок зводяться більше до оцінки ступеня стенозу і зменшення просвіту судин, ніж до оцінки характеристик атеросклеротичних утворень. Тому дана робота присвячена розробленню удосконаленого методу еластографії саме сонних артерій.

**Результати роботи.** Для розроблення удосконаленого методу діагностики сонних артерій було розглянуто різні існуючі способи створення деформацій. Будь-яка деформація твердого тіла може бути віднесена до одного з двох видів: деформації розтягування-стиснення (компресійна), і деформації зсуву (зсувна). Відповідь твердого тіла на прикладене зусилля описується модулями пружності, які характеризують його здатність пружно деформуватися при прикладанні до нього сили. Оскільки кровоносні судини за структурою стінок відносяться до м'язевих тканин, то для їх діагностики доцільно використовувати еластографію.

Для діагностики сонних артерій пропонується проводити еластографію на зсувних хвилях, яка, на відміну від компресійної, не вимагає компресії тканин датчиком. Тим самим досягається візуалізація більш високої точності і більш високої якості. Хвиля коливальних форми при незмінному об'ємі, або зсувна хвиля, – це поперечна хвиля, при якій коливання частинок відбуваються в площині, перпендикулярній до напрямку поширення хвилі. Зсувна хвиля рухається із швидкістю, яка залежить від відношення модуля зсувної пружності  $\mu$  до щільності середовища  $\rho$ :

$$C_{US} = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \quad (1)$$

Суть методу полягає у випромінюванні ультразвукового імпульсу в обрану точку і у відстеженні викликаних ним згасаючих коливальних рухів тканин шляхом випромінювання в наступні моменти часу декількох зондуєчих імпульсів, від кожного з яких реєструвати одномірні ехограми. Подальшою обробкою ехограм визначається зміщення у досліджуваній області за відповідними пружними характеристиками тканин. Для усунення артефактів від пульсації судин необхідно забезпечити синхронізацію часу знімання інформації з діастолі за сигналами електрокардіограми. Для зменшення часу сканування досліджуваної області (площею до 30 мм) необхідно здійснювати паралельний прийом відразу чотирьох зондуєчих променів після одного генеруючого імпульсу.

Для збудження коливальних в тканинах доцільно використовувати несучу частоту імпульсу 7,2 МГц. Тривалість імпульсу становить до 70 мкс на глибинах до 3,5 см і 140 мкс на більших глибинах. У зондуєчих імпульсах для збільшення просторової роздільної здатності використовується несуча частота 7,2 МГц. Приклад отриманої ехограми і еластограм хворої судини наведений на рис.1. На ехограмі як світла область видно ділянки кальцинованого атеросклеротичного ураження стінки артерії. На еластограмі їй відповідає область малих деформацій

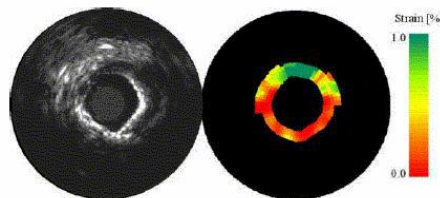


Рис. 1. Ехограма і відповідна еластограма сонної артерії, отримані в період обстеження

Як показали вимірювання, зсувний модуль пружності м'яких тканин малий у порівнянні з модулем всебічного стиснення, і зсувна хвиля є “повільною”. Дійсно, швидкість ультразвуку в тканинах приблизно така ж, як у воді, тобто  $C_{US} = 1500 \text{ м/с}$ . Тому саме за допомогою зсувної хвилі можна досліджувати структуру внутрішніх стінок артерій з врахуванням пульсації крові у них. Джерелами зсуву можуть бути низькочастотні пульсації, створювані серцем і судинами, достатньо високочастотні зсувні хвилі, які випромінюються взаємодіючими ультразвуковими

пучками або одним сфокусованим ультразвуковим пучком за рахунок радіаційного тиску [3]. Пропонується технологія створення зсувних хвиль, що використовує радіаційний тиск сильного сфокусованого ультразвукового імпульсу. Цей спосіб отримання зсувних хвиль дозволяє отримати кількісну інформацію про пружність тканин, але тільки на заданій глибині в зоні фокусу. Для отримання зсувних хвиль на іншій глибині треба змістити зону фокуса ближче або далі від датчика і вже в ній створити новим потужним ультразвуковим імпульсом необхідний тиск для отримання зсувних хвиль і виміряти їх характеристики. Вибір місця для вимірювання швидкості зсувної хвилі проводиться за допомогою пробного об'єму на двомірному ультразвуковому зображенні, а числові значення показника пружності видаються в метрах за секунду або перераховуються в кілопаскалі. При цьому створюються сфокусовані точки максимального тиску, в результаті чого зсувні хвилі формують фронт у вигляді так званого конуса Маха (рис. 2). Рух цього фронту відстежується за допомогою спеціального ультразвукового сканування, при цьому ділянки з різною швидкістю зсувних хвиль кодуються різними відтінками сірого кольору або різними кольорами за шкалою з певною кількістю кольорних комірок, що дає можливість візуально виявляти зони з різною еластичністю. Так, шляхом отримання зсувних хвиль і обчислення їх швидкостей у всьому діапазоні досліджуваних глибин з подальшим кольорним картуванням створюється двомірне кольорове зображення пружності тканин, що і є кольорною еластограмою зсувної хвилі. Зазвичай, червоним кольором маркуються більш пружні, тверді структури, використовуючи його як сигнал наявності атеросклеротичних змін на тлі синьо-блакитного фону нормальних тканин. Колірну еластограму можна переглядати в режимі реального часу окремо, а можна накласти на сірошкальне зображення або зіставити поруч з ним в двох паралельних вікнах. Після вивчення кольорних еластограм проводиться еластометрія за допомогою одного або кількох пробних об'ємів з міліметровою роздільною здатністю. Можна заміряти пружність тканини однієї конкретної ділянки і порівняти її з показником іншої ділянки. Цифрові дані можуть бути представлені у вигляді показників швидкості зсувних хвиль (в м/с) або пружності тканини (кПа). Можливість отримання абсолютних цифрових значень пружності різних органів і тканин в нормі і при патології є великою перевагою еластографії зсувної хвилі, і значно підвищує відтворюваність методу.

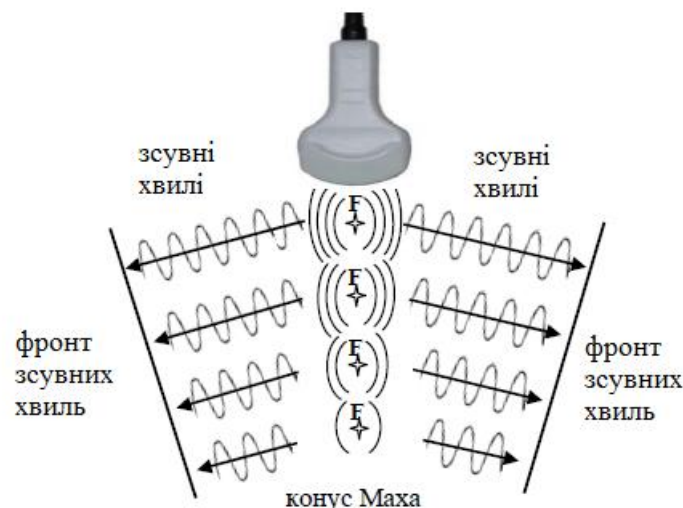


Рис. 2. Формування фронту зсувних хвиль (конус Маха) за допомогою сфокусованих точок (F1-F4) максимального тиску, послідовно створюваних на різній глибині з певною часовою затримкою

Структурна схема електронного блоку ультразвукового сканера показана на рис. 3. На ньому можна побачити основні елементи електронного блоку: формувач хвилі, формувач променя. Ехо-сигнали, прийняті датчиком і перетворені ним в електричні сигнали, потрапляють в електронний блок на вхід формувача променя. Основне його призначення, яке слідує із назви, - забезпечити необхідну форму УЗ променя на передачу і прийом. Формувач хвилі – це багатоканальний пристрій, з'єднаний з датчиком кабелем з великою кількістю провідників, кількість яких співпадає із загальним числом елементів п'єзоперетворювача. Кількість



елементів в п'єзоперетворювачі в залежності від складності приладу може змінюватися для датчиків електронного сканування в діапазоні від 80 до 512 і вище, така ж буде кількість з'єднувальних проводів.

У каналах формувача променя здійснюється фокусування на приймання шляхом виставлення визначених значень затримок сигналів в кожному з каналів.

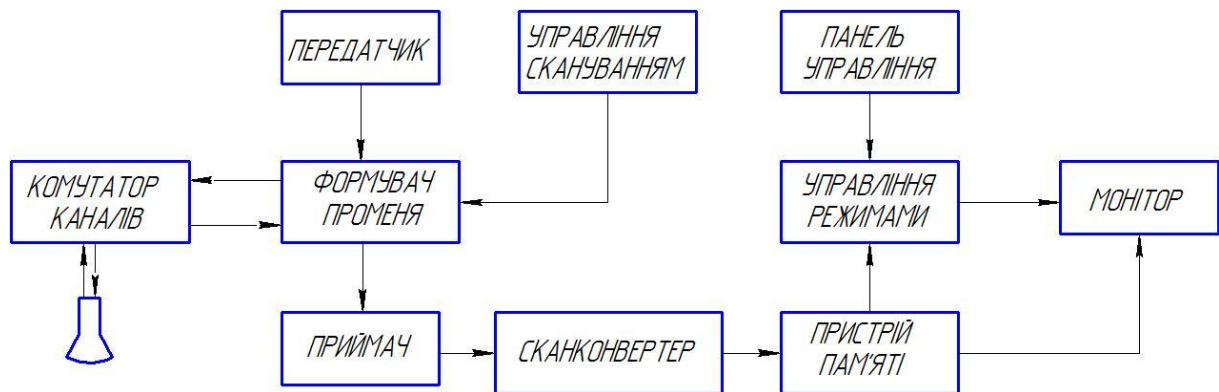


Рис. 3. Структурна схема електронного блоку ультразвукового діагностичного сканера

На вході формувача променя стоїть комутатор, в якому з великого числа проводів вибирається, як правило, менша кількість, яка дорівнює кількості каналів приймача і передавача. Комутатор на вході формувача виконує роль пристрою, що забезпечує сканування (переміщення) УЗ променя в датчиках лінійного і конвексного типу. Сканування здійснюється за сигналами пристрою керування скануванням.

Якщо прилад допускає одночасне приєднання декількох датчиків, то за допомогою додаткового перемикача кожен з датчиків може підключатися до комутатора і формувача УЗ променя. Вибір того чи іншого датчика здійснюється за сигналами, що надходять від клавіатури після натискання потрібної клавіші.

Передавач генерує сигнали для випромінювання всередину досліджуваного тіла, є багатоканальним пристроєм, який по кожному із каналів повинен передавати на формувач променя короткі електричні імпульси. Основні завдання, виконувані передавачем:

- генерувати імпульси якомога меншої довжини (чим коротший імпульс, тим краща поздовжня роздільна здатність приладу);
- забезпечувати амплітуду імпульсів необхідного рівня (чим більша амплітуда, тим більша чутливість), але не більше допустимого з точки зору безпеки пацієнта;
- здійснювати зсув після затримки між імпульсами для формування УЗ променя на передачу з потрібним фокусом;
- змінювати робочу частоту імпульсів (5; 9; 10; 18 МГц) в залежності від вибраного типу датчика.

Приймач отримує від формувача променя ехо-сигнали по багатьох каналах одночасно, він повинен підсилювати ці сигнали, піддавати їх відповідним перетворенням, сумувати сигнали всіх каналів і подавати сумарний сигнал на сканконвертер. Ехо-сигнали підсилюються в приймачі в 1-100 тис. раз по амплітуді (60-100 дБ). Підсилення може змінюватися за бажанням дослідника за допомогою кнопки підсилення на клавіатурі приладу.

Крім загального підсилення сигналів, можна регулювати підсилення по зонах глибини. Основне призначення цього регулювання – компенсувати затушення в різних зонах глибини в залежності від властивостей досліджуваної області. Рівень приймаючих ехо-сигналів внаслідок затушення помітно зменшується з глибиною, наприклад, рівень сигналу, отриманого внаслідок відбиття від неоднорідності на глибині 10 см, може бути в 1 тис. раз меншим по амплітуді, ніж рівень сигналу від того ж відбиття на глибині 1 см. У зв'язку з цим в приймачі здійснюється регулювання підсилення в залежності від глибини: чим більша глибина, тим більше підсилення. Правильне регулювання забезпечує компенсацію затушення сигналу в залежності від глибини таким чином, щоб максимальні рівні амплітуд ехо-сигналів були наближено однаковими у всьому діапазоні глибин. В цьому випадку забезпечується рівномірність яскравості зображення і висока діагностична інформативність на всіх глибинах.

Ще одна функція приймача – стиснення і регулювання динамічного діапазону ехо-сигналів, визначаючого відношення максимального і мінімального сигналів.

Зміна діапазону робочих частот – це також функція приймача. Кожний прилад повинен працювати з набором датчиків, які мають різні частоти. Через це діапазон частот прийому необхідно змінювати при перемиканні приладу на роботу з датчиком, який має іншу частоту, щоб забезпечити найкращу якість прийому ехо-сигналів.

Сканконвертер – це цифровий пристрій, який служить для перетворення інформації, отриманої в процесі сканування з виходу приймача, у форму, найбільш зручну для відображення на екрані приладу. В процесі сканування прийом сигналів проходить в області УЗ променя. При цьому вимірюються полярні координати кожного сигналу – глибина, кут, а також амплітуда сигналу.

З виходу сканконвертера інформація, підготовлена для відображення, поступає у цифровий пристрій пам'яті, де записується з тією швидкістю, з якою проходить сканування. З кожним новим циклом сканування проходить запис нового кадра за рахунок витіснення інформації отриманої з попереднього кадра.

Пристрій пам'яті дозволяє реалізувати дуже важливий метод підвищення якості зображення, який називається "усереднення по кадрах". Основний недолік методу усереднення по кадрах – зниження реальної частоти кадрів, більш помітне, чим вищий рівень усереднення.

Оперативне управління роботою всіх елементів і вузлів електронного блоку здійснюється за допомогою основного процесора відповідно до програми, розробленої індивідуально для даного приладу. Крім основного процесора, в залежно від складності приладу можуть використовуватися додаткові процесори, наприклад для управління скануванням, виконання функцій сканконвертера, обробки результатів вимірювань і т.д.

#### **Висновки:**

1. Обґрунтовано доцільність проведення еластографії сонних артерій з метою діагностики атеросклерозу і стану атеросклеротичних бляшок.

2. Проведення еластографії з використанням зсувних хвиль, які виникають при застосуванні радіаційного тиску сильного сфокусованого ультразвукового імпульсу, дозволяє визначати щільність атеросклеротичних бляшок, ступінь їх нерухомості і небезпеку виникнення тромбоемболії у людському організмі.

3. Розроблена конструкція електронного ультразвукового сканера забезпечує високу роздільну здатність прийнятих ехо-сигналів, відбитих на різних глибинах і в мінімальному діапазоні часових інтервалів.

4. Розроблена методика проведення дослідження показала високу інформативність еластографії сонних артерій.

#### **Література**

1. Ультразвукова еластографія: теорія і практика створення навчального тренажера/ О.Б. Динник, М.М. Жайворонко, Н.М. Кобиляк, М.С. Харченко// Променева діагностика, променева терапія.-№ 3.-2014.-С.42-53

2. Кузик Ю.І. Атеросклероз сонних артерій: особливості патоморфологічної картини/ Ю.І.Кузик // Медицина транспорту України.- № 4.- 2011.-С.12-16

3. Руденко О. В. Физические основы эластографии. Часть 2. Эластография на сдвиговой волне (лекция) / О. В. Руденко, Д. В. Сафонов, П. И. Рыхтик, С. Н. Гурбатов //Радиология-Практика. 2014. - № 4 (46). - С. 62-72.

<sup>1</sup>Vytvytska L.A., <sup>2</sup>Lavruk H.Z., <sup>1</sup>Chuiko M.M., <sup>2</sup>Vytvytsky Z.Y.

<sup>1</sup> Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas

<sup>2</sup> Ivano-Frankivsk National Medical University

#### **ADVANCED METHOD OF ELASTOGRAPHY BLOOD ARTERIES**

The existing methods of ultrasonic control of the human body are analyzed. The expediency of carotid elastography for the diagnosis of atherosclerosis and the degree of immobility of atherosclerotic plaques in vessels is substantiated. It is theoretically justified the feasibility of conducting elastography on the shear waves that arise when using the radiation pressure of a strong focused ultrasonic pulse. The design of an electronic ultrasonic scanner has been developed, which provides high sensitivity of the received signals at different depths with high resolution. Ultrasonic

sensors parameters are determined, the technique of carrying out of the research providing control at different depths is developed, an example of carrying out of carotid elastography is shown.

**Keywords:** ultrasonic vibrations, elastography, atherosclerotic plaques, shear wave

<sup>1</sup>Витвицкая Л.А., <sup>2</sup>Лаврук Х.З., <sup>1</sup>Чуйко М.М., <sup>2</sup>Витвицкий З.Я.

<sup>1</sup> Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа

<sup>2</sup> Ивано-Франковский национальный медицинский университет

### **РАСШИРЕННЫЙ МЕТОД ЭЛАСТОГРАФИИ КРОВОНОСНЫХ АРТЕРИЙ**

Проведен анализ существующих методов ультразвукового контроля человеческого организма. Обоснована целесообразность проведения эластографии сонных артерий с целью диагностики атеросклероза и степени неподвижности атеросклеротических бляшек в сосудах. Теоретически обоснована целесообразность проведения эластографии на сдвиговых волнах, которые возникают при использовании радиационного давления сильно сфокусированного ультразвукового импульса. Разработана конструкция электронного ультразвукового сканера, который обеспечивает высокую чувствительность принятых сигналов на разных глубинах с высоким разрешением. Определены параметры ультразвуковых датчиков, разработана методика проведения исследования, которая обеспечивает проведение контроля на разных глубинах, показан пример проведения эластографии сонных артерий.

**Ключевые слова:** ультразвуковые колебания, эластография, атеросклеротические бляшки, сдвиговая волна



УДК 621.757

DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2313-5352-2020-16-4>

Григор'єва Н.С., д.т.н., проф., Шабайкович В.А., д.т.н., проф., Марчук І.В., к.т.н. доц.  
Луцький національний технічний університет

## АГРЕГАТУВАННЯ СКЛАДАЛЬНОГО ВИРОБНИЦТВА В ПРИЛАДОБУДУВАННІ

*Підвищення ефективності застосування агрегування в приладобудуванні може бути досягнуто виключно при застосуванні прогресивних способів і видів агрегування на основі наукових основ. Для того слід створити матеріально-технічну базу розробки технологічного обладнання та оснащення на підставі принципу агрегування з уніфікованих вузлів і модулів, розробити типаж уніфікованих вузлів і типову технологію та обладнання для складання характерних приладів з організацією їх серійного виробництва. Тому спочатку встановлюється потрібна та обґрунтована якість і конкурентоспроможність приладів, а далі розглядається їх забезпечення за рахунок технологічності сучасної конструкції, ефективною технології, обладнання та оснащення.*

**Ключові слова:** агрегування, заходи, мінімізація, складання, уніфікація.

**Вступ.** Агрегування є тенденцією розвитку виробництва і може з великою ефективністю застосовуватися в гнучкому складальному виробництві. В наукових основах агрегування [1,2] вказується, що агрегування використовується в різних областях, а в приладобудуванні – в загальній теорії конструювання, теоретичною основою якої є теорія приладів і механізмів. Основою агрегування є структурно-змінний синтез, тобто узагальнення окремих конструкційних рішень, на підставі яких виконується постійність початкової структури і досягається багаторазова їх оборотність стосовно рішенням нових завдань.

**Викладення основного матеріалу.** Застосовується три способи агрегування:

- з'єднанням агрегатів у вигляді самостійних приладів, які утворюють комплекси;
- приєднанням до базової складової частини різних залежних складових частин агрегатів, вузлів, деталей (різновидність – метод базового агрегату);
- зміною складових частин в приладі застосуванням різних варіантів складових частин при різних їх компоновці.

Розрізняється також три види агрегування [3]:

- першого порядку як метод конструювання приладів з уніфікованих і стандартизованих елементів, просторове поєднання яких зумовлює оборотність;
- другого порядку – метод конструювання приладів на підставі базової конструкції з приєднанням різних пристроїв і досяганням зміни функціонального призначення;
- третього порядку – метод конструювання, який зумовлює можливість застосування уніфікованих деталей та вузлів приладів різного функціонального призначення.

Зчленовані деталі, вузли повинні бути сумісними, тобто здатними до спільного використання в заданих умовах при встановлених вимогах. Сумісність розрізняється геометрична та функціональна. Функціонування агрегованих виробів може бути описане методами теорії масового обслуговування.

При агрегуванні використовується блочно-модульний і блочно-агрегатний принцип конструювання. Перший принцип передбачає створення приборів на основі модулів і блоків, другий – з уніфікованих і стандартних деталей і вузлів багаторазової оборотності, що досягається зміною характеру з'єднання. При цьому кожний роз'єм збільшує масу, знижує жорсткість, вимагає додаткових операцій обробки стиків, але сприяє організації потокового виробництва. Відомі вимоги, яким має відповідати конструкція при її членуванні на агрегати, блоки вузли і модулі. В залежності від характеру з'єднання агрегатів при модульному виконанні д'юб розділяються на чотири групи: з гнучким з'єднанням, жорстким, кінематичним і монтажним.

Поєднання широкого використання методу концентрації (суміщення), агрегатно-модульного принципу побудови і застосування мікропроцесорної техніки і комп'ютерів забезпечує високу ефективність автоматизації процесів складання. Проектування технологічних процесів складання з оптимальною концентрацією переходів і вибору технологічного обладнання та оснащення, побудованого на агрегатно-модульному принципі необхідна розробка методу синтезу структурних схем і компоновок, розрахунок параметричних рядів

© Григор'єва Н.С., д.т.н., проф., Шабайкович В.А., д.т.н., проф., Марчук І.В., к.т.н. доц.

уніфікованих вузлів і елементів агрегатного обладнання з раціональними технологічними і конструкційними параметрами, методів експлуатації такого обладнання. Для цього необхідний єдиний комплексний підхід, при якому технологічне обладнання та оснащення розглядається як ймовірна складна система, керована рядом параметрів. На стадії проектування забезпечується екстремальне значення критерію оптимальності при прийнятих обмеженнях. Таким чином, при проектуванні агрегатного обладнання необхідно застосовувати багатопараметричний синтез на ймовірній основі. Зараз це завдання, на жаль, вирішується на підставі особистого досвіду та інженерної інтуїції, що зовсім не гарантує не то що оптимального, а навіть раціонального конструкційного рішення. Для того основними завданнями в теорії проектування технологічного складального обладнання та оснащення є подальше розпрацювання методу розрахунку оптимальної концентрації операцій структури технологічного процесу складання і вибору реалізуючого технологічного обладнання та оснащення. А така можливість розробки оптимальної технологічної схеми агрегатного складального обладнання залежить від технологічних можливостей і технічних характеристик уніфікованих вузлів, з яких воно конструюватиметься. Тобто необхідно мати відпрацьовані параметричні ряди агрегатних вузлів і виконавчих механізмів з оптимальними конструкційно-технологічними параметрами.

Як приклад на рис.1 наведена компоновка агрегатного напівавтомата для закручування різьбових шпильок, на базі якого був створений їх параметричний ряд. Напівавтомат скомпонований з силового стола 1, пневмогайковерта 2, механізму виключення обертання

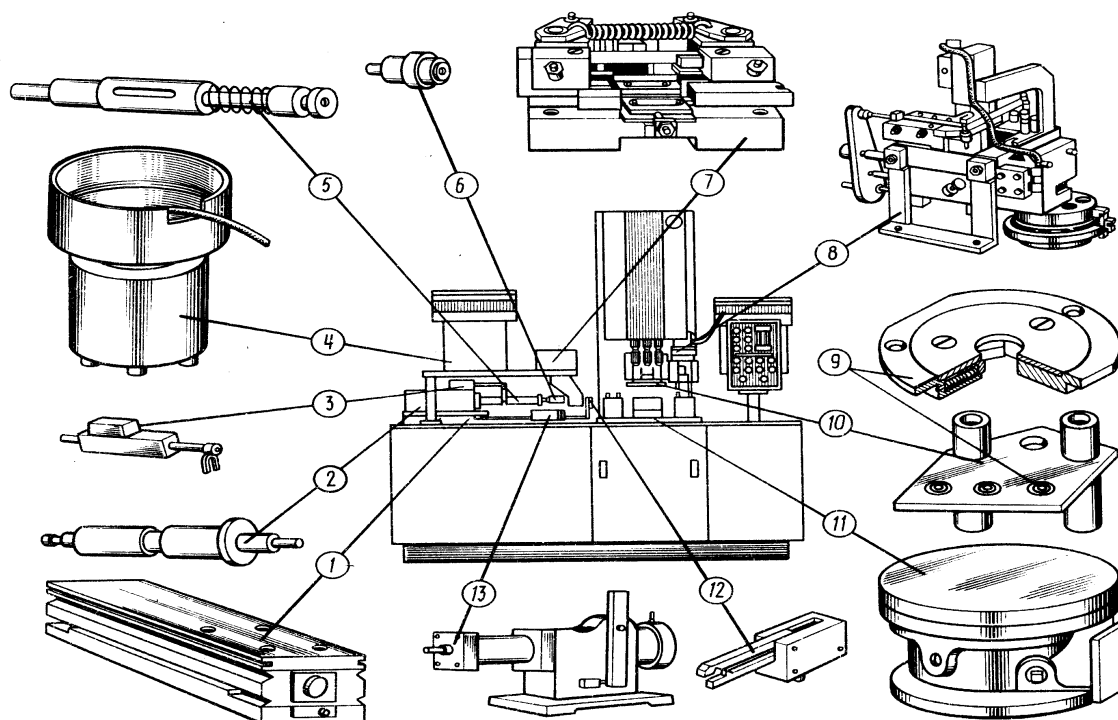


Рис.1. Компоновка різьбозакручуючого напівавтомата з уніфікованих елементів

шпинделя, вібробункера 4, шпинделя 5, патрону 6, механізму орієнтування шпильок за кроком різьби 7, такого ж механізму 8 за довжиною різьбових кінців і кроку різьби, кулачкового захвату 9, механізму подачі захватів 10, поворотного столу 11, кліщового захвату 12, механізму повороту захватів 13. Напівавтомат був призначений для складання кришки розподілюючих зубчастих коліс зі шпильками. Перехід на складання інших конструкційно-технологічно подібних виробів вимагає заміни як деяких агрегатів, так і окремих елементів в них.

Оптимізація типажу уніфікованих вузлів для компоновки технологічного обладнання полягає у встановленні характеризуючих параметрів, області їх зміни і потребу в вузлах різних типорозмірів через функцію попиту, встановлення функції мети, вибору критерію оптимальності та обмежень, розроблені методу рішення завдання оптимізації. Таке завдання успішно може бути вирішене лише з застосуванням *ЕОМ*, для чого розроблені алгоритми оптимізації, побудовані на повному переборі всіх варіантів, методи динамічного програмування та адаптивному методі. До недоліків можна віднести наближеність результатів обчислень,

складність програмування, необхідність попередньої підготовки вхідних даних. Виникають труднощі в одержанні функції попиту в уніфікованих елементах складального обладнання з-за великої працемісткості збору необхідної інформації, визначення її потрібного обсягу. Він вважається достатнім, якщо подальше збільшення не приводить до зміни параметрів функції попиту. Оптимальним є ряд пневмоприводів, що складається з 21 типорозміру з крутним моментом 5...405 Нм. Величини інших параметрів пневмоприводів визначались обробкою статистичної інформації і конструкційними міркуваннями.

Оптимальний рівень автоматизації, від якого залежить конструкційна розробка агрегатного

та оснащення, визначається з порівнянням працемісткості автоматичного та ручного складання з врахуванням приведених витрат [4]

$$X_{opt} = 1 - \sqrt{\frac{E_n [(p_1 + q_1) + (p_2 + q_2) / N]}{(\delta + \beta) S t_p}}, \quad (1)$$

де:  $E_n$  – нормативний коефіцієнт ефективності;  $p_i, q_i$  – коефіцієнти регресивних прямих;  $N$  – річна програма випуску;  $\delta$  - коефіцієнт заробітної плати;  $\beta$  - загальні накладні видатки в частках заробітної плати;  $S$  – хвилинна заробітна плата складальника;  $t_p$  – працемісткість ручного складання.

Наведена залежність дозволяє встановити економічну доцільність автоматизації складальних робіт в залежності від програми випуску. Бажано було б мати подібні вирази доцільності переналадження при різній величині партій складаних виробів, тривалості та коштів. Такі дані можна би було використати при автоматизованому проектуванні гнучких технологічних процесів складання виробів в рамках загальної АСТПВ, системи проектування технологічних процесів і компонок агрегатного складального обладнання, яка ділиться на декілька підсистем (складальні одиниці та деталі, вибір базових деталей, проектування маршруту складання, визначення рівня автоматизації складання, вибір модулів агрегатного складального обладнання, проектування складальних позицій, компоновка схем агрегатного складального обладнання, оптимізація).

В гнучкому складальному виробництві значне місце займають роботизовані технологічні комплекси, які також можуть складатися з окремих агрегатів. Головним елементом виступає робот. Його основними елементами є стояк, модуль горизонтального переміщення, вертикального переміщення, повороту і захватний пристрій. Агрегатний принцип дозволяє використовувати модулі з уніфікованих параметричних рядів. Теоретичні дослідження продуктивності і інших характеристик складальних комплексів показав, що можна значно збільшити ефективність при використанні групового методу побудови операцій, розробці раціональних засобів технологічного оснащення, особливо захватів, підвищенні безвідмовності за рахунок точного взаємного орієнтування складаних деталей, оптимізації компоновки, підвищенні функціональної надійності елементів системи, стабілізації якості складаних деталей [5]. Вважається, що найбільш перспективною є розробка технологічних процесів роботизованого складання на підставі групових принципів при забезпеченні високої надійності роботи складальних комплексів. Для цього використовується максимальна диференціація технологічних процесів, що забезпечує зменшення загальних допоміжних переміщень, застосування більш простих швидкодіючих роботів. Рекомендується застосування двох основних схем побудови технологічних операцій. Перша схема це однопотокове складання з використанням агрегатних багатопозиційних поворотних захватів. На завантажувальній позиції робот захоплює комплект деталей і переносить їх на складальну позицію, де і відбувається їх складання. Деталі встановлюються роботом при програмованому повороті багатопозиційного захвата довкола вертикальної осі на один кутовий крок простим зворотно-поступовим рухом. Друга схема реалізує багатопотокове групове паралельне складання з одночасним виконанням декількох спряжень деталей і багатокомпонентних виробів. Метод групового диференційного складання рекомендується, коли є велика кількість вузлів, що складаються з невеликої кількості деталей. Якщо ж кількість деталей в вузлі є великою, то застосовуються універсальні швидкозмінні багатопозиційні захвати робота, додаткові складальні позиції. Єдиною умовою ефективного складання вважається правильне групування складальних одиниць. Організація технологічних процесів складання передбачає взаємодію складаних потоків деталей, що

сходяться на роботизованій складальній позиції з завантажувальних позицій при одночасно здійснюваних спряженнях в складаних деталях.

Оскільки в гнучкому складанні напрямок потоків може постійно зменшуватись в залежності від конструкції складальної одиниці, то повинна бути забезпечена висока технологічна гнучкість. Це досягається в складальних роботизованих комплексах застосуванням принципів агрегативності і модульності. Такі захвати містять загальну корпусну деталь, що кріпиться на руці робота і змінні механізми захвату, проміжні, компенсуючі похибки механізми, змінні затискні губки, датчики. При цьому враховується об'єм випуску, продуктивність, частота змінюваності, функціональні можливості робота, терміни і вартість технологічного оснащення. Найбільший вплив мають технологічні можливості комплексу і конструкційні та технологічні характеристики складальних одиниць, базові деталі та поверхні, схема базування, форма спряжуваних поверхонь, тощо. Для правильного вибору роботизованого комплексу використовуються його проектні характеристики: обсяг капітальних вкладень, рентабельність, гнучкість в експлуатації, запас в продуктивності, технологічна гнучкість.

Перспективним напрямком в розвитку гнучкого складального виробництва є автоматизовані складальні центри, які забезпечують різноманіття складальних рухів, переміщення базуючих елементів, інструментальних головок, які виконують різні технологічні операції. В загальному складальне обладнання з великою надлишковістю технологічних можливостей, переналадженням при відсутності його серійного випуску не завжди буде раціональним при високій його вартості та пониженої надійності роботи. Складальні центри за рядом загальних ознак наближаються до багатопозиційних верстатів дискретної дії з поворотними столами. Але складальні центри успішно можуть виконувати складання виробів з великою кількістю деталей зі зміною їх номенклатури і типорозмірів. В цьому випадку вони наближаються до складальних ліній. На складальних центрах можна суміщати операції дообробки деталей та складання. Відомі конструкції багатоцільових складальних центрів агрегатної конструкції, на яких виконуються операції свердління, нарізання різьби, підрізки і складання (фірма *Med, Англія*) зі зниженням вартості виготовлення виробів до 75%, ніж на традиційному обладнанні чи механічній обробки і складання вузлів кінопроектора.

**Висновки.** Аналітичний огляд сучасних технологічно-конструкційних рішень гнучкого автоматичного складання дозволяє зробити деякі загальні висновки. Головний з них полягає у тому, що на сьогоднішній день відсутні науково-технологічні основи гнучкого автоматичного складання взагалі і агрегатних процесів гнучкого складання в тому числі. Такий стан значно гальмує подальше практичне його впровадження в виробництво, не дає можливості розкрити всі потенційні можливості збільшення ефективності. Джерелом збільшення ефективності гнучкого автоматичного складання є поєднання областей використання в гнучкому складанні концепції агрегатно-модульної побудови складального обладнання та оснащення, автоматичного проектування технологій та конструкцій, конкурентоспроможності. При цьому слід зауважити, що багато питань з вказаних областей мають свій розв'язок, але відомі рішення слабо пов'язані, або не пов'язані як з гнучким автоматичним складанням, так і між собою.

Вимагається доопрацювання обладнання агрегатно-модульної побудови, модульних гнучких технологічних процесів, більш тісним поєднанням з комп'ютерно-інтегральним виробництвом. Технологічність конструкції приладів відпрацьовується за вимогами автоматичного складання взагалі, а не гнучкого агрегативованого. Застосування агрегатно-модульного принципу в проектуванні технологічного гнучкого складального обладнання явно недостатнє. Це дасть змогу уніфікувати їх конструкції, та організувати серійний випуск. Зараз зробити це неможливо з-за великої різноманітності конструкційних рішень.

#### Інформаційні джерела

1. Верба І.І., Даниленко О.В., Самойленко О.В. Обладнання автоматизованого виробництва. –К.: КПІ ім. І.Сікорського. 2020. -260 с.
2. Технологические основы агрегатирования сборочного оборудования. А.И. Дашенко и др. – М.: Машиностроение, 1991. -272 с.
3. Гокун В.Б. Агрегатирование и унификация в машиностроении. – М.: Изд-во стандартов, 1970. -315 с.
4. Волчкевич Л.И. Конкурентоспособность автоматической сборки в дискретном производстве // Материалы Международной конференции. –Жешов, 2006. С.9-14.

5. Григор'єва Н.С. Науково-технологічні основи гнучкого автоматичного складання виробів: Монографія. –Луцьк: Надстир'я, 2008. -520 с.

**Григор'єва Н.С., д.т.н., проф., Шабайкович В.А., д.т.н., проф., Марчук І.В.**  
Луцкий национальный технический университет

#### **АГРЕГАТИРОВАНИЕ СБОРОЧНОГО ПРОИЗВОДСТВА В ПРИБОРОСТРОЕНИИ**

*Статья посвящена агрегатированию, современным технологично-конструкционным решениям гибкой автоматической сборки в приборостроении. Общим выводом может быть то, что на сегодняшний день отсутствуют научно-технологические основы гибкой автоматической сборки вообще и модульных процессов гибкой сборки в том числе. Такое положение значительно тормозит дальнейшее практическое внедрение агрегатирования в производство, не дает возможности раскрыть все потенциальные возможности увеличения технической и экономической эффективности. Источником увеличения эффективности гибкой автоматической сборки является сочетание областей использования в гибком составлении концепции модульной технологии сборки, агрегатно-модульного построения сборочного оборудования и оснастки, стандартизации, унификации и типизации, автоматического проектирования технологий и конструкций, конкурентоспособности. Благодаря такому сочетанию можно значительно повысить все показатели качества как переналаживаемого технологического оборудования с оснасткой, так и самих сборочных изделий приборостроения. При этом следует заметить, что многие вопросы из указанных областей имеют свое решение, но известные решения либо слабо связаны или не связаны как с гибкой автоматической сборкой, так и между собой с отдельных областей.*

**Ключевые слова:** : агрегатирование, мероприятия, минимизация, сборка, унификация.

**N. Grigoryeva, DSc.,Ph.D, prof., V. Shabaikovich, DSc.,Ph.D, prof., I. Marchuk**  
Lutsk National Technical University

#### **AGGREGATION OF ASSEMBLY PRODUCTION IN THE INSTRUMENT MAKING**

*The article is devoted to aggregation, modern technological design solutions of flexible automatic assembly. The general conclusion may be that today there are no scientific and technological foundations of flexible automatic assembly in general and modular processes of flexible assembly as well. This situation significantly slows down the further practical implementation of aggregation in production, does not make it possible to reveal all the potential possibilities for increasing technical and economic efficiency. The source of increasing the efficiency of flexible automatic assembly is a combination of areas of use in flexible drafting of the concept of modular assembly technology, modular assembly construction of assembly equipment and accessories, standardization, unification and typification, automatic design of technologies and structures, and competitiveness. Thanks to this combination, it is possible to significantly increase all quality indicators of both adjustable technological equipment with accessories and the assembly products themselves. It should be noted that many issues from these areas have their own solution, but the known solutions are either weakly connected or not related to flexible automatic assembly, or to each other from individual areas.*

**Keywords:** aggregation, measures, minimization, assembly, unification.

УДК 621.914.1

DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2313-5352-2020-16-5>

Марчук В.І., Гринюк С.В., Марчук І.В., Сачковська Л.О

Луцький національний технічний університет

**ДИНАМІЧНА МОДЕЛЬ ПРОЦЕСУ ШЛІФУВАННЯ ПЕРЕРИВЧАСТИМИ КРУГАМИ**

*В роботі розглядається динамічна модель процесу шліфування переривчастими кругами як об'єкт управління. Динамічна модель переривчастого шліфування представляється у вигляді одномасової системи. В процесі шліфування спостерігається регенеративний ефект, який заключається в тому, що реакція пружної системи проявляється у вигляді зворотнього зв'язку з запізнення у часі. Цей ефект відіграє подвійну роль і значно ускладнює вивчення динаміки процесу шліфування, так як за зносу в процесі різання круг і деталь задіяні в регенеруючому зворотньому зв'язку. В результаті проведених досліджень отримуємо оптимальний розв'язок для об'єктивного представлення динаміки процесу переривчастого шліфування.*

**Ключові слова:** моделю, амплітуда, шліфування, точність, деталь.

**Вступ.** Ідея створення переривчастого шліфування складається з періодичного переривання контакту круга з деталлю і виключення теплового насичення поверхневих шарів оброблюваного матеріалу для зменшення температури різання. Характерною особливістю переривчастого шліфування є самооформлення макро профіля робочих виступів круга. Процес знімання матеріалу в таких умовах відрізняється від звичайного шліфування.

Математична модель процесу шліфування як об'єкта управління повинна відображати взаємозв'язок сил різання і регулюючих впливів, враховуючи вплив на динаміку процесу шліфування зносу круга і характеристик пружної системи [1,7].

**Огляд та аналіз попередніх досліджень.** В процесі шліфування спостерігається регенеративний ефект, який заключається в тому, що реакція пружної системи проявляється у вигляді зворотнього зв'язку з запізнення у часі. Цей ефект відіграє подвійну роль і значно ускладнює вивчення динаміки процесу шліфування, так як за зносу в процесі різання круг і деталь задіяні в регенеруючому зворотньому зв'язку[2, 7-9].

Відомі теоретичні та експериментальні дослідження, що розглядаються в роботах [3, 4, 7-9], показують, що пружну систему верстата можна з моделювати як багатомасову коливачу систему з присутнім їй характерним спектром власних частот. Деформації пружної системи шліфувальних верстатів характеризуються значеннями, які порівнюються з величиною припуску, який знімається. Дані переміщення складаються з контактних деформацій, які обумовленні наявністю зазорів на стиках зв'язаних вузлів, і деформацій пружної системи, які зв'язані з піддатливістю вузлів станка, пристосувань і деталі [5-9].

**Виклад основного матеріалу.** Динамічна модель переривчастого шліфування представимо у вигляді одномасової системи «m» зв'язаної з нерухомою опорою за допомогою пружини «C». На масу «m» діє імпульсне навантаження  $F(\tau_1, \tau_2)$ , де  $\tau_1$  – період контакту робочого виступу переривчастого круга з оброблювальною деталлю,  $\tau_2$  – період розриву процесу різання при проходженні впадини круга над зоною контакту.

Коливальний рух маси «m» на інтервалі  $(0, \tau_1)$  описується диференціальним рівнянням (1)

$$m\ddot{y} + cy = F_0, \quad (1)$$

а на інтервалі  $(\tau_1, \tau_2)$  рух маси «m» описується рівнянням (2)

$$m\ddot{y} + cy = 0. \quad (2)$$

Розв'язок рівняння (1) має наступний вигляд

$$y_1 = A \sin kt + B \cos kt + h, \quad (3)$$

де  $k = \sqrt{c/m}$  – власна частота коливання системи;  
 $h = F_0/c$  – статистичне переміщення маси « $m$ » під дією сили  $F_0$ .  
 Розв'язок рівняння (2) має наступний вигляд

$$y_2 = C \sin k\tau + D \cos k\tau. \quad (4)$$

Невідомі сталі  $A, B, C, D$  визначаються із чотирьох початкових умов

$$\left. \begin{aligned} y_1(0) &= y_2(\tau_2) \\ \dot{y}_1(0) &= \dot{y}_2(\tau_2) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

$$\left. \begin{aligned} y_1(\tau_1) &= y_2(\tau_1) \\ \dot{y}_1(\tau_1) &= \dot{y}_2(\tau_1) \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Після розв'язку системи рівнянь і перетворень отримаємо

$$C = h \cdot \frac{\sin k \frac{\tau_1}{2} \cdot \sin k \frac{\tau_1 + \tau_2}{2}}{\sin k \frac{\tau_2}{2}}, \quad (7)$$

$$D = \frac{h \cdot \sin k \frac{\tau_1}{2}}{\cos k \frac{2\tau_1 + \tau_2}{2} \cdot \sin k \frac{\tau_2}{2}} \cdot \left( \cos k \frac{\tau_1}{2} - \sin k \frac{\tau_1 + \tau_2}{2} \cdot \sin k \frac{2\tau_1 + \tau_2}{2} \right), \quad (8)$$

$$A = C \cdot \cos k\tau_2 - D \cdot \sin k \cdot k\tau_2, \quad (9)$$

$$A = C \cdot \sin k\tau_2 + D \cdot \cos k \cdot k\tau_2 - h. \quad (10)$$

При  $\sin k \frac{\tau_2}{2} = 0$  і  $\cos k \frac{2\tau_1 + \tau_2}{2} = 0$  константи  $A, B, C, D$  прямують до нескінченності. При цих умовах в системі настає ударний резонанс.

Умови ударного резонансу:

$$1. \sin k \frac{\tau_2}{2} = 0 \text{ при } k \frac{\tau_2}{2} = \pi \cdot n, \quad (11)$$

де  $n = 1, 2, \dots, \infty$  звідки  $\tau_2 = \frac{2\pi n}{k}$ ;

$$2. \cos k \frac{2\tau_1 + \tau_2}{2} = 0 \text{ при } k \frac{2\tau_1 + \tau_2}{2} = \frac{\pi}{2} + \pi n, \quad (12)$$

звідки  $\tau_2 + 2\tau_1 = \frac{\pi(1+2n)}{k}$ .

Із отриманих умов (11) і (12) випливає безчислова множина резонансних станів системи. Повний розв'язок диференціальних рівнянь одномасової системи має вигляд [6]

$$A = \frac{S}{2m \sqrt{\frac{c}{m}} \cdot \sin\left(\pi \sqrt{\frac{c}{m}} / \omega\right)}, \quad (13)$$

де  $S = \int_0^{\tau} P(\tau) d\tau$  – імпульс сили;

$P = c/m$ ;

$S = F_0 \tau_1$ ;

$F_0$  – сила різання, Н;

$\omega$  – частота дій імпульсів.

Вираз  $\frac{S}{m \cdot \sqrt{c/m}}$  визначає максимальне відхилення, яке викликане однократним імпульсом.

Вираз  $\beta = \frac{1}{2 \sin\left(\pi \sqrt{\frac{c}{m}} / \omega\right)}$  характеризує повторення ударів від різучих виступів.



При переривчастому шліфування існує безчисленна множина резонансних систем як при  $\omega < \sqrt{c/m}$ , так і при  $\omega > \sqrt{c/m}$ . Із рівності (13) видно, що на величину амплітуди вимушених коливань дає вплив імпульс сили  $S$ .

Повтор дій імпульсів вказує менш значний вплив на амплітуду. Амплітудою вимушених коливань можна керувати величиною імпульсу сили. Наприклад, із збільшенням швидкості круга, час контакту  $\tau_1$  зменшується. Відповідно зменшується імпульс сили  $S = F_0 \tau_1$  і амплітуда вимушених коливань.

Із зменшенням амплітуди збільшується фактична глибина входження ріжучих зерен в метал і збільшується товщина зрізу максимально виступаючих зерен. Збільшується ймовірність контакту оброблювального металу з кругом порівнянні з шліфуванням суцільним кругом.

Контакт металу з кругом викликає його зношення і робота круга переходить в режим самозаточування. З фізичної точки зору зменшення амплітуди означає, що круг не встигає зреагувати на імпульс сили  $S$  і система отримує переміщення, яке рівне статистичному такої ж сили  $F_0$ . При цьому, чим менше  $\tau$ , тим менша амплітуда  $A$ .

Із збільшенням глибини входження ріжучих зерен в метал при переривчастому шліфуванні, зростає сила різання. В результаті імпульс сили  $S = F_0 \tau_1$  збільшується.

Тоді можна зробити висновок, що при переривчастому шліфуванні сила різання  $F_0$  більша, чим при суцільному, але із за інертності вимірювальної апаратури підтвердити це експериментально неможливо.

Попередні дані констатують проте, що переривчастість обробки за рахунок динаміки принципово змінює закономірність знімання матеріалу і механізм зношення круга і тим самим дозволяє кардинально розв'язати проблему підтримки високих ріжучих властивостей кругів процесі шліфування.

Переривчастість шліфування забезпечує одночасну високу продуктивність знімання матеріалу і ефективну правку круга і тим самим створює ефект механіки шліфування. З врахуванням  $T = 2\pi/\omega$  ( $T$  – період часу між двома імпульсами), а також  $T = \alpha\tau_1$  ( $\tau_1$  – тривалість контакту виступу круга з деталлю;  $\alpha$  – відношення між періодом імпульсів і тривалістю їх) і  $S = F_0 \tau_1$  формулу для розрахунку амплітуди коливань можна представити наступним чином

$$A = \frac{F_0 \cdot 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{c}{m}}}{\alpha \cdot \omega \cdot 2 \cdot c \cdot \sin\left(\pi \cdot \sqrt{\frac{c}{m}} / \omega\right)} = \frac{\pi \cdot h \cdot \sqrt{\frac{c}{m}}}{\alpha \cdot \omega \cdot \sin\left(\pi \cdot \sqrt{\frac{c}{m}} / \omega\right)}, \quad (14)$$

де  $h = F_0/c$  – переміщення круга в радіальному напрямку від дії статистичної сили  $F_0$ . З рівності (14) випливає:

1.  $A \rightarrow \infty$  при періодичному досягненні  $\sin\left(\pi \cdot \sqrt{\frac{c}{m}} / \omega\right) \rightarrow 0$ ;
2. Амплітуда зменшується із збільшенням частоти імпульсів  $\omega$ .

Другий висновок дуже важливий, оскільки з врахуванням  $\omega = \frac{2\pi}{\tau} = \frac{2\pi \cdot V_{кр.}}{(l_1 + l_2)}$  (де  $V_{кр.}$  – швидкість круга;  $l_1, l_2$  – довжини виступів і впадин переривчастого круга), збільшення швидкості круга і зменшення  $l_1 + l_2$ , тобто довжин впадин і виступів на крузі, частота імпульсів  $\omega$  збільшується і приводить до зменшення амплітуди вимушених коливань  $A$ . Це вказує на те, що при умові оптимального відношення  $\left(\pi \cdot \sqrt{\frac{c}{m}} / \omega\right) \neq 0$ , амплітуду коливань  $A$  практично можна зменшити до нуля.

Розглянемо процес шліфування деталі, яка рухається по нормалі до робочої поверхні круга (рис. 1). За період входження впадини переривчастого круга деталь перемістилася в радіальному напрямку на величину  $h$ . Знімання матеріалу виконують зерна, які розташовані на передній кромці робочого виступа. Внаслідок високого навантаження цих зерен і інтенсивності випадіння із зв'язки, на робочому виступі круга з'явиться фронтальна поверхня довжиною  $l$ , розташована під «кутом атаки»  $\alpha$  до площини різання.



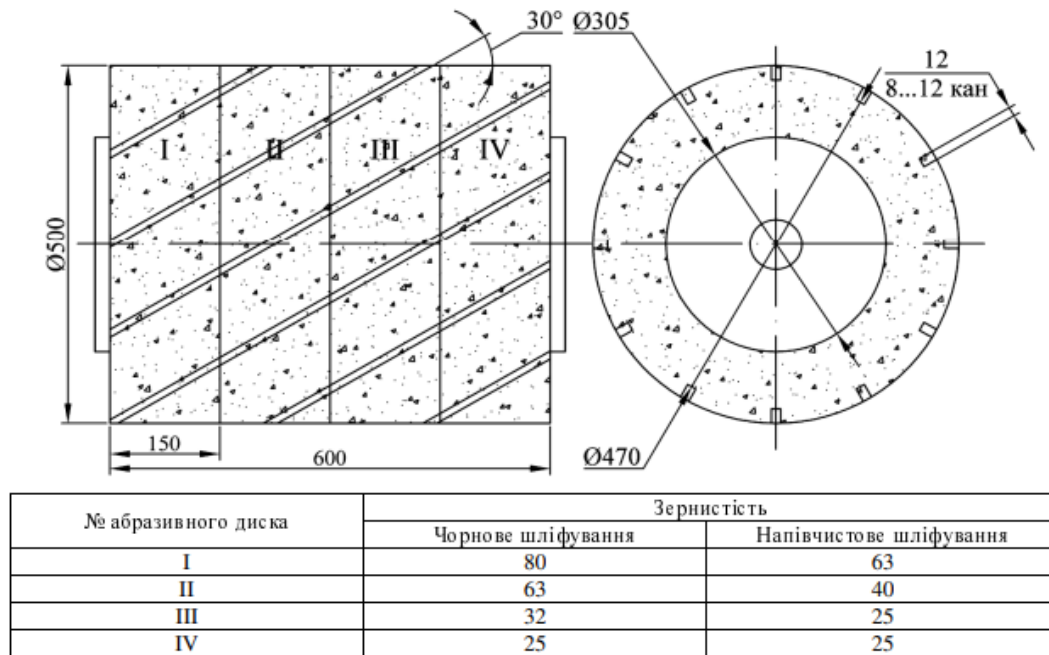


Рис. 1 Розрахункова схема переривчастого шліфування

Збільшення глибини входження матеріалу деталі в робочу поверхню круга, руйнується зв'язка, круг працює в режимі самозаточування. Забезпечується стабільність ріжучої здатності круга по часу. З цього можна зробити висновок проте, що переривчасте шліфування є новим методом правки круга безпосередньо в процесі шліфування.

Аналіз формули (14) показує, що при збільшенні  $\omega$  до визначеного значення відношення

$$\frac{\pi \cdot \sqrt{\frac{c}{m}}}{\alpha \cdot \omega \cdot 2 \cdot \sin\left(\pi \cdot \sqrt{\frac{c}{m}} / \omega\right)} < 1 \text{ і відповідно } A < h.$$

Саме в цьому заключається ефект переривчастого шліфування, як нового методу правки круга. При цьому, чим більше  $\alpha$ , тим кращий результат. Відповідно, ефективність правки круга зростає з зменшенням довжини ріжучого виступу круга.

Після підстановки в рівність (14) значення  $\alpha = \frac{l_1 + l_2}{l_1}$  і  $\omega = \frac{2\pi}{\tau} = \frac{2\pi \cdot V_{кр.}}{(l_1 + l_2)}$  отримаємо

$$A = \frac{h \cdot \sqrt{\frac{c}{m}} \cdot l_1}{2 \cdot V_{кр.} \cdot \sin\left(\pi \cdot \sqrt{\frac{c}{m}} / \omega\right)}. \quad (15)$$

Таким чином, із зменшенням довжини ріжучого виступу  $l_1$ , зменшується амплітуда  $A$ .

**Висновки.** На закінчення можна сказати, що недивлячись на прийняті допущення, отриманий розв'язок (15) дає об'єктивне представлення про динаміку процесу переривчастого шліфування. При динамічному навантаженні системи, маса шліфувального круга  $m$  здійснює гармонічні коливання. Збільшення глибини входження ріжучих зерен створює умови для ударного взаємозв'язку зв'язки круга з металом, що приводить до інтенсивного зносу круга. Відбувається неперервне оновлення ріжучого контура шліфувального круга. Коливання виконують функцію правлячого інструмента. Вони стабілізують гострий ріжучий рельєф круга і відповідно технологічні параметри процесу шліфування: точність, якість поверхневого шару і теплопровідність.

В порівнянні з суцільним шліфуванням, переривчасті круги мають більш високу ріжучу здатність, працюючи в режимі самозаточення, що дозволяє використовувати більш твердих кругів. Для уникнення великих динамічних навантажень, амплітуду коливань  $A$  потрібно обмежувати.

**Інформаційні джерела**

1. Марчук В.І. Технологічні основи забезпечення якості робочих поверхонь кілець роликотідшипників [Текст] : дис... д-ра техн. наук: 05.02.08 / Марчук Віктор Іванович ; Луцький держ. технічний ун-т. - Луцьк, 2004. - 458 арк.+ дод.: 150арк. - арк. 430-458
2. Перель Л.Я. Подшипники качения: расчет, проектирование и обслуживание опор: [Справочник]. – М.: Машиностроение. – 1989. - №4. – С. 130- 134.
3. Ящерицын П.И. Повышение качества шлифованных поверхностей и режущих свойств абразивно-алмазного инструмента / П.И. Ящерицын, А.Г. Зайцев. – Минск : Наука и техника, 1972. – 480 с
4. Якимов А.В. Технология машиностроения: Учебник / А.В. Якимов, А.А. Якимов, В.П. Ларшин, В.Н. Свирщев. – Пермь, 2002. – 563 с.
5. Лурье Г.Б. Шлифование металлов. – М.: Машиностроение, 1969. – 172 с.
6. Островский В.И. Теоретические основы процесса шлифования. – Л.: Ленинград. Ун-та, 1981. – 144 с.
7. В.І Марчук, І.В Марчук Технологічне керування температурою під час безцентрового шліфування функціональних поверхонь обертання. Наукові нотатки, 142-147
8. Т.Г Джугурян, В.І Марчук, І.В Марчук, М.В Олексин, ЛЮ Сачковська. До визначення умов зниження температури безцентрового шліфування переривчастими кругами.Перспективні технології та прилади №13 2018 р, ст48-52.
9. Т.Г. Джугурян, І.В. Марчук. Особливості безцентрового шліфування циліндричних поверхонь функціонального призначення переривчастими шліфувальними кругами. Перспективні технології та прилади, 115-118

**Marchuk V.I., Hryniuk S.V., Marchuk I.V., Sachkovskaya L.O.**  
**Lutsk National Technical University**

**DYNAMIC MODEL OF GRINDING CIRCUIT GRINDING PROCESS**

*The paper considers a dynamic model of the process of grinding with discontinuous wheels as an object of control. The dynamic model of intermittent grinding is presented in the form of a single-mass system. During the grinding process, a regenerative effect is observed, which is that the reaction of the elastic system manifests itself in the form of feedback from the delay in time. This effect plays a dual role and significantly complicates the study of the dynamics of the grinding process, as wear and tear during the cutting process, the circle and the part are involved in the regenerative feedback. As a result of the research, we obtain the optimal solution for an objective representation of the dynamics of the process of intermittent grinding.*

**Keywords:** model, amplitude, grinding, accuracy, detail.

**Марчук В.І., Гринюк С.В., Марчук І.В., Сачковська Л.А.**  
 Луцький національний технічний університет

**ДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ШЛИФОВАНИЕ ПРЕРИВИСТАМИ КРУГАМИ**

*В работе рассматривается динамическая модель процесса шлифования прерывистыми кругами как объект управления. Динамическая модель прерывистого шлифования представляется в виде одномассовой системы. В процессе шлифовки наблюдается регенеративный эффект, который заключается в том, что реакция упругой системы проявляется в виде обратной связи с опозданием во времени. Этот эффект играет двойную роль и значительно затрудняет изучение динамики процесса шлифования, так как за износа в процессе резки круг и деталь задействованы в регенерирующей обратной связи. В результате проведенных исследований получаем оптимальное решение для объективного представления динамики процесса прерывистого шлифования.*

**Ключевые слова:** модель, амплитуда, шлифование, точность, деталь.

УДК 621.9.08-52

DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2313-5352-2020-16-6>

Денисюк В.Ю., к.т.н., Симонюк В.П., к.т.н., Лапченко Ю.С., к.т.н., Новосад Б.І.

Луцький національний технічний університет

## МЕТРОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТОЧНОСТІ ПРИЛАДІВ АКТИВНОГО КОНТРОЛЮ В ПРОЦЕСІ ОБРОБКИ

В статті розглянуто методи підвищення точності розмірних параметрів деталей шляхом виявлення механізму взаємозв'язків конструктивно-технологічних особливостей деталей, які обробляються, та метрологічної точності приладів автоматичного управління і контролю процесом металообробки. Описано методіку визначення похибки показів та інших характеристик точності приладів для шліфувальних верстатів за допомогою жорсткої стійки, забезпеченої опорним столиком і кронштейном для кріплення вимірювального засобу, який перевіряється та зразкового цифрового індикатора, за яким відзначають переміщення столика. Встановлено, що суттєвим резервом підвищення точності обробки на металообробних верстатах є використання системи автоматичного регулювання за вихідним параметром із застосуванням відповідного приладу активного контролю. При цьому прилад повинен мати аналоговий або дискретний вихід і певні динамічні властивості, які визначають динамічні властивості всієї системи і допустиму похибку.

**Ключові слова:** активний контроль, налагодження, прилад, система, похибка, вимірювання, перевірка, наконечник, аретування, точність, калібрування.

**Постановка проблеми.** У машино- та приладобудівному виробництві багато деталей виготовляють з високою розмірною точністю. Висока точність геометричних розмірів і форми деталей забезпечує правильне функціонування, надійність і довговічність роботи механізмів і машин. Точність розмірів деталей визначає можливість їх правильного складання та взаємозамінності, що дозволяє істотно знизити витрати при виготовленні, ремонті та експлуатації механізмів машин і приладів. Підвищені вимоги до точності обробки призводять до зростання трудомісткості обробки і вартості виготовлення даних деталей [1, 2].

Для забезпечення високої точності обробки верстата постачають автоматичними засобами контролю розмірів оброблюваних і оброблених деталей, засобами контролю лінійних і кутових переміщень вузлів і механізмів верстата, позиціонування і настройки інструменту.

Активний контроль і контроль переміщень на верстатах особливо ефективні при малих допусках на виготовлення деталей і при фінішній, прецизійній обробці, головним чином при шліфуванні і хонінгуванні. Крім підвищення точності обробки, активний контроль і контроль переміщень і позиціонування інструменту на верстатах забезпечують повну автоматизацію процесу обробки з замкнутим зворотним зв'язком за розміром оброблюваної деталі [3, 4].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Автоматизовані системи активного контролю призначені для вимірювання геометричних розмірів деталей у процесі їх оброблення і управління технологічним обладнанням за результатами цих вимірювань [5].

Контроль розмірів може виконуватись як у зоні обробки – операційний контроль (рис. 1), так і поза зоною оброблення – виносний контроль.

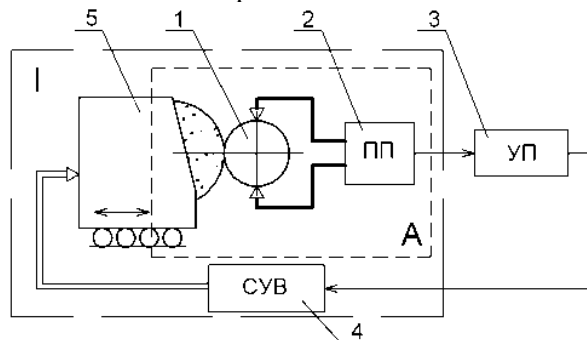


Рис. 1. Схема операційного контролю:

I – верстат. 1 – деталь, що обробляється; 2 – первинний вимірювальний перетворювач; 3 – управляючий прилад; 4 – схема управління верстатом; 5 – виконавчий орган верстата; А – робоча зона оброблення

Первинний вимірювальний перетворювач 2 встановлюється у зоні оброблення деталі і служить для перетворення лінійного розміру деталі (у даному випадку – зовнішнього діаметра) у проміжний сигнал. Сигнал обробляється в управляючому приладі 3, на виході якого формуються команди управління верстатом. Команди управління поступають у схему верстата і реалізуються виконавчими органами верстата, які, у свою чергу, переміщують різальний інструмент.

Основні переваги операційного контролю: а) контролюється динаміка протікання процесу оброблення деталі; б) є можливість формувати команди управління на будь-якій фазі процесу оброблення; в) швидке реагування на дію випадкових сторонніх чинників.

Незалежно від технологічного обладнання засоби активного контролю у загальному вигляді будуються за єдиною структурною схемою (рис. 2), що складається з окремих елементів, призначених для виконання заданих функцій.

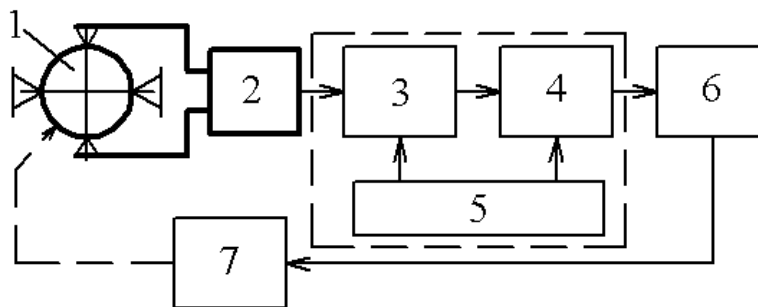


Рис. 2. Структурна схема засобу активного контролю:

1 – деталь, розміри якої контролюються (об’єкт регулювання); 2 – вимірювальний перетворювач; 3 – вимірювальний пристрій; 4 – пристрій формування команд управління; 5 – блок живлення; 6 – схема управління верстатом; 7 – виконавчий орган верстату

Як видно зі схеми, системи активного контролю є різновидом систем автоматичного регулювання – присутній замкнутий контур зі зворотним зв’язком. Об’єктом регулювання служить розмір деталі, яка обробляється. Закон регулювання формується в управляючому приладі.

Якщо система активного контролю застосовується на верстаті з ЧПК, то функцію формування закону автоматичного регулювання доцільно покласти на мікропроцесорні засоби управління верстатом. У цьому випадку появляється можливість гнучкого управління верстатом, залежно від технологічних вимог.

У зв’язку з тим, що система активного контролю створює вирішальний вплив на розмір оброблення деталі, іноді вживається визначення – система управління точністю оброблення.

Прилади активного контролю фіксують не повний розмір контрольованого параметра, а тільки припуск на оброблення. Діапазон відліку відповідно лежить у межах, що перевищує максимальний припуск на 50–100%. Повний розмір задається “жорстким калібром” – механічно фіксованою установкою вимірювальних наконечників первинного перетворювача.

Основним вузлом системи активного контролю, від якого залежить точність вимірювання, є вимірювальний (первинний) перетворювач.

Основною класифікаційною ознакою вимірювального перетворювача є його принцип дії, який зумовлює метрологічні, експлуатаційні характеристики та конструктивну побудову. Використовується резистивний, пневматичний, індуктивний, ємнісний принцип дії, або комбінований, наприклад пневмоелектроконтактний.

У даний час найбільшого поширення набули індуктивні перетворювачі з однією або двома (диференціальні перетворювачі) обмотками. Вони забезпечують високу точність перетворення, достатньо великий діапазон вимірювання (до 1000 мкм), прості у виготовленні, надійні і довговічні в експлуатації.

Система верстат-прилад активного контролю має бути забезпечена точним вимірювальним приладом для вимірювання розмірів оброблених деталей і налаштовувальних зразком.

Вимірювальний прилад або автоматичний засіб повинні забезпечувати отримання показів про значення обробленого розміру з точністю, необхідною для коригування рівня настройки приладу активного контролю, і дозволяти швидко і зручно проводити вимірювання готових виробів.

Настроювальний зразок повинен забезпечувати можливість настройки приладу активного контролю і періодичної її перевірки з потрібною точністю.

**Мета роботи.** Підвищення точності розмірних параметрів деталей шляхом виявлення механізму взаємозв'язків конструктивно-технологічних особливостей деталей, які обробляються, та метрологічної точності приладів автоматичного управління і контролю процесом металообробки.

**Викладення основного матеріалу.** Визначення метрологічних характеристик (похибок) приладу є найбільш відповідальною частиною випробувань, що включає перевірку і калібрування приладу. Для кожного приладу визначення похибок прописано в ТУ на прилад, а для приладів масового випуску розроблені Методики і ГОСТ на перевірку приладу. Одні прилади перевіряються за допомогою універсальних засобів, наприклад, кінцевих мір довжини (КМД), для інших розроблені спеціальні стенди та установки. Всі прилади повіряються і калібруються методом порівняння з КМД або точними зразковими атестованими засобами.

Калібрування приладів за допомогою КМД вимагає досвіду і досить трудомістке. В даний час випускають оптоелектронні прилади з дискретністю цифрового відліку 0,1 і 0,01 мкм і діапазоном вимірювання до 100 мм, наприклад, прилади типу METRO (Heidenhain, Швейцарія) за допомогою яких дуже зручно калібрувати деякі прилади, наприклад, індуктивні прилади активного контролю, вимірювальні скоби, головки і індуктивні перетворювачі.

Оптоелектронні прилади і цифрові індикатори, завдяки великому діапазону вимірювання, високій точності (похибка 0,2– 0,3 мкм), установці нуля (скидання на нуль) в будь-якій точці діапазону вимірювань і цифровому відліку надзвичайно зручні для настройки, перевірки і випробування вимірювальних приладів. Однією з умов калібрування за допомогою оптоелектронного зразкового приладу є забезпечення плавних однакових долемікронних одночасних переміщень, що задаються вимірювальним наконечником зразкового приладу і приладу, який калібрується. Це дозволяє порівняти їх покази і визначити похибку в будь-якій точці діапазону вимірювань. Слід відзначити, що цифрова індикація цих приладів ідеально підходить для перевірки і калібрування, так як відлік за нею зручний і не має похибки [4].

Визначення похибки показів та інших характеристик точності приладів для шліфувальних верстатів, проводять за допомогою жорсткої стійки або пристосування (рис. 3), забезпеченого опорним столиком і кронштейном для кріплення вимірювального засобу, який перевіряється та зразкового цифрового індикатора (ємнісного, індуктивного, оптоелектронного), за яким відзначають переміщення столика. Столик має можливість плавних долемікронних зворотно-поступальних безлюфтових переміщень за допомогою вузла мікрометричної подачі. Двоконтактні скоби 2 і 8 або одноконтактну головку 9, які перевіряються за допомогою кронштейнів кріплять у робочому положенні до стійки 7. У стійку встановлюють цифровий індикатор або оптоелектронну головку 6. Під контактні наконечники скоб і головок встановлюють блоки кінцевих мір довжини 3.

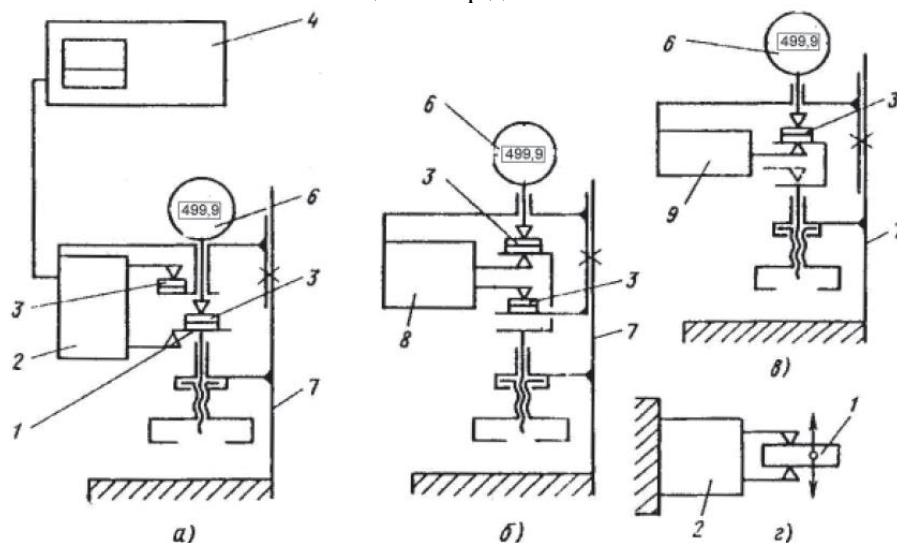


Рис. 3. Схема перевірки приладу:

а, г – з двохконтактною скобою для валів; б – з двохконтактною скобою для отворів; в – з одноконтактною головкою

Прилад 4, який перевіряється і індикатор 6 встановлюють в нульове положення. Плавним переміщенням столика 1 на дисплеї 4 приладу, який перевіряється послідовно встановлюють покази, що відповідають заданим контрольним точкам і порівнюють їх з показами зразкового індикатора 6. Як видно зі схеми рис. 3, при переміщенні столика одна губка скоби переміщається разом зі столиком і наконечником індикатора 6, інша – нерухома. Для усунення зазорів в кінематичному механізмі столика перед установкою в необхідне положення його переміщують в одному напрямку.

Зняття показів в кожній контрольній точці проводять три рази. Похибка показів на заданій ділянці відраховується від нульового показу і визначається найбільшою за абсолютним значенням різницею трьох відліків за цифровим дисплеєм 4 приладу, що перевіряється і зразковому індикатору 6. Отримані значення порівнюють з нормованими межами.

Параметри вихідного аналогового сигналу постійного струму і його похибки визначають за допомогою засобів, показаних на рис. 3, а.

До аналогового виходу блоку управління 4 підключають цифровий вольтметр 5. Відповідно до встановленого для конкретного приладу номінального значення чутливості вихідного аналогового сигналу, вираженого у В/мм (або у мВ/мкм), покази вольтметра приводять до еквівалентних одиниць довжини (мкм).

Похибку вихідного аналогового сигналу в заданих контрольних точках відраховують від нульового рівня. Вона визначається різницею відліків переміщень наконечників скоби за зразковим індикатором 6 і приведеними до одиниць довжини відповідними відліками показів величини напруги за цифровим вольтметром.

Сучасні цифрові блоки управління мають цифровий канал зв'язку (кодовий вихід, як правило, RS232). Для повноцінної перевірки цифрового каналу зв'язку необхідна спеціальна програма і комп'ютер, які дозволять послати в блок команду зі списку дозволених і отримати та візуалізувати відповідь із блоку. Тому виробник зазвичай докладає носій (флеш-пам'ять) з програмою і протоколом обміну.

При визначенні похибки (розмаху) спрацьовування команд електричне живлення до блоку управління підводять через регулятор напруги, щоб перевірити похибку приладу при заданих ТУ коливаннях напруги. Кінцеву команду приладу налаштовують поблизу нульового показу відлікового пристрою. Попередні команди налаштовують на спрацьовування в точках, які визначаються ТУ на прилад.

Контактний наконечник скоби, яка повіряється або головки приводять в зіткнення зі столиком стійки (рис. 3). Другий контактний наконечник двохконтактної скоби приводять до зіткнення з нерухомою опорою. Плавним переміщенням столика стійки забезпечують одночасне переміщення наконечника скоби 2 і індикатора 6 так, щоб відбувалося послідовне спрацьовування попередніх, а потім кінцевої команди. Столик переміщують в одному напрямку для виключення зазорів в кінематичному механізмі стійки.

За цифровим індикатором 6 відзначають покази, при якому відбувається спрацьовування відповідної команди приладу.

Всього для кожної команди проводять три серії випробувань по десять вимірювань (спрацьовувань команд) при номінальному, найбільшому і найменшому граничних значеннях напруги живлення (110; 121; 99) В або (220; 242; 198) В. Розмах спрацьовування (похибка спрацьовування) кожної команди визначається як найбільша різниця з 30 відліків за зразковим індикатором.

Похибку настройки визначають за допомогою засобів, що застосовуються для визначення похибки спрацьовування команд (рис. 3, а, б, в). До столика 1 стійки 7 підводять контактний наконечник приладу, що перевіряється 2, 8 або 9 таким чином, щоб на дисплеї блоку управління 4 встановився показ, близький до нульового. За допомогою клавіатури блоку управління 4 налаштовують рівень спрацьовування кінцевої команди на значення, що відповідає нулю приладу. Цю настройку вважають початковою ( $X_n$ ).

Столик 1 стійки 7 плавно переміщують таким чином, щоб покази блоку 4 змістилися в плюсову область. Потім столик 1 переміщують в зворотному напрямку, і за зразковим індикатором 6 фіксують відлік по загорянню світлодіода в момент спрацьовування кінцевої команди. Переміщення столика 1 повторюють три рази. З отриманої серії трьох відліків обчислюють середнє арифметичне значення:

$$X_{01} = \frac{X_1 + X_2 + X_3}{3}. \quad (1)$$

За похибку настройки в першій серії випробувань приймають різницю між початковим показом індикатора  $\delta$ , при якому проводилася настройка ( $X_{n1}$ ), і отриманим середнім арифметичним значенням трьох відліків за шкалою індикатора ( $X_i$ ).

Налаштування команди і визначення похибки настройки повторюють три рази:

$$\begin{aligned}\delta_1 &= X_{n1} - X_{01}; \\ \delta_2 &= X_{n2} - X_{02}; \\ \delta_3 &= X_{n3} - X_{03}.\end{aligned}\quad (2)$$

За похибка настройки  $\delta_n$  приймають найбільшу за абсолютним значенням похибку, отриману в трьох серіях випробувань.

Зміщення настройки після встановленого числа циклів роботи приладу і спрацьовування всіх команд визначають на обкатному стенді або центровому круглошліфувальному верстаті з застосуванням контрольної і фасонної оправок. Їх номінальний діаметр повинен приблизно відповідати середньому значенню діапазону настройки приладу. Випробування можуть проводитися і на іншому верстаті залежно від призначення приладу [4].

Контрольна оправка має дуже малу похибку форми в поперечному перерізі, а фасонна оправка має невеликі виступи для підйому наконечників скоби.

Скобу або головку, які перевіряються налаштовують за контрольною оправкою, що обертається зі швидкістю 30 – 60 об/хв так, щоб забезпечувався близький до нуля показ за шкалою блоку управління.

Потім замість контрольної оправки в центри стенду або верстату встановлюють фасонну оправку, приводять її в обертання і проводять 200 циклів попередньої обкатки. За кожен цикл повинні послідовно спрацьовувати всі команди і переміщатися контактні наконечники оснащення, що перевіряється відповідно з циклом обробки деталі на верстаті, тобто на весь діапазон вимірювання, наприклад, на 500 мкм.

Після обкатки на стенді встановлюють контрольну оправку, приводять її в обертання і фіксують покази блоку управління при десятикратному підводі контактних наконечників до контрольної оправки.

Початковий рівень настройки перед повірочною обкаткою ( $X_n$ ) визначається як середнє арифметичне значення серії 10 відліків:

$$X_n = 0,1 \sum X_i. \quad (3)$$

Замість контрольної оправки в центри встановлюють фасонну оправку, що відповідає цільову призначенню приладу. Проводять повірочну обкатку до встановленого числа циклів вимірювання (наприклад 1500 циклів). Для приладів, що працюють з аретуванням контактних наконечників, передбачають їх періодичне аретування в процесі обкатки.

Після закінчення повірочної обкатки замість фасонної оправки встановлюють контрольну оправку і приводять її в обертання. Фіксують покази блоку управління при десятикратному підводі контактних наконечників до контрольної оправки.

При наявності в приладі вихідного аналогового сигналу покази можуть зніматися також з цифрового вольтметра, підключеного до аналогового виходу блоку управління.

Рівень настройки після обкатки ( $X_k$ ) визначають як середнє арифметичне значення серії з 10 відліків, тобто

$$X_k = 0,1 \sum X_i.$$

За зміщення рівня настройки приладу  $\delta_{zn}$  приймають різницю між середніми арифметичними значеннями до і після повірочної обкатки приладу:

$$\delta_{zn} = X_n - X_k.$$

Для визначення зміщення настройки приладів-підналагоджувальників, які коригують розмірну настройку верстата за результатами контролю деталей після їх обробки, застосовують таку методику.

Готують деталь-зразок (міру), розмір якої не виходить за межі встановленого для даної операції поля допуску, наприклад, розмір відповідає середині поля допуску. Допуски геометричної форми міри не повинні перевищувати 10-20% нормованої межі зміщення настройки приладу. За потреби можна перевіряти підналагоджувальник за кількома мірами різного розміру.

Для обкатки приладу використовують партію оброблених деталей з полем розсіювання розмірів, що перевищують допуск, контрольований приладом. На підготовчій стадії проводять



попередню настройку рівня спрацьовування керуючої команди «підналагоджування» за встановленою на вимірювальну позицію міру. На початковому етапі проводять попередню обкатку приладу протягом 20 – 30 хв, встановлюючи обкатувальні деталі на вимірювальну позицію вручну або за допомогою механізмів, що забезпечують автоматичне завантаження та орієнтацію деталей. Такт проходження деталей обкатки зазвичай узгоджують з продуктивністю контролю в процесі експлуатації приладу. Разом з обкатними деталями не менше 15 – 20 разів пропускають міру. За цифровим дисплеєм фіксують результати вимірювання міри і проводять коригування рівня настройки команди «підналагоджування» за допомогою клавіатури блоку. Визначають розмах показів і рівень настройки як середнє арифметичне (3).

При незмінній настройці протягом наступних 2 год через вимірювальну позицію пропускають партію обкатних деталей.

Після закінчення циклу обкатки знову виконують 10 циклів вимірювань міри і фіксують результати вимірювань. Визначають рівень настройки після обкатки як середнє арифметичне (3). Різниця значень рівня настройки до і після обкатки не повинна перевищувати нормованого значення зміщення настройки  $\delta_{zn} = X_n - X_k$ .

При необхідності таку операцію повторюють для кожної команди або вибірково для декількох команд.

Визначення похибки показів при алгебраїчному підсумовуванні переміщень контактних наконечників двохконтактних скоб, що мають два індуктивних перетворювачі, або двох одноконтактних головок визначають шляхом однакових переміщень кожного наконечника в протилежні сторони. Контактні наконечники скоби 2 і цифрового індикатора 6 вводять в зіткнення з КМД, закріпленої на столику 1 (рис. 3, г). Налаштуванням скоби і блоку управління забезпечують нульовий показ приладу. Переміщенням столика верхньому і нижнього наконечникам скоби одночасно надають рівні переміщення в різних напрямках. При цьому відстань між контактними наконечниками залишається незмінною. Переміщення відраховують за цифровим індикатором 6. Покази блоку управління приладу, що перевіряється не повинні змінюватися  $A - B = const$ . Похибку показів на заданих ділянках переміщень визначають за відхиленням показів блоку управління від початкової (нульової) настройки приладу 4.

Тривалість безперервної роботи приладу перевіряють включенням в мережу електричного живлення на час безперервної роботи, регламентований в стандартах або ТУ. Результати випробувань вважаються позитивними, якщо після закінчення часу безперервної роботи прилад відповідає встановленим вимогам точності.

Розмах спрацьовування команд блоку управління в робочих умовах визначають із застосуванням кліматичної камери наступним чином.

Підключені до блоку управління випробувана скоба, індуктивний перетворювач або одноконтактний пристрій закріплюють в кронштейні стійки 7 (рис. 3) і встановлюють поза кліматичною камерою, в приміщенні, де забезпечуються нормальні умови застосування. Блок управління поміщають в камеру і встановлюють у ній нормальні кліматичні умови. Перевіряють розмах спрацьовування команд приладу в нормальних умовах.

Температуру в камері підвищують до верхнього значення температурних робочих умов застосування і підтримують її протягом 3 год. Визначають розмах спрацьовування команд.

Відносну вологість повітря і температуру в камері підвищують до значення, встановленого в робочих умовах застосування. Витримують прилад в зазначених умовах протягом 3 год. Після цього прилад включають в мережу і визначають розмах спрацьовування команд. Допустимі зміни температури в камері протягом часу визначення параметрів точності не повинні перевищувати 2 °С.

Прилад вимикають, блок витягають з камери і витримують в нормальних умовах протягом 3 год. Потім прилад включають і в цих же умовах визначають розмах спрацьовування команд.

Вважають, що прилад витримав випробування на стійкість до впливу верхніх значень температури і вологості в робочих умовах застосування, якщо розмах спрацьовування команд не перевищує нормовані значення.

Аналогічним чином проводять перевірку приладу на стійкість до впливу нижнього значення температури робочих умов застосування.

Точність обробки, яку забезпечує система шліфувальний верстат-прилад активного контролю, визначають в робочих умовах застосування.

Перед випробуваннями встановлюють правильність функціонування і взаємодії всіх

вузлів приладу і верстата. Дуже важливо, щоб встановлені режими різання забезпечували відхилення геометричної форми оброблених поверхонь не більше (25-50) % допуску розміру.

В процесі випробувань партію деталей обробляють в автоматичному чи напівавтоматичному режимах. Число деталей в партії, режими різання, кількість випробовуваних приладів, умови їх післяопераційного контролю і засоби вимірювання оброблених деталей встановлюються технічною документацією на прилад і верстат.

Зазвичай за розмір обробленої деталі приймають півсуму найбільшого і найменшого розмірів у вимірюваному скобою поперечному перерізі, тобто частково виключають відхилення форми оброблених деталей. Такий прийом краще відображає точність приладу активного контролю, але не визначає точність системи верстат-прилад, так як для визначення точності обробки не слід виключати похибку форми оброблених деталей.

Точність обробки, що забезпечується верстатом, оснащеним приладом активного контролю, визначають полем розсіювання розмірів партії оброблених деталей.

Поле розсіювання розмірів в партії зі 100 і більше деталей рекомендується оцінювати за формулою:

$$\omega = 4S, \quad (4)$$

де  $\omega$  – поле розсіювання розмірів;  $S$  – середньоквадратичне відхилення розмірів партії оброблених деталей, що обчислюється за формулою:

$$S = \sqrt{\frac{\sum (X_i - X)^2}{n}}, \quad (5)$$

при  $n = 100 - 150$ .

У разі помітного зміщення рівня настройки  $\Delta_{zn}$  в партії оброблених деталей слід його враховувати як  $\Delta_{zn} = |X_i - X_{max}|$ , де  $X_{max}$  – найбільше відхилення центру розсіювання миттєвої вибірки в процесі обробки від відповідного значення  $X_i$  на початку обробки.

Якщо центри розсіювання розмірів зміщуються в часі за лінійною залежністю, то поле розсіювання  $\omega$  можна визначити як

$$\omega = \Delta_{zn} + 4S. \quad (6)$$

Середнє відхилення  $S$  з достатньою для практики точністю можна визначити методом розмахів або іншими методами за ГОСТ 27.202-83.

Точність обробки вважається задовільною, якщо поле розсіювання розмірів оброблених деталей не виходить за межі, встановлені документацією на прилад.

Випробування приладів на верстаті трудомісткі і займають багато часу. Тому фірми мають багато різних стендів і пристосувань, на яких випробовують прилади та їх вузли. Є й стенди для випробування в динамічному режимі, схожому на режим експлуатації.

При випробуваннях приладів в динамічному режимі бажано повністю імітувати умови їх експлуатації. Відомо, що при роботі приладу на верстаті його наконечники контактують з обертовою або прямолінійною поверхнею контрольованої деталі, яка переміщається, що має відхилення від круглості, циліндричності або прямолінійності.

Швидкість переміщення контрольованої поверхні зазвичай становить від 2 до 50 м/хв. Відхилення форми контрольованої поверхні можуть досягати декількох мікрометрів. В процесі обробки у міру зняття припуску під контактними наконечниками приладу безперервно змінюється розмір зі швидкістю до 100 мкм/с на початку обробки і майже до нульового значення в кінці циклу.

Таким чином, під контактними наконечниками приладу відбуваються одночасно невеликі зміни розміру (відхилення форми) з відносно високою частотою (до 10 Гц) і порівняно повільна безперервна зміна розміру.

При стендових випробуваннях імітацію зазначених впливів здійснюють різними способами: переміщенням контактних наконечників уздовж конічної, овальної, шліцьової оправок, що обертаються.

При випуску приладів широко застосовують описаний вище спосіб визначення похибки від зміщення настройки, що полягає в тому, що проводиться обкатка приладів на поворотній оправці з лисками або овальної оправці і періодична перевірка по нерухомій або обертовій атестованій оправці. Цей спосіб зручний, простий і не вимагає складного випробувального устаткування.

При дослідних та приймальних випробуваннях нових приладів їх перевірку в

динамічному режимі часто здійснюють на стенді з обертовою конусною оправкою.

В сучасних приладах активного контролю для шліфувальних верстатів застосовують мікропроцесорні або комп'ютерні цифрові блоки управління та індуктивні перетворювачі. При випуску і налагодженні приладу і при заміні перетворювача після ремонту необхідно провести його лінеаризацію (калібрування), встановивши задану дискретність цифрової індикації, діапазон вимірювання і, головне, задану лінійність характеристики у всьому діапазоні вимірювання. Мікропроцесорні електронні блоки забезпечені програмою, що дозволяє провести лінеаризацію характеристики перетворювача.

У вимірювальному оснащенні приладів активного контролю застосовують диференціальні і рідше недиференціальні індуктивні перетворювачі. Їх вбудовують безпосередньо у вимірювальну оснащення приладів (скоби, головки), і лінеаризацію перетворювачів проводять в зборі разом з оснащенням, що має каретки, важелі, державки та наконечники. І, головне, вимірювальне оснащення (важелі) не завжди має передавальне відношення 1:1.

Калібрувальні переміщення надають наконечнику вимірювального оснащення (рис. 3), встановленого в робочому положенні. Таким чином, при калібруванні враховують дійсні передавальні відношення кінематичних ланок (важелів, кареток) вимірювального оснащення.

Процедура калібрування і лінеаризації полягає в тому, що в мікропроцесорний блок вводять задані точки, які визначають «ідеальну» характеристику приладу (в даному випадку лінійну), її діапазон і чутливість відповідно до таблиці 1.

Таблиця 1

Калібрувальні точки

Номер калібр. точки	11	22	33	34	55	66	77	78	79	10	11
Розмір, мкм	-100	-50	-10	0	10	50	100	200	300	400	500

Потім переміщують шток індуктивного перетворювача або наконечник вимірювального оснащення на визначені інтервали і, встановлюючи його в задані точки «ідеальної» характеристики, запам'ятовують в блоці вихідні сигнали перетворювача в кожній точці. Таким чином, вихідна характеристика приладу наближається до заданої (лінійної) характеристики.

Лінеаризація індуктивних перетворювачів може проводитися різними методами, наприклад, методом кусочно-лінійної апроксимації. Для лінеаризації кожного перетворювача вимірювального оснащення, в яке вбудований перетворювач, встановлюють на стійку зі столиком (рис. 3) так, щоб вимірювальному наконечнику можна було задати точні калібрувальні переміщення тонкою подачею столика. Для контролю заданих переміщень на стійку встановлюють цифровий індикатор з дискретністю відліку 0,1 мкм з діапазоном показів не менше 2,0 мм (зазвичай 5 – 20 мм) і з похибкою  $\pm 0,2$  мкм.

Для лінеаризації індуктивного перетворювача необхідно спочатку зняти його характеристику, тобто визначити залежність його вихідного сигналу від переміщення наконечника вимірювальної оснастки. В цьому режимі вихідний сигнал, що надходить безпосередньо з перетворювача через аналого-цифровий перетворювач (АЦП), відображається на дисплеї в умовних одиницях (не в мкм). За плавністю і пропорційністю зміни цього сигналу залежно від переміщення наконечника приладу, який калібрується можна судити про справність та лінійність перетворювача. Крім того, знята характеристика дозволяє визначити положення електричного нуля перетворювача, від якого проводиться калібрування приладу. Це дуже важлива обставина, що дозволяє перевірити справність перетворювача прямо на верстаті і не допускає відходу настройки з робочої ділянки характеристики.

Таким чином, калібрування приладу починають з установки столика стійки, індуктивного перетворювача і цифрового індикатора в нульове положення електричного нуля індуктивного перетворювача за його вихідним сигналом в умовних одиницях. Число точок калібрування вибирається залежно від конструкції перетворювача або вимірювального оснащення, діапазону вимірювання, необхідної точності лінеаризації і точності видачі команд. При зменшенні інтервалів між точками точність лінеаризації підвищується. Тому на точному діапазоні поблизу нуля (від -10 до +50 мкм) точки калібрування слід задавати через менші інтервали.

При використанні недиференціальних перетворювачів, що мають нелінійну

характеристику, призначають більше число точок лінеаризації. Диференціальні перетворювачі досить лінійні на всій робочій ділянці в діапазоні  $\pm 0,5$  мм, і для їх калібрування в більшості випадків достатньо 5 – 7 калібрувальних точок.

Калібрування починається з установки перетворювача за допомогою столика в положення електричного нуля (за вихідним сигналом в умовних одиницях). У цьому положенні встановлюють на нуль зразковий цифровий індикатор 6 (рис. 3). Зазвичай використовується робоча ділянка характеристики приладу активного контролю, що становить 600 – 1000 мкм. Власне діапазон вимірювання приладу коливається від  $-100$  до  $+500$  мкм (точний діапазон: від  $-10$  до  $+50$  мкм). Слід враховувати також можливість коригування нуля ( $\pm 100$  мкм) і збільшити діапазон калібрування на цю величину.

Калібрування починають від першої, наприклад, мінусової точки обраної робочої ділянки характеристики індуктивного перетворювача ( $-100$  мкм). Цю точку встановлюють переміщенням столика (рис. 3) за показами зразкового цифрового індикатора.

У цій точці вводять в пам'ять блоку управління сигнал перетворювача, що відповідає точці  $-100$  мкм (натисканням кнопки «Введення»). Потім послідовно за допомогою столика за показаннями зразкового цифрового індикатора переміщують вимірювальний наконечник приладу на задані калібрувальні інтервали (табл. 1), і в кожній точці вводять в пам'ять блоку вихідний сигнал перетворювача.

Після проходження всіх заданих точок робочої характеристики приладу і запам'ятовування в блоці вихідних сигналів перетворювача, що відповідають цим точкам, прилад має лінійну характеристику із заданою чутливістю в заданому діапазоні вимірювання.

Після проведення калібрування пам'ять блоку автоматично блокується. Калібрування запам'ятовується навіть при виключенні живлення блоку і не може бути змінене без введення пароля.

Точність калібрування (лінеаризації) залежить від точності переміщення вимірювального наконечника засобу, який калібрується на задані інтервали за допомогою столика стійки за показами цифрового індикатора.

**Висновки.** Підвищення точності обробки досягається вдосконаленням технологічних процесів виготовлення деталей і в першу чергу застосуванням прецизійних металорізальних верстатів. Для зменшення похибок вдосконалюють конструкцію верстатів, застосовують кращі за характеристиками матеріали, використовують різні методи компенсації температурних і динамічних похибок. Резервом для підвищення точності металообробних верстатів є і застосування при обробці деталей приладів активного (управляючого) контролю.

В даний час прилади активного контролю не дозволяють в повній мірі здійснити систему автоматичного регулювання (САР) технологічної системи ВПД за вихідним параметром, так як вони передбачають релейне управління шляхом подачі від однієї до шести команд в залежності від величини вимірюваного розміру. Крім того, динамічні властивості стандартних приладів активного контролю не піддаються спеціальним дослідженням.

Таким чином, суттєвим резервом підвищення точності обробки на металообробних верстатах є використання САР за вихідним параметром із застосуванням відповідного приладу активного контролю. При цьому прилад повинен мати аналоговий або дискретний вихід і певні динамічні властивості. Останні визначають динамічні властивості всієї системи ВПД і допустиму похибку. Виконання цих умов вимагає розробок нових приладів активного контролю і дослідження їх динамічних характеристик.

#### Інформаційні джерела

1. Активный контроль размеров / под ред. С.С. Волосова. – М.: Машиностроение, 1984. – 224 с.
2. Активный контроль в машиностроении: справочник / под ред. Е.И. Педа. – М.: Машиностроение, 1978. – 352 с.
3. Денисюк В.Ю. Автоматизоване управління процесами суперфінішного оброблення кілець підшипників / В.Ю. Денисюк, В.П. Симолюк, В.В. Пташенчук / Матеріали Шістнадцятої міжнародної молодіжної науково-технічної конференції «Машинобудування очима молодих:

прогресивні ідеї-наука-виробництво», м. Суми, 26-29 жовтня 2016 р. – Суми: Сумський державний університет, 2016. – С. 8–11.

4. Этингоф М.И. Автоматический размерный контроль на металлорежущих станках: [текст] / М.И. Этингоф – М.: АПР, 2016. – 336 с.

5. Михалевич В.Т. Автоматичне керування точністю оброблення: монографія. / В.Т. Михалевич, В.І. Марчук– Луцьк: РВВ Луцького НТУ, 2013. – 186 с.

**Денисюк В.Ю., к.т.н., Симолюк В.П., к.т.н., Лапченко Ю.С. к.т.н., Новосад Б.И.**  
Луцкий национальный технический университет

### **МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТОЧНОСТИ ПРИБОРОВ АКТИВНОГО КОНТРОЛЯ В ПРОЦЕССЕ ОБРАБОТКИ**

*В статье рассмотрены методы повышения точности размерных параметров деталей путем выявления механизма взаимосвязей конструктивно-технологических особенностей деталей, которые обрабатываются и метрологической точности приборов автоматического управления и контроля процессом металлообработки. Описана методика определения погрешности показаний и других характеристик точности приборов для шлифовальных станков с помощью жесткой стойки, обеспеченной опорным столиком и кронштейном для крепления измерительного средства, которое проверяется и образцового цифрового индикатора, по которому отмечают перемещения столика. Установлено, что существенным резервом повышения точности обработки на металлообрабатывающих станках является использование системы автоматического регулирования по выходным параметрам с применением соответствующего прибора активного контроля. При этом прибор должен иметь аналоговый или дискретный выход и определенные динамические свойства, которые определяют динамические свойства всей системы и допустимую погрешность.*

**Ключевые слова:** активный контроль, наладка, прибор, система, погрешность, измерения, поверка, наконечник, арретирование, точность, калибровки.

**V. Denysiuk, V. Symonyuk, Y. Lapchenko, B. Novosad**  
Lutsk National Technical University

### **METROLOGICAL PROVISION OF ACCURACY OF ACTIVE CONTROL DEVICES IN THE PROCESSING PROCESS**

*The article considers the methods of increasing the accuracy of dimensional parameters of parts by identifying the mechanism of relationships of design and technological features of the parts being processed, and metrological accuracy of automatic control and monitoring of the metalworking process. The method of determining the error of readings and other accuracy characteristics of devices for grinding machines using a rigid rack provided with a support table and a bracket for mounting the measuring instrument under test and an exemplary digital indicator, which indicates the movement of the table. It is established that a significant reserve for improving the accuracy of machining on metalworking machines is the use of an automatic control system for the initial parameter with the use of an appropriate active control device. The device must have an analog or discrete output and certain dynamic properties that determine the dynamic properties of the entire system and the allowable error.*

**Keywords:** active control, debugging, device, system, error, measurement, calibration, tip, locking, accuracy, calibration., abrasive, circulatory motion, trajectory, momentum, load, electromagnet.

УДК 66.078.2

DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2313-5352-2020-16-7>

Кокошко Р.В., Кріль Б.А. к.т.н., Кріль О.В.

Національний університет „Львівська політехніка”

## ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ СТРУКТУРНИХ СХЕМ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ МУЛЬТИКОМПРЕСОРНИМИ УСТАНОВКАМИ ДЛЯ ОДЕРЖАННЯ СТИСНЕНОГО ПОВІТРЯ

*Стиснене повітря є універсальним енергоносієм для живлення різних виконавчих пристроїв в автоматизованих і роботизованих виробництвах. Проте системи для одержання стисненого повітря є одними з найбільших споживачів електричної енергії. Експериментальні дослідження перехідних процесів роботи цих установок потрібні для створення більш ефективних алгоритмів роботи систем керування мультикомпресорними установками. Результати дослідження алгоритмів роботи систем керування мультикомпресорними установками з різними випереджуючими сигналами наводяться в цій статті. Структурна схема керування мультикомпресорною установкою складається з головного вільнопрограмованого логічного контролера, на якому реалізовувались і досліджувались алгоритми керування, та локальних контролерів окремих компресорних агрегатів. Суттєве покращення роботи системи керування мультикомпресорною установкою досягнене при введенні додаткового інформативного сигналу від швидкодійного витратоміра для вимірювання витрати споживаного повітря.*

**Ключові слова:** мультикомпресорна установка; компресорний агрегат; стиснене повітря; вільнопрограмований логічний контролер; частотний привід.

**Вступ.** Стиснене повітря – другий за поширенням після електричного струму енергоносіїв в сучасних промислових виробництвах. Його використовують для приведення в дію різного пресового обладнання для висікання або пресування заготовок та виробів з полімерних та металевих стрічок. Стиснене повітря рухає найрізноманітніші пневматичні виконавчі механізми - пневмоциліндри, запірні і регулюючі клапани та засувки, вібратори. Перевагами таких механізмів є висока швидкодія і великі зусилля при мінімальних розмірах і простоті конструкції. Перераховані пристрої придатні для роботи в вибухонебезпечних середовищах. Стиснене повітря використовують як реагент в технологічних процесах окислення, фракціонування, охолодження, фільтрування, продування, осушування, аерації.

Здебільшого, в кожному з згаданих вище технологічних виробництв застосовується мінімум як два повітряні компресори з середньою споживаною потужністю від 30 до 600 кВт [1,2], або більша їхня кількість. Як правило, на кожному успішно працюючому виробництві періодично проходить модернізація та нарощування виробничих потужностей і зростає споживання стисненого повітря. Це веде за собою збільшення кількості компресорних агрегатів. При застосуванні двох і більше компресорних агрегатів систему називають мультикомпресорною установкою [3].

В результаті модернізації підприємства компресорне обладнання буде складатися з агрегатів різної потужності, моделей різних років випуску і різних виробників. Це не є якимось суттєвим недоліком, оскільки продуктивність таких створених в результаті нарощування виробництва мультикомпресорних установок має гнучко мінятися в залежності від споживання повітря і кількості задіяного технологічного обладнання. Для такої мультикомпресорної установки потрібно задіяти централізовану систему керування і критерієм її ефективності буде мінімізація енергозатрат та зменшення кількості вмикань та вимикань окремих компресорних агрегатів. Важливо виключити можливі моменти втрати керування мультикомпресорною установкою, що призведе до аварійної зупинки окремих технологічних ліній. Процеси втрати керування мультикомпресорною установкою розглянуто в роботі [3].

Витрати за весь час експлуатації компресорного агрегату для одержання стисненого повітря за даними [4] розподіляються наступним чином: витрати на електроенергію - понад 75 %, решту – амортизація та поточне обслуговування. Це свідчить про те, що задача вдосконалення алгоритмів та схем керування мультикомпресорними установками є актуальною і її навіть часткове вирішення зумовить значну економію електроенергії.

Для енергоефективної експлуатації компресорних агрегатів для одержання стисненого повітря застосовують різні методи керування агрегатами і організації їхньої спільної роботи. Один з

найефективніших методів - це підтримання значення тиску стисненого повітря в системі з незначним перевищенням понад значення завдання [1,5]. Проте такий метод керування мультикомпресорною установкою потребує точного регулювання тиску при збуреннях з різними динамічними характеристиками та плавного перемикавання компресорів для зменшення коливань значень тиску в системі.

На сьогоднішній день на тих підприємствах, які широко використовують стиснене повітря як енергоносії, з компресорних агрегатів середньої потужності найчастіше поширені гвинтові компресора [1,2] зі змащенням або без нього, якщо стиснене повітря використовується при безпосередньому контакті з продуктом. Звичним є те, що компресори часто оснащують частотними перетворювачами для плавного регулювання продуктивності. Застосування частотних перетворювачів в мультикомпресорних установках для одержання стисненого повітря забезпечує не тільки підвищення енергоефективності, а також дозволяє плавно регулювати продуктивність з мінімальними коливаннями значення тиску стисненого повітря на виході з системи.

**Постановка проблеми.** Ввід в роботу швидкодіючого преса після технологічної зупинки або коли в виробництві стиснене повітря використовують для охолодження, при вивантаженні продукту чи при підпорі буферної ємності з великим об'ємом, різко зростає миттєва витрата стисненого повітря. Такі процеси на великому виробництві можуть накладатися в часі або проходити окремо. Система керування мультикомпресорною установкою має швидко реагувати на зміну тиску та витрати повітря і утримати значення тиску стисненого повітря в заданих межах. Тому такі системи відносять до систем зі змінним навантаженням, де витрата стисненого повітря за лічені десятки секунд зростає або зменшується в кілька разів. Для прикладу, на рис.1 і рис.2 наведені історичні тренди зміни витрати на пивоварному виробництві. На рис.1 наведений приклад швидкого (більш ніж в два рази) зростання споживання повітря за 2 хв., а на рис.2 – приклад зменшення споживання повітря (теж майже в два рази) за 5 хв.

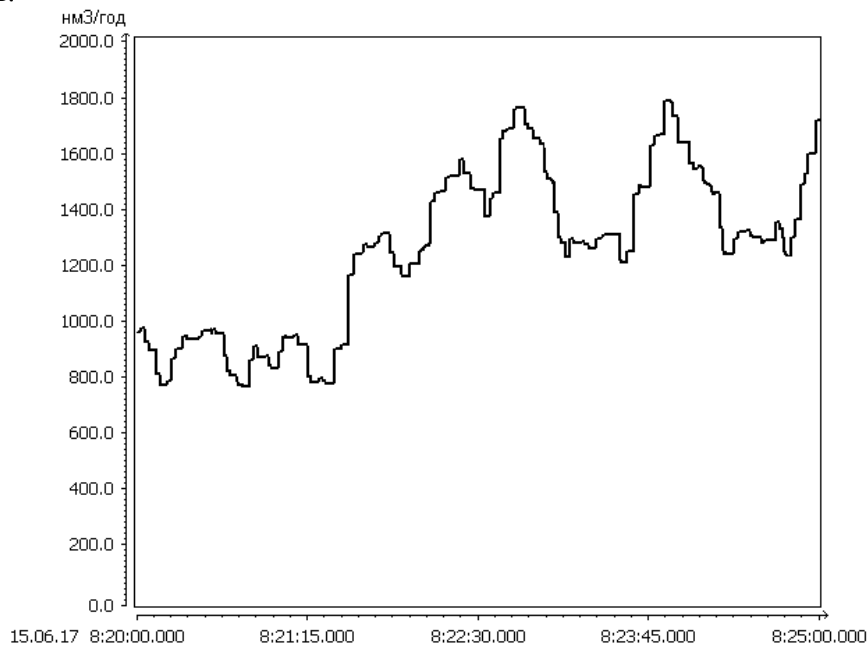


Рис.1. Історичний тренд збільшення споживання повітря на підприємстві ПрАТ «Карлсберг Україна» «Львівська пивоварня».

Якщо ставиться задача по забезпеченню енергоефективної роботи компресорних агрегатів для одержання стисненого повітря в мультикомпресорних установках має застосовуватися головний або центральний контролер, який вибирає компресорні агрегати потрібної продуктивності та вмикає або вимикає їх в потрібні моменти часу для забезпечення стабільного значення тиску стисненого повітря при різких змінах споживання [1,5]. Власне, вибір компресорних агрегатів, керування підготовкою їх до роботи в потрібному завантаженні, вибір моментів запуску чи зупинки, розрахунок завдання для компресорного агрегату, двигун якого живиться від частотного перетворювача входить в перелік складових алгоритму керування мультикомпресорною установкою для одержання стисненого повітря.



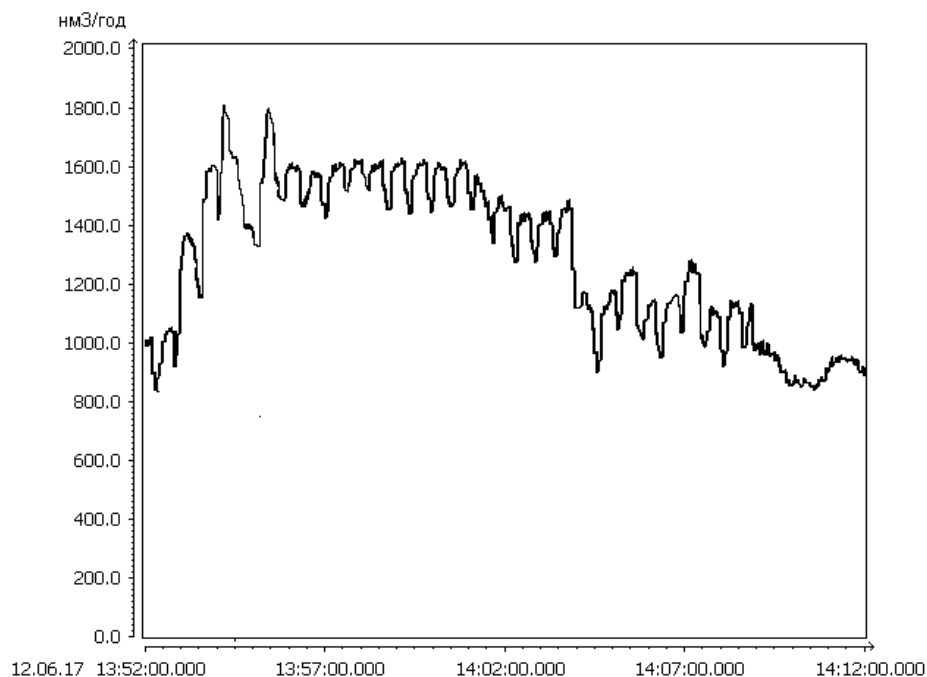


Рис.2. Історичний тренд зменшення споживання повітря на підприємстві ПрАТ «Карлсберг Україна» «Львівська пивоварня».

Найбільше підходять для застосування в якості головного чи центрального контролера вільнопрограмовані логічні контролери. Вони дозволяють підводити до них інформативні сигнали від давачів тиску, температури та витрати, гнучко враховувати особливості задіяних на підприємстві окремих компресорних агрегатів. Збір даних та передача їх на верхній рівень управління від таких контролерів не потребує залучення спеціалістів виробників компресорів або спеціального доступу до локальних контролерів окремих компресорних агрегатів.

Тому формування принципів та алгоритмів керування окремими компресорними агрегатами в мультикомпресорній установці є актуальним і очікувано забезпечить економію електроенергії та зменшить число пусків-зупинок окремих компресорних агрегатів.

**Огляд структурних схем.** Сучасні компресорні агрегати оснащуються індивідуальними системами керування, які керують ними в залежності від фіксованого завдання значення тиску чи завдання тиску в певних межах. Гвинтові компресори мають три режими роботи [1]: завантаження (режим при якому компресор працює і створює заданий тиск в системі), розвантаження (режим при якому компресор працює але не створює тиску в системі) та режим очікування (режим в якому компресор не працює, але очікує сигнал на запуск).

Споживання електроенергії в режимі розвантаження для компресорного агрегату складає 15-35% [3] від споживаної при повній продуктивності, тому довготривала робота агрегату в режимі розвантаження знижує загальну енергоефективність мультикомпресорної установи.

Для керування мультикомпресорною установкою в складі декількох компресорних агрегатів з фіксованою швидкістю обертання приводів застосовують так звану каскадну схему керування. В такій схемі для кожної з індивідуальної системи керування виставляється свій певний діапазон значень тиску, при досягненні яких цей компресорний агрегат вмикається і працює. По досягненні верхнього значення тиску компресорний агрегат переходить в режим розвантаження і, якщо тиск протягом заданого значення часу не зменшується, компресор переходить в режим очікування (див. рис. 3).

Така система керування можлива при застосуванні частотних перетворювачів для живлення двигунів компресорних агрегатів. В цих системах важливо правильно вибрати компресорний агрегат, привід якого буде живитися від частотного перетворювача, оскільки застосовувати частотні перетворювачі для живлення двигунів двох або більше компресорних агрегатів економічно недоцільно. Згідно із дослідженням [3] неправильний вибір компресора зі

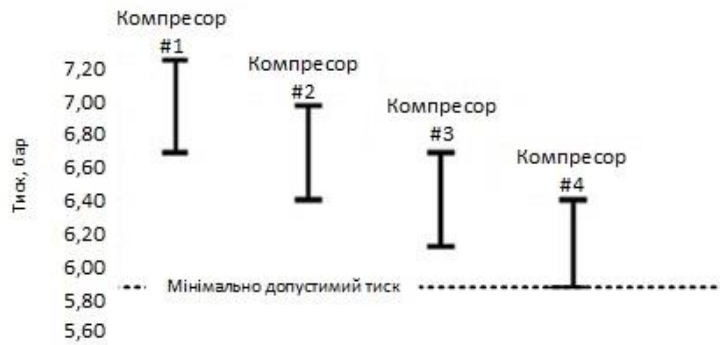


Рис.3. Каскадний алгоритм керування мультикомпресорною установкою з фіксованими швидкостями обертання приводів компресорних агрегатів.

змінним навантаженням призводить до одночасного ввімкнення двох і більше компресорів, при цьому компресорні агрегати з фіксованою швидкістю обертання постійно перемикаються з режиму завантаження в режим розвантаження, а компресор зі змінною швидкістю обертання працює в коливному режимі. Тому компресорний агрегат, який працює зі змінною швидкістю обертання приводу для зміни продуктивності, має забезпечити мінімально необхідну витрату стисненого повітря для підприємства. Це пояснюється тим, що виробники компресорів вказують мінімальну допустиму швидкість обертання двигуна, при якій допускається неперервна робота компресора. При постійній роботі такого компресорного агрегату з частотним перетворювачем на максимальній продуктивності споживання електроенергії буде більшим, ніж для аналогічного компресорного агрегату з фіксованою швидкістю обертання. Це зумовлюється коефіцієнтом корисної дії частотного перетворювача, додатковими втратами на двигуні за рахунок вихрових струмів, причому ці всі втрати часто недооцінюють. За даними [6] для компресорних агрегатів зі змінною швидкістю обертання приводу найбільш ефективна їхня робота досягається в межах до 80% від максимальної продуктивності. При цьому згідно з [5] для компресорів з фіксованою швидкістю обертання найбільш ефективна робота в мультисистемних установках для одержання стисненого повітря забезпечується при роботі в режимі завантаження.

Найпростіша система керування компресорним агрегатом для режиму зі змінним навантаженням на основі вільнопрограмованого логічного контролера з застосуванням частотного перетворювача виглядає так, як це показано на рис. 4.

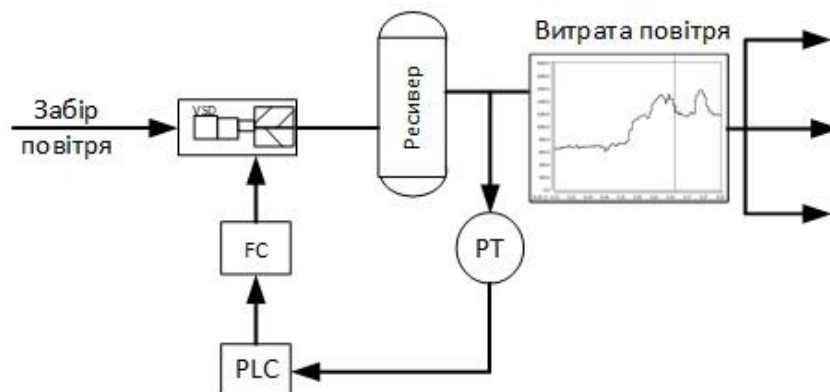


Рис.4. Структурна схема системи регулювання тиску зміною частоти обертання приводу компресорного агрегату, який працює при змінному навантаженні.

Така структурна схема придатна для окремого компресорного агрегату. Якщо ж паралельно з ним буде працювати ще один компресорний агрегат з фіксованою швидкістю обертання приводу, то в моменти ввімкнення та вимкнення або завантаження чи розвантаження буде виникати збурення, з яким PID - регулятор першого агрегату не справиться. Тобто, в моменти нанесення таких збурень доцільно впливати на PID - регулятор шляхом вимкнення I і D складових або зняття частини сигналу на виході регулятора, яку внесли ці складові.

Очевидно, що цю функцію має виконувати центральний чи головний контролер, який буде здійснювати загальне керування мультикомпресорною установкою.

Приклад значних коливань тиску при по касадному ввімкненні компресорних агрегатів з фіксованою швидкістю обертання і роботі компресорного агрегату зі змінним навантаженням на максимальній продуктивності показано на рис. 5.

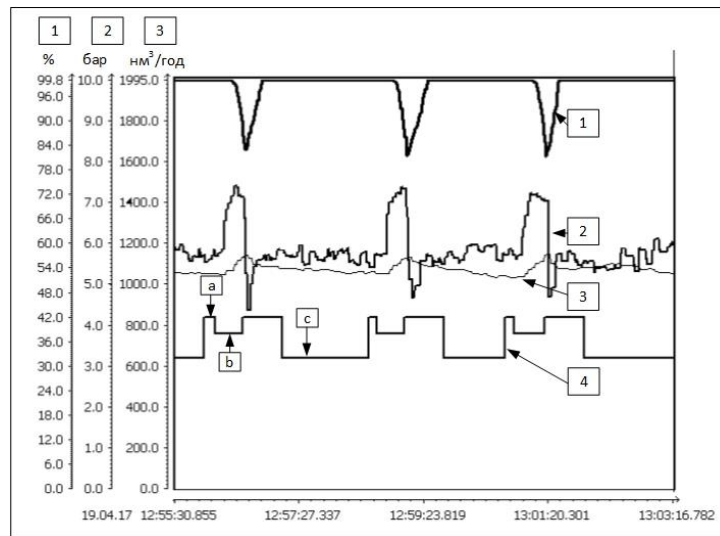


Рис.5. Історичний тренд роботи мультикомпресорної установки для одержання стисненого повітря при застосуванні PID-контролера в системі керування компресором, який працює в режимі зі змінним навантаженням. Де: 1 – завдання частотному перетворювачу з виходу PID-контролера, % ( продуктивність даного компресора 1175 нм<sup>3</sup>/год); 2 – витрата повітря, приведена до нормальних умов, нм<sup>3</sup>/год (вимірюється методом змінного перепаду тисків); 3 – тиск після фільтра, бар; 4 – діаграма роботи компресора з фіксованим навантаженням (а – режим розвантаження, б – режим завантаження, с – режим очікування, компресор не працює).

Як видно з цього тренду, при роботі мультикомпресорної установки виникла втрата керування. В даному прикладі вона полягає в тому, що компресорний агрегат зі змінним навантаженням не встигає відпрацювати збурення, яке створюється при пуску компресора з фіксованим навантаженням. Очевидно, що в цій системі керування краще і ефективніше було б, якщо б компресор з постійною продуктивністю працював в базовому режимі завантаження, а компресорний агрегат зі змінним навантаженням відпрацьовував би всі ці відносно невеликі стрибки витрати. Для цього потрібно вдосконалити алгоритм керування компресором зі змінним навантаженням. Він має мати специфічні особливості в моменти ввімкнення та вимкнення компресора, який працює з постійним навантаженням.

В роботі [7] пропонують змінювати інтегральну складову регулятора в залежності від величини параметру, який регулюється. Не зовсім ясно, як це зробити, оскільки такі регулятори – це регулятори зі змінною структурою та зі змінними параметрами. Для них є чіткі правила для зміни структури та зміни параметрів, наприклад, міняти коефіцієнт підсилення або інтегральну складову можна тільки при переході розузгодження через нульове значення, інакше це буде рівноцінне нанесенню стрибкоподібного збурення і введе систему керування в коливний режим роботи.

Автори роботи [8,9] пропонують застосувати нечітку, так звану fuzzy, логіку для зміни параметрів PID регулятора в залежності від тиску в системі і швидкості його зміни. Але будь-який регулятор, який би мав реалізовувати нечітку логіку – це теж регулятор зі змінною структурою і змінними параметрами. Всі застереження, які описані в попередньому абзаці, справедливі і для цієї реалізації. Подібні алгоритми пропонуються для компресорних установок, що складаються з одного агрегату, хоча немає прикладів їх практичної реалізації і роботи в промислових умовах.

Очевидно, що для керування мультикомпресорною установкою для одержання стисненого повітря в умовах різких змін споживання алгоритми керування мають бути досить

складними і з чітко прописаними правилами зміни продуктивності агрегату зі змінною продуктивністю, порядком ввімкнення та вимкнення агрегатів з постійною продуктивністю, керування режимами завантаження та розвантаження. Однозначно, що з часом, по мірі введення нових додаткових випереджуючих сигналів (наприклад, ще один додатковий сигнал за витратою споживання найбільшого споживача), дослідники будуть їх вдосконалювати.

**Вимоги до систем керування.** При побудові систем керування мультикомпресорними установками для одержання стисненого повітря з застосуванням вільнопрограмованих контролерів в алгоритмі керування необхідно враховувати наступне:

- 1) алгоритм керування має мати змінну структуру та змінні параметри;
- 2) основний алгоритм має бути реалізований на головному вільнопрограмованому логічному контролері; локальні контролери окремих агрегатів мають бути сконфігуровані так, щоб не перешкоджали виконанню основного алгоритму;
- 3) потрібно експериментально визначити час пуску компресора з фіксованим навантаженням;
- 4) встановити час, при якому компресор може працювати в режимі розвантаження, та час переходу в режим завантаження;
- 5) вияснити обмеження по мінімально допустимій швидкості обертання приводу компресорного агрегату, при якій не порушуються режими охолодження та змащування;
- 6) доцільно розширити діапазон зміни частот живлення приводу компресора з частотним приводом до 55-60 Гц;
- 7) основним сигналом для роботи системи керування вважати значення тиску стисненого повітря на виході з ресивера після установки;
- 8) додатковим сигналом прийняти сигнал про значення витрати стисненого повітря на виході з установки.

**Дослідження структурної схеми.** Найчастіше для вимірювання витрати стисненого повітря застосовують витратомір на базі термоанемометричного методу вимірювання, наприклад, . Основним його недоліком є недостатня швидкодія, що обмежує його застосування для одержання додаткового випереджуючого сигналу. Тому додатковий випереджуючий сигнал по зміні витрати повітря, найдоцільніше отримати при вимірюванні споживання стисненого повітря методом змінного перепаду тиску. Основною перевагою його є висока швидкодія, яку ще можна підвищити при застосуванні дифманометра з аналоговою схемою перетворення, оскільки для більшості інтелектуальних дифманометрів мінімальне значення сталої часу є на рівні 1 с. Застосований при введенні додаткового випереджуючого сигналу по витраті витратомір змінного перепаду розрахований на мінімально можливий перепад тиску для мінімізації втрат тиску на звужуючому пристрої. При цьому ми відійшли від обмежень, які диктуються правилами розрахунку стандартних звужуючих пристроїв [10], оскільки облік кількості спожитого повітря – технологічний, а більш важливе призначення цього витратоміра – формування випереджуючого сигналу по витраті для системи керування мультикомпресорною установкою.

З врахуванням результатів попередніх досліджень була розроблена структурна схема системи керування мультикомпресорною установкою для одержання стисненого повітря, в якій вільнопрограмований логічний контролер виконує функцію головного, а локальні контролери систем керування окремих компресорних агрегатів сконфігуровані з максимальним адаптуванням в якості підпорядкованих головному контролеру. Ця структурна схема зображена на рис. 6.

Два компресорні агрегати працюють в режимі з постійною швидкістю обертання приводів, а двигун третього компресорного агрегату живиться від частотного перетворювача. В системі задіяні два інформаційні сигнали: перший - значення тиску в трубопроводі після ресивера, другий – значення витрати в трубопроводі після ресивера.

Розроблена система реалізована на ПрАТ «Карлсберг Україна» «Львівська пивоварня» і досліджувалась з двома алгоритмами роботи. В першому алгоритмі не застосовувався інформаційний сигнал про витрату споживаного повітря. Історичні тренди роботи системи керування відображали стрибки тиску повітря на виході мультикомпресорної установки і один з них вже був наведений вище на рис. 5.

В наступному вдосконаленому алгоритмі роботи системи керування мультикомпресорною установкою був задіяний сигнал про витрату споживаного повітря і

приклад історичного тренду роботи мультикомпресорної установки за цим алгоритмом зображений на рис. 7.

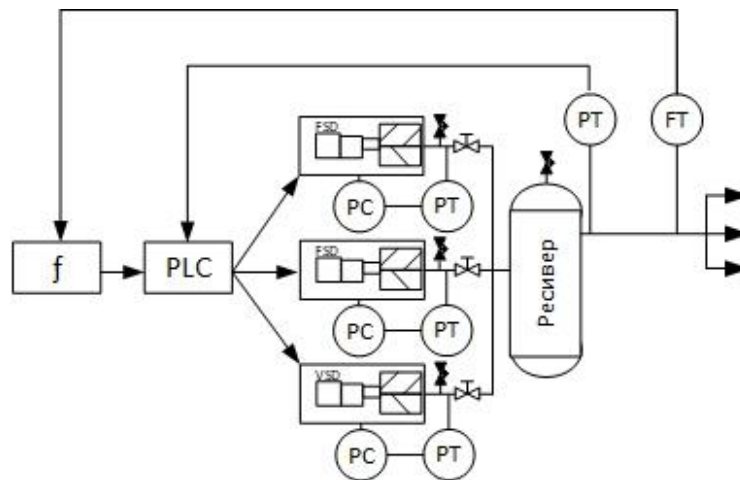


Рис.6. Структурна схема системи керування мультикомпресорною установкою для одержання стисненого повітря із застосуванням окремого головного контролера та додаткового зворотнього зв'язку по витраті. Де: FT – витратомір змінного перепаду тиску; PT – давач тиску; PLC – вільнопрограмований контролер;  $f(x)$  – функція перетворення сигналу по витраті.

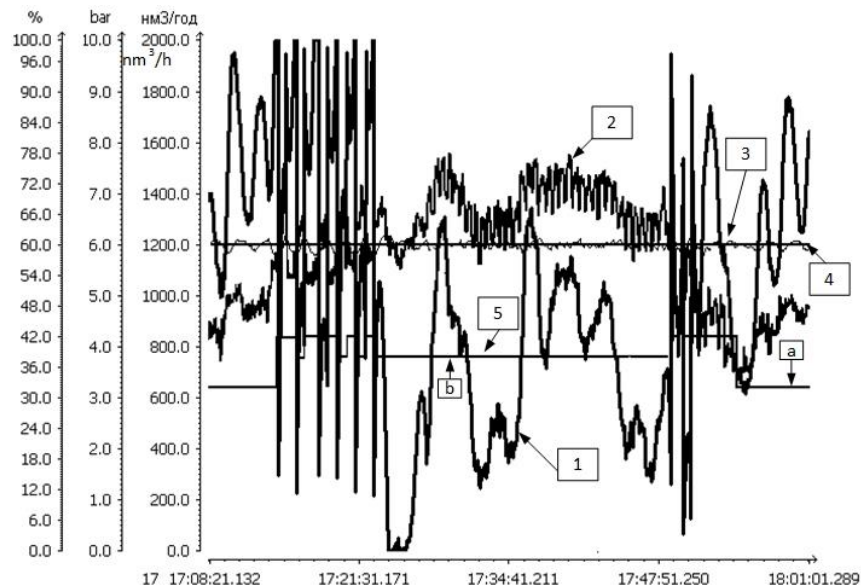


Рис.7. Історичний тренд роботи мультикомпресорної установки для одержання стисненого повітря при застосуванні в системі керування вільно програмованого логічного контролера і з введенням додаткового зворотнього зв'язку по витраті. Де: 1 – завдання частотному перетворювачу з виходу PID-контролера, % (продуктивність даного компресора 1175  $\text{nm}^3/\text{год}$ ); 2 – витрата повітря, приведена до нормальних умов,  $\text{nm}^3/\text{год}$  (вимірюється методом змінного перепаду тисків); 3 – тиск після ресивера, бар; 4 – завдання тиску після ресивера, бар; 5 – діаграма роботи компресора з фіксованим навантаженням (a – режим розвантаження, b – режим завантаження).

Цей тренд підтверджує те, що при введенні додаткового зворотнього зв'язку по витраті повітря, загальному керуванню мультикомпресорною установкою від головного контролера забезпечується точніше підтримання значення тиску повітря на виході з установки при змінному споживанні. Другий алгоритм був впровадженим в діюче виробництво і застосовується на протязі 5 років. Підприємством підтверджені очікувані результати – зменшення енергоспоживання для одержання стисненого повітря та зменшення кількості

ввімкнень та вимкнень компресорних агрегатів, які працюють від приводів з постійною швидкістю обертання, зменшення кількості переводів компресорів з розвантаженого стану в завантажений і навпаки.

Сигнал по витраті споживаного повітря є більш інформативним і завадостійким, в порівнянні з сигналом за зміною тиску. Це можна пояснити наступним чином.

Обробка інформативних сигналів по тиску та по витраті з наступним прийняттям рішення про ввімкнення чи вимкнення компресорних агрегатів, переведення компресорів з розвантаженого стану в завантажений чи навпаки, формування завдання частотному перетворювачу приводу компресора зі змінним завантаженням, зміна структури та параметрів головного регулятора (вимкнення I-складової або скидання наінтегрованого значення вихідного сигналу головного регулятора) полягає в тому, що ці сигнали фільтрують, задають певні мінімальні та максимальні порогові значення, вимірюють зміну їх значень в часі. На сигнал по тиску накладаються пульсації тиску від окремих компресорів, які потрібно профільтрувати, сам ресивер вносить запізнення і зміну тиску з врахуванням потрібної зони нечутливості фіксують з значним запізненням. Для витратоміра споживаного повітря пульсації тиску від окремих компресорних агрегатів є синфазним сигналом і дифманометр на звужуючому пристрої їх не сприймає. Сигнал від витратоміра фільтрується з мінімальною сталою часу, задається швидкість зміни витрати з невеликою зоною нечутливості. Тому рішення про керування окремими компресорними агрегатами можна сформулювати швидше і коректніше.

Підтверджені експериментальні результати та висновки справедливі лише для класичної конфігурації мультикомпресорної установки, тобто, коли послідовно ввімкнені наступні складові: окремі компресорні агрегати; колектор для збору повітря від окремих компресорних агрегатів; ресивер; вихідний трубопровід, на якому встановлені витратомір та давач тиску; гребінка для роздачі повітря до споживачів.

**Висновки.** Сформовані основні принципи побудови алгоритмів систем керування мультикомпресорними установками середньої потужності. Досліджені режими споживання стисненого повітря пивоварним виробництвом. Досліджені тренди роботи системи керування мультикомпресорною установкою при реалізації двох розроблених алгоритмів. Експериментально підтверджено, що застосування додаткового випереджуючого сигналу від швидкодіючого витратоміра, який вимірює споживання стисненого повітря за методом змінного перепаду тиску, дозволяє створювати більш ефективні алгоритми керування мультикомпресорною установкою для одержання стисненого повітря.

#### **Інформаційні джерела**

1. US Department of Energy. Improving compressed system performance: a sourcebook for industry. –Washington : U.S. Department of EERE,2003. – 128 с
2. Brian S. Elliott. (2006) Compressed Air Operations Manual. - McGraw-Hill Education – 2006,407 p.ISBN: 978-0-07-149184-6 MHID: 0-07-149184-8.
3. Neil Mehlretter(2012), “Proper Application of Variable Speed Compressors”. World Energy Engineering Congress,2012 ,999-1015 p.
4. Radgen P. (2006). Mission 6.2: Energy Efficiency, Режим доступу: [http://okolje.arso.gov.si/ipcc/uploads/File/Compressed\\_air\\_en.pdf](http://okolje.arso.gov.si/ipcc/uploads/File/Compressed_air_en.pdf) :[13.04.2019]
5. Don van Ormer (2017) Режим доступу: <https://www.airbestpractices.com/system-assessments/compressor-controls/central-monitoring-and-control-multiple-air-compressors>
6. Energy Efficiency of Compressed Air Systems/ Smaeil Mousavi,Sami Kara, Bernard Kornfeld// 21 st CIRP Conference on Life Cycle Engineering/ Procedia CIRP,2014. – 313-318p.
7. Chunyue PAN(2017) Air Compressor Pressure Control System Based On Gearshift Integral PID Controller. MATEC Web of Conferences 139, 00199 (2017) ICMITE 2017 DOI: 10.1051/mateconf/201713900199 [https://www.matec-conferences.org/articles/mateconf/pdf/2017/53/mateconf\\_icmite2017\\_00199.pdf](https://www.matec-conferences.org/articles/mateconf/pdf/2017/53/mateconf_icmite2017_00199.pdf).
8. Chris Schmidt, Kelly Kissock (2005) Modeling and Simulation of Air Compressor Energy Use. ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Industry,July 19-22, 131 – 142p. <https://aceee.org/files/proceedings/2005/data/index.htm>.
9. J. Javadi Moghaddam, M. Madani (2010) A decoupled adaptive neuro-fuzzy sliding mode control system to control rotating stall and surge in axial compressors Expert Systems with Applications Volume 38, Issue 4, April 2011, Pages 4490-449 <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2010.09.122> .

10. Pistun, Y.; Lesovoi, L.; Matiko, F.; Markovskiy, D & Lesovoi, R. (2007) "RASKHOD-RU" CAD computer programme. Manual. Publishing House of "Institute of Energy Audit and Energy Carrier Accounting" CJSC, Lviv, Режим доступу :<http://www.ieoe.com.ua> [23.03.2020]

**Кокошко Р.В., Криль Б.А. к.т.н., Криль А.В.**

Национальный университет "Львовская политехника"

### **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРНЫХ СХЕМ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ МУЛЬТИКОМПРЕССОРНЫЕ УСТАНОВКАМИ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ СЖАТОГО ВОЗДУХА**

Сжатый воздух является универсальным энергоносителем для питания различных исполнительных устройств в автоматизированных и роботизированных производствах. Однако системы для получения сжатого воздуха являются одними из крупнейших потребителей электроэнергии. Экспериментальные исследования переходных процессов работы этих установок нужны для создания более эффективных алгоритмов работы систем управления мультикомпрессорные установками. Результаты исследования алгоритмов работы систем управления мультикомпрессорные установками с различными опережающими сигналами приводятся в этой статье. Структурная схема управления мультикомпрессорные установкой состоит из главного свободнопрограммируемого логического контроллера, на котором реализовывались и исследовались алгоритмы управления, и локальных контроллеров отдельных компрессорных агрегатов. Существенное улучшение работы системы управления мультикомпрессорные установкой достигнуто при введении дополнительного информативного сигнала от быстродействующего расходомера для измерения расхода потребляемого воздуха.

**Ключевые слова:** мультикомпрессорные установка; компрессорный агрегат; сжатый воздух; свободнопрограммируемый логический контроллер; частотный привод.

**Kokoshko R.V., ph.d. Krill B.A., Krill O.V.**

Lviv Polytechnic National University

### **EXPERIMENTAL STUDY OF THE MULTIPLE-COMPRESSOR CONTROL SYSTEMS STRUCTURAL DIAGRAMS FOR PRODUCING COMPRESSED AIR**

*Compressed air is a versatile energy source for powering various actuators in automated and robotic industries. However, compressed air systems belong to the most energy-consuming equipment category. Experimental studies of the transients of these systems are needed to create more efficient algorithms of the multiple-compressor systems. In this article are given the results of the study of the multiple-compressors control systems algorithms with different leading signals. The block diagram of the multiple-compressors consists of a master programmable logic controller, which implements and investigates control algorithms, and local controllers of individual compressors. A significant improvement the multiple-compressors control system were achieved by introducing an additional informative signal from the air consumption high-speed flow meter.*

**Keywords:** multiple-compressors; compressor; compressed air; programmable logic controller; frequency drive.



УДК 669.295.539.121

DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2313-5352-2020-16-8>

Криницький О.С., Дакус С.В.

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

## УДОСКОНАЛЕНИЙ МЕТОД ТА ПРИСТРІЙ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ЕЛЕКТРОПРОВІДНОСТІ І КОЕФІЦІЄНТА ТЕРМО-ЕРС ДЛЯ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИХ МАТЕРІАЛІВ

**Анотація.** В роботі представлено огляд методів вимірювання електропровідності і коефіцієнта термо-ЕРС для термоелектричних матеріалів. Дані параметри визначають термоелектричну потужність для напівпровідникових матеріалів, які використовують для створення термоелектричних генераторів як альтернативних джерел енергії. Попри простоту методик вимірювання цих параметрів, їх практична реалізація пов'язана зі значними труднощами, що призводить до похибок результатів вимірювання і впливає на оцінку ефективності нових термоелектричних матеріалів. Запропоновано удосконалений метод вимірювання параметрів термоелементів та розроблена конструкція пристрою для його реалізації.

**Ключові слова:** термоелектричні матеріали, електропровідність, коефіцієнт термо-ЕРС, термоелектрична потужність.

**Вступ і постановка задач.** Проблеми, пов'язані з пошуком і створенням альтернативних джерел енергії, є загальновідомими [1]. Пильну увагу дослідників із часу відкриття термоелектричних явищ привертає можливість прямого перетворення значної кількості дармової теплової енергії, що виділяють промислові агрегати, в електричну. Але отримати надійну, економічно вигідну і дешеву систему для перетворення теплової енергії в електричну є надзвичайно складно. Це пов'язано, насамперед, з термоелектричним матеріалом, який повинен бути одночасно добрим провідником електрики, як "електронний метал" і дуже поганим провідником тепла [2], а отримання такого матеріалу має як чисто фізичні, так і технологічні обмеження. Так, зокрема, ефективність термоелектричного перетворення визначається співвідношенням

$$\eta = \frac{T_h - T_c}{T_h} \left( \frac{\sqrt{1 + Z\bar{T}} - 1}{\sqrt{1 + Z\bar{T}} + (T_c / T_h)} \right) \quad (1)$$

де  $T_h$  і  $T_c$  – температури гарячого і холодного кінців термоелемента відповідно,  $T$  – середня температура між  $T_h$  і  $T_c$ ;  $Z = \alpha^2 \sigma / \chi = \alpha^2 / \rho (\chi_l + \chi_e)$  – термоелектрична добротність, де  $\alpha$  – коефіцієнт термо-ЕРС;  $\sigma$  – питома електрична провідність;  $\rho$  – питомий електричний опір;  $\chi$  – теплопровідність (у тому числі  $\chi_l$  – граткова теплопровідність,  $\chi_e$  – електронна теплопровідність).

Більшість сучасних матеріалів мають ефективність термоелектричного перетворення  $\eta$ , яка коливається від 8 до 16% [3]. Зауважимо, що за значенням термоелектричної безрозмірної добротності матеріалів  $ZT \approx 1$ , яка досягається зараз на практиці, коефіцієнт корисної дії  $\eta$  термоелектричного перетворення складає 3%, але цього недостатньо для практичного використання. Якщо б ми мали  $ZT = 2 \div 3$  тоді  $\eta = 20\%$ , то це привело б до різкого зростання їх використання, а за  $ZT = 3 \div 4$  термоелектричні перетворювачі могли б конкурувати зі звичайними електричними генераторами [4]. Виходячи із відзначеного вище, зараз і надалі актуальним залишається створення нових ефективних термоелектричних матеріалів. Для вирішення цього завдання важливу роль відіграють вимірювання термоелектричних властивостей – термо-ЕРС, електропровідності і теплопровідності нових термоелектричних матеріалів. Результати вимірювань повинні бути надійними і досить точними, вимірювання повинні виконуватися в широкому інтервалі температур, в межах яких термоелектричні пристрої застосовуються. Незважаючи на відносну простоту методик вимірювання термоелектричних властивостей матеріалів, їх практична реалізація з урахуванням цих вимог є складним завданням. Наприклад, якщо ми хочемо отримати значення  $ZT$ , із точністю яка становить близько 10%, то нам необхідно, щоб точність визначення термоелектричних коефіцієнтів  $\alpha$ ,  $\sigma$  і  $\chi$  була не нижчою 3%.

**Метою** роботи є систематизація існуючих методів вимірювання електропровідності і коефіцієнта термо-ЕРС та розроблення удосконаленого методу для вимірювання даних параметрів і пристрою для його реалізації.

**Результати роботи.** Розглянуті методи вимірювання  $\sigma$  для виключення впливу термоелектричної складової, в яких можуть використовувати як вимірювання на змінному струмі, так і вимірювання на постійному струмі.

**Двзондовий метод** застосовують для вимірювання питомого опору зразків, які мають правильну геометричну форму (циліндричні, прямокутні і ін.) і сталу площу поперечного перерізу. Для вимірювання на торцях зразка формують омичні контакти, через ці контакти уздовж зразка пропускають електричний струм. На одній із поверхонь уздовж напрямку проходження струму на зразку встановлені контакти у вигляді голок (зонди), які мають малу площу контакту із поверхнею зразка і дозволяють виміряти спад напруги на ньому. Якщо зразок має однорідну структуру, то його електричну провідність можна визначити згідно виразу:

$$\sigma = \frac{IL}{US}, \quad (2)$$

де  $I$  - струм через зразок,  $U$  - спад напруги на зразках,  $L$  - відстань між зондами,  $S$  – площа поперечного перерізу зразка.

Неточне дотримання геометричних розмірів зразка веде до відхилення форми еквіпотенційних поверхонь від плоских поверхонь, паралельних торцевим граням зразка, і виникненню систематичної похибки. Також спотворення форми еквіпотенціальної поверхні може спостерігатися і поблизу омичних контактів, якщо вони неоднорідні за площею.

На контактні метал - напівпровідник при протіканні електричного струму може виникати ряд фізичних ефектів і явищ, які вносять суттєву похибку в результати вимірювань. Основними з них є: інжекція носіїв заряду контактом, що впливає на провідність зразка; ефект Пельтьє, що призводить до виникнення градієнта температури на зразку і певного значення термо-ЕРС; нагрів зразка електричним струмом, що протікає через нього. Щоб зменшити похибки, викликані цими явищами, струм через зразок вибирають якомога меншим, але таким який забезпечує необхідну точність-вимірювання струму і напруги. Торцеві грані зразка шліфуються абразивним порошком, після чого електролітичним методом наносять шар металу. Абразивне оброблення забезпечує зменшення інжекції носіїв заряду.

Схему **однзондового методу** вимірювання можна отримати, спростивши двозондову схему, якщо один із зондів для вимірювання спаду напруги з'єднати із струмовим контактом. Встановлений на поверхні зразка зонд можна зробити рухомим тобто можна змінювати відстань від струмопідвідного контакту до зонда. Якщо провести вимірювання двох спадів напруг на відстанях  $L_1$  і  $L_2$  то величину електропровідності можна визначити згідно формули:

$$\sigma = \frac{I}{S} \frac{L_2 - \varphi(L_1)}{\varphi(L_2) - \varphi(L_1)}. \quad (3)$$

Вплив опору контактів на результати вимірювань електропровідності буде таким самим як і в двозондовому методі.

Розглянутий метод можна використовувати для перевірки однорідності зразка, визначення в неоднорідному зразку залежності електропровідності від його довжини, перевірки омичності контактів [5, 6].

У розглянутих вище методах вимірювання електропровідності, необхідно щоб зразки мали правильну форму, і однакову площу поперечного перерізу по всій довжині, тому було розроблено **чотиризондовий метод**, який позбавлений цих недоліків (рис. 1).

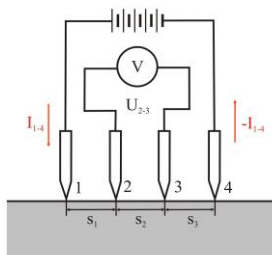


Рис. 1. Схема вимірювання чотиризондовим методом  
При використанні його не потрібно створювати омичні контакти до зразка і можна

вимірювати зразки будь якої форми, єдиною умовою є те, щоб зразок мав хоча б одну плоску поверхню, лінійні розміри якої більші за лінійні розміри системи зондів. Якщо відстані  $s$  між зондами однакові (відхилення може бути до  $\sim 5\%$ ), то формула для визначення питомої електропровідності матиме вигляд:

$$\sigma = \frac{I_{1-4}}{2\pi U_{2-3}s}. \quad (4)$$

Основна похибка при вимірюванні чотиризондовим методом отримується в результаті того, що при виведенні формули для розрахунку питомої електропровідності, передбачалося, що контакт зонда з поверхнею напівпровідника точковий. На практиці ця умова ніколи не виконується, і в результат вимірювання вноситься систематична похибка. Неоднаковість відстані між зондами також впливає на точність вимірювання. Опір між зондом і напівпровідником залежить від площі контакту і з її збільшенням зменшується [7].

Описані вище контактні методи є руйнівними в тому сенсі, що поверхня матеріалу порушується в місцях контакту з зондами і утворюються дефекти. Вимірювальні зонди мають недовгий термін служби. Самі вимірювальні методи мають високу чутливість до поверхні, до матеріалу і геометрії зразка. Цих недоліків позбавлені **високочастотні безконтактні методи вимірювання електропровідності**. Суть яких полягає в оцінці взаємодії напівпровідникового зразка з індуктивним або ємнісним датчиком, включеним в коливальний контур.

Для вимірювання електропровідності індуктивним методом застосовують котушку індуктивності, по якій пропускають змінний струм, а також прилад, що дозволяє визначити значення і фазу цього струму. При вимірюваннях здійснюється індуктивний зв'язок зразка з котушкою. Досліджуваний зразок впливає на електричні параметри котушки індуктивності, в результаті чого струм, який протікає через неї, несе інформацію про властивості зразка.

**Ємнісний метод** реалізується наступним чином, зразок поміщається між двома пластинками, які покриті діелектриком. Зразок із металевою пластиною утворюють ємність  $C_K$ . Якщо контактні ємності однакові то можна представити еквівалентну схему, у вигляді послідовно включеного конденсатора і резистора, роль якого відіграє частина зразка яка знаходиться між пластинками.

Основним недоліком безконтактних високочастотних методів вимірювання питомого опору є велика глибина проникнення високочастотного поля в напівпровідник, що сильно знижує чутливість методу. Крім того, результати вимірювань залежать від конфігурації зразка. Для підвищення чутливості використовують методи надвисоких частот [6].

**Стаціонарні методи (диференціальні)** методи широко застосовуються для вимірювання термо-ЕРС на зразках правильної геометричної форми (прямокутних, циліндричних), перепад температури створюється нагрівачем і зазвичай не перевищує 10-15 К. Коефіцієнт термо-ЕРС визначається як

$$\alpha = \frac{E}{\Delta T}, \quad (5)$$

тобто за вимірюваннями перепаду температури  $\Delta T$  в двох віддалених одна від одної точках зразка, які знаходяться на одній лінії теплового потоку (рис. 2) [8].

У напівпровідникових матеріалах  $\alpha$  зазвичай має величину від декількох одиниць до декількох сотень мікрвольт на градус. Тому величина  $E$  лежить в межах декількох мілівольт, якщо встановити  $\Delta T \sim 5-10$  К. то вимірювання величин такого порядку може бути виконано за допомогою мілівольтметра.

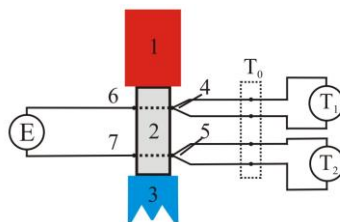


Рис. 2. Схема для вимірювання різниці температур двома диференціальними термопарами і термо-ЕРС зразка зондами: 1 - нагрівач; 2 - зразок; 3 - холодильник; 4,5 - термопари; 6, 7 - зонди.

Значно важче виміряти перепад температури який має значення порядку  $\Delta T \sim 1-5$  К, особливо при середній температурі в кілька сотень градусів, так як вимірювання за допомогою двох термопар дає хороші результати тільки при низьких температурах зразка. Крім того, зміна температурного перепаду в процесі вимірювань істотно впливає на отримані результати [8].

Для вимірювання малих перепадів температур використовують мостовий метод ввімкнення термопар [9], коли вітки термопар з'єднують відповідно зі схемою зрівноваженого моста.

Також для вимірювання перепаду температури на зразку застосовують диференціальне включення вимірювальної термопари (рис. 3). При вимірах зразків з хорошою електропровідністю один із спаїв термопари повинен бути електрично ізольований від зразка і термо-ЕРС можна визначити із співвідношення

$$\alpha = \beta \frac{E}{\Delta E}, \quad (6)$$

де  $\Delta E$  - термо-ЕРС диференціальної термопари  $\Delta E = \beta(T_1 - T_2) = \beta\Delta T$ .

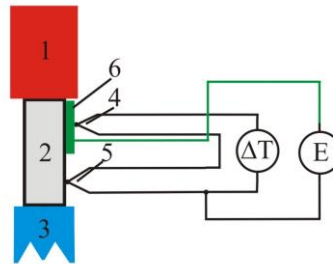


Рис. 3. Схема з диференціальною термопарою: 1 - нагрівач; 2 - зразок; 3 - холодильник; 4,5 - термопари; 6 - електрод з електроізолюваною термопарою

Основною перевагою даного методу є те що перепад температури вимірюється безпосередньо, що знижує похибку визначення  $\alpha$  при високих температурах. Але даний метод має значний недолік це електрична ізоляція одного із спаїв термопари від зразка, якщо дана ізоляція має погану теплопровідність її застосування може внести додаткову похибку при визначенні  $\Delta T$ .

Всі вище описані методики визначення коефіцієнта термо-ЕРС використовують для вимірювання різниці температур, створеної у зразку, термопари. Це зручно і при дотриманні всіх умов їх використання вони забезпечують достатню точність вимірювань, тому при виборі термопари необхідно врахувати її стабільність в діапазоні температур дослідження їх фізичну і хімічну стійкість у робочому середовищі, а також, при вимірах швидко змінних процесів, і їх інерційність. При використанні кількох термопар слід звернути увагу на їхню ідентичність, а також спосіб їх підведення до зразка. Точність вимірювання перепаду температури на зразку визначається не тільки точністю градування термопари, а і тепловим опором між термопарою і зразком, і тепловідводом по термопарним провідникам за рахунок теплопровідності [9,10].

Провівши аналіз представлених вище методів вимірювання запропоновано удосконалений інтегральний метод вимірювання і електропровідності, і термо-ЕРС та розроблено пристрій для визначення цих параметрів (рис. 4).

Вимірювальна установка дозволяє досліджувати температурні залежності термо-ЕРС і питомої електропровідності для напівпровідникових матеріалів в температурному інтервалі від 300 К до 800 К, зразків діаметром 5 мм і висотою 5-10 мм. Зразок поміщається на мідний стрижень і притискається зверху гвинтом для фіксації, також для розміщення термопар у зразку висвердлюються отвори. Для вимірювання електропровідності через мідний стрижень і гвинт подають електричний струм на зразок, а для вимірювання коефіцієнта термо-ЕРС на даний стрижень намотана додаткова піч для створення перепаду температури. Для розігріву зразка щоб вимірювати температурну залежність його параметрів зразок і вимірювальну комірку поміщають у піч, для уникнення сильного окиснення із системи відкачується повітря вакуумним насосом до значення  $10^{-3}$  мм.рт.ст.

Вимірювання коефіцієнта термо-ЕРС  $\alpha$  реалізовано так: на зразку за допомогою нагрівача створюється градієнт температури  $\approx 10$  К, який вимірюється двома термопарами типу хромель-алюмель, а значення термо-ЕРС яке виникає на зразку визначається з використанням однойменних віток термопари. Коефіцієнт термо-ЕРС визначали згідно з формулою:

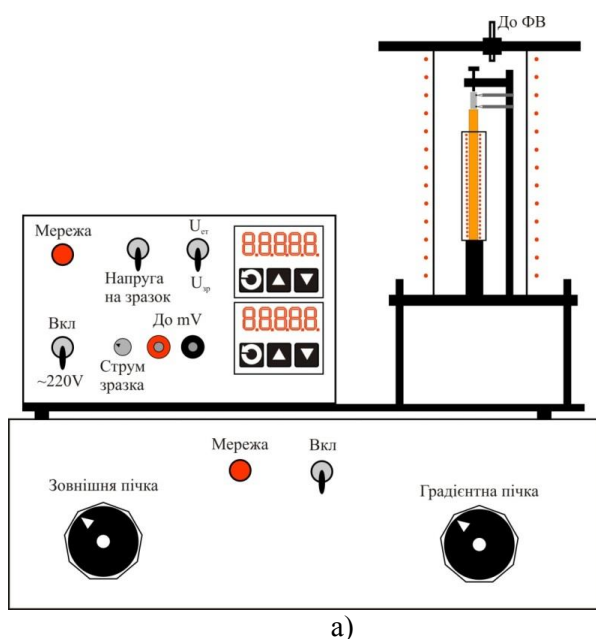
$$\alpha = \frac{U_{\text{ерс}}}{(T_2 - T_1)}, \quad (7)$$

де  $U_{\text{ерс}}$  – термо-ЕРС,  $T_1, T_2$  – температури кінців зразка.

Електропровідність вимірюється наступним чином: через еталонний резистор і зразок пропускають електричний струм. Значення спадів напруг, яке виникає на резисторі і зразку, вимірюють електронним вольтметром із високим входним опором. Щоб уникнути ефекту нагріву зразка під час вимірювання, через нього пропускають змінний струм частотою 50 Гц. В якості зондів для вимірювання спаду напруги на зразку використовують однойменні вітки термопар. Питому електропровідність можна визначити, використовуючи співвідношення:

$$\sigma = \frac{U_{\text{ет}} \cdot l}{U_{\text{зр}} \cdot R_{\text{ет}} \cdot S}. \quad (8)$$

де  $U_{\text{зр}}$  – спад напруги на зразку,  $R_{\text{ет}}$  – опір еталонного резистора,  $S$  – площа поперечного перерізу зразка,  $l$  – відстань між термопарами.



а)



б)



в)

Рис. 4. Загигляд пристрою для вимірювання коефіцієнта термо-ЕРС  $\alpha$  та питомої електропровідності  $\sigma$  (а), вимірювальна комірка (б), кріплення зразка в пристрої (в).

Як показали випробування виготовленого дослідного зразка, пристрій дозволяє вимірювати коефіцієнт термо-ЕРС із відносною похибкою 3% та питому електропровідність - з похибкою 2,5%, що свідчить про доцільність використання даного методу вимірювання параметрів термоелементів.

#### Висновки.

1. В даній роботі проведено огляд існуючих методів вимірювання коефіцієнта термо-ЕРС та питомої електропровідності для напівпровідникових матеріалів, проведено їхню метрологічну оцінку. Запропоновано удосконалений інтегральний метод визначення параметрів термоелементів, в якому відсутні недоліки проаналізованих методів

2. Розроблено пристрій, який дозволяє із більшою точністю і у широкому діапазоні термоелектричних матеріалів оцінити їх коефіцієнт термо-ЕРС та питому електропровідність

#### Література

1. Фреїк Д.М., Никируй Л.І., Криницький О.С. Досягнення і проблеми термоелектрики 1. Історичні аспекти (Огляд) // Фізика і хімія твердого тіла – 2012 – Т. 13, №2 – С. 297-318.
2. Фреїк Д.М., Лоп'янка М.А. Наноструктуровані термоелектричні матеріали: проблеми,



технології, властивості (огляд) // Фізика і хімія твердого тіла – 2013 – Т. 14, №2 – С. 280-299.

3. Liu W., Yan X., Chen G., Ren Z., Recent advances in thermoelectric nanocomposites // Nano Energy – 2012 – Vol. 1, Is. 1 – P.42-56.

4. Фреїк Д.М., Никируй Л.І., Галушак М.О., Матеїк Г.Д., Досягнення і проблеми термоелектрики II. Основні положення теорії термоелектричних явищ (огляд) // Фізика і хімія твердого тіла – 2012 – Т. 13, №3 – С. 574-585.

5. Horst C., Tetsuya S., Leslie S. (Eds.) Springer Handbook of Materials Measurement Methods / Springer Science, Business Media, Inc., 2006. P.1209.

6. Burkov A.T. Measurements of resistivity and thermopower: principles and practical realization // Thermoelectric Handbook: Macro to Nano / Ed. D.M. Rowe. London-NY: CRC Press, 2006. P. 22-1-12 .

7 Bowler N. Theory of four-point direct-current potential drop measurements on a metal plate // Research in Nondestructive Evaluation. 2006. V. 17. N 1. P. 29–48.

8. Анатичук Л.И., Термоелектричество. Том II. Фізика термоелектричества / Л.И. Анатичук, Киев, Черновці: Інститут термоелектричества, 2008. – С.388.

9. D.M. Rowe, Thermoelectrics Handbook: Macro to Nano CRC, Boca Raton, FL, 2005, p. 1014.

10. Doebelin Ernest O. Measurement systems: application and design / Ernest O. Doebelin. – 5th ed. 1065p. 2004

**Криницький А.С., Дакус С.В.**

Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа

#### **УСОВЕРШЕНСТВОВАННЫЙ МЕТОД И УСТРОЙСТВО ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ И КОЭФФИЦИЕНТА ТЕРМО-ЭДС ДЛЯ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ**

*Представлен обзор методов измерения электропроводности и коэффициента термо-ЭДС для массивных термоелектрических материалов. Данные параметры определяют термоелектрическую мощность  $\alpha^2\sigma$  для полупроводниковых материалов используемых для создания термоелектрических генераторов. Несмотря на простоту методик измерения этих параметров их практическая реализация, связанная со значительными трудностями, это приводит к погрешностям результатов измерения, влияет на оценку эффективности новых термоелектрических материалов. В обзоре проанализированы метрологические характеристики термоелектрических параметров, принципы их экспериментального определения. Предложен усовершенствованный метод измерения параметров термоэлементов и разработана конструкция устройства для его реализации*

**Ключевые слова:** термоелектрические материалы, электропроводность, коэффициент термо-ЭДС, термоелектрическая мощность.

**Krynytsky O.S., Dakus S.V.**

Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas

#### **ADVANCED METHOD AND DEVICE FOR MEASUREMENT OF ELECTRICAL CONDUCTIVITY AND THERMO-EMF COEFFICIENT FOR THERMOELECTRIC MATERIALS**

*The review of methods of measurement of electrical conductivity and thermoelectric coefficient for bulk thermoelectric materials. These parameters determine the thermoelectric power  $\alpha^2\sigma$  for semiconductor materials are used to create thermoelectric generators. Despite the simplicity of the methods of measuring these parameters of their practical implementation associated with considerable difficulties, this leads to errors in measurement results that affect the assessment of the effectiveness of new thermoelectric materials. The review analyzes the metrological characteristics of thermoelectric parameters, principles of experimental determination. An improved method for measuring the parameters of thermocouples is proposed and the design of the device for its implementation is developed*

**Keywords:** thermoelectric materials, electrical conductivity, thermo-EMF coefficient, thermoelectric power.

УДК 620.179:681.121

DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2313-5352-2020-16-9>

Малісевич Н., аспірантка, Середюк О. Є., д.т.н.

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

МОДЕЛЮВАННЯ ВПЛИВУ ТЕПЛОТИ ЗГОРЯННЯ ПРИРОДНОГО ГАЗУ НА  
ВИМІРЮВАННЯ ЙОГО ВИТРАТИ ТОРЦЕВИМИ СОПЛАМИ

***Анотація.** Проведено аналіз відомих нормативних документів і технічних рішень для визначення теплоти згоряння природного газу. Охарактеризовано патентозахищений метод і алгоритм контролю теплоти згоряння, який базується на вимірювання температури спалювання газу за умови вимірювання витрати природного газу за допомогою спеціальних звужувальних пристроїв – торцевих сопел. З використанням комп'ютерного моделювання досліджено взаємозв'язок фізичних характеристик і компонентного складу природного газу з його теплотою згоряння за умови вимірювання витрати газу торцевими соплами. Отримані алгоритмічні залежності між теплотою згоряння природного газу і його коефіцієнтом стисливості, який визначається впливом густини газу і вмісту негорючих компонентів. Кількісно оцінено вплив зміни густини природного газу на коефіцієнт стисливості і теплоту згоряння газу порівняно із зміною вмісту азоту і вуглекислого газу. Досліджено вплив густини газу і вмісту азоту на показник адіабати і коефіцієнт розширення газу при вимірюванні витрати торцевим соплом пальника. Результати моделювання дозволили запропонувати ітераційно-експериментальний метод розрахунку теплоти згоряння природного газу при його експериментальному визначенню без безпосереднього вимірювання густини газу.*

**Ключові слова:** природний газ, теплота згоряння, торцеве сопло, витрата, коефіцієнт стисливості, коефіцієнт розширення, густина газу, комп'ютерне моделювання.

**Актуальність задачі.** Облік природного газу на сьогоднішній час потребує вдосконалення, що зумовлює необхідність застосування не тільки більш точних засобів вимірювання витрати об'єму газу, але і застосування нових концептуальних підходів у його практичній реалізації. Це стосується здійснення обліку природного газу інформаційно-вимірювальними системами в одиницях енергії, що повинно гармонізуватися з міжнародними підходами [1, 2] і відповідати національному стандарту України [3]. Актуальність вирішення цього питання підкреслюється запровадженням з 1 січня 2020 року нового національного стандарту [4], який регламентує дві системи створення пристроїв перетворення в енергію (ППЕ, термінологія із [4]) облікованого об'єму природного газу. Ці ППЕ формують вхідну інформацію для обчислювача енергії і фактично є складовою частиною інформаційно-вимірювальних систем обліку енергії природного газу.

У першому виді система ППЕ містить засіб визначення теплоти згоряння (ЗВТЗ), який монтований локально та є складовою частиною ППЕ. Ця структура системи містить обчислювач енергії, який може використовувати згенерований сигнал від локально монтованого ЗВТЗ для визначення енергії.

У другому виді система ППЕ не передбачає локального встановлення ЗВТЗ, а передбачає використовувати тільки його вихідний сигнал як від зовнішнього перетворювача системи. При цьому також обчислювач може приймати для визначення енергії фіксоване значення сигналу теплоти згоряння або яке періодично оновлюється.

Таким чином, при вимірюванні енергії природного газу обов'язковим є застосування ЗВТЗ природного газу. Тому актуальним є запровадження ефективних систем контролю якості природного газу, які би характеризувалися не тільки достатньою точністю, але і швидкодією у поєднанні з якомога простішою конструктивною реалізацією. Тому актуальним є розроблення пристроїв для вимірювання і експрес-контролю теплоти згоряння газу, в тому числі, безпосередньо у споживачів.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Згідно із стандартом [3] для визначення теплоти згоряння природного газу можна застосовувати прямі і непрямі методи. Прямі методи передбачають використання засобів вимірювання, за функціонування яких проводять спалювання газу і визначають кількість енергії, що утворилася при цьому. Непрямі методи



передбачають визначення теплоти згоряння природного газу переважно розрахунковими методами при наявній інформації про компонентний склад природного газу. Спалювання газу при цьому відсутнє.

Найбільш поширеним непрямим методом визначення теплоти згоряння природного газу є розрахунковий метод [5, 6], що базується на використанні даних про компонентний склад природного газу, отриманих за допомогою хроматографічного аналізу. Хроматографи в основному є лабораторними засобами і застосовуються у відповідних підрозділах газотранспортних і газопостачальних організацій для періодичного і поточного контролю якості природного газу [7].

Однак застосування хроматографічного методу для визначення теплоти згоряння природного газу не може бути реалізоване при виконанні вимірювань безпосередньо у промислових чи побутових споживачів внаслідок дороговизни і складності технічної реалізації методу.

Вивчення сучасних технічних рішень у сфері вимірювання теплоти згоряння природного газу [8] показало, що наявною є обмежена кількість принципових підходів і схемних рішень для апаратного вимірювання і експрес-контролю якості природного газу безпосередньо у газоспоживачів, серед яких можуть бути конкретизовані патентозахищені рішення [9-11]. Оскільки відсутні дані про метрологічну атестацію дослідного або серійного зразка конкретних вимірювальних засобів на базі будь-якого із зазначених технічних підходів і кожен з них характеризується відповідними перевагами і недоліками, то актуальним є проведення наукових досліджень у сфері практичної реалізації методу експрес-визначення теплоти згоряння природного газу [11], який запропонований авторами даної публікації.

В дослідженнях [12, 13] експериментально підтверджено працездатність запропонованого способу експрес-визначення теплоти згоряння природного газу і визначення умов, за яких відкриваються можливості його практичної реалізації. Водночас деякою складністю практичної реалізації способу є необхідність наявності інформації про густину природного газу. Тут необхідно зауважити, що це не стосується питання хроматографічного аналізу, оскільки при хроматографічному аналізі визначається компонентний склад газу і за його результатами стає можливим визначення теплоти згоряння. Згідно запропонованого нами способу [11] необхідно вимірювати густину газу для розрахунку його витрати через торцеве сопло звукувального пристрою у пальнику, де згорає суміш газу і повітря. Адже, наприклад, зростання густини газу не завжди характеризує зростання його теплоти згоряння, що завжди має місце для суміші вуглеводневих компонент із збільшенням молярної маси. До зростання густини газу також може привести збільшення частки азоту чи вуглекислого газу, які є негорючими компонентами, і за цих умов теплота згоряння буде зменшуватися. Ці фактори безпосередньо також будуть впливати на результати вимірювання витрати газу з використанням спеціальних звукувальних пристроїв (в нашому прикладі торцевих сопел). Тому доцільним є дослідження кореляційних зв'язків між фізичними параметрами природного газу (коефіцієнта стисливості, коефіцієнта розширення, показника адіабати), які впливають на результат вимірювання витрати газу методом змінного перепаду тиску і теплою згоряння досліджуваного газу.

Метою роботи є моделювання впливу теплоти згоряння природного газу на фізичні параметри природного газу які визначають точність вимірювання витрати торцевими соплами при реалізації методу експрес-визначення і контролю теплоти згоряння природного газу.

**Викладення основного матеріалу.** Суть запропонованого способу визначення теплоти згоряння природного газу полягає у використанні інформативного параметра – температури спалювання [11]. При реалізації способу повинно забезпечуватися згоряння суміші заданого об'ємного співвідношення досліджуваного газу із повітрям при застосуванні пальника спеціальної конструкції, у якому використовується торцеве сопло як первинних перетворювач витрати для вимірювання об'ємної витрати спалюваного досліджуваного газу. Реалізація способу передбачає попереднє встановлення градуовальної характеристики засобу вимірювання як функціональної залежності теплоти згоряння природного газу від температури полум'я пальника і витрати досліджуваного газу.

Алгоритм реалізації вимірювального контролю при визначенні теплоти згоряння природного газу на основі розробленої фізичної моделі записується формулою [8]:

$$H_c = \frac{(A \cdot T - B \cdot K_i \cdot \varphi \cdot q_c \cdot \tau)}{q_c \cdot \tau}, \quad (1)$$

де  $H_c$  – нижча теплота згоряння природного газу за стандартних умов, Дж/м<sup>3</sup>;  $A$  – коефіцієнт конструктивного виконання пальника, Дж/К;  $T$  – вимірювана температура полум'я пальника, °С;  $B$  – питома теплота пароутворення води, яка визначається вологістю повітря, яке приймає участь у спалюванні газу, Дж/кг;  $K_i$  – коефіцієнт співвідношення об'ємів повітря і досліджуваного газу у пальнику, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>;  $\varphi$  – абсолютна вологість повітря навколишнього середовища, кг/м<sup>3</sup>;  $q_c$  – об'ємна витрата газу в пальнику за стандартних умов, м<sup>3</sup>/год;  $\tau$  – тривалість пропуску об'єму газу через пальник, с.

Значення коефіцієнта конструктивного виконання пальника  $A$  необхідно визначити експериментальним методом під час попереднього калібрування пристрою експрес-визначення теплоти згоряння природного газу щонайменше на трьох його взірцях відомої теплоти згоряння як функцію від робочих параметрів згоряння газу.

Оскільки при спалюванні газу згідно алгоритму (1) необхідне достатньо точне визначення його витрати, то одним із напрямків практичної реалізації може бути застосування первинних перетворювачів з використанням торцевих звужувальних пристроїв (ЗП) [11].

При цьому об'єм природного газу, що проходить через торцевий ЗП, розраховується за формулою:

$$q_c = 5,9736 \cdot 10^{-2} \alpha \varepsilon d^2 K_\varphi \sqrt{\frac{P \Delta p}{\rho_c T K}}, \quad (2)$$

де  $\alpha$  – коефіцієнт витрати ЗП;  $\varepsilon$  – поправний множник на розширення газу при протіканні його через ЗП;  $d$  – діаметр отвору ЗП пальника;  $\Delta p$  – перепад тиску на ЗП;  $\rho_c$  – густина природного газу за стандартних умов;  $K_\varphi$  – коефіцієнт, який враховує вологість природного газу;  $P$ ,  $T$ ,  $K$  – абсолютний тиск, абсолютна температура і коефіцієнт стисливості природного газу за умов ЗП відповідно.

Коефіцієнт витрати  $\alpha$  для ЗП визначається експериментальним шляхом при його індивідуальному градуванні за допомогою еталонного обладнання, наприклад, дзвонової еталонної установки [14].

Із аналізу формули (1) очевидним є вплив витрати  $q_c$ , яка визначається з використанням алгоритму (2). Звідси є очевидним взаємозв'язок між витратою  $q_c$  і змінними параметрами  $\varepsilon$ ,  $\rho_c$ ,  $K$ , які визначаються якісними характеристиками природного газу. При цьому, як наслідок, очевидно є наявність їх впливу на теплоту згоряння природного газу.

Вплив коефіцієнта  $K_\varphi$  на результат вимірювання витрати природного газу викладений в нормативному документі [15]. За умови відносної вологості природного газу менше 10%, що нормується умовами газопостачання споживачів приймається рівним одиниці. Також тут додамо, що вплив вологості природного газу і вологості навколишнього середовища при реалізації алгоритму (1) досліджено нами в [16].

При моделюванні зміни коефіцієнта стисливості використано алгоритм методу його розрахунку NX19мод. [17] за такого діапазону зміни фізичних характеристик і компонентного складу природного газу. При цьому молярна концентрація азоту становить (0,0075÷0,1) у відносних одиницях та вуглекислого газу (0,0005÷0,03) у відносних одиницях, густина газу (0,67÷0,73) кг/м<sup>3</sup> і за таких заданих параметрів потоку газу через ЗП: абсолютний тиск (0,101825÷0,103325) МПа, абсолютна температура (283÷293) К.

Зважаючи на те, що кожен з цих параметрів може змінюватися у вказаних межах для умов функціонування пристрою експрес-вимірювання теплоти згоряння природного газу, необхідно дослідити вплив зміни кожного параметра на коефіцієнт стисливості. На основі проведених розрахунків побудовані графічні залежності зміни коефіцієнта стисливості від кожного вхідного параметра, за умови вибору середнього значення всіх інших вхідних параметрів.

Спочатку проведено моделювання зміни коефіцієнта стисливості від вмісту азоту  $x_{N_2}$  і вуглекислого газу  $x_{CO_2}$  (рис. 1) і від густини природного газу (рис. 2). Для моделювання використовувалася методика NX19мод. [17]. Встановлено суттєво більший вплив зміни густини газу на зміну коефіцієнта стисливості порівняно із зміною вмісту азоту  $x_{N_2}$  і вуглекислого газу

$x_{CO_2}$ . Так при зміні густини на 10%, наприклад від 0,7 до 0,77 кг/м<sup>3</sup> коефіцієнт стисливості змінюється на  $4 \cdot 10^{-6}$ , що становить  $4 \cdot 10^{-4}$ %. Водночас при зміні вмісту азоту на 10%, наприклад від 0,05 до 0,055 відносних одиниць – коефіцієнт стисливості змінюється на  $2 \cdot 10^{-7}$ , що становить  $2 \cdot 10^{-5}$ %. А при зміні вмісту вуглекислого газу на 10%, наприклад від 0,02 до 0,022 відносних одиниць – коефіцієнт стисливості змінюється на  $5 \cdot 10^{-7}$  що становить  $2 \cdot 10^{-5}$ %. Тобто очевидними є практично на порядок більший вплив зміни густини газу на коефіцієнт стисливості, ніж зміни вмісту азоту чи вуглекислого газу.

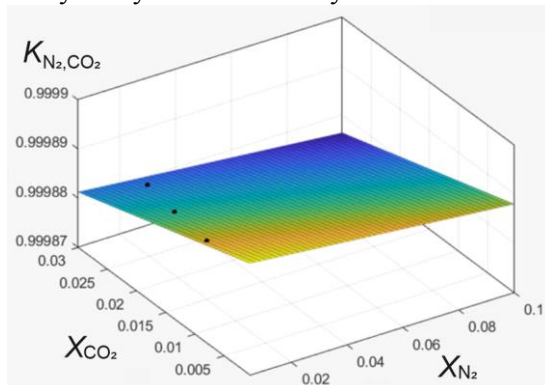


Рис. 1. Результати моделювання вмісту азоту і вуглекислого газу на коефіцієнт стисливості природного газу

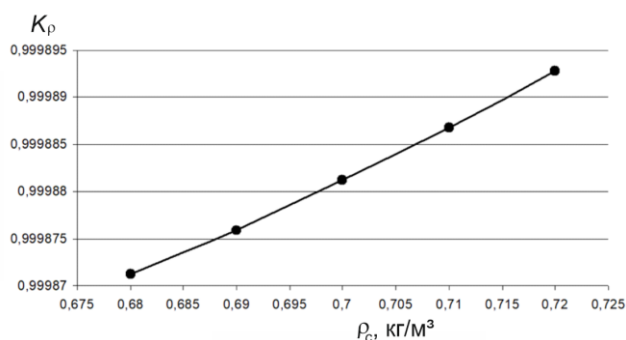


Рис. 2. Результати моделювання густини природного газу на його коефіцієнт стисливості

За результатами моделювання отримані такі апроксимаційні залежності зміни коефіцієнта стисливості від досліджуваних параметрів:

$$K_{N_2, CO_2} = 0,9999 - 5,143 \cdot 10^{-5} \cdot x_{N_2} - 0,0003921 \cdot x_{CO_2}; \quad (3)$$

$$K_{\rho} = 0,0021 \cdot \rho_c^2 - 0,0024 \cdot \rho_c + 1,0005. \quad (4)$$

де  $K_{N_2, CO_2}$  – коефіцієнт стисливості при роздільній зміні вмісту азоту і вуглекислого газу;  $K_{\rho}$  – коефіцієнт стисливості при зміні густини газу.

Для аналізованих складів газу здійснювався розрахунок їх нижчої теплоти згорання з використанням формули [6]:

$$H = 85,453 \cdot (0,52190 \cdot \rho_c + 0,04242 - 0,65197 \cdot x_{N_2} - x_{CO_2}). \quad (5)$$

де  $H$  – нижча теплоти згорання за стандартних умов, яка є функцією трьох змінних  $\rho_c$ ,  $x_{N_2}$  і  $x_{CO_2}$ .

Це дало можливість здійснити моделювання закономірностей зміни теплоти згорання  $H$  за умов попередньо вибраних діапазонів зміни параметрів  $x_{N_2}$ ,  $x_{CO_2}$ ,  $\rho_c$ , що відображено на рис. 3, 4.

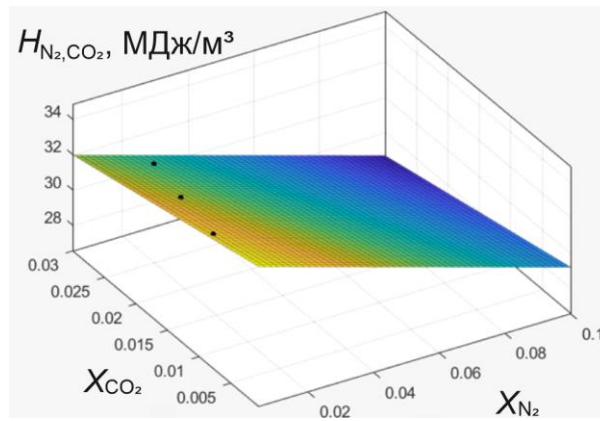


Рис. 3. Результати моделювання вмісту азоту і вуглекислого газу на теплоту згоряння природного газу

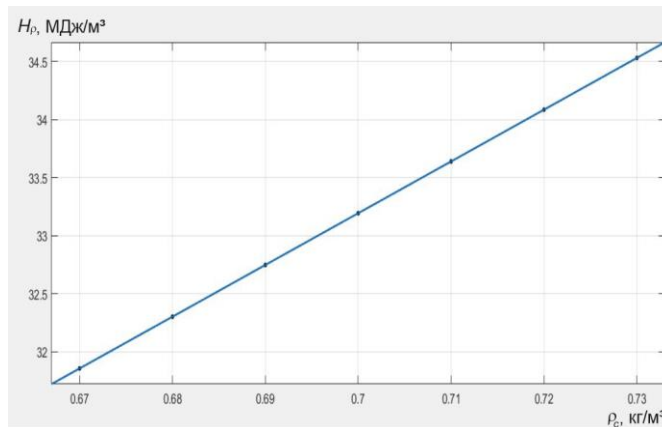


Рис. 4. Результати моделювання густини газу на його теплоту згоряння

Теплота згоряння  $H_{N_2,CO_2}$  моделювалася при змінних  $x_{N_2}$ ,  $x_{CO_2}$  і постійному значенню густини  $\rho_c=0,7$  кг/м<sup>3</sup>, а теплота згоряння  $H_{\rho}$  моделювалася при змінній густині  $\rho_c$  та постійних значеннях  $x_{N_2}=0,05$ ,  $x_{CO_2}=0,015$ .

Отримані результати моделювання не суперечать відомим фізичним закономірностям, тобто із зростанням вмісту азоту і вуглекислого газу відбувається зменшення його теплоти згоряння, а із збільшенням густини відбувається зростання теплоти згоряння. Вплив цих параметрів на зміну теплоти згоряння характеризується різною чутливістю, що можна обчислити з графіків або з отриманих апроксимаційних залежностей:

$$H_{N_2,CO_2} = 34,84 - 55,71 \cdot x_{N_2} - 85,45 \cdot x_{CO_2} \quad (6)$$

$$H_{\rho} = 44,6 \cdot \rho_c + 1,976 \quad (7)$$

Наступним етапом досліджень було встановлення залежності між теплою згоряння і коефіцієнтами стисливості  $K_{\rho}$  і  $K_{N_2,CO_2}$  (рис. 5, 6).

$$H_{N_2,CO_2} = 3,214 \cdot 10^5 \cdot K_{N_2,CO_2} - 3,213 \cdot 10^5 \quad (8)$$

$$H_{\rho} = -5,802 \cdot 10^8 \cdot K_{\rho}^2 + 1,16 \cdot 10^9 \cdot K_{\rho} - 5,802 \cdot 10^8 \quad (9)$$

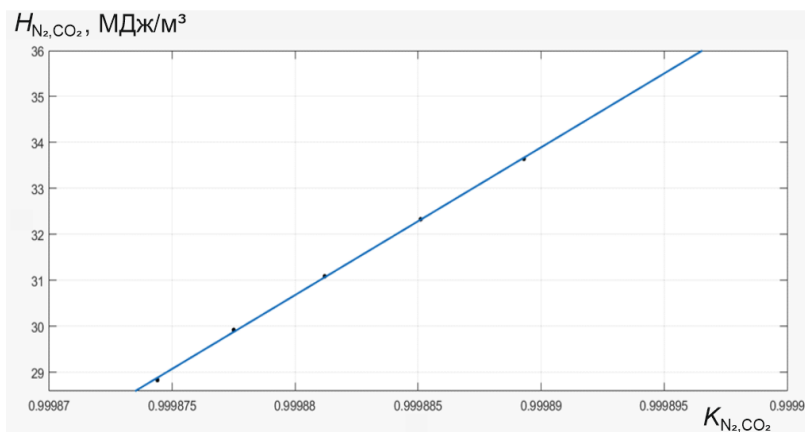


Рис. 5. Графічна ілюстрація взаємозв'язку коефіцієнта стисливості  $K_{N_2,CO_2}$  із теплою згоряння газу

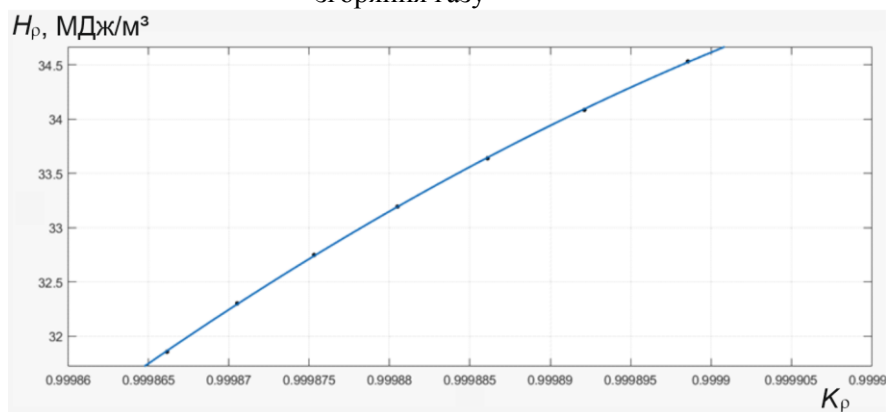


Рис. 6. Графічна ілюстрація взаємозв'язку коефіцієнта стисливості  $K_{\rho}$  газу із його теплою згоряння

Це моделювання також підтверджує про більший вплив на теплоту згоряння зміни складової коефіцієнта стисливості від густини порівняно із складовою коефіцієнта стисливості від вмісту азоту і вуглекислого газу.

Так як впливовими факторами на зміну коефіцієнта стисливості є три параметри, то для ілюстрації об'єднаного впливу здійснено моделювання зміни коефіцієнта стисливості від двох параметрів (густини та суми негорючих складових) (рис. 7), а також аналогічне моделювання теплоти згоряння від цих параметрів (рис. 8).

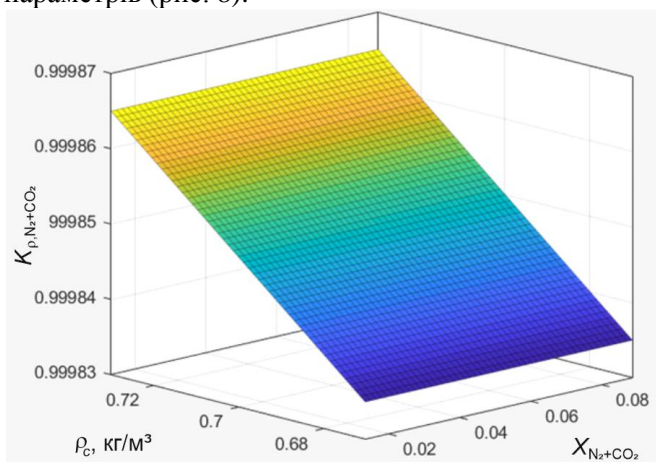


Рис. 7. Результати моделювання вмісту суми негорючих складових і густини газу на його коефіцієнт стисливості

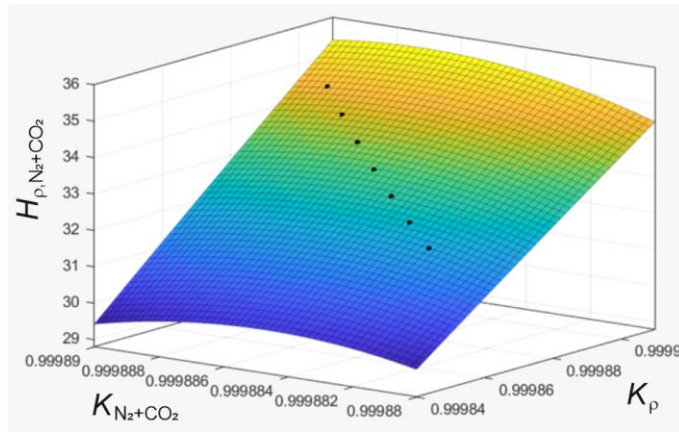


Рис. 8. Результати моделювання двох складових коефіцієнту стисливості (суми негорючих складових і густини газу) на його теплоту згоряння

Ці рисунки також підтверджують про суттєво більший вплив зміни густини як на коефіцієнт стисливості газу так і на його теплоту згоряння порівняно із впливом зміни негорючих компонентів.

Формульне подання отриманих залежностей має вигляд:

$$K_{\rho, N_2+CO_2} = 0,9995 - 3,08 \cdot 10^{-13} \cdot x_{N_2+CO_2} + 0,0005 \cdot \rho_c \quad (10)$$

$$H_{\rho, N_2+CO_2} = \left( \begin{array}{l} -1,864 \cdot 10^{10} - 1,387 \cdot 10^9 \cdot K_{\rho} + 3,868 \cdot 10^{10} \cdot K_{N_2+CO_2} - \\ - 2,684 \cdot 10^7 \cdot K_{\rho}^2 + 1,441 \cdot 10^9 \cdot K_{\rho} \cdot K_{N_2+CO_2} - 2,006 \cdot 10^{10} \cdot K_{N_2+CO_2}^2 \end{array} \right) \quad (11)$$

Враховуючи, що в формулі (2) витрата  $q_c$  залежить від коефіцієнта розширення робочого середовища (природного газу), то проведено моделювання зміни показника адиабати  $\kappa$  і коефіцієнта розширення  $\varepsilon$ . При цьому використовувався алгоритм:

$$\kappa = \left( \begin{array}{l} 1,556 \cdot (1 + 0,074 \cdot x_{N_2}) - 3,9 \cdot 10^{-4} \cdot T \cdot (1 - 0,68 \cdot x_{N_2}) - 0,208 \cdot \rho_c + \\ + \left( \frac{P}{T} \right)^{1,43} \cdot \left[ 384 \cdot (1 - x_{N_2}) \cdot \left( \frac{P}{T} \right)^{0,8} + 26,4 \cdot x_{N_2} \right] \end{array} \right) \quad (12)$$

$$\varepsilon = \left[ \left( 1 - \frac{\Delta p}{P} \right)^{\frac{2}{\kappa}} \cdot \frac{\kappa}{\kappa - 1} \cdot \frac{1 - \left( 1 - \frac{\Delta p}{P} \right)^{\frac{\kappa - 1}{\kappa}}}{\frac{\Delta p}{P}} \cdot \frac{1 - m^2}{1 - m^2 \cdot \left( 1 - \frac{\Delta p}{P} \right)^{\frac{2}{\kappa}}} \right]^{0,5} \quad (13)$$

де  $m$  – модуль торцевого звукувального пристрою.

Результати моделювання наведені на рис. 9, 10, які показують, що коефіцієнт розширення практично не залежить від показника адиабати і визначається головним чином перепадом тиску на торцевому ЗП, який є розрахованим параметром за результатами вимірювання  $\Delta p, P$ . Тому для умов вимірювання теплоти згоряння природного газу його можна вважати сталим і попередньо розрахованим для певного складу газу з врахуванням фізичних умов функціонування торцевих сопел.

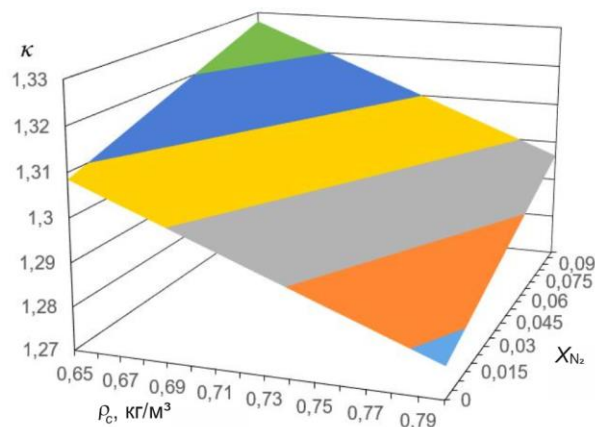
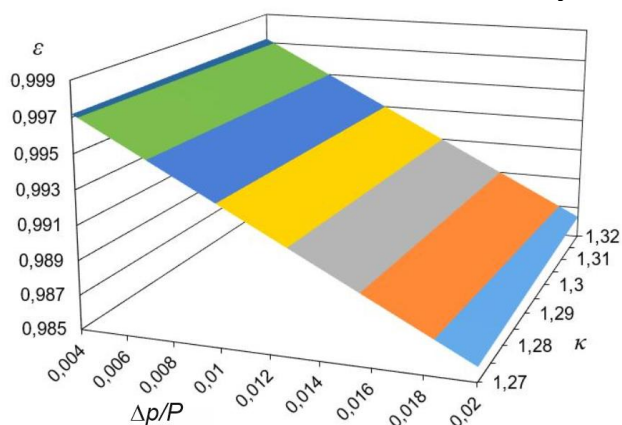


Рис. 9. Результати моделювання показника адиабати від вмісту азоту та густини газу

Рис.10. Результати моделювання коефіцієнта розширення від показника адиабати та відношення  $\Delta p/P$ 

Отримані результати моделювання дозволяють застосувати ітераційний метод при розрахунку теплоти згоряння природного газу. Його реалізація передбачає застосування даних газопостачальної організації про густину і фізичні характеристики природного газу за попередній інформативний період для даного об'єкту газоспоживання, для проведення обчислень по визначенню теплоти згоряння природного газу при першій ітерації. При наступній ітерації враховується взаємозв'язок отриманого першого розрахункового значенням теплоти згоряння з параметрами газу  $\varepsilon$ ,  $\rho_c$  і  $K$ , які враховуються для наступного обчислення витрати і теплоти згоряння. Кількість ітерацій визначається ступенем наближення кожного наступного обчислення до попереднього, що потребує подальших досліджень для практичної реалізації ітераційного методу.

Водночас такий підхід виключає необхідність вимірювання густини природного газу при реалізації способу експрес-вимірювання, що суттєво спрощує його практичну реалізацію. Доцільно тут також зауважити, що ітераційний метод розрахунку потребує практичної апробації з використанням природного газу за різних взірців відомої теплоти згоряння і відомого його компонентного складу для проведення можливої корекції алгоритму ітераційного методу розрахунку. Це буде метою подальших досліджень.

**Висновки.** Проведено аналіз відомих нормативних документів і технічних рішень для визначення теплоти згоряння природного газу. Охарактеризовано патентозахищений метод і алгоритм контролю теплоти згоряння, який базується на вимірювання температури спалювання газу за умови згоряння суміші природного газу і повітря заданого об'ємного співвідношення і вимірювання витрати природного газу за допомогою спеціальних звукувальних пристроїв – торцевих сопел.

З використанням комп'ютерного моделювання досліджено взаємозв'язок фізичних характеристик і компонентного складу природного газу з його теплою згоряння за умови вимірювання витрати газу торцевими соплами. Отримані алгоритмічні залежності між теплою згоряння природного газу і його коефіцієнтом стисливості, який визначається впливом густини газу і вмісту негорючих компонентів. Встановлено на порядок більший вплив



зміни густини природного газу на коефіцієнт стисливості і теплоту згоряння газу порівняно із зміною вмісту азоту і вуглекислого газу.

Досліджено вплив густини газу і вмісту азоту на показник адиабати і коефіцієнт розширення газу при вимірюванні витрати торцевим соплом пальника. Показано, що найбільш суттєвим впливом характеризуються умови функціонування торцевого сопла, які визначаються відношенням перепаду тиску на соплі до абсолютного тиску на його вході.

Результати моделювання дозволили запропонувати ітераційний метод розрахунку теплоти згоряння природного газу при його експериментальному визначенні без безпосереднього вимірювання густини газу на основі попереднього задання значення густини природного газу і врахування впливу параметрів коефіцієнта стисливості і розширення на теплоту згоряння газу.

Подальші дослідження будуть спрямовані на розроблення практичного алгоритму ітераційно-експериментального методу визначення теплоти згоряння природного газу.

### Інформаційні джерела

1. ISO 15112:2007. Natural Gas – Energy determination.
2. EN 1776:2015. Gas infrastructure. Gas measuring systems. Functional requirements.
3. ДСТУ ISO 15112:2009. Природний газ. Визначення енергії: [Чинний від 2011-01-01]. Вид. офіц. Київ: держспоживстандарт України, 2011. 53 с. (Національний стандарт України).
4. ДСТУ EN 12405-2:2018 (EN 12405-2:2012, IDT). Лічильники газу. Пристрої перетворювання. Частина 2. Перетворювання в енергію: [Чинний від 2020-01-01]. Вид. офіц. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2019. 46 с. (Національний стандарт України).
5. ГОСТ 22667-82. Газы горючие природные. Расчетный метод определения теплоты сгорания, относительной плотности и числа Воббе. [Введен с 1983-07-01]. Изд. офиц. Москва : Изд-во стандартов, 2006. 3 с.
6. ГОСТ 30319.1-96. Газ природный. Методы расчета физических свойств. Определение физических свойств природного газа, его компонентов и продуктов его переработки: [Введен с 1997-07-01]. Изд. офиц. Минск, 1996. 21 с. (Межгосударственный стандарт).
7. Як це працює. Енергетичні одиниці замість кубометрів газу (How it works. Energy units instead of cubic meters of gas). *104.ua* : веб-сайт. URL: <https://104.ua/ua/analytics/id/jak-ce-pracjuje.-energetichni-odinici-zamist-kubom-21751> (дата звернення: 27.02.2020).
8. Середюк О.Є., Малісевич Н.М. Аналіз патенто захищених технічних рішень у сфері визначення теплоти згоряння природного газу. *Методи та прилади контролю якості*. 2018. № 1 (40). С. 58-69.
9. Спосіб оперативного визначення теплоти згоряння газоподібних палив / Большаков В.І., Полевий Г.А., Прокопенко П.Г., Жилка О.І. : пат. 84975 С2 Україна. № а200703615; заявл. 02.04.07; опубл. 10.12.08; Бюл. № 23. 4 с.
10. Спосіб експрес-визначення теплоти згоряння природного газу / Карпаш О.М., Дарвай І.Я., Карпаш М.О. [та ін.] : пат. 92846 С2 Україна. № а200905201; заявл. 25.05.09; опубл. 10.12.10, Бюл. № 23. 6 с.
11. Спосіб експрес-визначення теплоти згоряння природного газу / Середюк О.Є., Лютенко Т.В., Малісевич Н.М.: пат. 112737 С2 Україна. № а201512215; заявл. 09.12.2015; опубл. 10.10.2016, Бюл. № 19. 7 с.
12. Середюк О.Є., Малісевич Н.М. Дослідження методичної похибки вимірювання температури полум'я при згоранні природного газу. *Technical using of measurement–2020*: тези доп. VI всеукр. наук.-техн. конф. молодих вчених у царині інформаційно-вимірювальних технологій та метрології, м. Славське, 4-7 лютого 2020 р., Львів: ТЗОВ «Галицька видавнича спілка», 2020. С. 146-149.
13. Малісевич Н.М., Середюк О.Є. Апробація експрес-контролю теплоти згоряння паливних газів за їх температурою при спалюванні. *Прикладні науково-технічні дослідження*. Том 1: тези доп. IV міжнар. наук.-практ. конф., 1-3 квітня 2020 р., Івано-Франківськ: Академія технічних наук України, 2020. С. 97-98.
14. Облік природного газу: довідник / [М.П.Андрішин, О.М.Карпаш, Я.С.Марчук, І.С.Петришин, О.Є.Середюк, С.А.Чеховський]; за ред. С.А.Чеховського. – Івано-Франківськ: ПП «Сімик», 2008. – 180 с.
15. ДСТУ ГОСТ 8.586.2:2009. Метрологія. Вимірювання витрати та кількості рідини й газу із застосуванням стандартних звукувальних пристроїв. Частина 2. Діафрагми. Технічні

вимоги: [Чинний від 2010-04-01]. Вид. офіц. Київ: Держстандарт України, 2009. 92 с. (Державний стандарт України).

16. Середюк О., Малісевич Н. Дослідження впливу конструктивних факторів на технічну реалізацію методу експрес-контролю теплоти згорання природного газу. *Перспективні технології та прилади*. зб. наук. праць. Вип. 15 (грудень, 2019). Луцьк: Луцький НТУ, 2019. С. 81-89.

17. ГОСТ 30319.2-96. Газ природный. Методы расчета физических свойств. Определение коэффициента сжимаемости: [Введен с 1997-07-01]. Изд. офиц. Минск, 1996. 65 с. (Межгосударственный стандарт).

**Н. Малісевич, аспірантка О. Середюк, д.т.н.,**

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

#### **МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕПЛОТЫ СГОРАНИЯ ПРИРОДНОГО ГАЗА НА ИЗМЕРЕНИЕ ЕГО РАСХОДА ТОРЦЕВЫМИ СОПЛАМИ**

*Проведен анализ известных нормативных документов и технических решений для определения теплоты сгорания природного газа. Рассмотрен патентозащищенный метод и алгоритм контроля теплоты сгорания, базирующийся на измерении температуры сжигания газа при измерении расхода природного газа с помощью специальных сужающих устройств – торцевых сопел. С использованием компьютерного моделирования исследована взаимосвязь физических характеристик и компонентного состава природного газа с его теплотой сгорания при измерении расхода газа торцевыми соплами. Получены алгоритмические зависимости между теплотой сгорания природного газа и его коэффициентом сжимаемости, который определяется влиянием плотности газа и содержания негорючих компонент. Количественно оценено влияние изменения плотности природного газа на коэффициент сжимаемости и теплоту сгорания газа с учетом изменения содержания азота и углекислого газа. Исследовано влияние плотности газа и содержания азота на показатель адиабаты и коэффициент расширения газа при измерении расхода торцевым соплом горелки. Результаты моделирования позволили предложить итерационно-экспериментальный метод расчета теплоты сгорания природного газа при его экспериментальному определению без непосредственного измерения плотности газа.*

**Ключевые слова:** природный газ, теплота сгорания, торцевое сопло, расход, коэффициент сжимаемости, коэффициент расширения, плотность газа, компьютерное моделирование.

**N. Malisevich, PhD student, O. Serediuk, Doctor of Technical Sciences**

Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas

#### **SIMULATION OF THE INFLUENCE OF NATURAL GAS COMBUSTION HEAT ON THE MEASUREMENT OF ITS CONSUMPTION BY END NOZZLES**

*The analysis of known normative documents and technical decisions for determination of heat of combustion of natural gas is carried out. The patent-protected method and algorithm of combustion heat control are described, which is based on measuring the combustion temperature of gas under the condition of measuring the consumption of natural gas with the help of special narrowing devices - end nozzles. Using computer simulations, the relationship between the physical characteristics and component composition of natural gas with its heat of combustion under the condition of measuring gas flow with end nozzles was studied. Algorithmic dependences between the heat of combustion of natural gas and its compressibility coefficient, which is determined by the influence of gas density and the content of non-combustible components, are obtained. The influence of changes in the density of natural gas on the coefficient of compressibility and heat of combustion of gas compared with the change in the content of nitrogen and carbon dioxide was quantified. The influence of gas density and nitrogen content on the adiabatic index and the coefficient of gas expansion when measuring the flow with the end nozzle of the burner was studied. The simulation results allowed to propose an iterative-experimental method of calculating the heat of combustion of natural gas in its experimental determination without direct measurement of gas density.*

**Keywords:** natural gas, heat of combustion, end nozzle, flow rate, compressibility coefficient, expansion coefficient, gas density, computer simulation.

© Н. Малісевич, аспірантка, О. Середюк С., д.т.н.

УДК 539.3:620.179

DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2313-5352-2020-16-10>

Мащенко В.А., Одеська державна академія технічного регулювання та якості

Квасніков В.П., Національний авіаційний університет, м. Київ

## ФІЗИЧНІ ПРИНЦИПИ ТА МЕТОДИ ВИМІРЮВАННЯ КОЕФІЦІЄНТА ПУАССОНА В'ЯЗКОПРУЖНИХ ПОЛІМЕРНИХ МАТЕРІАЛІВ

В роботі проведено огляд основних методів (прямий і непрямий методи, метод скінченних елементів, ультразвуковий імерсійний метод) вимірювання комплексного коефіцієнта Пуассона в'язкопружних полімерних матеріалів. Особливу увагу сконцентровано на фізичних принципах поведінки об'єкта і системи вимірювань, реалізації процесу вимірювань для кожного методу, проаналізовано рівень його застосовності та інформативність. У розглянутих методах використовуються різні підходи до вимірювання первинних параметрів, що дає можливість проводити порівняльний аналіз отриманих значень дійсної та уявної частин комплексного коефіцієнта Пуассона та визначати їх достовірність. Проаналізовані джерела похибок при проведенні вимірювань кожним із методів, отриманні співвідношення для оцінки похибок, проведені розрахунки мінімальних та максимальних відносних похибок визначення дійсної та уявної частин комплексного коефіцієнта Пуассона та зроблений їх порівняльний аналіз. Вибір метода вимірювань, в значній мірі, залежить від частотного діапазону збудження деформацій, типу деформацій у зразку полімерного в'язкопружного матеріалу та орієнтовного значення коефіцієнта Пуассона матеріалу.

**Ключові слова:** прямий метод і непрямий методи, метод скінченних елементів, ультразвуковий імерсійний метод, поздовжня та поперечна деформації, похибка вимірювання.

Сучасний розвиток техніки тісно пов'язаний із широким застосуванням в'язкопружних матеріалів (різного типу каучуки, еластомери, тверді конструкційні полімери та полімерні піни) із необхідними механічними характеристиками. В'язкопружність передбачає наявність комплексних динамічних модулів пружності: модуля Юнга ( $E^*$ ), модуля зсуву ( $\mu^*$ ) та модуля об'ємної деформації ( $k^*$ ), а вимірювання величин  $E^*$ ,  $\mu^*$ ,  $k^*$  пов'язані із динамічними навантаженнями зразків полімерних матеріалів. Дисипації енергії в таких випадках можуть бути визначені за зсувом фаз між напругою та деформацією і залежать від частоти та амплітуди напруги зовнішнього збурення, температури та попередньої деформації [1].

Крім динамічних модулів пружності, однією із основних характеристик матеріалів є коефіцієнт Пуассона ( $\nu$ ). Значення  $\nu$  рідко декларуються виробником конструкційних полімерних матеріалів, тому проблема його прямого вимірювання або визначення на основі інших параметрів фактично є досить актуальною.

### Аналіз останніх публікацій

Метод прямих вимірювань та методики визначення комплексного коефіцієнта Пуассона ( $\nu^*$ ) на основі динамічних модулів пружності як функції частоти представлені в роботах [2–5]. Для розглянутих методів у роботі [2] проведений порівнюється аналіз з точки зору точності вимірювань та частотного діапазону. Паралельно розглядається питання визначення коефіцієнта механічних втрат для комплексного коефіцієнта Пуассона як відношення уявної частини до дійсної частини величини  $\nu^*$  [2, 3]. Оцінку похибок методу прямих вимірювань  $\nu^*$  представлено в роботах [3, 4].

Стандарти [6–10] розроблені для визначення динамічних модулів пружності та [6, 9, 10] для визначення коефіцієнта Пуассона в'язкопружних матеріалів, які вважаються нестисливими або нелінійно поведуться при значних статичних деформаціях.

Методи запропоновані в роботах [11–12] подібні за принципом реалізації вимірювань та призначенні для визначення динамічного модуля Юнга. Крім цього дані методи можуть бути використанні для визначення динамічної жорсткості як параметра оцінки коефіцієнта Пуассона зразків в'язкопружних матеріалів.

Інформативними параметрами, які дозволяють визначати механічні характеристики в'язкопружного матеріалу та коефіцієнт Пуассона зокрема, є швидкості поширення ультразвукових (УЗ) коливань різного типу: поздовжніх ( $l$ ) та поперечних ( $t$ ). Імерсійні методи для визначення швидкостей поширення поздовжніх ( $\nu_l$ ) та поперечних ( $\nu_t$ ) УЗ-хвиль в матеріалах та технічні особливості експерименту розглянуті в роботах [13–18].

### Мета роботи

Провести огляд фізичних принципів та експериментальних методів вимірювання коефіцієнта Пуассона в'язкопружних матеріалів. Розглянути фізико-технічні особливості поведінки об'єкта і системи вимірювань при реалізації основних методів, провести порівняльний аналіз основних їх характеристик та оцінити похибки вимірювань.

### Виклад основного матеріалу

Коефіцієнт Пуассона дорівнює відношенню, із знаком мінус, відносної поперечної деформації до відносної поздовжньої деформації при одновісному прямому навантаженню зразка матеріалу. Якщо відносні деформації ( $\varepsilon_x$ ,  $\varepsilon_y$ ) можна описати наступними гармонійними функціями:

$$\varepsilon_x(t) = \hat{\varepsilon}_x e^{i\omega t}; \quad (1)$$

$$\varepsilon_y(t) = \hat{\varepsilon}_y e^{i(\omega t - \delta_v)}, \quad (2)$$

тоді коефіцієнт Пуассона є комплексною величиною і визначається наступним чином [2]:

$$v^*(i\omega) = \frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_x} = \frac{\hat{\varepsilon}_y}{\hat{\varepsilon}_x} (\cos \delta_v - i \sin \delta_v) = v'(\omega) - i v''(\omega), \quad (3)$$

де  $\delta_v$  – кут зсуву фаз між напругою і деформацією;  $v'$ ,  $v''$  – дійсна і уявна частини комплексного коефіцієнта Пуассона;  $\operatorname{tg} \delta_v(\omega) = \frac{v''(\omega)}{v'(\omega)}$ ;  $\omega$  – циклічна частота;  $t$  – час.

### Прямий метод визначення коефіцієнта Пуассона

Прямий метод визначення  $v^*$  базується на збудженні у циліндричному або призматичному зразку вібраційних коливань та вимірюваннях поперечної  $\varepsilon_y$  та поздовжньої  $\varepsilon_x$  відносних деформацій (рис. 1а). Частота збудження вібраційних коливань пов'язана із лінійним розміром зразка, який повинне бути менший за довжину акустичної хвилі, що поширюється у ньому. У такому випадку, зразок матеріалу можна моделювати у вигляді пружини, а межі частотного діапазону можуть перекривати практично увесь звуковий діапазон починаючи від частоти 100 Гц.

Дійсну і уявну частини комплексного  $v^*$  визначають за наступними співвідношеннями:

$$v'(\omega) = \frac{\hat{\varepsilon}_y(\omega)}{\hat{\varepsilon}_x(\omega)} \cos \delta_v(\omega) \approx \frac{\hat{\varepsilon}_y(\omega)}{\hat{\varepsilon}_x(\omega)}; \quad (4)$$

$$\operatorname{tg} \delta_v(\omega) \approx \delta_v(\omega); \quad (5)$$

$$v''(\omega) = v'(\omega) \operatorname{tg} \delta_v(\omega); \quad (6)$$

де  $\delta_v \ll 1$ .

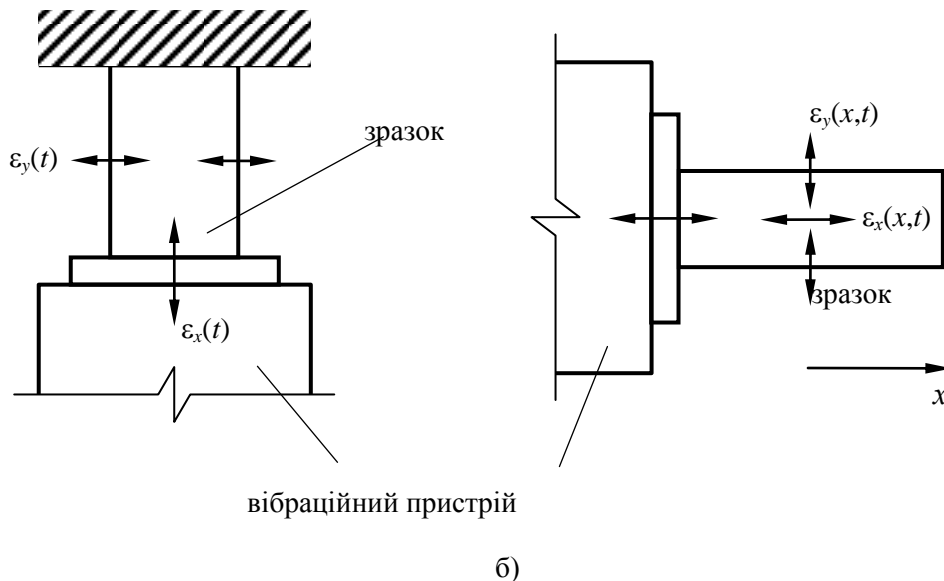


Рис. 1. Пристрої для вимірювання комплексного коефіцієнта Пуассона прямим методом

Верхня межа частотного діапазону залежить від довжини зразка і може досягати 18 кГц для довго стрижня в якому збуджуються осьові вібрації (рис. 2б) [3].

Поздовжні та поперечні деформації у прямому методі вимірюють за допомогою тензодатчиків. Відносні похибки величини  $v'$  залежать від методу обробки сигналів та геометричних розмірів зразків. В роботах [3, 4] значення відносних похибок відповідно дорівнює 13 % та 2,6 %.

### Непрямий метод визначення коефіцієнта Пуассона

Непрямі методи визначення величини  $v^*$  базуються на вимірюваннях двох будь яких комплексних модулів пружності зразків та використанні рівнянь теорії пружності. Для величини  $v^*$  співвідношення між парами модулів пружності ( $k^*$ ,  $\mu^*$ ;  $k^*$ ,  $E^*$ ;  $E^*$ ,  $\mu^*$ ) мають наступний вигляд [2, 5]:

$$v_{k,\mu}^* = \frac{3k^* - 2\mu^*}{6k^* + 2\mu^*}; \quad (7)$$

$$v_{k,E}^* = \frac{1}{2} \left( 1 - \frac{E^*}{3k^*} \right); \quad (8)$$

$$v_{E,\mu}^* = \frac{E^*}{2\mu^*} - 1. \quad (9)$$

Відносні похибки визначення величини  $v^*$  за співвідношеннями (7)–(9) можна оцінити наступним чином:

$$\varepsilon_{v_{k,\mu}^*} = \frac{\Delta v_{k,\mu}^*}{v_{k,\mu}^*} = \frac{\Delta k^* + \Delta \mu^*}{3k^* - 2\mu^*} + \frac{\Delta k^* + \Delta \mu^*}{6k^* + 2\mu^*}; \quad (10)$$

$$\varepsilon_{v_{k,E}^*} = \frac{\Delta v_{k,E}^*}{v_{k,E}^*} = \frac{\Delta E^*}{E^*} + \frac{\Delta k^*}{k^*}; \quad (11)$$

$$\varepsilon_{v_{E,\mu}^*} = \frac{\Delta v_{E,\mu}^*}{v_{E,\mu}^*} = \frac{\Delta E^*}{E^*} + \frac{\Delta \mu^*}{\mu^*}. \quad (12)$$

При вимірюванні модулів пружності методом динамічної в'язкості у діапазоні частот від 10 Гц до 10 кГц відносна похибка ( $\varepsilon_{E^*, \mu^*, k^*}$ ) не буде перевищувати 2,5–3 % [6, 8].

### Визначення коефіцієнта Пуассона з використанням метода скінченних елементів

Використання методу скінченних елементів [9] передбачає, що модуль  $E^*$  досліджуваного матеріалу відомий і отриманий в результаті вимірювань згідно [6–8] або [10]. Практична реалізація методу полягає у побудові теоретичного графіка залежності безрозмірної жорсткості ( $R$ ) від коефіцієнта Пуассона для зразка циліндричної форми і вибору значення  $v'$ , що відповідає динамічній експериментально динамічній жорсткості ( $\tilde{R}$ ) визначеній прямим (рис. 2а) або непрямим (рис. 2б) методами [9].

Значення  $\tilde{R}$  для зразка, який знаходиться під осьовим навантаженням силою  $F$ , визначають наступним чином:

$$\tilde{R} = \frac{Fh}{sE\Delta h}, \quad (13)$$

де  $h$  – висота циліндра,  $s$  – площа основи циліндра,  $\Delta h$  – прогин зразка.

Безрозмірна жорсткість, що визначається співвідношенням (13), є функцією  $\omega$  і може бути отримана безпосередньо вимірюванням динамічної жорсткості ( $S$ ) як відношення сили до деформації:

$$S(\omega) = \frac{F(\omega)}{\Delta h(\omega)}. \quad (14)$$

Прямий метод вимірювань передбачає збудження у зразку випадкових вібраційних коливань. Дані при вимірюваннях  $F(\omega)$  і  $\Delta h(\omega)$  записують і обробляють за допомогою двоканального аналізатора швидкого перетворення Фур'є.

При використанні прямого методу вимірювань  $\tilde{R}(\omega)$  розраховують за співвідношенням:

$$\tilde{R}(\omega) = \frac{S(\omega)h}{sE}. \quad (15)$$

У непрямому методі вимірювань зразок навантажують деякою масою та збудують у ньому вібраційні коливання, а динаміку деформацій визначають за амплітудами коливань поверхонь зразка на основі сигналів із акселерометрів (рис. 2б).

Рівняння руху для непрямого метода буде мати наступний вигляд [11]:

$$-\omega^2 M x_2^* e^{i\omega t} = \frac{sE^*}{h} (x_1 - x_2^*) e^{i\omega t}, \quad (16)$$

де  $M$  – маса навантаження на зразок,  $x_{1,2}$  – амплітуди коливань поверхонь зразка.

Динамічну жорсткість в такому випадку можна визначити наступним чином:

$$S(\omega) = -M\omega^2 Z, \quad (17)$$

де  $Z$  – відношення амплітуд коливань.

Величину  $Z$  можна визначити за наступним співвідношенням [11, 12]:

$$Z = \frac{|x_2^*|}{|x_1^*|} = \frac{|A_0 k_2 e^{i(\omega t - \delta)}|}{|A_0 k_1 e^{i\omega t}|} = \frac{U_2 k_1}{U_1 k_2}, \quad (18)$$

де  $A_0$  – амплітуда вібраційних коливань,  $U_i$  – сигнали із акселерометрів,  $k_i$  – чутливість акселерометрів,  $\delta$  – зсув фаз.

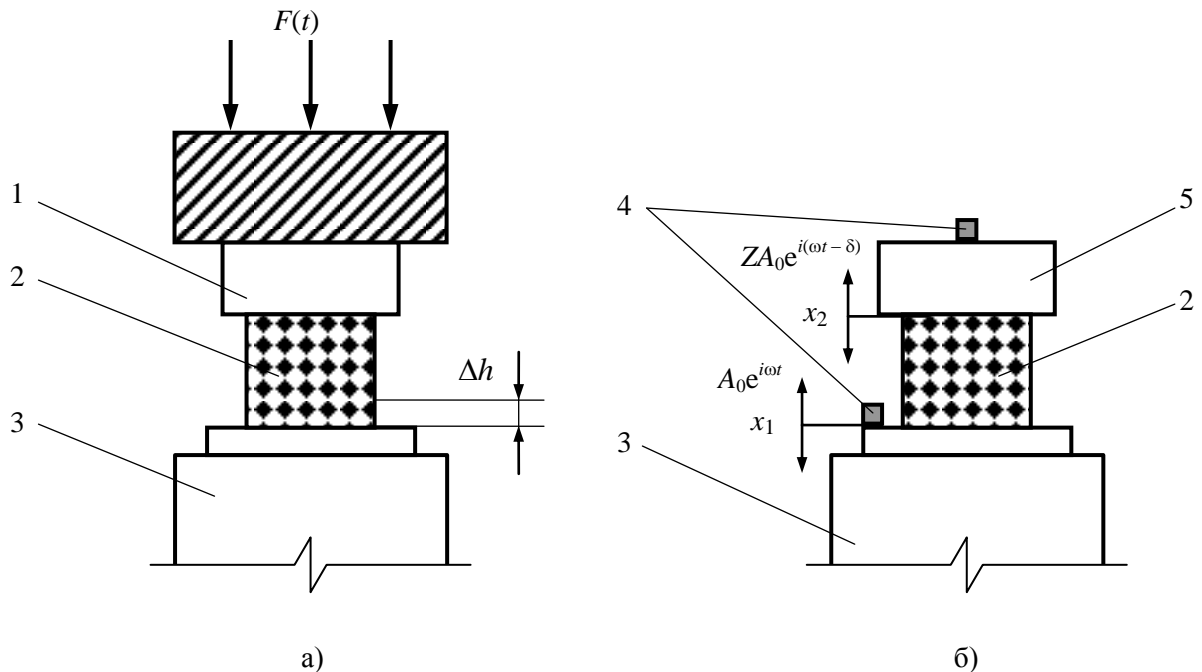


Рис. 2. Пристрої для прямого (а) і непрямого (б) методів вимірювання динамічної жорсткості:

1 – датчик сили, 2 – зразок, 3 – джерело вібраційних коливань, 4 – акселерометри, 5 – маса  $M$ , що навантажує зразок.

Величини  $U_i$  і  $\delta$  визначають експериментально і вимірюють, відповідно, за допомогою цифрового вольтметра та частотоміра [11].

Відносну похибку визначення безрозмірної динамічної жорсткості ( $\varepsilon_{\tilde{R}}$ ) для методу скінченних елементів при прямих і непрямих вимірюваннях можна оцінити відповідно за наступними співвідношеннями:

$$\varepsilon_{\tilde{R}} = \frac{\Delta\tilde{R}}{\tilde{R}} = \frac{\Delta S}{S} + \frac{\Delta h}{h} + \frac{\Delta s}{s} + \varepsilon_E; \quad (19)$$

$$\varepsilon_{\tilde{R}} = \frac{\Delta\tilde{R}}{\tilde{R}} = \frac{\Delta M}{M} + 2 \frac{\Delta\omega}{\omega} + \frac{\Delta Z}{Z} + \frac{\Delta h}{h} + \frac{\Delta s}{s} + \varepsilon_E, \quad (20)$$

де  $\Delta\tilde{R}$  – абсолютна похибка визначення безрозмірної динамічної жорсткості;  $\Delta S$  – абсолютна похибка при визначенні динамічної жорсткості;  $\Delta h$  – абсолютна похибка при вимірюванні

висоти циліндричного зразка;  $\Delta s$  – абсолютна похибка при визначенні площі зразка;  $\Delta M$  – абсолютна похибка при вимірюванні маси;  $\Delta \omega$  – абсолютна похибка при визначенні частоти вібраційних коливань;  $\Delta Z$  – абсолютна похибка визначення відношення сигналів акселерометрів.

**Ультразвуковий імерсійний метод.**

Метод базується на проходженні поздовжніх та поперечних УЗ-хвиль через зразок в'язкопружного полімерного матеріалу, що занурений у імерсійну рідину [13]. Визначення швидкостей  $v_l$  та  $v_t$  проводять на основі порівняння результатів прямих вимірювань часів поширення зондуючого імпульсу через імерсійну рідину при відсутності та наявності зразка полімерного матеріалу між випромінювачем і приймачем УЗ-хвиль. Крім того, при визначенні  $v_t$  використовується метод обертової пластини, який дозволяє визначити критичний кут, при якому поздовжня хвиля, при падінні із рідини на поверхню зразка, трансформується у поверхневу, а у зразку поширюється тільки поперечна хвиля [14].

Коефіцієнт Пуассона при відомих значеннях  $v_l$  та  $v_t$  визначається наступним чином [14, 15]:

$$v' = \frac{2 - \left(\frac{v_l}{v_t}\right)^2}{2 \left(1 - \left(\frac{v_l}{v_t}\right)^2\right)}. \quad (21)$$

Із врахуванням коефіцієнтів поглинання поздовжніх ( $\alpha_l$ ) та поперечних хвиль ( $\alpha_t$ ) у зразку полімерного матеріалу та співвідношення (9), уявну частину комплексного  $v^*$  можна визначити наступним чином:

$$v'' = \frac{v_l^3 \alpha_l (\omega^2 + \alpha_t^2 v_t^2)^2}{2 v_t^3 \alpha_t (\omega^2 + \alpha_l^2 v_l^2)^2} - 1. \quad (22)$$

Відносні похибки визначення дійсної ( $\varepsilon_{v'}$ ) та уявної ( $\varepsilon_{v''}$ ) частин комплексного коефіцієнта Пуассона оцінимо за наступними співвідношеннями:

$$\varepsilon_{v'} = \frac{\Delta v'}{v'} = \frac{\sqrt{\Delta v_l^2 \left(\frac{\partial v'}{\partial v_l}\right)^2 + \Delta v_t^2 \left(\frac{\partial v'}{\partial v_t}\right)^2}}{v'}; \quad (23)$$

$$\varepsilon_{v''} = \frac{\Delta v''}{v''} = \frac{\sqrt{\Delta v_l^2 \left(\frac{\partial v''}{\partial v_l}\right)^2 + \Delta v_t^2 \left(\frac{\partial v''}{\partial v_t}\right)^2 + \Delta \alpha_l^2 \left(\frac{\partial v''}{\partial \alpha_l}\right)^2 + \Delta \alpha_t^2 \left(\frac{\partial v''}{\partial \alpha_t}\right)^2 + \Delta \omega^2 \left(\frac{\partial v''}{\partial \omega}\right)^2}}{v''}, \quad (24)$$

де  $\Delta v'$  – абсолютна похибка визначення дійсної частини комплексного  $v^*$ ;  $\Delta v''$  – абсолютна похибка визначення уявної частини комплексного  $v^*$ ;  $\Delta v_l$  – абсолютна похибка вимірювання поздовжньої хвилі у зразку,  $\Delta v_t$  – абсолютна похибка вимірювання поперечної хвилі у зразку;  $\Delta \alpha_l$  – абсолютна похибка вимірювання коефіцієнту затухання поздовжньої хвилі у зразку;  $\Delta \alpha_t$  – абсолютна похибка вимірювання коефіцієнту затухання поперечної хвилі у зразку;  $\Delta \omega$  – абсолютна похибка частоти УЗ-хвилі;  $\frac{\partial v'}{\partial v_l}, \frac{\partial v'}{\partial v_t}, \frac{\partial v''}{\partial v_l}, \frac{\partial v''}{\partial v_t}, \frac{\partial v''}{\partial \alpha_l}, \frac{\partial v''}{\partial \alpha_t}, \frac{\partial v''}{\partial \omega}$  – відповідні частинні похідні від дійсної та уявної частин комплексного коефіцієнта Пуассона.

Із врахуванням (21) та частинних похідних  $\frac{\partial v'}{\partial v_l}, \frac{\partial v'}{\partial v_t}$  співвідношення (23) запишемо у наступному вигляді:

$$\varepsilon_{v'} = \sqrt{\varepsilon_{v_l}^2 + \varepsilon_{v_t}^2} f(\zeta), \quad (25)$$



де  $f(\xi)$  – функція коефіцієнта Пуассона,  $f(\xi) = \left| \frac{2\xi^2}{(2\xi^2 - 1)(\xi^2 - 1)} \right|$ , причому  $\xi^2 = \frac{2\nu' - 1}{2\nu' - 2}$ ;  $\varepsilon_{\nu'}$  – відносна похибка визначення швидкості поширення поздовжньої хвилі у зразку;  $\varepsilon_{\nu_i}$  – відносна похибка визначення швидкості поширення поперечної хвилі у зразку.

Графік залежності  $\varepsilon_{\nu'}$  від величини  $\nu'$  представлено на рис. 3.

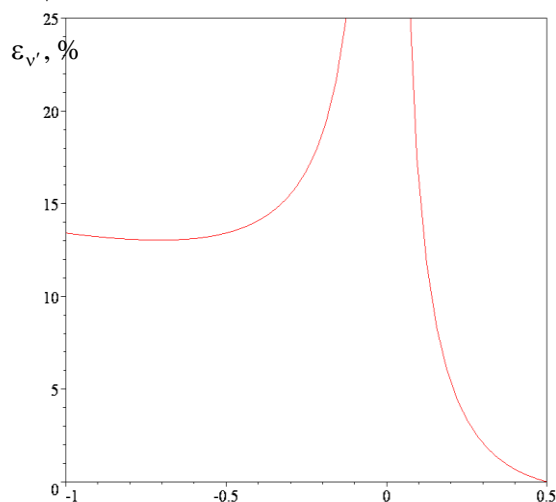


Рис. 3. Графік залежності відносної похибки  $\varepsilon_{\nu'}$  від величини  $\nu'$

### Порівняльний аналіз характеристик методів вимірювання

Основні характеристики розглянутих методів вимірювань коефіцієнта Пуассона представлені в табл. 1.

Величина  $\nu'$  основних твердих конструкційних полімерних знаходиться в діапазоні 0,3–0,5. Для пористих полімерних матеріалів значення  $\nu' \cong 0$ , а для полімерних ауксетиків лежить в межах від  $-1$  до  $0$ . Прямий метод розроблений для вимірювань величини  $\nu' \geq 0$ , але із врахуванням конструктивних особливостей та технічних можливостей приладових систем може бути використаний для пористих полімерних матеріалів та полімерних ауксетиків.

Для непрямого методу динамічні модулі пружності повинні бути визначенні за допомогою стандартного методу динамічної жорсткості або резонансних методів. Конструкції експериментальних комірок для методу динамічної жорсткості розроблялися для визначення комплексних модулів з додатнім значенням  $\nu'$ . Резонансні методи теоретично можуть бути використані при вимірюваннях у всьому діапазоні можливих значень  $\nu'$ .

У методі скінченних елементів для визначення  $S$  прямим методом проводять вимірювання прогину  $\Delta h$  зразка під дією динамічного навантаження, що можливе для полімерних матеріалів із  $\nu' \geq 0,45$ . Відповідно, для зразків матеріалів із  $\nu' = 0,3-0,45$ , пористих полімерних матеріалів та полімерних ауксетиків метод є малоефективним. Для твердих конструкційних полімерів деформація і прогин зразка під дією зовнішньої сили будуть досить малі або взагалі відсутні, а для пористих полімерних матеріалів та полімерних ауксетиків, деформація зразка буде відбуватися і без збудження зовнішніх вібрацій.

Імерсійний УЗ-метод використовують при вимірюваннях для визначення дійсної частини комплексного  $\nu^*$  від  $-1$  до  $0,5$ . При  $\nu' = 0,5$  для абсолютно не стисливого матеріалу повністю відсутні зсувні деформації, а швидкість  $\nu_i$  рівна нулю. Метод також має обмеження для пористих матеріалів по верхній межі частотного діапазону збудження ультразвуку. Якщо розмір пор більший за довжину УЗ-хвилі, то у зразку спостерігається велике поглинання ультразвуку або взагалі його проходження.

Аналіз значень меж частотних діапазонів (табл. 1), при яких проводяться вимірювання, показує, що реалізація жодного із методів неможлива в діапазоні 18–200 кГц. Частотні діапазони прямого і непрямого методів та методу скінченних елементів не перекриваються із частотою УЗ-хвиль. В такому випадку при деформаціях задіяні різні елементи структурної організації полімерних матеріалів, що впливає на релаксаційні процеси під час динамічного навантаження і на вимірювання первинних параметрів.

Таблиця 1

## Порівняльні характеристики методів вимірювання

Характеристика метода	Прямий	Непрямий	Скінченних елементів	Ультразвуковий іммерсійний
Діапазон значень коефіцієнта Пуассона	$\nu' \geq 0$	$0 \leq \nu' < 0,5$	$\nu' \geq 0,45$	$-1 \leq \nu' < 0,5$
Діапазон частот, КГц	0,1–18	0,01–10	0,1–10	200–50000
Тип деформації	динамічна поздовжня та поперечна	поздовжня, поперечна, всебічний стиск	динамічна поздовжня та поперечна	пружні деформації під дією УЗ-хвиль
Попереднє навантаження	ні	так	так / ні	ні
Джерела похибок	методи обробки сигналів, геометричні розміри зразків	помилки у виготовленні зразка, невірний вибір геометрії зразка	помилки у виготовленні зразка, невірний вибір геометрії зразка, великий зсув фаз між каналами вимірювання сили і деформації, невірне калібрування датчиків	різниця між швидкостями поширення поздовжніх та поперечних хвиль у зразку та швидкістю ультразвуку у іммерсійній рідині
Відносна похибка $\varepsilon_{\nu'}$ , %	2,6; 13	5–6	$\geq 2,6$ $\geq 2,7-3,7$	0,3–15,5
Відносна похибка $\varepsilon_{\nu''}$ , %		5–6		$\leq 10$

Оцінки відносних похибок для непрямого методу за співвідношеннями (7)–(9) показують, що їх величини лежать у діапазоні значень 5–6 %, при цьому мінімальне (максимальне) значення може зменшуватися (збільшуватися) на 0,25 % при вимірюваннях та визначенні модулів  $k^*$ ,  $\mu^*$ .

Для методу скінченних елементів мінімальна відносна похибка оцінена за співвідношенням (19), без внеску  $\frac{\Delta S}{S}$ , рівна 2,6 %. Оцінки величини  $\varepsilon_{\nu'}$  за співвідношенням

(20), без внеску  $\frac{\Delta Z}{Z}$ , дають значення в межах 2,7–3,7 %, при цьому вважали, що  $\frac{\Delta M}{M} \leq 0,1$  %;

$$\frac{\Delta h}{h} \leq 0,1 \text{ \%}; \quad \frac{\Delta s}{s} \leq 0,02 \text{ \%}; \quad \frac{\Delta \omega}{\omega} = 0,01-0,5 \text{ \%}.$$

Для іммерсійного УЗ-методу в діапазоні значень  $0,3 \leq \nu' < 0,45$  відносна похибка оцінена за співвідношенням (25) рівна 0,3–2,1 %. Для коефіцієнта Пуассона полімерних ауксетиків прийнятною похибкою можна вважати величину  $\varepsilon_{\nu'} = 15,5$  %, що відповідає  $\nu' = -0,3$ . Із зменшенням величини  $\nu'$  до  $-1$  відносна похибка не буде перевищувати вказане значення  $\varepsilon_{\nu'}$ . Для  $\nu''$  оцінка відносної похибки за співвідношенням (24) показує, що  $\varepsilon_{\nu''}$  не перевищує 10 %,

при цьому відносні похибки відповідних величин рівні:  $\frac{\Delta v_t}{v_t} = 1\%$ ;  $\frac{\Delta v_t}{v_t} = 0,5\%$ ;  $\frac{\Delta \alpha_t}{\alpha_t} = 0,4\%$ ;

$$\frac{\Delta \alpha_t}{\alpha_t} = 1,7\%; \frac{\Delta \omega}{\omega} = 2,5\% \text{ [14].}$$

### Висновки

1. Методи для визначення комплексного коефіцієнта Пуассона в'язкопружних полімерних матеріалів базуються на різних фізичних принципах збудження динамічних деформацій у зразках та вимірюванні первинних параметрів.

2. Вибір метода вимірювань, в значній мірі, залежить від частотного діапазону зовнішнього збурення, типу деформацій у зразку полімерного в'язкопружного матеріалу та орієнтовного значення коефіцієнта Пуассона матеріалу для якого проводяться вимірювання.

3. Розглянуті методи відрізняються основними джерелами похибок, що дає можливість при отриманні експериментальних результатів різними методами значень дійсної і уявної частин комплексного коефіцієнта Пуассона встановити їх достовірність.

### Список літератури

1. Ferry J. D. Viscoelastic properties of polymers / J. D. Ferry // John Wiley & Sons, INC., New York, Chichester, Brisbane, Toronto, Singapore, 1980. – 672 p.
2. Pritz T. Measurement methods of complex Poisson's ratio of viscoelastic materials / T. Pritz // Applied Acoustics. – 2000. – V. 60. – P. 279–292.
3. Mead D. J. Measurement of the dynamic moduli and Poisson's ratio of a transversely isotropic fibre-reinforced plastic / D. J. Mead, R. J. Joannides // Composites. – 1991. – V. 22. – N. 15. – P. 1529.
4. Giovagnoni M. On the direct measurement of the dynamic Poisson's ratio / M. Giovagnoni // Mechanics of Materials. – 1994. – V. 17. – P. 33–46.
5. Kulik V. M. Physical principles of methods for measuring viscoelastic properties / V. M. Kulik, A. V. Boiko // Journal of Applied Mechanics and Technical Physics. – 2018, – V. 59. – No. 5. – P. 874–885.
6. ISO 18437-1:2012 Mechanical vibration and shock – Characterization of the dynamic mechanical properties of viscoelastic materials – Part 1: Principles and guidelines.
7. ISO 18437-2:2012 Mechanical vibration and shock – Characterization of the dynamic mechanical properties of viscoelastic materials – Part 2: Resonance method.
8. ISO 18437-4:2012 Mechanical vibration and shock – Part 4: Dynamic stiffness method.
9. ISO 18437-5:2012 Mechanical vibration and shock – Characterization of the dynamic mechanical properties of viscoelastic materials – Part 5: Poisson ratio based on comparison between measurements and finite element analysis.
10. ASTM E1875-13 Standard test method for dynamic Young's modulus, shear modulus, and Poisson's ratio by sonic resonance.
11. Koblar D. Evaluation of the frequency-dependent Young's modulus and damping factor of rubber from experiment and their implementation in a finite-element analysis / D. Koblar, M. Boltežar // Experimental Techniques. – 2016. – V. 40. – P. 235–244.
12. Measurement method of complex viscoelastic material properties / A. V. Boiko, V. M. Kulik, B. M. Seoudi, H. H. Chun, I. Lee // International Journal of Solids and Structures. – 2010. – V. 47. – P. 374–382.
13. Физическая акустика / Под. ред. У. Мезона. Том. 1. Методы и приборы ультразвуковых исследований. Часть А. – М.: Мир, 1966. – 592 с.
14. Мащенко В. А. Визначення модулів пружності конструкційних та гетерогенних матеріалів ультразвуковим методом / В. А. Мащенко // Міжвузівський збірник „Наукові нотатки”. – 2019. – Вип. 65. – С. 165–169.
15. Ginzl E. Determining Approximate Acoustic Properties of Materials / E. Ginzl, B. Turnbull // e-Journal of Nondestructive Testing. – 2016. – N. 12. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [https://www.ndt.net/article/ndtnet/2016/17\\_Ginzl.pdf](https://www.ndt.net/article/ndtnet/2016/17_Ginzl.pdf).
16. Franko E. E. Measurement of Elastic Properties of Materials by the Ultrasonic Through-Transmission Technique / E. E. Franko, J. M. Meza, F. Buiocchi // Dyna. – 2011. – N. 168. – P. 59–64.

17. A study of PC-based ultrasonic goniometer system of surface properties and characterization of materials / S. Sani, M. H. Md. Saad, N. Jamaludin, M. P. Ismail and other // Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2018 – V. 298. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/298/1/.../pdf>.

18. Characterization of material damage by ultrasonic immersion test / A. Castellano, P. Foti, A. Fraddosio, U. Galietti and other // Procedia Engineering. – 2015. – N. 109. – P. 395–402.

**Мащенко В.А.**, Одесская государственная академия технического регулирования и качества  
**Квасников В.П.**, Национальный авиационный университет, г. Киев

### **ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ПУАССОНА ВЯЗКОУПРУГИХ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

В работе проведен обзор основных методов (прямой и непрямой методы, метод конечных элементов, ультразвуковой иммерсионный метод) измерения комплексного коэффициента Пуассона вязкоупругих полимерных материалов. Особое внимание сконцентрировано на физических принципах поведения объекта и системы измерений, реализации процесса измерений для каждого метода, проанализировано уровень его применимости и информативности. В рассмотренных методах используются различные подходы к измерению первичных параметров, что дает возможность проводить сравнительный анализ полученных значений действительной и мнимой частей коэффициента Пуассона и определять их достоверность. Проанализированы источники погрешностей при проведении измерений каждым из методов, получены соотношения для оценки погрешностей, проведены расчеты минимальных и максимальных относительных погрешностей определения действительной и мнимой частей комплексного коэффициента Пуассона и сделан их сравнительный анализ. Выбор метода измерений, в значительной мере, зависит от частотного диапазона возбуждения деформаций, типа деформаций в образце полимерного вязкоупругого материала и ориентировочного значения коэффициента Пуассона материалу.

**Ключевые слова:** прямой метод и непрямой методы, метод конечных элементов, ультразвуковой иммерсионный метод, продольная и поперечная деформации, погрешность измерения.

**Mashchenko V.**, Odessa State Academy of Technical Regulation and Quality  
**Kvasnikov V.**, National Aviation University, Kyiv

### **PHYSICAL PRINCIPLES AND METHODS OF MEASURING THE POISSON'S RATIO VISCOELASTIC POLYMERIC MATERIALS**

The article reviews the main methods (direct and indirect methods, finite element method, ultrasonic immersion method) of measuring the complex Poisson's ratio of viscoelastic polymeric materials. Particular attention is paid to the physical principles of behavior of the object and the system of measurements, the implementation of the measurement process for each method, analyzed the level of its applicability and informativeness. The considered methods use different approaches to the measurement of primary parameters, which makes it possible to conduct a comparative analysis of the obtained values of the real and imaginary parts of the Poisson's ratio and determine their reliability. The sources of errors in measurements by each of the methods are analyzed, the ratios for estimation errors, the minimum and maximum relative errors of determining the real and imaginary parts of the complex Poisson's ratio are calculated and their comparative analysis is made. The choice of measurement method largely depends on the frequency range of excitation of the deformations, the type of deformations in the sample of the polymeric viscoelastic material and the approximate value of the Poisson's ratio of the material for which the measurements are performed.

**Keywords:** direct method and indirect methods, finite element method, ultrasonic immersion method, longitudinal and transverse deformations, measurement error.

УДК 620.9+621.315.592

DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2313-5352-2020-16-11>

Никируй Л.І.<sup>1</sup>, канд. фіз.-мат. наук, Замуруєва О.В.<sup>2</sup>, канд. фіз.-мат. наук, Урбан О.А.<sup>3</sup>, канд. екон. наук, Федосов С.А.<sup>2</sup>, д-р фіз.-мат. наук

<sup>1</sup>Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника

<sup>2</sup>Східноєвропейський національний університет імені Лесі Українки

<sup>3</sup>Луцький національний технічний університет

## ВПЛИВ НАУКОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ НА РОЗВИТОК ВІДНОВЛЮВАЛЬНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ

*Сучасні дослідження в галузі відновлювальної енергетики визначають напрямки практичної реалізації різних джерел енергії. Можливість швидкого практичного застосування таких результатів має вирішальне значення для економічного зростання. У роботі аналізуються передові публікації як результати фундаментальних досліджень різних напрямків відновлювальної енергетики та визначаються ключові моменти, що вплинули на практичний розвиток кожної з цих галузей. Показано, як наукові дослідження в різних країнах після практичної реалізації впливають на їх економічний розвиток. Визначено ключових гравців світового ринку відновлювальної енергетики.*

**Ключові слова:** відновлювальна енергетика, публікації, наукові дослідження, h-індекс.

**Вступ.** Сучасні дослідження в галузі відновлювальної енергетики визначають напрямки практичної реалізації різних джерел енергії. Можливість швидкого практичного застосування таких результатів має вирішальне значення для економічного зростання. Розкриття потенціалу відновлювальної енергетики має бути стратегічним пріоритетом для кожної держави. Це пов'язано з екологією, безпекою, економікою та політикою. Відповідно, кожна держава сьогодні намагається різними шляхами сприяти все більшій підтримці впровадження відновлювальних джерел енергії. З однієї сторони, це сприяння у заохоченні різних компаній впроваджувати такі технології, з іншої – вкрай необхідною є підтримка наукових досліджень у відповідних сферах. Більше того, не лише окремі держави прагнуть забезпечити свою енергетичну безпеку та незалежність, але ці процеси активно розвивають міжнародні структури, як ЄС, НАТО тощо [1].

Аналіз стану наукових досліджень може надати інформацію про фактори, які впливають на глобальне поширення відновлювальної енергетики. Результати вагомих досліджень публікують у наукових виданнях високого рівня, які індексуються міжнародними наукометричними базами Scopus та WoS, і їх зможуть цитувати інші дослідники. Веб-сайти цих баз дають можливість опрацювати велику кількість статистичної інформації, аналіз якої дає змогу здійснювати фахові прогнози.

**Методологія досліджень.** Наукові результати можна проаналізувати, якщо вони є у формі публікації. Наукову літературу шукали в академічних бібліотеках, Web of Science, Scopus, рецензували англійською мовою та видавали книги, що стосуються даної тематики. Завдяки вдосконаленим інструментам наукометричних систем здійснювався пошук та відбір наукових праць. Дана методологія детально описана в роботі [2].

На першому етапі досліджень виконано повний аналіз опублікування наукових статей за ключовими словами (тегами): «Energy» (Енергія/Енергетика), «Renewable Energy» (Відновлювальна енергія/енергетика), «Solar Energy» (Сонячна енергія/енергетика), «Wind Energy» (Вітрова енергія/енергетика), «Geothermal Energy» (Геотермальна енергія/енергетика), «Biofuel Energy» (Біопаливо та біоенергія), «Thermoelectric Energy» (Термоелектрична енергія/енергетика). Аналіз виконувався за критеріями: рік публікації, країни авторів публікації, науковий напрямок (профіль) публікації, найбільш цитовані публікації у галузі, найбільш цитовані автори у галузі. Для коректного аналізу [2] проводилося відхилення зайвих результатів двома шляхами: пошук статистичної закономірності частоти опублікованих праць за вказаними ключовими словами, але які не стосувалися саме енергетики; додавання до кожного із ключових слів серії додаткових ключових слів, які уточнювали пошук.

Також визначався певний нормалізований h-індекс для можливості порівнювати зв'язок між кількістю публікацій за кожним тегом та якістю опублікованих матеріалів (h-індекс за тегом). Це дозволило встановити основні закономірності між розвитком зацікавленості

наукової спільноти до досліджень відповідних видів відновлювальної енергетики та встановити пікові етапи зростання такої зацікавленості, що можна пояснити різними факторами: створенням принципово нових підходів / технологій / матеріалів у галузі чи прийняттям відповідних законодавчих актів, що сприяли поглибленню економічної зацікавленості у розвитку конкретних напрямків.

**Аналіз результатів.** Аналіз публікацій щодо тегу «Energy» вимагає виваженості у дослідженні. З однієї сторони, за весь період можна спостерігати у базі даних Scopus близько 4 млн. публікацій. Але далеко не всі публікації стосуються тематики вироблення чи збереження енергії. Більше того, лише певна частина відповідає напрямку «Renewable / Alternative Energy» (Відновлювальної / Альтернативної енергії) [3]. Тому, перш за все, важливо виділити групу публікацій з відновлювальної енергетики «Renewable Energy» та розділити її за окремими напрямками. Для зручності цього аналізу введено коефіцієнт релевантності публікацій для певного напрямку  $R$  за допомогою наступного алгоритму:

1) Аналіз перших 10 сотень публікацій у Scopus, які відсортовані за цитуванням від найвищого. Вибірка публікацій, які за тематикою відповідають будь-яким процесам чи дослідженням щодо традиційної і відновлювальної енергетики. Усі інші публікації відсіюються (енергія атомних станів, енергія у питаннях, пов'язаних із астрофізикою, медициною, реабілітацією, психологією, та ін.).

2) Аналіз перших сотень публікацій у Scopus, які відсортовані за датою публікації від найновішого. Тут також проводиться вибірка кількості публікацій, як у пункті 1.

3) Встановлення частки релевантних публікацій від їх загальної кількості  $R = N_{rel} / N$ , де  $N_{rel}$  – кількість відображених у результаті пошуку публікацій (у даному випадку традиційної та відновлювальної енергетики), а  $N$  – загальна кількість публікацій, що відображаються за назвою обраного тегу. Аналогічна процедура здійснюється за іншими тегамі, які відповідають ключовим напрямкам досліджень відновлювальної енергетики. Отримані результати відображено у таблиці 1.

Таблиця 1

Коефіцієнт релевантності публікацій за напрямками			
№	Напрямки	$R_1$ (за цитуванням)	$R_2$ (за останні роки)
1.	Energy	0,47	0,68
2.	Wind energy	0,61	0,94
3.	Solar energy	0,84	0,91
4.	Biofuel energy	0,99	0,98
5.	Geothermal energy	0,88	0,97
6.	Thermoelectric energy	0,92	0,88

Коефіцієнт  $R = 1$  можливий у дуже ідеалістичному випадку, коли назва ключового тегу повністю відповідає конкретному та єдиному тегу. Такий випадок є ідеальним і не може бути реалізований практично, але за певними напрямками значення може бути дуже близьким до 1.

Як і очікувалося (табл. 1), найбільше відхилення від 1 спостерігається для тегу «Energy». За результатами аналізу найбільш цитованих та найбільш нових публікацій значенням  $R$  виявилися різними. Це можна пояснити наступними міркуваннями. Найбільш цитованими роботами є статті, які описують принципово нові підходи чи моделі, є абсолютно новими або започатковують новий напрям досліджень. Для випадку з тегом «Energy», як виявилось [2], найбільш цитованими роботами стали публікації, які описують основні принципи ab initio розрахунків чи інших теоретичних розрахунків електронних станів. Це зрозуміло, оскільки наведені в них принципи, стали основою математичного апарату сучасної теоретичної фізики. Лише десята за цитованістю робота [4] відповідає досліджуваному напрямку та містить 21 141 цитування. Тому коефіцієнт релевантності 0,47 є реальним.

Для коефіцієнту релевантності для публікацій, які аналізувались як найновіші, то  $R$  тут збільшився до 0,68. Це свідчить про загальне зростання наукового інтересу до енергетичних проблем. Причому, саме відновлювальних джерел енергії, оскільки відновлювальна енергетика з кожним роком все більше заміщує традиційну, яка базується на спалюванні ресурсів із виділенням шкідливих для навколишнього середовища речовин, затопленні територій чи використанні атомних станцій. Найшвидше ж впровадження нових ідей сприятиме загальному покращенню екологічної та енергетичної ситуації у світі.

Щодо інших тегів, там було знайдено кілька важливих закономірностей. Дуже сильно відрізняються коефіцієнти  $R$  для тегу «Wind Energy» (Вітрова енергія). Досить низький коефіцієнт 0,61 для співпадання публікацій із високою кількістю цитувань пояснюється наявністю у переліку статей за тематикою астрофізики, які описують процеси у великих космічних об'єктах, рух галактик, тощо. Крім того, дуже велика кількість публікацій стосуються не прямо генерування електроенергії від вітру, а фізиці та механіці окремих частин вітрогенераторів, які використовуються і цитуються з іншими напрямками (наприклад, «Solar Energy»), (Сонячна енергія)) та стосуються матеріалів для акумуляторів чи конструкцій певних двигунів [5]. Проте за останні роки питання перетворення енергії вітру в електричну стало найбільш актуальним за даним пошуковим запитом. Слід відзначити і конструктивні особливості нових моделей вітрогенераторів та їх систем, екологічні проблеми їх роботи, а також розрахунки економічної ефективності. Важливим фактором є те, що вітрова енергія – один із найпоширеніших видів відновлювальної енергетики, яка вже активно виробляється та щорічно якнайбільше поширюється в різних країнах. Так, за 2015 році у світі було вироблено 432 680 МВт вітрової електроенергії, а у 2016 році – 486 749 МВт [6]. Знижується також і вартість такої електроенергії до рівня 0,04 дол.США/кВт·год [7]. Також існує значно більша кількість журналів, які присвячені питанням генерування вітрової електроенергії у порівнянні із астрофізичною тематикою, яка хоча і є більш цитованою, але нею займається значно менша кількість дослідників.

Схожа картина спостерігається при дослідженні сонячної енергетики. На відміну від інших досліджень, тут поєднано в єдиний тег «Solar Photoelectric / PV» (Сонячна фотоелектрика / ФВ) та «Solar Heat Energy» (Сонячна теплова енергія). Фізика цих процесів принципово різна, однак, для них існує спільне джерело безкоштовної енергії – Сонце. Різниця у цьому випадку між  $R_1$  і  $R_2$  менша, але є стабільне відхилення їх значень від 1. Отже перетворення сонячної енергії в електричну чи теплову, які були б корисні для людини, значно раніше почали цікавити дослідників і тепер вони стабілізувалися на певних пропорційних до кількості публікацій значеннях (0,84 та 0,91) щодо інших публікацій, які зустрічаються за цими тегами. До інших областей досліджень тут однозначно відносять астрофізичні (процеси на Сонці), аерокосмічні та «чисті» географічно-екологічні дослідження. Хоча значення (близькі до 0,9) свідчать про високий імпакт досліджень щодо сонячної енергетики, який підтримується як державними механізмами у різних країнах, так і бізнесом, для яких впровадження інновацій є одночасно і комерційним і суспільним успіхом.

Інші два теги «Biofuel Energy» (Енергія біопалива) (включаючи агробіопаливо, біомасу тощо) та «Geothermal Energy» (Геотермальна енергія) відносяться до тих видів відновлювальної енергетики, які на сьогодні успішно впроваджуються на практиці, мають відповідні наукові обґрунтування та дослідження, але у кількості виробленої енергії суттєво поступаються «Solar Energy» та «Wind Energy» [8]. Однак інформація про них є невід'ємною та важливою складовою частиною усіх сучасних оглядів та проектів [1, 6, 7]. Щодо «Biofuel Energy», то спостерігаються дуже близькі значення між  $R_1$  і  $R_2$  (0,99 і 0,98 відповідно). Це свідчить про чітку тематичну спрямованість таких публікацій. Щодо «Geothermal Energy», то релевантність публікацій відповідно до тематики відновлювальної енергетики в останні роки досить висока і становить 0,97. Дещо нижче значення серед числа найбільш цитованих публікацій за цим напрямком можна легко пояснити дослідженнями у геології чи науки про Землю.

В останні роки дуже потужною стала термоелектрична індустрія – «Thermoelectric Energy» (Термоелектрична енергія). Зокрема, на Міжнародній конференції з термоелектрики ICT2017 у Пасадені, США взяли участь 557 організацій (університети, дослідницькі центри і компанії з цілого світу). Лише для цього напрямку спостерігається значення  $R_1$  вище  $R_2$ . Тобто, найбільш цитовані публікації становлять переважну частину відносно інших можливих матеріалів. Наприклад, коли досліджуються матеріали чи ефекти, які могли б використовуватися для виробництва термоелектричної енергії, але самі вони призначені для інших цілей. А практична можливість прямого перетворення тепла в електрику без застосування складних рухомих механізмів та без спеціального спалювання сировини сьогодні є важливим економічним та екологічним фактором. Причому, щорічно зростає і кількість, і якість публікацій цього напрямку.

Іншим цікавим прикладом є те, що до 1970-их років кількість публікацій за окремими напрямками відновлювальної енергетики складала одиниці чи рідко – десятки публікацій у рік.



З початку 1970-их років ситуація змінилася і спостерігається спочатку плавне зростання, а з 2001-2008 рр. – стрімкий нелінійний ріст кількості публікацій. Тобто, з того часу прийшло усвідомлення для світової спільноти тематики вичерпності природних ресурсів та необхідності переорієнтації на зменшення викидів у навколишнє середовище.

Відповідно до цього, важливо проаналізувати якість публікацій, яка визначається у науковій спільноті кількістю їх цитувань. На рис. 1 наведено співвідношення між h-індексами публікацій у напрямку відновлювальної енергетики і енергетики (рис. 1а) та кількості публікацій лише за окремими напрямками відновлювальної енергетики (рис. 1б). Загальна кількість публікацій за тегом «Energy» не береться до уваги, оскільки ця кількість включає у тому числі й кількість публікацій за всіма видами відновлювальної енергетики і є значно вищою. Це ускладнює адекватне сприйняття графічного матеріалу.

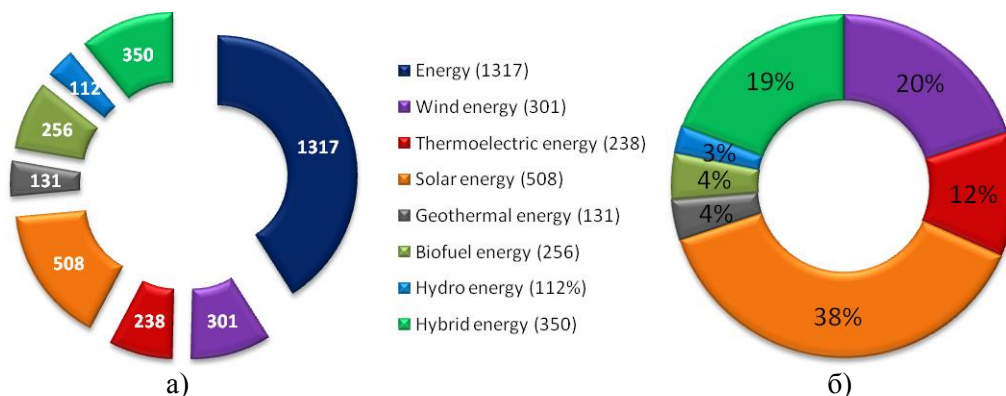


Рис. 1. Сумарний h-індекс (а) та загальна кількість публікацій у відсотках (б), пов'язаних із енергією в цілому та окремими видами відновлювальної енергетики.

Для цього аналізу було розглянуто ще один додатковий тег «Hybrid Energy» (Гібридна енергія), оскільки дуже часто сьогодні намагаються покращити існуючі системи відновлювальної енергетики через поєднання різних механізмів в єдиному комплексі. Це дає змогу при затраті менших коштів отримати систему із значно вищою ефективністю у порівнянні з ефективністю кожної окремої системи. Для двох окремих систем повна ефективність може бути вищою, але їх вартість буде набагато вищою за гібридну систему, що робить використання двох таких систем окремо економічно невигідним.

Якщо розглянути окремі напрямки, то чітко видно, що як за цитуванням, так і за кількістю публікацій найвище значення має тег «Solar Energy»:  $h=508$  (або 38 %) загальної кількості публікацій за тематикою відновлювальної енергетики. Дуже близькі показники за обома параметрами мають теги «Wind Energy» ( $h=301$ , або 20 %) і «Hybrid Energy» ( $h=350$ , або 19 %). Такі значення за цими тегами зрозумілі та передбачувані. Адже саме сонячна енергія і вітрова енергія сьогодні є вирішальними з економічної точки зору і першими почали масово впроваджуватися [7]. Основні публікації стосуються високотехнологічної сфери щодо принципово нових ідей, які стимулюють новий етап розвитку галузі. Так, у [4] обґрунтовано можливість розробки дешевих та комерційно вигідних фотоелементів товщиною 10 мкм на основі оптично прозорих плівок із наночастинок діоксиду титану. Ці наночастилки збирають достатньо високий відсоток потоку сонячного випромінювання (46 %) і демонструють виняткові показники перетворення енергії фотона в електричну енергію із загальною ефективністю (7,1-7,9) %. Схожим матеріалам присвячені й інші роботи, де пропонується певна хімічна модифікація цих фотоелементів на основі  $TiO_2$  через легування елементами нітрогену, розробка поверхнево активного наноструктурного діоксиду титану, тощо. Тобто, чітко видно, що найбільш цитованими є наукові дослідження у сфері фотоелектричного матеріалознавства. Для «Wind Energy» ситуація інша. Більш вагомими (цитованими) є матеріали, які стосуються систем перетворення енергії у цілому, у т.ч., й вітрової, а також інженерно-технічних та конструкторських рішень вітрових станцій. Також є частина публікацій, які відповідають тематиці матеріалознавства (5,4 %), але далеко не всі вони стосуються суто матеріалів для турбін, лопатей або корпусів. Значна кількість публікацій присвячена матеріалам акумуляторних батарей, які можуть використовуватися і для інших видів відновлювальної енергетики [5].

Порівнюючи відсотковий вміст внеску саме статей із галузі матеріалознавства у кожен із видів відновлювальної енергетики, як розділу, який для цих напрямків найбільше відповідає фундаментальній природничій науці, то можна побачити наступний розподіл (включаючи Chemical Engineering (хімічну інженерію)): Solar Energy – 40,4 %, Wind Energy – 5,4 %, Geothermal Energy – 11,3 %, Biofuel Energy – 35,9 %, Thermoelectric Energy – 50,4 %, Energy – 42,6 %. Тобто, до технологічних сфер, які мають вагому наукову складову, найбільше відноситься Thermoelectric Energy, Solar Energy і Biofuel Energy. Причому, значний відрив Thermoelectric Energy від Solar Energy можна пояснити саме перспективою термоелектрики. Але термоелектричні перетворювачі не завжди можуть бути самостійними джерелами електричної енергії, часто вони є додатковими чи допоміжними для покращення екологічної ситуації. Суто лише термоелектричне перетворення енергії використовується на практиці значно рідше, ніж фотоелектричне. Відповідно, кількість опублікованих робіт за тегом «Thermoelectric Energy» складає 12 % (рис. 1б).

Значно менша кількість робіт стосується Biofuel Energy (4 %), Geothermal Energy (4 %), Hydro Energy (3 %). Але існує досить потужна практична реалізація. Тобто, на ринку є велика кількість гравців, які комерційно впроваджують ці напрямки, користуючись великими підтримками на рівні держав та використовуючи їх природний та виробничий потенціали. Тому й імпакти цієї невеликої у відсотках кількості публікацій достатньо високі (рис. 1а).

Враховуючи релевантність цитувань за напрямками (табл. 1) та перемноживши ці значення на величини h-індексу та кількості публікацій, отримаємо певні нормалізовані значення цих параметрів (рис. 2).

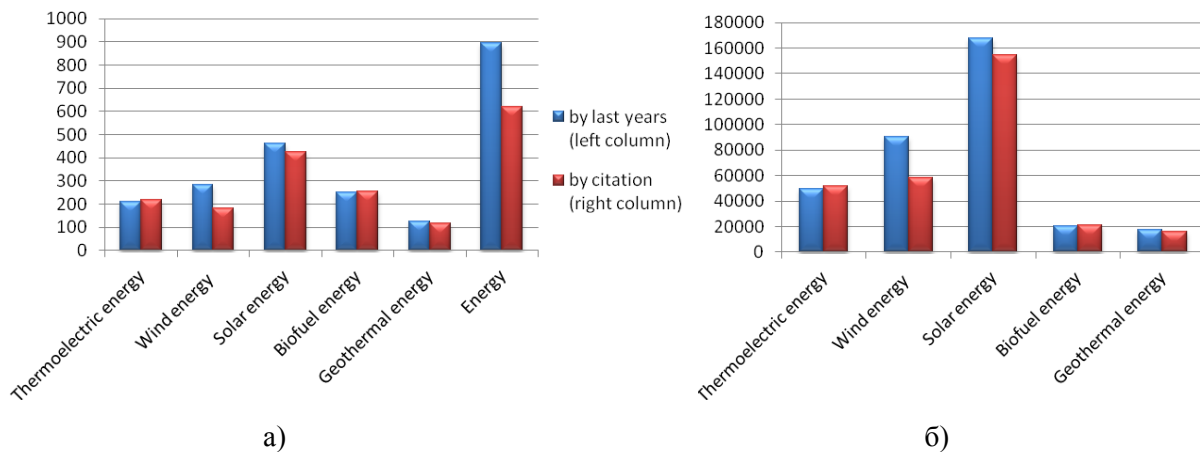


Рис. 2. Нормалізовані значення h-індексу (а) та кількості публікацій (б) за науковими напрямками

Як видно, дані на рис. 2 повністю відповідають наведеним вище висновкам і припущенням. Цікаво відзначити той факт, що нормалізоване значення кількості публікацій вказує на більшу кількість статей, які вийшли за останні роки, ніж статей, які мають високі посилання, спостерігається лише для тегу «Thermoelectric Energy» (рис. 2б). Це свідчить про достатньо нові публікації у цій сфері, а також про посилення зацікавленості до цієї тематики в останні роки.

Певну статистику щодо публікацій наведено у таблиці 2. Однозначними країнами лідерами щодо публікацій у сфері енергетики, у т.ч., відновлювальної енергетики, є США та Китай. Є країни, які мають національні пріоритети у сфері енергетики. Вони займають різні порядкові місця у цій таблиці, залежно від певного типу відновлювальної енергетики. Це часто пов'язано із географічним розташуванням країни, або із власною державною політикою. Як США, так і Китай географічно розташовані у різних географічних поясах, а також кожна із цих держав має потужні дослідницькі центри. Тому їх 1-а і 2-а позиції є очевидними. Німеччина, Великобританія, Індія, Японія, Канада, Італія, Франція – це країни, які обрали енергетичну безпеку у якості свого національного інтересу.

Наприклад, Індія задекларувала перехід на 100 % відновлювальну енергетику до 2022 року. Основою відновлювальної енергетики в Індії буде сонячна енергетика. Тому саме у сонячній енергетиці Індія займає 3 місце у світі за кількістю публікацій. Ця сама тенденція є і у виробництві сонячної електроенергії. Лідеруючі позиції в розвитку сонячної енергетики займають Китай (52 ГВт), США (12,5 ГВт) та Індія (9 ГВт) [7].

Ситуація щодо науково-дослідних центрів, які займають провідні позиції за кількістю публікацій, дещо відмінна від рейтингу за державою. Існують центри, які, як виявилось, є однозначними лідерами в енергетичних дослідженнях. Причому, це одночасно може бути і розробка політики щодо екологічних норм джерел енергії, і розробка принципово нових матеріалів та пристроїв. Тобто, існують організації, які здобули незаперечну позитивну репутацію (табл. 2, рядок 2): CNRS, University of Tokyo, UC Berkeley, MIT, NASA Goddard Space Flight Center, National Renewable Energy Laboratory, California Institute of Technology, Tsinghua University, Technical University of Denmark та ін.

Таблиця 2

Статистика кількості публікацій за країнами відповідно до різних ключових тегів [2]						
№	Energy	Solar Energy	Wind Energy	Thermoelectric Energy	Biofuel Energy	Renewable Energy
1.	1. USA	1. USA	1. USA	1. USA	1. USA	1. USA
	2. China	2. China	2. China	2. China	2. China	2. China
	3. Germany	3. India	3. UK	3. Japan	3. India	3. UK
	4. Japan	4. Germany	4. Germany	4. India	4. UK	4. Germany
	5. UK	5. Japan	5. India	5. Germany	5. Germany	5. India
	6. France	6. UK	6. Japan	6. UK	6. Brazil	6. Italy
	7. India	7. Italy	7. Canada	7. South Korea	7. Italy	7. Spain
	8. Italy	8. France	8. France	8. France	8. Canada	8. Canada
2.	1. CNRS	1. NASA Goddard Space Flight Center	1. NASA Goddard Space Flight Center	1. MIT	1. UC Berkeley	1. Nat. Renewable Energy Lab.
	2. Univ. Tokyo	2. Nat. Renewable Energy Lab.	2. Danmarks Tek. Univ.	2. Cal. Tech.	2. USDA Agr. Res. Center	2. Tsinghua Univ.
	3. UC Berkeley	3. CNRS	3. CNRS Berkeley	3. Tsinghua Univ.	3. US Deprt. Agr.	3. Aalborg Univ.
	4. MIT	4. UC Berkeley	4. UC Berkeley	4. CNRS	4. Univ. Sao Paolo	4. Danmarks Tek. Univ.
	5. Inst. Nazionale de Fisica Nucleare	5. Cal. Tech.	5. Nat. Renewable Energy Lab.	5. Wuhan Univ.	5. Oak Ridge Nat. Lab.	5. North China Elect. Pow. Univ.
3.	1. European Org. for Nuclear Res., Geneve, Switzerland	1. Max Planck Institute for Solid State Research, Stuttgart, Germany	1. Univ. of the Ryukyus, Nakagami District, Japan	1. Northwestern Univ., Evanston, USA	1. Univ. of Utah, Salt Lake City, USA	1. Univ. of the Ryukyus, Nakagami District, Japan
	2. Tata Inst. of Fund. Res., Mumbai, India	2. ETH Zurich, Switzerland	2. Princeton Univ., USA	2. Northwestern Univ., Evanston, USA	2. Univ. of Cork, Ireland	2. Univ. of Ontario Oshawa, Canada
	3. Univ. Bergen, Norway	3. Univ. of Ontario Oshawa, Canada	3. Nagoya Univ., Japan	3. Purdue Univ., Lafayette, USA	3. Univ. of Groningen, Netherlands	3. Aalborg Univ., Denmark

Але ще цікавішим є третій рядок табл. 2, у якому наведено центри, які є найбільш цитованими у своїй галузі. Відбір проводився за найцитованішими дослідниками із цих центрів (наведено афіліацію найбільш визнаних вчених). У термоелектриці перші дві позиції займає один і той же університет: Northwestern University (США). За іншими напрямками наведені заклади не входять у перелік організацій із рядка 2. Тобто, загальна кількість публікацій авторів із закладів, що вказані у рядку 3 є меншою, але саме вони є флагманами, тобто тими, хто є «засновником тенденцій». І виявляється, що ці «засновники тенденцій» представляють організації не лише із США, Канади, Японії, Німеччини, Індії, але й із Швейцарії, Норвегії, Данії, Нідерландів, які не входять у перелік держав, наведених у рядку 1 табл. 2. Тобто, якщо певна держава не входить до переліку тих країн, які видають найбільшу кількість публікацій, тим не менш, дослідники з них можуть претендувати на найвищі позиції у рангу світових вчених. І друге, дуже цікавим виявилось певне «зміщення» у тих організаціях, де працюють найбільш цитовані дослідники у скандинавських держав. А з іншої сторони, саме держави, наведені у рядку 3 табл. 2, мають найбільшу кількість нобелівських лауреатів. Це ще раз підтверджує, що статистика відкритих даних міжнародних науко-метричних баз дає вірогідний результат і сприяє наданню достовірних висновків.

Також, дуже важливі висновки отримуються із побудови графіків зростання кількості публікацій з роками. Зокрема, математичним інструментами можна здійснити обробку побудованих графіків та усереднити їх асимптотичною кривою. Як виявилось, найбільш вдалимими кривими, які плавно описують статистичні дані по кількості публікацій є поліноми 4-ого, 5-ого і 6-ого порядків (рис. 3). Самі поліноми для досліджуваних тегів наведено в таблиці 3.

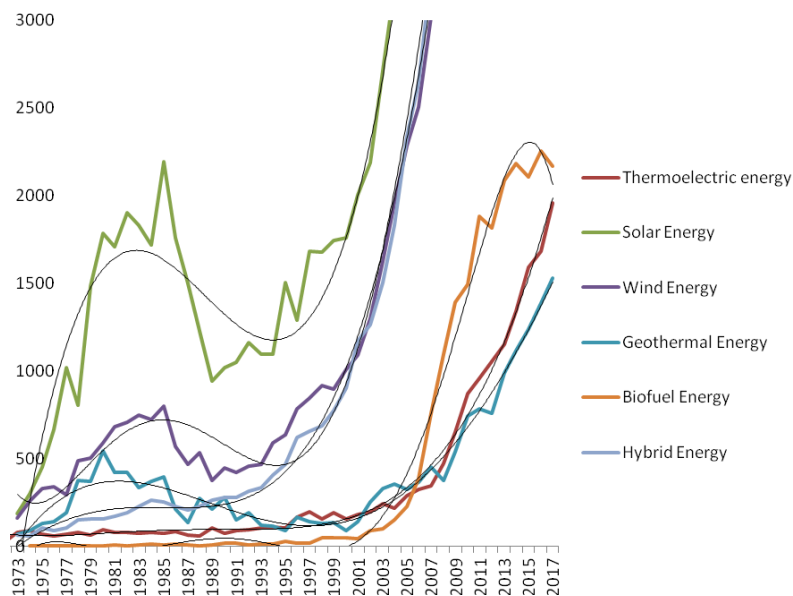


Рис. 3. Залежності кількості публікацій з роками та їх усереднення асимптотичною кривою за науковими напрямками

Таблиця 3

Поліноми, які описують ріст кількості публікацій за роками у всьому світі		
№	Напрямки	Поліноми
1.	Energy	$y = -0,0966x^4 + 5,5003x^3 + 131,31x^2 - 13592x + 257094$
2.	Wind energy	$y = 0,0009x^5 - 0,1054x^4 + 4,4025x^3 - 61,431x^2 - 242,42x + 8973,5$
3.	Solar energy	$y = -0,0003x^4 - 0,6833x^3 + 62,356x^2 - 1794,5x + 17876$
4.	Biofuel energy	$y = -3 \times 10^{-5}x^6 + 0,0052x^5 - 0,3152x^4 + 9,066x^3 - 121,05x^2 + 499,36x + 1674,3$
5.	Geothermal energy	$y = -0,0017x^4 + 0,068x^3 + 2,9287x^2 - 148,58x + 1650,5$
6.	Thermoelectric energy	$y = 0,0021x^4 - 0,2742x^3 + 13,193x^2 - 277,27x + 2251,6$
7.	Hybrid Energy	$y = 0,0045x^4 - 0,778x^3 + 45,25x^2 - 1228,4x + 11877$

Очевидним є існування певних причин, які б могли пояснити різкі зміни у зростанні кількості публікацій. Так, різке збільшення кількості публікацій у 1975 році за тегом «Solar Energy» було пояснено наступним. У 1973 році відбулися кілька потрясінь світового масштабу. Так, через появу у 1960-их роках великих нафтових танкерів, Японія змогла налагодити поставки з Середнього Сходу. Тоді нафтове ембарго 1973-го і наступне за ним стрімке зростання цін на нафтові енергоресурси послужили поштовхом до відновлення національного «сонячного» ринку [9]. З іншої сторони, успіх військової операції Ізраїлю на початку 1970-их привів до масштабного нафтового бойкоту в 1973 році. Це були деякі причини, які змусили світ побачити нестабільність існуючого енергетичного стану та шукати альтернативу. Таким чином, розпочався бум сонячної енергетики. Спочатку це було дослідження щодо використання концентрованої теплової сонячної енергії (сонячні колектори, водонагрівачі та ін.), а далі – фотоелектричне перетворення сонячної енергії. Пік спостерігається у 1981-1982 роках. Перед цим, у 1978 році у США вперше було введено «зелений тариф».

Наступний ріст спостерігається з 2000-их років, коли різні держави, особливо у теплій кліматичній зоні почали зобов'язувати жителів ставити на своїх будинках теплові колектори. Пошук більш дешевих колекторів, а також сонячних фотоелектричних станцій та гібридних систем став новою причиною збільшення кількості публікацій у цьому напрямку. У 1997 році було підписано Амстердамський договір, у якому був закладений принцип сталого розвитку для ЄС. Зокрема, у цьому договорі йшла мова про покращення виробництва поновлювальних джерел енергії. Це вже була не окрема ініціатива, наприклад, як у Німеччині в 1991 році, а спільна ініціатива багатьох держав, яка спричинила новий крок у розвитку відновлювальної енергетики.

Вітрова енергетика (Wind Energy) теж розвивалася за законами, схожими до тих, які описують сонячну (Solar Energy). Зміщення на 1-2 роки піку росту «Wind Energy» (рис. 3) спричинено іншими передумовами для розвитку вітрової енергетики. Малі вітрові станції, які завжди існували, наприклад, у Данії, не могли забезпечити потрібного росту генерування такої енергії у достатній кількості. Тому уряд США підтримував розробку у NASA надпотужних вітрових турбін з 1971 року. Уже в 1981 році було створено першу турбіну на 7,5 МВт [10]. Тут так само, після першого піку, зумовленого дослідницькими чинниками, друге потужне зростання кількості публікацій зумовлене введенням зеленого тарифу у різних державах, як це спостерігається у Solar Energy.

Ріст кількості публікацій за тематикою «Thermoelectric Energy» спричинений двома чинниками: (I) створенням нового типу термоелектричних матеріалів, зокрема, композитних матеріалів із нановключеннями [11] та (II) розвиток економічної конкуренції між промисловими компаніями, зокрема, створенням умов певними державами для здешевлення кінцевих пристроїв. Таким чином, різко почали розвиватися технології здешевлення синтезу матеріалів та компактування модулів. Це було причиною збільшення уваги до термоелектрики науковців, а отже й різкого збільшення кількості публікацій. Аналогічно до термоелектрики спостерігається зростання «Geothermal Energy», «Biofuel Energy» без наявності додаткових піків.

**Висновки.** Для адекватного передбачення розвитку відновлювальної енергетики, необхідно одночасно враховувати ряд факторів і це не лише ціна або наявність самих систем. Також необхідно враховувати динаміку отримання результатів, їх якість та можливість поширення. Саме тому на перший план виходить багатофакторний аналіз наукових публікацій, як основний метод поширення результатів наукових досліджень. Щодо різних факторів, що впливають із статистики наукових публікацій, головним є показник сприйняття результатів досліджень науковою спільнотою, або, як його часто називають, індекс цитат, а також кількість публікацій за рік та галузями.

Кількість наукових публікацій на тему відновлювальної енергетики безпосередньо визначається економічним станом країни, в якій проводяться дослідження. Якість наукових публікацій або їх цитування також залежить від рівня фінансування досліджень. Публікації дослідників з економічно менш потужних держав також можуть мати конкурентоспроможні наукові результати. Однак через відсутність «відкритого доступу», який часто потребує додаткового фінансування, такі видання менш відомі вченим з інших країн, а тому їх «видимість» є нижчою як для наукової спільноти, так і для виробничих компаній як потенційних майбутніх донорів.

Методологія, запропонована в цій роботі, може бути основою для майбутніх досліджень конкретних напрямків відновлювальної енергетики. Аналіз якості опублікованих результатів досліджень – це єдине джерело інформації для складання професійних бізнес-планів для великих компаній, які хочуть вийти на нові ринки або стартапи під час впровадження нових ідей у сфері відновлювальної енергетики. Для того, щоб публікації мали позитивний вплив на економічний розвиток, вони повинні бути максимально доступними для наукової спільноти. Одним з найбільш ефективних варіантів може бути спільне міжнародне дослідження.

#### Інформаційні джерела

1. Energy DG, European Commission. EU, Energy in Figures, Statistical Pocketbook 2017. Brussels: Publications Office of the European Union, 2017. 265 p. DOI: 10.2833/80717
2. Wisz G, Nykyruy L, Yakubiv V, Hryhoruk I, Yavorskyi R. Impact of Advanced Research on Development of Renewable Energy Policy: Case of Ukraine. Int. J. Renewable Energy Res. 2018. Vol. 8, № 4. P. 2367–2384.
3. Dresselhaus M., Thomas I. Alternative Energy Technologies. Nature. 2001. Vol. 414. P. 332–337. DOI: 10.1038/35104599
4. O'regan B., Grätzel M. A Low-cost, High-efficiency Solar Cell Based on Dye-sensitized Colloidal TiO<sub>2</sub> Films. Nature. 1991. Vol. 353. P. 737–740. DOI: 10.1038/353737a0
5. Kang B., Ceder G. Battery Materials for Ultrafast Charging and Discharging, Nature. 2009. Vol. 458. P. 190–193. DOI: 10.1038/nature07853
6. Global Wind Statistics 2016 [accessed 10 Feb. 2017]. Brussels : Global Wind Energy Council, 2017.
7. Renewable Power Generation Costs in 2017. Abu Dhabi : International Renewable Energy Agency, 2018. 160 p.
8. Ehrlich R., Geller H.A. Renewable Energy, 2nd Ed.: A First Course. CRC Press, 2017. 490 p.
9. Bainbridge D. A. The Integral Passive Solar Water Heater Book. The Passive Solar Institute, 1981. 99 p.
10. web-source: <http://www.windsofchange.dk/WOC-usastat.php>
11. Snyder G.J., Toberer E.S. Complex Thermoelectric Materials. Nat. Mat. 2008. Vol. 7. P. 105–114. DOI: 10.1038/nmat2090

Никируй Л.И.<sup>1</sup>, канд. физ.-мат. наук, Замуруева О.В.<sup>2</sup>, канд. физ.-мат. наук, Урбан О.А.<sup>3</sup>, канд. экон. наук, Федосов С.А.<sup>2</sup>, д-р физ.-мат. наук

<sup>1</sup>Прикарпатский национальный университет имени Василия Стефаника

<sup>2</sup>Восточноевропейский национальный университет имени Леси Украинки

<sup>3</sup>Луцкий национальный технический университет

#### ВЛИЯНИЕ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ НА РАЗВИТИЕ ВОЗОБНОВЛЯЕМОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

*Современные исследования в области возобновляемой энергетики определяют направления практической реализации различных источников энергии. Возможность быстрого практического применения таких результатов имеет решающее значение для экономического роста. В работе анализируются передовые публикации как результаты фундаментальных исследований для различных направлений возобновляемой энергетики и определяются ключевые моменты, которые повлияли на практическое развитие каждой из этих областей. Показано, как научные исследования в разных странах после практической реализации влияют на их экономическое развитие. Определены ключевые игроки возобновляемой энергетики на мировом рынке.*

**Ключевые слова:** возобновляемая энергетика, публикации, научные исследования, h-индекс.



Nykyruy L.I.<sup>1</sup>, Cand. Sc. (Phys. & Math.), Zamurujeva O.V.<sup>2</sup>, Cand. Sc. (Phys. & Math.), Urban O.A.<sup>3</sup>, Cand. Sc. (Econ.), Fedosov S.A.<sup>2</sup>, Dr. Phys. & Math. Sc.

<sup>1</sup>Vasyl Stefanyk Precarpathian National University

<sup>2</sup>Lesya Ukrainka Eastern European National University

<sup>3</sup>Lutsk National Technical University

### **THE IMPACT OF SCIENTIFIC RESEARCH ON THE DEVELOPMENT OF RENEWABLE ENERGY**

*Modern research in the field of renewable energy determines the directions of practical implementation of different energy sources. The possibility of rapid practical application of such results is crucial for economic growth. In the paper analyses the advanced publications as the results of fundamental researches for different directions of renewable energy and identifies the key points that have influenced the practical development of each of these areas. It is shown how scientific research in different countries after the practical implementation affects their economic development. The key players in the global renewable energy market have been determined.*

**Keywords:** Renewable energy, publications, scientific research, h-index.



УДК 621.923

DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2313-5352-2020-16-12>

Новиков Ф. В., д. т. н.

Харьковский национальный экономический университет им. С. Кузнеця, г. Харьков, Украина

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСЛОВИЙ ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНОГО НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОГО ШЛИФОВАНИЯ

*Аналитически установлено, что при шлифовании реализовать условие стабилизации температуры резания, обеспечивающее одновременно увеличение производительности обработки, можно применением прогрессивного метода глубинного шлифования с относительно небольшой скоростью детали и глубиной шлифования более 5 мм. В этом случае с увеличением глубины шлифования или скорости детали (в определенных пределах) температура резания остается постоянной, а производительность обработки увеличивается. Это подтверждается результатами экспериментальных исследований. На этой основе обоснованы условия уменьшения температуры резания при одновременном существенном увеличении производительности обработки и даны практические рекомендации по выбору рациональных параметров шлифования по температурному критерию. Показано, что при лезвийной обработке при определенных условиях можно в широких пределах увеличивать производительность обработки фактически без увеличения температуры резания, что согласуется с экспериментальными данными. Это связано с уменьшением доли тепла, уходящего в поверхностный слой обрабатываемой детали.*

**Ключевые слова:** температура резания, производительность обработки, глубинное шлифование, лезвийная обработка, процесс резания, плотность теплового потока

**Постановка проблемы в общем виде и ее связь с важнейшими научными и практическими задачами.** Шлифование традиционно является эффективным методом окончательной обработки деталей машин, обеспечивающим высокие показатели качества и точности обработки. Применение его на операциях предварительной обработки ограничено, как правило, достижением высокой температуры резания, снижающей качество обрабатываемых поверхностей в связи с образованием на них прижогов, микротрещин и других температурных дефектов. Применение различных технологических сред позволяет в определенной степени снизить температуру резания, однако в полном объеме не решает проблему эффективного применения метода шлифования на операциях предварительной обработки взамен лезвийной обработки. Поэтому, по-прежнему, актуальна задача обоснования технологических возможностей снижения температуры резания при шлифовании и повышения производительности обработки. Настоящая работа посвящена теоретическому определению условий снижения температуры резания при шлифовании и повышения производительности обработки.

**Анализ последних достижений и публикаций.** Вопросам определения условий снижения температуры резания при шлифовании в научно-технической литературе уделено большое внимание [1, 2]. Разработаны математические модели тепловых процессов при шлифовании [3], позволяющие на уровне математической физики установить закономерности формирования температуры резания. Однако при этом недостаточно теоретически обоснованы условия распределения тепла, возникающего в процессе резания и уходящего в обрабатываемую деталь и образующиеся стружки, что ограничивает возможности получения обобщенных теоретических решений. В работах [4] предложены теоретические подходы к решению этих задач, требующие проведения дальнейших исследований в этом направлении.

**Цель работы** – теоретическое определение условий снижения температуры резания при шлифовании и повышения производительности обработки, разработка практических рекомендаций по выбору рациональных параметров шлифования.

**Материалы исследований.** Для решения поставленной задачи следует воспользоваться аналитической зависимостью для определения температуры резания при шлифовании, полученной с учетом распределения тепла, возникающего в процессе резания и уходящего в обрабатываемую деталь и образующиеся стружки (рис. 1 [4]):

$$\theta = \frac{\sigma}{c \cdot \rho} \cdot \left[ 1 - e^{-\frac{c \cdot \rho \cdot V_{рез}^2 \cdot \tau}{\lambda}} \cdot e^{-\frac{c \cdot \rho \cdot \theta}{\sigma}} \right] \quad (1)$$

или с учетом соотношения  $l_1 = V_{рез} \cdot \tau$ :

$$\theta = \frac{\sigma}{c \cdot \rho} \cdot \left[ 1 - e^{-\frac{c \cdot \rho \cdot V_{рез} \cdot l_1}{\lambda}} \cdot e^{-\frac{c \cdot \rho \cdot \theta}{\sigma}} \right], \quad (2)$$

где  $\sigma$  – условное напряжение резания, Н/м<sup>2</sup>;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности обрабатываемого материала, Вт/м·К;  $c$  – удельная теплоемкость обрабатываемого материала, Дж/(кг·К);  $\rho$  – плотность обрабатываемого материала, кг/м<sup>3</sup>;  $V_{рез} = t/\tau$  – скорость перерезания шлифовальным кругом адиабатического стержня, м/с;  $t$  – глубина шлифования, м;  $\tau$  – время перерезания адиабатического стержня, с.

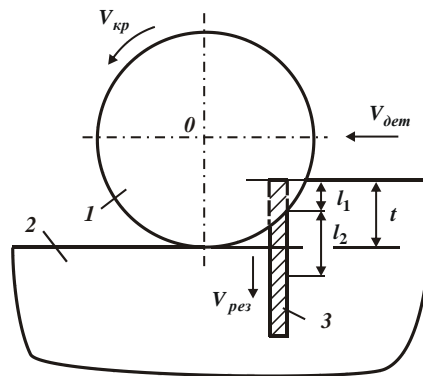


Рис. 1. Расчетная схема температуры резания при плоском шлифовании:  
 1 – шлифовальный круг; 2 – обрабатываемый материал; 3 – адиабатический стержень  
 ( $l_1$  – длина срезанной части адиабатического стержня;  $l_2$  – глубина проникновения тепла в поверхностный слой обрабатываемой детали;  $V_{кр}$  – скорость круга)

Расчетами установлено, что температура резания  $\theta$  с увеличением времени  $\tau$  увеличивается, асимптотически приближаясь к максимальному значению  $\sigma/c \cdot \rho$ .

Известна зависимость для определения температуры резания  $\theta$  [5], которая с учетом выражения для определения плотности теплового потока  $q = \sigma \cdot V_{рез}$  принимает вид:

$$\theta = \frac{q \cdot l_2}{\lambda} = \frac{\sigma \cdot V_{рез} \cdot l_2}{\lambda}. \quad (3)$$

Подставляя зависимость (3) в (2), имеем:

$$\bar{l}_2 = \left[ 1 - e^{-(\bar{l}_1 + \bar{l}_2)} \right], \quad (4)$$

где  $\bar{l}_1 = \frac{c \cdot \rho \cdot V_{рез}}{\lambda} \cdot l_1$ ;  $\bar{l}_2 = \frac{c \cdot \rho \cdot V_{рез}}{\lambda} \cdot l_2$ .

Параметр  $l_2$  определяется зависимостью [5]:

$$l_2 = \sqrt{\frac{2 \cdot \tau_n}{c \cdot \rho \cdot \lambda}}, \quad (5)$$

где  $\tau_n$  – время нагрева части адиабатического стержня длиной  $l_2$ , с.

Время  $\tau_n$ , исходя из (1) с учетом  $m = 2 \cdot V_{рез} \cdot \sqrt{\frac{c \cdot \rho}{2 \cdot \lambda}}$ , определяется из уравнения:

$$\sqrt{\tau_n} = \frac{1}{m} \cdot \left( 1 - e^{-\frac{m^2}{2} \cdot \tau - m \cdot \sqrt{\tau_n}} \right). \quad (6)$$

Для упрощения расчетов температуры резания  $\theta$  можно воспользоваться уравнением (4), задавая значения безразмерной величины  $\bar{l}_1 + \bar{l}_2$  и определяя значения безразмерных величин  $\bar{l}_2$  и  $\bar{l}_1$ . Это позволило протабулировать безразмерную величину  $\bar{l}_2$  в зависимости от безразмерной величины  $\bar{l}_1$  [5] и решать практические задачи по выбору оптимальных условий шлифования и лезвийной обработки. Для этого необходимо первоначально определить значение  $\bar{l}_1 = \frac{c \cdot \rho \cdot V_{рез}}{\lambda} \cdot l_1$  и по нему выбрать значение  $\bar{l}_2$ . Затем определить величину  $l_2 = a \cdot \bar{l}_2 / V_{рез}$ , где  $a = \lambda / (c \cdot \rho)$  – коэффициент температуропроводности обрабатываемого материала, м<sup>2</sup>/с.

Исходя из зависимости (5), для известного значения  $l_2$  можно определить время нагрева адиабатического стержня  $\tau_n$  и отношения  $\tau_n / \tau$ ,  $(\tau - \tau_n) / \tau$ , определяющие соответственно доли тепла, уходящего в поверхностный слой обрабатываемой детали и в образующиеся стружки. В табл. 1 в качестве примера приведены расчетные значения параметров теплового процесса при плоском шлифовании стали ШХ15 шлифовальным кругом радиусом  $R_{кр} = 150$  мм со скоростью детали  $V_{дем} = 10$  м/мин для различных значений глубины шлифования  $t$ .

Таблица 1

Расчетные значения параметров теплового процесса при шлифовании

Показатели	Глубина шлифования $t$ , мм								
	0,01	0,1	0,4	0,5	0,6	0,7	1,0	5,0	15,0
$l$ , мм	1,73	5,473	10,946	12,238	13,406	14,48	17,3	38,684	67
$\tau$ , с	0,01	0,0328	0,0657	0,0734	0,08	0,0869	0,1038	0,232	0,4
$V_{рез}$ , мм/с	1	3,049	6,088	6,812	7,5	8,055	9,634	21,551	37,5
$l_1$ , мм	0,01	0,1	0,4	0,5	0,6	0,7	1,0	5,0	15,0
$\bar{l}_1$	0,0012	0,0363	0,29	0,4054	0,5357	0,6713	1,1469	12,828	67
$\bar{l}_2$	0,0488	0,2442	0,581	0,6535	0,7135	0,7607	0,867	1,0	1,0
$\bar{l}_1 + \bar{l}_2$	0,05	0,28	0,87	1,06	1,25	1,43	2,01	13,828	68,0
$l_2$ , мм	0,411	0,6728	0,802	0,8058	0,8	0,7933	0,756	0,39	0,224
$l_1 + l_2$ , мм	0,421	0,7728	1,202	1,3058	1,4	1,4933	1,7559	5,39	15,224
$\tau_n$ , с	0,01	0,0269	0,0383	0,0386	0,038	0,0375	0,034	0,009	0,003
$\tau_n / \tau$ , %	100	82,15	58,2	52,3	47,6	43,1	32,8	3,9	0,7
$(\tau - \tau_n)$ , с	0	0,0029	0,0274	0,0348	0,042	0,05	0,0698	0,223	0,397
$(\tau - \tau_n) / \tau$ , %	0	17,85	41,8	47,7	52,4	56,9	67,2	96,1	99,3
$(\tau - \tau_n) / \tau_n$	0	0,217	0,718	0,912	1,1	1,32	2,049	24,641	132,3
$\theta \cdot \lambda / \sigma$	0,411	2,05	4,883	5,489	6,0	5,39	7,283	8,405	8,405
$Q_{\text{уд}}$ , мм <sup>2</sup> /мин	100	1000	4000	5000	6000	7000	10000	50000	150000

Время  $\tau$  контакта круга с фиксированным адиабатическим стержнем и скорость  $V_{рез}$  перерезания адиабатического стержня (рис. 1) определяются по зависимостям:  $\tau = l / V_{дем}$ ;  $V_{рез} = l_1 / \tau$ , где  $l = \sqrt{2 \cdot t \cdot R_{кр}}$  – длина дуги контакта круга с адиабатическим стержнем, м;  $l_1 = t$ . Температура резания  $\theta$  определяется по зависимости (3), преобразованной к виду:

$$\theta \cdot \frac{\lambda}{\sigma} = V_{рез} \cdot l_2 = \bar{l}_2 \cdot a. \quad (7)$$

Как следует из табл. 1, с увеличением глубины шлифования  $t$  до значения 0,6 мм величина  $l_2$  первоначально увеличивается, а затем уменьшается. Отношение  $\tau_n/\tau$ , определяющее долю тепла, уходящего в поверхностный слой обрабатываемой детали, с увеличением глубины шлифования  $t$  непрерывно уменьшается вплоть до нуля. Так, при  $t=5$  мм отношение  $\tau_n/\tau$  принимает весьма малое значение – 3,9 %, а при  $t=15$  мм – еще меньшее значение, равное 0,7 %. Поэтому с переходом в область глубинного шлифования доля тепла, уходящего в образующиеся стружки, непрерывно увеличивается, вплоть до 100 %.

Температура резания  $\theta$  с увеличением глубины шлифования до значения  $t=5$  мм увеличивается, а затем остается фактически постоянной, принимая значения, близкие к максимально возможному значению, при условии  $\theta \cdot \lambda / \sigma = 8,4$ . Следовательно, при глубине шлифования  $t \geq 5$  мм можно фактически неограниченно увеличивать производительность обработки при неизменной температуре резания. В этом, по сути, состоит эффект глубинного шлифования, широко разрекламированного в индустриально развитых странах еще в послевоенные годы. В зарубежных литературных источниках также показано, что эффект глубинного шлифования проявляется при достижении глубины шлифования приблизительно равной 5 мм, а при дальнейшем увеличении глубины шлифования этот эффект усиливается за счет увеличения производительности обработки при неизменной температуре резания. В связи с этим рекомендуется обработку осуществлять с глубиной шлифования, достигающей 17 – 20 мм и более, например, при вышлифовывании канавок у сверл.

Примерами практического осуществления схемы глубинного шлифования следует рассматривать процессы разрезания материалов на части, вышлифовывании пазов и канавок шлифовальным кругом. В этих случаях глубина шлифования может принимать значения в несколько раз превышающие 20 мм. При этом температура резания, как правило, менее  $1000^\circ\text{C}$ , что позволяет производить высококачественную обработку без образования температурных дефектов на обрабатываемых поверхностях.

Вместе с тем, как следует из табл. 1, с увеличением глубины шлифования интенсивно увеличивается удельная производительность обработки  $Q_{y0}$ , достигая чрезвычайно больших значений, не реализуемых на практике. Так, известно [6], что с точки зрения работоспособности абразивного круга процесс глубинного шлифования может осуществляться с удельной производительностью обработки, изменяющейся в пределах  $Q_{y0} = 2000 \dots 5000$  мм<sup>2</sup>/мин. Исходя из табл. 1, это возможно при глубине шлифования  $t = 0,2 \dots 0,5$  мм и температуре резания, примерно в 2 раза меньшей максимально возможной. Очевидно, для достижения максимально возможной температуры резания при глубинном шлифовании с удельной производительностью обработки  $Q_{y0} = 2000 \dots 5000$  мм<sup>2</sup>/мин необходимо уменьшать скорость детали  $V_{дет}$ .

Изменение отношения  $\tau_n/\tau$  (табл. 1) в широких пределах свидетельствует о том, что при расчете температуры резания необходимо учитывать как долю тепла, уходящего в поверхностный слой обрабатываемой детали, так и долю тепла, уходящего в образующиеся стружки. Согласно предложенному решению, распределение тепла, уходящего в поверхностный слой обрабатываемой детали и в образующиеся стружки, в расчетах учитывается автоматически, поскольку баланс тепла основан на учете этих двух составляющих и не требует применения поправочного коэффициента. Поэтому предложенная методика расчета параметров теплового процесса при шлифовании является наиболее приемлемой для решения практических задач. Выбор оптимальной глубины шлифования в данном случае необходимо производить из условия достижения предельной температуры резания. В работе [7] экспериментально доказана эффективность применения метода глубинного шлифования с точки зрения повышения производительности обработки при обеспечении заданной температуры резания.

В табл. 2 и табл. 3 показан характер изменения параметров теплового процесса при плоском шлифовании с увеличением скорости детали  $V_{дет}$ . Как видно, с увеличением  $V_{дет}$  величина  $l_2$  и отношение  $\tau_n/\tau$  непрерывно уменьшаются вплоть до нуля. Это свидетельствует об уменьшении доли тепла, уходящего в поверхностный слой обрабатываемой детали, и увеличении доли тепла, уходящего в образующиеся стружки.

Таблиця 2

Расчетные значения параметров теплового процесса  
при шлифовании для  $t=0,01$  мм

Показатели обработки	Скорость детали $V_{дет}$ , м/мин				
	10	50	500	5000	50000
$l$ , мм	1,73	1,73	1,73	1,73	1,73
$\tau$ , с	0,01	0,002	0,0002	0,00002	0,000002
$V_{рез}$ , мм/с	1,0	5,0	50,0	500,0	5000,0
$l_1$ , мм	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
$\bar{l}_1$	0,0012	0,006	0,0595	0,595	5,95
$\bar{l}_2$	0,0488	0,1	0,3093	0,7355	0,999
$\bar{l}_1 + \bar{l}_2$	0,05	0,11	0,37	1,33	6,949
$l_2$ , мм	0,411	0,168	0,052	0,0123	0,00123
$l_1 + l_2$ , мм	0,421	0,178	0,062	0,0223	0,01123
$\tau_n$ , с	0,01	0,0168	0,00016	0,000009	0,00000009
$\tau_n / \tau$ , %	100	84	80	45	4,5
$(\tau - \tau_n) / \tau$ , %	0	16	20	55	95,5
$(\tau - \tau_n) / \tau_n$	0	0,19	0,25	0,82	22,2
$\theta \cdot \lambda / \sigma$	0,441	0,84	2,6	6,15	8,4
$Q_{y0}$ , мм <sup>2</sup> /мин	100	500	5000	50000	500000

Таблиця 3

Расчетные значения параметров теплового процесса  
при шлифовании для  $t=0,1$  мм

Показатели обработки	Скорость детали $V_{дет}$ , м/мин					
	5	10	50	100	1000	3000
$l$ , мм	5,473	5,473	5,473	5,473	5,473	5,473
$\tau$ , с	0,0656	0,0328	0,00656	0,00328	0,000328	0,00011
$V_{рез}$ , мм/с	1,524	3,049	15,244	30,488	304,88	914,64
$l_1$ , мм	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
$\bar{l}_1$	0,0181	0,0363	0,1815	0,363	3,63	10,89
$\bar{l}_2$	0,1813	0,2442	0,4883	0,6284	0,99	1
$\bar{l}_1 + \bar{l}_2$	0,2	0,28	0,67	0,99	4,62	11,89
$l_2$ , мм	1,0	0,6728	0,269	0,173	0,0272	0,0092
$l_1 + l_2$ , мм	1,1	0,7728	0,369	0,273	0,1272	0,1092
$\tau_n$ , с	0,0595	0,0269	0,0043	0,00178	0,000044	0,000005
$\tau_n / \tau$ , %	90,7	82,15	65,7	54	13,62	4,5
$(\tau - \tau_n) / \tau$ , %	9,3	17,85	34,3	46	86,38	95,5
$(\tau - \tau_n) / \tau_n$	0,102	0,217	0,522	0,852	6,455	22
$\theta \cdot \lambda / \sigma$	1,525	2,051	4,1	5,274	8,316	8,4
$Q_{y0}$ , мм <sup>2</sup> /мин	500	1000	5000	10000	100000	300000

Температура резания при этом непрерывно увеличивается, асимптотически приближаясь к максимально возможному значению, соответствующему условию  $\theta \cdot \lambda / \sigma = 8,4$ . Таким образом, с увеличением скорости детали  $V_{\text{дем}}$  до определенного значения (при  $t = 0,1$  мм приблизительно равного  $V_{\text{дем}} = 3000$  м/мин) температура резания увеличивается, а затем остается почти неизменной. Это позволяет увеличить производительность обработки без увеличения температуры резания, обеспечивая высокие показатели качества обрабатываемых поверхностей. Однако при этом удельная производительность обработки принимает чрезвычайно большие значения, не реализуемые на практике (из-за интенсивного износа абразивного круга и потери его режущей способности).

Как показано в табл. 1, на практике могут быть реализованы значения  $Q_{\text{yd}} = 2000 \dots 5000$  мм<sup>2</sup>/мин. Тогда, исходя из табл. 2, для  $t = 0,01$  мм скорость детали может принимать значения  $V_{\text{дем}} < 500$  м/мин, а для  $t = 0,1$  мм –  $V_{\text{дем}} < 50$  м/мин. Температура резания при этом более чем в 2 раза меньше максимально возможной температурой резания.

Из приведенных расчетных данных (табл. 1 – табл. 3) следует, что основным условием достижения максимально возможной температуры резания является уменьшение времени  $\tau_n$ , определяемого зависимостью (7). В эту зависимость из переменных параметров входит лишь скорость  $V_{\text{рез}}$ , причем, во второй степени. Поэтому, увеличивая ее, можно добиться существенного уменьшения времени  $\tau_n$  и реализовать условие достижения максимально возможной температуры резания, т.е. условие полного перехода возникающего при шлифовании тепла в образующиеся стружки. В этом случае отношение  $\tau_n / \tau < 1$ . В первом приближении его можно принять равным 0,3, поскольку при этом значении происходит наиболее интенсивный изгиб кривой  $\theta - \tau$  и температуру резания  $\theta$  можно рассматривать фактически неизменной величиной. Тогда с учетом зависимости (6) и  $\tau = t / V_{\text{рез}}$  (рис. 1), имеем:

$$0,3 \cdot \tau = \frac{a}{2 \cdot V_{\text{рез}}^2}. \quad (8)$$

Преобразуя зависимость (8), получено:

$$V_{\text{рез}} = \frac{a}{0,6 \cdot t}. \quad (9)$$

Из зависимости (9) вытекает, что чем больше глубина шлифования  $t$ , тем меньше скорость  $V_{\text{рез}}$ , которая определяется зависимостью:

$$V_{\text{рез}} = \frac{t}{\tau} = \frac{t}{l} \cdot V_{\text{дем}} = V_{\text{дем}} \cdot \sqrt{\frac{t}{2 \cdot R_{\text{кр}}}}. \quad (10)$$

Подставляя зависимость (10) в (8), получено:

$$V_{\text{дем}} = \frac{a}{0,6 \cdot t} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot R_{\text{кр}}}{t}}. \quad (11)$$

Как видно, выполнить условие (11) можно различными сочетаниями параметров режима шлифования  $t$  и  $V_{\text{дем}}$ . Для удобства анализа зависимости (11) ее следует преобразовать с учетом выражения удельной производительности обработки  $Q_{\text{yd}} = t \cdot V_{\text{дем}}$ :

$$Q_{\text{yd}} = \frac{a}{0,6} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot R_{\text{кр}}}{t}}. \quad (12)$$

Следовательно, чем больше глубина шлифования  $t$ , тем меньше  $Q_{\text{yd}}$ . В табл. 4 приведены рассчитанные по зависимостям (11) и (12) значения параметров  $V_{\text{дем}}$  и  $Q_{\text{yd}}$ , которые, очевидно, являются весьма большими для практической реализации. Исключением являются лишь условия глубинного шлифования ( $t \geq 5$  мм), которые можно реализовать на практике. Это согласуется с известными экспериментальными данными [8].

Таблица 4

Расчетные значения параметров  $V_{дет}$  и  $Q_{уд}$  для  $R_{кр}=150$  мм

$t$ , мм	0,01	0,1	0,5	1,0	5,0	15,0
$V_{дет}$ , м/мин	14534,5	459,5	41	14,5	1,3	0,25
$Q_{уд}$ , мм <sup>2</sup> /мин	145346	45962	20554,5	14535,5	6500	3739,6

Исходя из зависимостей (11) и (12), уменьшить параметры  $V_{дет}$  и  $Q_{уд}$  можно за счет уменьшения радиуса круга  $R_{кр}$ . Поэтому в табл. 5 приведены расчетные значения параметров  $V_{дет}$  и  $Q_{уд}$  для  $R_{кр}=50$  мм.

Таблица 5

Расчетные значения параметров  $V_{дет}$  и  $Q_{уд}$  для  $R_{кр}=50$  мм

$t$ , мм	0,01	0,1	0,5	1,0	5,0	15,0
$V_{дет}$ , м/мин	8391	265,4	23,6	8,3	0,75	0,14
$Q_{уд}$ , мм <sup>2</sup> /мин	83916	26537	11868	8392	3753	2166

В этом случае фактически возможна реализация глубинного шлифования, начиная с глубины шлифования  $t > 0,5$  мм, что расширяет возможности обеспечения установившейся максимально возможной температуры резания и, соответственно, увеличения производительности обработки (без увеличения температуры резания). Также установлено, что при лезвийной обработке безразмерная величина  $\bar{l}_1$  принимает, как правило, значения более 10 и тогда температура резания достигает максимального значения  $\theta = \sigma / (c \cdot \rho)$ . Это позволяет фактически неограниченно увеличивать производительность обработки без увеличения температуры резания, что согласуется с экспериментальными данными.

**Выводы.** В работе аналитически установлено, что при шлифовании реализовать условие стабилизации температуры резания, обеспечивающее одновременно увеличение производительности обработки, можно применением прогрессивного метода глубинного шлифования с относительно небольшой скоростью детали и глубиной шлифования более 5 мм. В этом случае с увеличением глубины шлифования или скорости детали (в определенных пределах) температура резания остается постоянной, а производительность обработки увеличивается. Это подтверждается результатами экспериментальных исследований. На этой основе обоснованы условия уменьшения температуры резания при одновременном существенном увеличении производительности обработки и даны практические рекомендации по выбору рациональных параметров шлифования по температурному критерию. Показано, что при лезвийной обработке можно в широких пределах увеличивать производительность обработки фактически без увеличения температуры резания, что согласуется с экспериментальными данными.

**Перспективы дальнейшей работы в данном направлении.** В дальнейших исследованиях необходимо экспериментально определить доли тепла, уходящего в поверхностный слой обрабатываемой детали, и увеличением доли тепла, уходящего в образующуюся стружку, при лезвийной и абразивной обработках. Это позволит разработать практические рекомендации по снижению температуры резания и существенном увеличении производительности обработки.

#### Информационные источники

1. Якимов А. В. Оптимизация процесса шлифования / А. В. Якимов. – Москва : Машиностроение, 1975. – 175 с.
2. Моделирование систем: монография / Г. А. Оборский, А. Ф. Дащенко, А. В. Усов и др. – Одесса: Астропринт, 2013. – 664 с.
3. Глубинное шлифование деталей из труднообрабатываемых материалов / С. С. Силин, В. А. Хрульков, А. В. Лобанов, Н. С. Рыкунов. – Москва : Машиностроение, 1984. – 62 с.



4. Полянский В. И. Расчет температуры шлифования с учетом баланса тепла, уходящего в стружки и обрабатываемую деталь // Сучасні технології в машинобудуванні: зб. наук. праць. – Вип. 13 / редкол.: В. О. Федорович (голова) [та ін.]. – Харків : НТУ «ХПІ», 2018. – С. 51-59.
5. Новиков Ф. В. Основы математического моделирования технологических процессов механической обработки: монография / Ф. В. Новиков. – Д. : ЛИРА, 2018. – 400 с.
6. Старцев Н. К. Исследование некоторых факторов, определяющих эффективность процесса глубинного шлифования пазов : автореф. дис. ... канд. техн. наук по специальности 05.02.08 "Технология машиностроения" / Н. К. Старцев. – Минск : БПИ, 1978. – 24 с.
7. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения / Под общ. ред. Ф. В. Новикова и А. В. Якимова. В десяти томах. – Одесса: ОНПУ, 2003. – Т. 2. "Теплофизика резания материалов". – 625 с.
8. Werner G. Technologische und Konstruktive Voraussetzungen für das Tiefschleifen. – "Werkstattstechnik", 1979. Nr. 10. 613–620.

**Новиков Ф. В., д.т.н.**

Харківський національний економічний університет імені Семена Кузнеця, м. Харків, Україна

### **ВИЗНАЧЕННЯ УМОВ ВИСОКОПРОДУКТИВНОГО НИЗЬКОТЕМПЕРАТУРНОГО ШЛІФУВАННЯ**

*Аналітично встановлено, що при шліфуванні реалізувати умову стабілізації температури різання, що забезпечує одночасне збільшення продуктивності обробки, можна застосуванням прогресивного методу глибинного шліфування з відносно невеликою швидкістю деталі й глибиною шліфування більше 5 мм. У цьому випадку зі збільшенням глибини шліфування або швидкості деталі (в певних межах) температура різання залишається постійною, а продуктивність обробки збільшується. Це підтверджується результатами експериментальних досліджень. На цій основі обґрунтовано умови зменшення температури різання при одночасному істотному збільшенні продуктивності обробки та надано практичні рекомендації щодо вибору раціональних параметрів шліфування за температурним критерієм. Показано, що при лезовій обробці за певних умов можна в широких межах збільшувати продуктивність обробки фактично без збільшення температури різання, що узгоджується з експериментальними даними. Це пов'язано зі зменшенням частки тепла, що надходить в поверхневий шар оброблюваної деталі.*

**Ключові слова:** температура різання, продуктивність обробки, глибинне шліфування, лезова обробка, процес різання, щільність теплового потоку

**Novikov F. V., Doctor of Technical Sciences**

Simon Kuznets Kharkiv National University of Economics, Kharkiv, Ukraine

### **DEFINITION OF TERMS OF HIGH-PERFORMANCE LOW TEMPERATURE GRINDING**

*It has been analytically established that when grinding, it is possible to realize the condition of stabilization of the cutting temperature, which provides at the same time an increase in processing productivity, using the progressive method of deep grinding with a relatively low speed of the part and grinding depth of more than 5 mm. In this case, with an increase in the grinding depth or the speed of the part (within certain limits), the cutting temperature remains constant, and the processing productivity increases. This is confirmed by the results of experimental studies. On this basis, the conditions for reducing the cutting temperature while substantially increasing the processing productivity are substantiated and practical recommendations are given for choosing rational grinding parameters according to the temperature criterion. It is shown that under blade conditions, under certain conditions, it is possible to increase the processing productivity over a wide range without actually increasing the cutting temperature, which is consistent with experimental data. This is due to a decrease in the fraction of heat leaving in the surface layer of the workpiece.*

**Keywords:** cutting temperature, processing productivity, deep grinding, blade processing, cutting process, heat flux density

UDC 531.

DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2313-5352-2020-16-13>

A. Perederko, Ph.D.

Odessa state academy of technical regulation and quality

**SIGNAL PHASE SHIFTS DURING THE MEASUREMENT OF VIBRATION PARAMETERS**

**Abstract.** In systems of vibration control, monitoring, diagnostics, active vibration protection, measurements and control of vibration parameters are necessary. For this, piezoelectric sensors are widely used in them as primary transducers. These sensors, due to their high metrological characteristics, such as accuracy, speed, a wide band of operating frequencies and temperatures, are traditionally used to measure vibration displacement, vibration velocity and vibration acceleration. The use of these types of sensors is necessary due to the need to measure and control vibration at objects with different frequency characteristics. The article considers possible distortions of the measured signal at the output of the sensors due to phase shifts. These phase shifts must be taken into account when developing and constructing measurement and processing schemes of the vibration signal. This is especially true when measuring and recording a rapid vibration processes, such as mechanical shock.

**Keywords:** vibration, phase shift, sensors for vibration measurement, vibrometer, accelerometer.

**Introduction and statement of the problem.** At the stages of development, testing and operation of various technical and technological devices, much attention is paid to the study of vibration. In recent years, measuring and information systems of vibration control, monitoring, diagnostics, active vibration protection have become widespread, that not only provides a large technical and economic effect, but also helps to prevent accidents and possible technological and environmental disasters [1,2].

The initial link of such systems is vibration and shock vibration parameters sensors located directly on the controlled object. They convert the measured mechanical value into an electrical signal supplied to the measuring device for further processing [3,4].

Sensors of vibrational parameters often work under difficult adverse conditions - at high temperatures, strong alternating magnetic fields, intense vibrational and shock overloads [5], high pressure and penetrating radiation. They are subject to special requirements for the accuracy and reliability of measurements.

Therefore, their study and improvement is an urgent issue of our time.

**The aim of the work.** To investigate the model of piezoelectric transducers used as sensors during the measurement of vibration parameters for their phase characteristics and phase distortions. Which are important in the study of short-term mechanical vibrations and shocks.

**Results of the work.** From all the variety of existing sensors for measuring vibration parameters, sensors with piezoelectric transducers have become the most common. Sensors designed to measure vibration displacement (shift) are called vibrometers. Sensors that measure vibration velocity are called velocimeters, and the ones that measure acceleration are called accelerometers.

Vibration acceleration belongs to non-electrical values that cannot be transformed into an electrical signal without additional transformations, so functionally intermediate transformations are performed by a sensitive element of the sensor.

Figure 1 shows the calculated model of the piezoelectric vibration sensor.

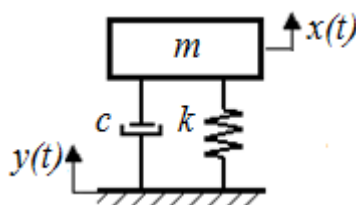


Fig. 1. Calculated model of the piezoelectric vibration sensor.

The model (Fig. 1) consists of mass  $m$ , spring  $k$  and damper  $c$ , which are located on the stand. The stand is attached to the vibrating object. With this arrangement, the lower end of the spring and the damper will have the same movement as the stand (movement  $y$  to be measured). Then the displacement of the mass relative to the stand will be  $z = x - y$ , where  $x$  is the vertical displacement of the mass  $m$ .

In this case, the vibrating object is subjected to harmonic motion:

$$y(t) = Y \sin \omega t. \quad (1)$$

The equation of mass  $m$  can be written as:

$$\ddot{m}x + c(\dot{x} - \dot{y}) + k(x - y) = 0 \quad (2)$$

Determining the relative displacement of  $z$  as:

$$z = x - y. \quad (3)$$

Equation (2) can be written as:

$$m\ddot{z} + c\dot{z} + kz = -m\ddot{y} \quad (4)$$

Equations (1) and (4) result in:

$$m\ddot{z} + c\dot{z} + kz = -m\omega^2 Y \sin \omega t, \quad (5)$$

therefore, the stationary solution is given by the method:

$$z(t) = Z \sin(\omega t - \phi), \quad (6)$$

where  $Z$  and  $\phi$  are given by equations (8) and (9), respectively:

$$z(t) = \frac{m\omega^2 Y \sin(\omega t - \phi)}{\sqrt{(k - m\omega^2)^2 + (c^2 \omega^2)}} = Z \sin(\omega t - \phi). \quad (7)$$

$$Z = \frac{m\omega^2 Y}{\sqrt{(k - m\omega^2)^2 + (c\omega)^2}}. \quad (8)$$

$$\phi = \tan^{-1} \left( \frac{c\omega}{k - m\omega^2} \right) = \tan^{-1} \left( \frac{2\zeta r}{1 - r^2} \right). \quad (9)$$

Where:  $r = \frac{\omega}{\omega_n}$ ,  $\zeta = \frac{c}{2m\omega_n}$ .

As can be seen from equation (6), the devices measuring the vibration parameters [6] have a phase lag. Thus, the output of the measuring device lags behind the input effect. The delay time is measured by the phase angle divided by the frequency  $\omega$ . Time delay is not important if we measure one harmonic component. But, in most cases, the vibration measured is not harmonic and consists of the sum of two or more harmonic components. In this case, the saved measurement data can give an inaccurate picture of vibration during further mathematical processing or on a graph. Since different harmonics can be amplified by different coefficients their phase shifts can also be different. The wave distortion of the recorded signal is called phase distortion or phase shift error. To illustrate the nature of the phase shift error, consider the vibration signal:

$$y(t) = a_1 \sin \omega t + a_3 \sin 3\omega t \quad (10)$$

Simulation of vibration signals was performed in the MATHCAD system. The shape of the vibration signal (10) is shown on Fig.2.

Suppose that for the first harmonic there was a phase shift  $90^\circ$  and  $180^\circ$  for the third harmonic of equation (10). The corresponding time lags are set through  $t_1 = 90^\circ / \omega$  and  $t_2 = 180^\circ / (3\omega)$ .

The output signal is shown in Fig.3. It is seen that the output signal is very different from the input signal due to phase distortion. As a general case, let a given complex wave be given by the sum of several harmonics as

$$y(t) = a_1 \sin \omega t + a_2 \sin 2\omega t + \dots \quad (11)$$

If the displacement is measured with, for example, a vibrometer, then its response to each component of the series is given by an equation similar to equation (6). So the output of the vibrometer will be:

$$z(t) = a_1 \sin(\omega t - \phi_1) + a_2 \sin(2\omega t - \phi_2) + \dots \quad (12)$$

$$\text{Where } \tan \phi_j = \frac{2\zeta \left( j \frac{\omega}{\omega_n} \right)}{1 - \left( j \frac{\omega}{\omega_n} \right)^2}, \quad j = 1, 2, \dots \quad (13)$$

Since the ratio  $\omega / \omega_n$  for the vibrometer is large, then  $\phi_j \approx \pi$ ,  $j = 1, 2, \dots$ , and equation (12) becomes:

$$z(t) \approx -[a_1 \sin \omega t + a_2 \sin 2\omega t + \dots] \approx -y(t) \quad (14)$$

Thus, the output signal will be inverse to the measured motion.

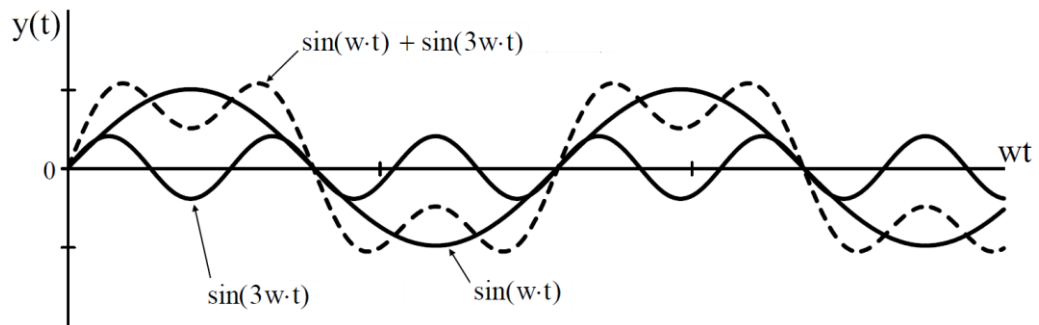


Fig.2. Shape of vibration signal.

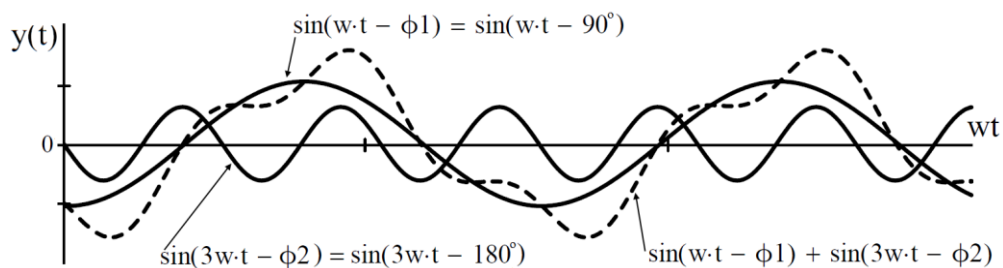


Fig. 3. Phase shift error.

Using a similar reasoning, we can show on the example of a velocimeter that

$$\dot{z}(t) \approx -\dot{y}(t) \quad (15)$$

for an input signal that consists of several harmonics.

Let's consider the phase shift for the accelerometer. Let the acceleration signal for the measurement be expressed using equation (11) as

$$\ddot{y}(t) = -a_1 \omega^2 \sin \omega t - a_2 (2\omega)^2 \sin 2\omega t - \dots \quad (16)$$

The answer or output of the accelerometer for each component can be found as in the equation. (12)

$$\ddot{z}(t) = -a_1 \omega^2 \sin(\omega t - \varphi_1) - a_2 (2\omega)^2 \sin(2\omega t - \varphi_2) - \dots \quad (17)$$

where the phase lags  $\phi_j$  are different for different components of the series in equation (17). Since the phase lag  $\phi$  varies almost linearly from  $0^\circ$  at  $r=0$  to  $90^\circ$  at  $r=1$  for  $\zeta=0.7$  we can express  $\phi$  as

$$\phi \approx \alpha r = \alpha \frac{\omega}{\omega_n} = \beta \omega \quad (18)$$

where  $\alpha$  and  $\beta = \alpha / \omega_n$  are constants. The delay time is set

$$t' = \frac{\phi}{\omega} = \frac{\beta \omega}{\omega} = \beta \quad (19)$$

This indicates that the time lag of the accelerometer does not depend from the frequency for any component, provided that the frequency is in range  $0 \leq r \leq 1$ . Since each component of the signal has the same time delay or phase lag, we have, from equation (17),

$$\begin{aligned} -\omega^2 \ddot{z}(t) &= -a_1 \omega^2 \sin(\omega t - \omega\beta) - a_2 (2\omega)^2 \sin(2\omega t - 2\omega\beta) - \dots \\ &= -a_1 \omega^2 \sin \omega\tau - a_2 (2\omega)^2 \sin 2\omega\tau - \dots \end{aligned} \quad (20)$$

where  $\tau = t - \beta$ . Note that equation (20) assumes that  $0 \leq r \leq 1$  - that is, even the highest frequency,  $n\omega$ , is less than  $\omega_n$ .

Of course, this is not achieved in practice. But, in the real output signal, there is no significant phase distortion even when some frequencies of a more higher order exceed  $\omega_n$ . The reason is that, as a rule, only the first few components are important for the approximation of even a complex waveform. The amplitudes of the higher harmonics are small and have very little effect on the overall shape of the signal. Thus, the output signal of the accelerometer has a shape close to the shape of the acceleration being measured.

### Conclusions:

1. When using vibration measuring equipment, it is necessary to take into account the phase characteristics of the charge or voltage amplifiers used together with the considered piezoelectric sensors.
2. Particular attention should be paid to the use of equipment equipped with electronic integrators and filters. Issues related to phase response and phase distortion are especially important in the study of short-term mechanical oscillations and mechanical shocks.

### References

1. Harris' Shock and Vibration Handbook, Cyril M. Harris, editor, Allan G. Piersol, editor, 5th ed., McGraw-Hill 2002.
2. J. Tuma, J. Kulhanek, "Using scripts in Signal Analyzer". In: 8th International Scientific Technical Conference Process Control 2008, Editor Taufer, Ivan. 1. edition Pardubice : Ceska spolecnost prumyslove chemie, June 9-12, 2008, Kouty nad Desnou, Czech Republic.
3. J. Edward Alexander. Shock Response Spectrum – A Primer Sound & Vibration/June 2009.
4. Harris S. Handbook of shock loads. / S.M. Harris, C.I. Creed // L. : Shipbuilding, 1980.
5. Subbotin S. Spectral characteristics for comparison and identification of impact loads / S. G. Subbotin, A. Yu. Melnikova // Factory Laboratory. Diagnostics of materials, 2009. No. 12 (75). S. 53–56. ISSN 1028-6861.
6. Perederko A. Mathematical models of piezoelectric sensors for measuring vibration parameters / A.L. Perederko. // Measuring and computing devices in technological processes. 2019, Issue 2. ISSN 2219-9365.
7. Karazin V. Features of modeling and reproduction of vibroimpact effects / V.I. Karazin V.I., S.V. Kolesnikov, S.D. Litvinov et al. // Theory of mechanisms and machines. 2013. No. 2 (11). ISSN 0236-3941.
8. Carl Sisemore, Vít Babuška. The Science and Engineering of Mechanical Shock Springer // ISBN 978-3-030-12103-7 (eBook). Nature Switzerland AG 2020.

9. Tretyakov A. Calculation of the shock response spectrum when testing portable tanks and gas containers/ A.V. Tretyakov, O.A. Tretyakov, M.V. Zimakova // Transport of the Russian Federation, No. 3 (58) 2015.

10. Voskoboinikov Yu. E. Solution of engineering problems in the MathCAD package / Yu. E. Voskoboinikov (and others); under the editorship of Yu. E. Voskoboinikova. - Novosibirsk: NGASU (Sibstrin), 2013 .

**Передерко А.Л., к.т.н.**

Одесская государственная академия технического регулирования и качества

#### **ФАЗОВЫЕ СДВИГИ СИГНАЛА ПРИ ИЗМЕРЕНИИ ВИБРАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ**

*В системах вибрационного контроля, мониторинга, диагностики, активной виброзащиты необходимы измерения и контроль параметров вибрации. Для этого в них, в качестве первичных преобразователей, широко применяются пьезоэлектрические датчики. Эти датчики, благодаря своим высоким метрологическим характеристикам, таким как точность, быстрдействие, широкая полоса рабочих частот и температур, традиционно используются для измерения виброперемещения, виброскорости и виброускорения. Применение этих типов датчиков обусловлено необходимостью измерения и контроля вибрации на объектах с различными частотными характеристиками. В статье рассмотрены возможные искажения измеряемого сигнала на выходе датчиков за счет фазовых сдвигов. Эти фазовые сдвиги необходимо учитывать при разработке и построении схем измерения и обработки сигнала вибрации. Особенно это актуально при измерении и регистрации быстротекущих вибрационных процессов, например таких как механический удар.*

**Ключевые слова:** *вибрация, фазовый сдвиг, датчики для измерения вибрации, виброметр, акселерометр.*

**Передерко А.Л., к.т.н.**

Одеська державна академія технічного регулювання та якості

#### **ФАЗОВІ ЗРУШЕННЯ СИГНАЛУ ПРИ ВИМІРЮВАННІ ВІБРАЦІЙНИХ ПАРАМЕТРІВ**

*В системах вібраційного контролю, моніторингу, діагностики, активного віброзахисту необхідні вимірювання і контроль параметрів вібрації. Для цього в них, в якості первинних перетворювачів, широко застосовуються п'єзоелектричні датчики. Ці датчики, завдяки своїм високим метрологічним характеристикам, таким як точність, швидкодія, широка смуга робочих частот і температур, традиційно використовуються для вимірювання вібропереміщення, віброшвидкості і віброприскорення. Застосування цих типів датчиків обумовлено необхідністю вимірювання і контролю вібрації на об'єктах з різними частотними характеристиками. У статті розглянуто можливі спотворення вимірюваного сигналу на виході датчиків за рахунок фазових зрушень. Ці фазові зрушення необхідно враховувати при розробці та побудові схем вимірювання та обробки сигналу вібрації. Особливо це актуально при вимірюванні та реєстрації швидкоплинних вібраційних процесів, наприклад таких як механічний удар.*

**Ключові слова:** *вібрація, фазовий зсув, датчики для вимірювання вібрації, виброметр, акселерометр.*

УДК 621.398

DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2313-5352-2020-16-14>

Сахацкий В. Д., Скомороха В. Ю.

Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет

## УСТРОЙСТВО СОПРЯЖЕНИЯ ВОЛНОВОДНОЙ ЛИНИИ ПЕРЕДАЧИ В СИСТЕМЕ ИЗМЕРЕНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННОГО ПОЛОЖЕНИЯ ПРОКАЛЫВАЮЩЕЙ ГОЛОВКИ МЕХАНИЗМА ПОДЗЕМНОЙ ПРОКЛАДКИ КОММУНИКАЦИОННЫХ ТРАСС

*Аннотация.* В статье рассматривается способ повышения эффективности измерительной системы определения пространственного положения прокалывающей головки механизма прокола грунта, в которой на частоте 5 ГГц полые металлические штанги могут использоваться в качестве линии передачи измерительного сигнала. Учитывая, что такая линия за счет своей неоднородности изменяет поляризацию прошедшей волны, предложена конструкция устройства сопряжения круглого волновода с коаксиальным входом приемного устройства, которая позволяет на его входе увеличить уровень сигнала. Проведенные экспериментальные исследования на макете линии передачи с рабочей частотой 10 ГГц подтвердили эффективность предложенного устройства сопряжения.

*Ключевые слова:* круглый волновод, коэффициент передачи, коаксиальный волновод, неоднородность, деполаризация волны, уровень сигнала.

**Введение и постановка задачи.** В настоящее время во многих странах мира прокладка различных видов подземных коммуникаций осуществляется без разрушения верхних слоев грунта. Для этого используют метод горизонтально-направленного прокола (бурения) грунта с помощью специальных механизмов прокола (бурения). Чаще всего непосредственным прокалывающим элементом является прокалывающая головка или пневмопробойник. В процессе прокола грунта нельзя допустить, чтобы траектория прокалывающей головки отклонялась от заданной трассы, так как такое отклонение не только не обеспечивает выход коммуникационной системы в заданную точку, но также может привести к столкновению прокалывающей головки с другими коммуникационными системами и разрушению их.

Причинами отклонения трассы от заданной являются неточность начальной установки оси механизма прокола относительно оси трассы, различная плотность и каменистость грунта, изгиб наращиваемых штанг, которые проталкивают прокалывающую головку в грунте.

Коррекция траектории движения прокалывающего органа и определение его подземного пространственного положения является одной из основных задач при горизонтально-направленном проколе грунта. Поэтому механизмы прокола необходимо снабжать системами контроля и управления траекторией движения прокалывающей головки. В настоящее время существуют различные методы определения координат прокалывающей головки, которые зависят от конструкции механизма прокола, особенностей грунта, глубины и длины трассы.

Бестраншейная прокладка коммуникационных трасс в городской черте накладывает определенные трудности на использование известных методов и средств такой прокладки. Во-первых работа в стесненных городских условиях вызывает необходимость разработки малогабаритных механизмов прокола. Во-вторых городская среда характеризуется широким частотным спектром промышленных электромагнитных помех. Данные обстоятельства приводят к тому, что известные прокалывающие механизмы и системы определения координат прокалывающей головки в городской черте зачастую неприменимы. Поэтому поиск эффективных методов создания помехозащищенных измерительных систем, привязанных к конкретному малогабаритному механизму прокола, является актуальной задачей.

**Анализ последних исследований и публикаций.** Измерение пространственных координат подземных трасс является неотъемлемым атрибутом при прокладке газовых, нефтяных, геотермальных и других скважин. В этом случае в качестве основного метода измерения используют инклинометрический метод. Инклинометр включает в себя скважинный и наземный приборы. В скважинном приборе для измерения азимута и зенитного угла скважины имеются датчики, которые реагируют на изменение магнитного и гравитационного поля земли. Питание скважинного прибора осуществляется с помощью специального картонажного кабеля от наземного прибора. По тому же картонажному кабелю наземный



прибор получает информацию от датчиков об угловых положениях скважины [1]. При определении пространственных координат скважин используются различные виды инклинометров. Их усовершенствование связано с разработкой более чувствительных датчиков и с повышением точности измерения.

Интенсивное развитие бестраншейного метода создания трасс подземных коммуникаций вызвало появление новых и усовершенствование известных механизмов прокола грунта, что повлекло за собой создание и развитие соответствующих им измерительных систем определения координат прокалывающего органа. Используемые при формировании подземных трасс методы и механизмы прокола, описаны в работе [2]. Такие механизмы обычно использовались для прокола грунта на больших площадях, поэтому имеют большие габариты и для работы в стесненных городских условиях являются малоприменимыми.

Для работы в городской черте в настоящее время разрабатываются малогабаритные механизмы прокола [3]. При этом технологический процесс прокола требует непрерывного контроля за пространственным положением прокалывающей головки и своевременной коррективы ее траектории [4].

Наибольшее распространение при определении подземных координат движущихся металлических объектов получили электромагнитные методы: радиопросвечивания, радиолокационный, феррозондовый и индукционный, которые достаточно подробно описаны в диссертационной работе Плешаковой Е.В. [5]. При этом, как правило, при проколе грунта используется импортное оборудование, такое как навигационная система МАГСтир (английская фирма Impracdrilling LTD), системы позиционирования Mark 111, 1V, V, Eclipse (компания Digitrack, Германия) и другие [5]. Процесс прокола грунта в большинстве случаев осуществляется с помощью пневмопробойника как источника электромагнитного поля. Для этого в его конструкцию включают устройства, создающие вне пробойника магнитное поле или электромагнитное излучение. Приемник располагается на поверхности земли и по прошедшему через слой грунта электромагнитному (магнитному) полю определяет место положения пневмопробойника и направление его движения. В [5] отмечено, что большинство таких систем работают в низкочастотном диапазоне, подвержены воздействию промышленных помех и не всегда обеспечивают высокую точность определения координат пробойника.

В настоящее время для повышения точности и помехозащищенности измерительных систем механизмов прокола грунта их разработки проводятся в более высоком диапазоне частот. При этом используют две разнесенные в пространстве приемные антенны. По принимаемому антеннами уровню или запаздыванию во времени электромагнитных сигналов от излучателей пробойника, судят о месте его положения и направлении движения.

Так в [6] описан способ измерения угла отклонения пневмопробойника от заданной траектории. Конструкция пробойника выполнена в виде несимметричного вибратора с рабочей частотой 150 МГц. Излучение вибратора принимается двумя антеннами, которые располагаются перед пробойником симметрично оси траектории трассы. Высокочастотные колебания на вибратор подаются от наземного генератора с помощью радиочастотного кабеля, который протягивается вдоль выполненной пневмопробойником трассы. По разнице уровней принятых антеннами сигналов определяют угол ее отклонения.

Данный способ обеспечивает повышение помехозащищенности измерительной системы и точность измерения угла отклонения трассы от заданного направления. К его недостаткам можно отнести возможность измерения только в горизонтальной плоскости, а также требование, чтобы приемники располагались в ряд на уровне пневмопробойника. Последнее при достаточно длинной трассе вызывает необходимость дополнительного разрушения поверхностного слоя.

В целом анализ литературных источников показывает, что действующие механизмы прокола грунта, методы и системы измерения (контроля) прокладываемой трассы являются крупногабаритными, имеют сложное техническое исполнение, вызывают необходимость дополнительных расчетов для определения пространственного положения прокалывающего органа, характеризуются большой стоимостью (десятки тысяч долларов для импортных систем). Их использование совместно с последними разработками малогабаритных прокалывающих установок статического действия при работе в сложных городских условиях зачастую невозможно. Линией передачи измерительного сигнала к приемнику обычно является поверхностный слой грунта, что затрудняет за счет больших потерь использование высокочастотного диапазона.

В процессе прокола грунта в большинстве известных измерительных систем приемник переносится так, чтобы он все время находился над источником излучения. Если на земной поверхности в направлении прокладываемой трассы будут находиться какие - либо строения, то непрерывный прием измерительного сигнала, несущего информацию о текущем направлении движения прокалывающего органа будет невозможен и, как следствие, возникает неуправляемый прокол грунта по произвольному направлению.

Корректировку трассы можно осуществить с помощью специальной конструкции наконечника прокалывающей головки. Поворачивая прокалывающую головку в процессе движения вокруг своей оси на заданный угол можно изменять направление ее движения [4].

Осуществить такой управляемый прокол грунта можно только с помощью информационно-измерительной системы, позволяющей определить углы отклонения головки от заданной трассы в горизонтальной и вертикальной плоскостях и угол поворота вокруг ее оси.

В работе [7] показано, что для малогабаритных механизмов прокола при использовании Wi-Fi технологий с несущей частотой 5 ГГц возможно создание измерительной системы для управляющего прокола грунта. При этом линией передачи измерительного сигнала (волноводной) могут служить стальные полые круглые штанги малогабаритного механизма прокола, которые обеспечивают продвижение в грунте прокалывающей головки. Проведенные теоретические исследования показали, что неоднородности, обусловленные стыком последовательно наращиваемых штанг, и удельная электропроводность стали позволяют без дополнительного усиления обеспечить уверенный прием измерительного сигнала об угловых положениях прокалывающей головки на расстоянии 50 м, что вполне приемлемо для работы в городской среде. Вместе с тем любая неоднородность в волноводной линии передачи приводит к изменению поляризации прошедшей волны и, как следствие, вызывает уменьшение уровня сигнала на входе приемника, настроенного на прием волны конкретного вида поляризации. Поэтому вопросы обеспечения уверенного приема измерительного сигнала для данной измерительной системы при деполяризации волны, распространяющейся по волноводной линии остаются открытыми.

**Цель работы.** Разработка и экспериментальное исследование устройства сопряжения волноводной линии передачи с приемной частью измерительной системы малогабаритных механизмов управляющего прокола грунта при приеме деполяризованной волны.

**Изложение материалов исследования.** Представление о малогабаритном механизме прокола грунта дает рис.1.



Рис. 1. Малогабаритный механизм прокола грунта [3]

В данном механизме продвижение прокалывающей головки осуществляется с помощью показанных на рис. 1 штанг в виде стальных труб длиной 50 см, внутренний и внешний диаметры которых соответственно равны 3,95 см и 6,35 см. Такая штанга является круглым волноводом, по которому на частоте 5 ГГц может распространяться основной  $H_{11}$  тип колебаний. Эти штанги и предлагается использовать для передачи измерительного сигнала от прокалывающей головки. Штанги соединяются друг с другом резьбовым соединением и механизм прокола может вместе с

прокальвающей головкой поворачивать их вокруг своей оси на заданный угол для управления траекторией движения.

Частоту 5 ГГц относят к рабочим частотам Wi-Fi систем. Сама измерительная система, построенная на основе Wi-Fi модулей состоит из передатчика и приемника. Передатчик размещается в полости прокальвающей головки, а приемник – вместе расположения прокальвающего механизма. В качестве передатчика может выступать миникомпьютер Raspberry Pi 3 Model B+ с подключенным к нему датчиком пространственного положения BMX055 [7].

Приемник реализован в виде миникомпьютера Raspberry Pi 3 Model B+ с подключенным к нему дисплеем для вывода информации. Данная система позволяет определять углы поворота прокальвающей головки в горизонтальной и вертикальной плоскостях, а также угол ее поворота вокруг своей оси. Расстояние, которое прошла прокальвающая головка, можно определить по числу подсоединяемых в процессе движения штанг.

Принцип измерения пространственного положения головки с учетом специфики применяемых для частоты 5 ГГц Wi-Fi модулей будет таким же, что и указанный в работе [8].

Предлагаемая измерительная система позволяет получать непрерывную информацию о пространственном положении прокальвающей головки вне зависимости от наличия на земной поверхности различных преград и осуществлять управляющий прокол грунта. Прокол можно осуществлять на произвольных глубинах прокладываемой трассы не зависимо от электрофизических параметров грунта. Уровень принимаемого сигнала будет зависеть только от его потерь в линии передачи и в устройствах ее сопряжения с передатчиком и приемником измерительной системы.

Наиболее просто устройство сопряжения волноводной линии передачи с приемником можно было бы выполнить в виде волноводного перехода с круглого сечения на коаксиальную линию. Подсоединив его к выходу волноводной линии и вращая вокруг своей оси, можно обеспечить согласование поляризаций волны на выходе линии с волной в коаксиально-волноводном переходе и получить максимальную входную мощность измерительного сигнала на приемнике. Однако возбуждающий штырь и его входное отверстие в коаксиально-волноводном переходе на круглом волноводе сами являются неоднородностью и также будут изменять уже согласованную на входе волноводного перехода поляризацию волны. Выполнять штанги в виде эллиптических волноводов, как это делается для ликвидации поляризационного вырождения волны типа  $H_{11}$  в специальных линиях передачи, технически сложно и дорого. Более простой способ устранения поляризационного вырождения волны состоит в изготовлении устройства сопряжения в виде волноводного перехода с круглого волновода на прямоугольный, к которому подсоединяется коаксиально-волноводный переход на прямоугольном волноводе. Последний, как и эллиптический волновод, не допускает поляризационного вырождения волны типа  $H_{11}$ , преобразующуюся в волну типа  $H_{10}$ .

Подобную конструкцию возбуждающего устройства целесообразно устанавливать и на входе волноводной линии, чтобы исключить возможность поляризационного вырождения волны типа  $H_{11}$  на стадии ее возбуждения. Следует отметить, что выполнить такое устройство сопряжения можно на основе стандартных составляющих его элементов, что удешевляет конструкцию. При этом необходимо иметь ввиду, что при малых размерах приемка для механизма прокола требуются небольшие по длине волноводные переходы, которые имеют более высокое значение КСВ.

Сравнивая картину распределения волны типа  $H_{11}$  в круглом волноводе и волны типа  $H_{11}$  в коаксиальной линии, можно заметить, что в коаксиальной линии напряженность электрического поля в большей степени концентрируется вблизи ее центрального проводника. Аналогичная картина наблюдается и вблизи металлического выступа в П-образном волноводе. Возбуждающий штырь коаксиально-волноводного перехода расположен вблизи центральной части волновода. Поэтому концентрируя поле вблизи оси волноводного перехода можно увеличить напряженность поля вблизи штыря и тем самым увеличить амплитуду ТЕМ волны в коаксиальном волноводе.

Экспериментальное подтверждение изложенного проводилось для макета линии передачи на частоте 10 ГГц (кратной рабочей частоте 5 ГГц). В качестве модели металлических штанг использовались отрезки стальной трубы длиной 50 см с внутренним и внешним диаметром равными соответственно 2,18 см и 2,68 см. Такие штанги на частоте 10 ГГц также могли поддерживать волну типа  $H_{11}$ . Отрезки волноводов (во избежание перекосов) соединялись между собой с помощью картонных трубок, которые плотно входили во внутренний диаметр волновода.

Неоднородностью линии передачи служил стык двух волноводов, а излучение из цилиндрической щели стыка экранировалось с помощью алюминиевой фольги, которая охватывала внешний диаметр волновода.

Макет устройства сопряжения изготавливался на основе стандартного для частоты 10 ГГц круглого волновода длиной 9 см и волноводного перехода с круглого на прямоугольный волновод длиной 12 см. Моделью коаксиально волноводного перехода служила детекторная секция, которая по своей структуре аналогична ему с тем отличием, что возбуждающим штырем в ней является цилиндрический диод, осуществляющий одновременно прием и преобразование радиоизлучения в низкочастотный информационный сигнал. Вдоль оси устройства сопряжения с помощью пенополиуретановых втулок устанавливались покрытые фольгой металлические стержни разного диаметра и длины, образуя отрезок коаксиальной линии. Для согласования с волноводной линией их концы имели конусообразную форму высотой 4 см. Общий вид макетов устройства сопряжения и измерительной установки с линией передачи показан на рис. 1. и рис.2.



Рис.1. Общий вид макета устройства сопряжения



Рис.2. Общий вид измерительной установки

Методика измерения состояла в следующем. От генератора стандартных сигналов типа Г4-32А через аттенюатор типа Д5-5 импульсно-модулированное излучение с помощью волноводного перехода с прямоугольного на круглый преобразовывалось в волну типа  $H_{11}$ , распространяющуюся по состыкованным друг с другом четырем отрезкам круглого волновода. Прошедшая деполаризованная волна принималась макетом устройства сопряжения, детектировалась и прямоугольный модулирующий сигнал фиксировался осциллографом типа С1-64А.

Измерительная установка позволяла определить степень деполаризации прошедшей волны и размеры металлического стержня устройства сопряжения, обеспечивающих максимальный уровень принятого сигнала.

Степень деполаризации прошедшей волны определялась путем поворота устройства сопряжения вокруг своей оси до получения максимального уровня выходного сигнала

Оптимальная конструкция устройства сопряжения определялась по минимальному значению коэффициента передачи, который находился как отношение уровня сигнала на входе волноводной линии и на выходе устройства сопряжения. Для этого детекторная секция подсоединялась к выходу аттенюатора и регулируя его уровень ослабления добивались показаний амплитуды сигнала на ее выходе равной 5 мВ. Затем к выходу аттенюатора подключалась линия передачи, вращением вокруг оси устройства сопряжения добивались максимального уровня выходного сигнала и вновь регулировкой аттенюатора устанавливался выходной сигнал с амплитудой 5 мВ. Разница в показаниях аттенюатора представляла собой значение коэффициента передачи (ослабления), выраженного в децибелах.

Результаты измерений показали, что по сравнению с устройством сопряжения, в котором отсутствовал металлический стержень, установка стержня диаметром 0,815 см и длиной 14,3 см, при глубине его погружения в волноводный переход на расстояние  $\Delta = 2$  см (отсчет от торца его круглого сечения), уровень выходного сигнала увеличился на 3 дБ. При этом угол деполяризации волны был равен  $0^{\circ}$ . При глубине погружения  $\Delta = 4$  см – на 5,8 дБ, а угол деполяризации стал равным  $20^{\circ}$ . При глубине погружения  $\Delta = 5,5$  см – на 5,3 дБ, а угол деполяризации возрос до  $40^{\circ}$ . В процессе исследования проводились пятикратные повторные измерения, погрешность которых не превышала  $\pm 2.6$  дБ. Таким образом предложенная конструкция устройства сопряжения подтвердила свою эффективность. Физически это можно объяснить теми же эффектами, которые имеют место в коаксиально- волноводных переходах, когда в них для увеличения выходной мощности используют волноводные диафрагмы или согласующие трансформаторы в виде штырей [9].

При дальнейших измерениях проводились сравнительные оценки коэффициента передачи волноводной линии с различными конструкциями устройства сопряжения. Исследовалось влияние на коэффициент передачи стержней различных геометрических размеров (с длинами 14,3 см, 18,7 см, 30,5 см и диаметрами 0,815 см, 0,847 см и 1,06 см). Лучшие результаты показал стержень длиной 18,7 см и диаметром 1,06 см. В частности, при глубине его погружения  $\Delta = 4$  см получен коэффициент передачи линии равный 5,8 дБ. При глубине погружения  $\Delta = 7$  см – 8,5 дБ, а при глубине погружения  $\Delta = 8$  см – 10,6 дБ. Анализ полученных результатов показал, что наименьшее затухание в линии передачи (минимальный коэффициент передачи) обеспечивает стержень диаметром 1,06 см при его длине 18,7 см и глубине погружения  $\Delta = 4$  см.

#### **Выводы:**

1. Рассмотрен способ увеличения уровня сигнала на входе приемника измерительной системы при использовании штанг малогабаритного механизма прокола грунта, как волноводной линии передачи с изменяющейся поляризацией волны.

2. Предложена конструкция устройства сопряжения волноводной линии передачи с приемной частью измерительной системы, которая по сравнению с известными волноводными конструкциями является более эффективной.

3. Для макета волноводной линии с рабочей частотой 10 ГГц экспериментально найдены геометрические размеры устройства сопряжения, обеспечивающие максимальный уровень сигнала на входе приемника.

Дальнейшие исследования предполагают испытание и доработку предложенной конструкции устройства сопряжения для измерительной системы на частоте 5 ГГц.

#### **Литература**

1. Исаченко В.Х. Инклинометрия скважин. - М.: Недра.-1987.-216с.
2. Руднев В. К. Кравец С. В., Каслин Н. Д., Супонев В. Н. Машины для бестраншейной прокладки подземных коммуникаций: учебн. пособие под ред. Руднева В. К. Харьков: ООО «Фавор», 2008. – 256с.
3. Супонев В.М. Створення обладнання для розробки горизонтальних свердловин комбінованими способами статичної дії: монографія. Харків, ХНАДУ, 2018. -196 с.
4. Супонев В.Н., Пенчук В.А., Гусаков В.Н. и др. Точность и управление траекторией прокола грунта// Нові технології в будівництві.-2015.- № 29. -С. 18–22.
5. Плешакова Е.В. Разработка методов обнаружения движущихся металлических объектов в непроводящих и слабопроводящих средах// Автореферат диссертации на соискание ученой степени канд. техн. наук по специальности 25.00.20 «Геомеханика, разрушение горных пород, рудничная аэрогидродинамика, горная теплофизика»-Новосибирск.-2006.
6. Плешакова Е.В. Патент RU 2338876 С1 МПК E21B 47/024, G01V 3/08 Способ определения угла отклонения пневмопробойника от заданной траектории. Оpubл.20.11.2008. Бюл. № 32. Патентообладатель: Институт горного дела Сибирского отделения РАН.
7. Сахацкий В.Д., Чепусенко Е.А. Помехозащищенная система измерения угловых координат прокалывающей головки в малогабаритных механизмах управляющего прокола грунта // VII Международная научно-техническая конференция Метрология, информационно-

измерительные технологии и системы. МИИТС-2020. Тезисы докладов. 18-19 февраля 2020, Харьков. –с.126-127

8. Сахацький В.Д. Використання Wi-Fi технологій для розробки вимірювальної системи визначення координат просторового положення проколюючої головки при безтраншейній прокладки комунікацій / В.Д. Сахацький, Є. О. Чепусенко // Технологія приборостроєння .- 2018.- № 2.-с. 37- 41.

9. Харвей А.Ф. Техника сверхвысоких частот/ под ред. В.И. Смушкевича. Т.1.- М.: Сов. радио, 1965.-784с.

**Сахацький В.Д., Скомороха В.Ю.**

Харківський національний автомобільно- дорожній університет.

### **ПРИСТРІЙ СПОЛУЧЕННЯ ХВИЛЕВОДНОЇ ЛІНІЇ ПЕРЕДАЧІ В СИСТЕМІ ВИМІРЮВАННЯ ПРОСТОРОВОГО ПОЛОЖЕННЯ ГОЛОВКИ, ЯКА ПРОКОЛУЄ, МЕХАНІЗМУ ПІДЗЕМНОЇ ПРОКЛАДКИ КОМУНІКАЦІЙНИХ ТРАС**

***Анотація:** У статті розглядається спосіб підвищення ефективності вимірювальної системи визначення просторового положення головки, яка проколює, механізму проколу ґрунту, в якій на частоті 5 ГГц порожнисті металеві штанги можуть використовуватися в якості лінії передачі вимірювального сигналу. З огляду на те, що така лінія за рахунок своєї неоднорідності змінює поляризацію хвилі, запропонована конструкція пристрою сполучення круглого хвилеводу з коаксіальним входом приймального пристрою, яка дозволяє на його вході збільшити рівень сигналу. Проведені експериментальні дослідження на макеті лінії передачі з робочою частотою 10 ГГц підтвердили ефективність запропонованого пристрою сполучення.*

***Ключові слова:** круглий хвилевід, коефіцієнт передачі, коаксіальний хвилевід, неоднорідність, деполаризація хвилі, рівень сигналу.*

**Sakhatskiy V. D., Skomorokha V. Yu.**

Kharkov National Automobile and Highway University

### **DEVICE FOR INTERFERENCE OF A WAVEGUIDE TRANSMISSION LINE IN THE SYSTEM FOR MEASURING THE SPATIAL POSITION OF THE PUNCHING HEAD OF THE UNDERGROUND LAYING OF THE COMMUNICATION TRAFFIC**

***Abstract:** The article discusses a way to improve the efficiency of the measuring system for determining the spatial position of the piercing head of the soil puncture mechanism, in which at a frequency of 5 GHz, hollow metal rods can be used as a transmission line of the measuring signal. Considering that such a line, due to its inhomogeneity, changes the polarization of the transmitted wave, a design is proposed for a device for interfacing a circular waveguide with a coaxial input of a receiving device, which allows increasing the signal level at its input. The conducted experimental studies on the model of a transmission line with an operating frequency of 10 GHz confirmed the effectiveness of the proposed interface device.*

***Keywords:** circular waveguide, transmission coefficient, coaxial waveguide, heterogeneity, change in wave polarization, signal level.*



УДК 621.822.681.2:369.64

DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2313-5352-2020-16-15>

Сачковська Л.О.

Луцький національний технічний університет

### МОДЕЛЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРНИХ ПРОЦЕСІВ ПЕРЕРИВЧАСТОГО ШЛІФУВАННЯ ПОВЕРХОНЬ ОБЕРТАННЯ КІЛЕЦЬ РОЛИКОПІДШИПНИКІВ

В даній роботі проведена серія експериментальних досліджень, що підтвердила результати моделювання температурних процесів в зоні безцентрового переривчастого шліфування поверхонь кілець кочення роликотпідшипників. Експериментально встановлені залежності між температурою шліфування, тангенціальною складовою  $P_z$  і радіальною складовою  $P_y$  під час переривчастого шліфування кругами з різними числами канавок. На підставі використання запропонованої збірної конструкції переривчастого шліфувального круга розроблена високоефективна технологія безцентрового шліфування поверхонь кілець роликотпідшипників з можливістю керуванням зернистістю збірної, робочої, калібрувальної та виходжувальної зони різання. Посадження різної зернистості в конструкції збірного шліфувального круга дало змогу покращити показники якості шліфованих поверхонь до Ra 1,0-1,4 мкм, знизити та стабілізувати температуру в зоні шліфування до 450°C та вилучити з технологічного процесу шліфування базової поверхні кільця одну операцію напівчорнового шліфування.

**Ключові слова:** круг, канавка, інструмент, кільце, температура, якість.

Особливо актуальним питання зниження теплонапруженості та стабілізації процесу шліфування виявляється при обробленні плоских поверхонь, яке супроводжується підвищенням зношенням шліфувального круга та високими контактними температурами внаслідок значної площі контакту круга з заготовкою. [1-9]

Встановимо характер зміни товщини поверхневого шару оброблюваної деталі, в якому концентрується тепло, що дорівнює довжині сегмента  $l_2$ . Під час цього будемо вважати, що

$$\theta_2 = \theta.$$

Тоді:

$$l_2 = \frac{\lambda \cdot S \cdot \theta}{N}. \quad (1)$$

Встановлено, що потужність теплового потоку  $N$  визначається залежністю  $N = \sigma \cdot S \cdot V_{\text{різ}}$ . Підставивши її в залежність (1), отримаємо:

$$l_2 = \frac{\lambda \cdot \theta}{\sigma \cdot V_{\text{різ}}}. \quad (2)$$

З урахуванням прийнятого значення:

$$z = \frac{\theta}{\left(\frac{\sigma}{c \cdot p}\right)}.$$

Залежність (2) запишемо у наступному вигляді:

$$l_2 = \frac{\lambda \cdot z}{c \cdot p \cdot V_{\text{різ}}} = \frac{\lambda}{c \cdot p \cdot V_{\text{різ}}} \cdot \bar{l}_2, \quad (3)$$



де  $\bar{l}_2 = z$ .

Порівнюючи залежності (1) і (3), бачимо, що вони відрізняються тільки другим безрозмірним множником. [1-8]

На рис. 1 зображено характер зміни безрозмірних величин  $\bar{l}_1$  і  $\bar{l}_2$  в залежності від показника приведеної температури  $z$ , який змінюється в межах  $0 \dots 1$ . Бачимо, що зі збільшенням  $z$  безрозмірна величина  $\bar{l}_1$  безперервно збільшується, прямуючи до нескінченості (при значенні  $z \rightarrow 1$ ). Безрозмірна величина  $\bar{l}_2$  збільшується згідно лінійного закону зі збільшенням величини  $z$  (в межах  $z = 0 \dots 1$ ). Коли ж  $\omega \geq 1$  функція  $\bar{l}_2$  не існує.

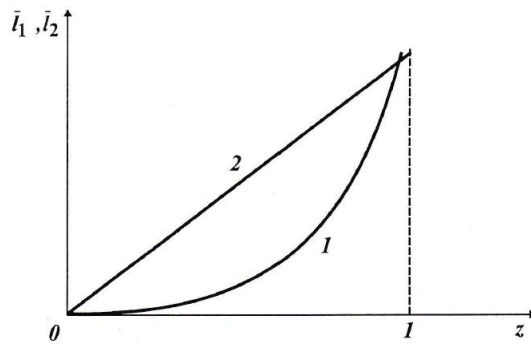


Рис. 1. Характерні зміни безрозмірних величин  $\bar{l}_1(1)$  і  $\bar{l}_2(2)$  в залежності від значення показника приведеної температури  $z$

Використовуючи вираз для визначення кількості тепла, яке витрачається на нагрівання адіабатичних сегментів  $(l_1 + l_2)$  загальна кількість тепла  $Q$  може бути визначена за формулою [8]:

$$Q = N \cdot \tau, \tag{4}$$

де  $N$  – потужність теплового потоку;  $\tau$  – час за який перерізається сегмент довжиною  $l_1$ , та дорівнює часу впливу теплового потоку [1, 4, 5, 7, 8].

В результаті проведених розрахунків було отримано інтегральне рівняння, в якому невідомі величини  $\theta_2$  та  $\theta$ , залежать від часу  $\tau$ . Для спрощення вирішення рівняння (4) виконаємо диференціювання його правої та лівої частин за часом  $\tau$ , тобто проведемо диференціювання всіх складових рівняння :

$$c \cdot p \cdot S \cdot V_{piz} \cdot \theta(\tau) + c \cdot p \cdot \lambda \cdot S^2 \cdot \frac{\theta_2 \cdot \theta'_2}{N} = N, \tag{5}$$

Де  $\theta'_2$  – перша похідна функції  $\theta_2$  по часу  $\tau$ ;  $\theta(\tau)$  – температура на останньому елементарному відрізку сегмента довжиною  $l_1$ , тобто по довжині сегмента  $l_1$ . [6, 7, 8]

Бачимо, що  $\theta(\tau) = \theta_2$ . Тоді рівняння (5) набуде остаточного вигляду:

$$c \cdot p \cdot S \cdot V_{piz} \cdot \theta_2 + c \cdot p \cdot \lambda \cdot S^2 \cdot \frac{\theta_2 \cdot \theta'_2}{N} = N.$$

Оскільки рівняння (2) не вдалось вирішити в явному вигляді відносно температури  $\theta$ , то використаємо залежність, яка дозволяє температуру  $\theta$  виразити через показник приведеної температури  $\omega$ . Тоді, виходячи з залежності (2), отримаємо:

$$\theta' = \frac{\sigma}{c \cdot p} \cdot z'. \tag{6}$$

де  $\theta'$  і  $z'$  – похідні функцій  $\theta$  і  $z$  за часом  $\tau$ . [8]

Для визначення похідної  $\omega'$  виконаємо диференціювання лівої та правої частин рівняння за часом. Очевидно, перша похідна лівої частини рівна одиниці, а правої частини:  $-\frac{\lambda}{c \cdot p \cdot V_{pi3}^2} \cdot \left[ \frac{-z'}{(1-z)} + z' \right]$ . В результаті рівняння (6) набуде вигляду:

$$1 = -\frac{\lambda}{c \cdot p \cdot V_{pi3}^2} \cdot z' \cdot \left[ \frac{-1}{(1-z)} + 1 \right],$$

звідки

$$z' = \frac{c \cdot p \cdot V_{pi3}^2}{\lambda} \cdot \frac{(1-z)}{z}. \quad (7)$$

Підставимо вирази (6), (7) в початкове диференційне рівняння, та виразимо потужність теплового потоку  $N$ :  $N = S \cdot \sigma \cdot V_{pi3}$ .

Повернемося до рівняння:

$$z + (1-z) = 1 \quad (8)$$

В даному рівнянні ліва і права частини рівні між собою. Можна зробити висновок, що функція температури  $\theta$ , яку ми шукали визначена правильно. [1-6]

Було визначено [9] кількість тепла  $Q_1/Q$ , що витрачається на нагрівання ділянки досліджуваного адіабатичного сегмента довжиною  $l_1$ , і кількість тепла  $Q_2/Q$ , що витрачається на нагрівання ділянки досліджуваного адіабатичного сегмента довжиною  $l_2$ , виходячи із рівняння балансу тепла:

$$\frac{Q_1}{Q} + \frac{Q_2}{Q} = 1. \quad (9)$$

Ліва і права частини рівняння (9) рівні між собою, тобто величина  $z$ , яку ми шукали, описана залежністю (8), визначена правильно.

$$\frac{Q_1}{Q} = 1 - \frac{z^2}{2 \cdot \bar{l}_1}; \quad \frac{Q_2}{Q} = 1 - \frac{z^2}{2 \cdot \bar{l}_1}. \quad (10)$$

Чим більша величина  $z$ , тим більше значення  $Q_1/Q$  і менше  $Q_2/Q$ . Це означає, що зі збільшенням  $z$  кількість тепла  $Q_1/Q$ , яке переходить у стружку збільшується, а кількість тепла  $Q_2/Q$ , що йде в оброблювану деталь – зменшується. З цього слідує наступний висновок, що під час шліфувального оброблення, яке характеризується високими температурами різання, кількість тепла, що йде в стружку буде більшою за кількість тепла, яке йде в заготовку. [1, 2, 5]

Для розрахунку і прогнозування відносної величини температури  $z$  використана залежність:

$$z = 1 - e^{-\frac{c \cdot \rho \cdot V_{pi3}}{\lambda} \cdot (l_1 + l_2)} = 1 - e^{-(\bar{l}_1 + \bar{l}_2)}. \quad (11)$$

В попередніх роботах [8, 9] встановлено, що відносна величина температури  $z$  цілком однозначно визначається сумарною довжиною ділянки стержня  $(l_1 + l_2)$ , підданого тепловому впливу. Чим менше дана величина, тим менша відносна величина температури  $z$  і відповідно, температура при шліфуванні  $\theta$ . [1, 3, 5, 7]

Показано, що найбільша температура при шліфуванні переривчастими кругами

досягається за умови  $l_1 = t$ , тобто в момент виходу шліфувального круга з контакту з розглянутим адіабатичним стержнем. Після перетворень залежність (9) приймає вигляд:

$$\frac{c \cdot \rho}{\lambda} \cdot Q_{num} \cdot \sqrt{\frac{t}{2 \cdot R_{кр}}} = \bar{l}_1, \quad (12)$$

де  $t$  – глибина шліфування, м;  $Q_{num}$  – питома продуктивність обробки,  $\text{м}^3/(\text{м} \cdot \text{с})$ ;  $V_{dem}$  – швидкість деталі, м/с;  $R_{кр}$  – радіус круга, м. [2-6]

У працях [8, 9] була зроблена кількісна оцінка основних параметрів теплового процесу при плоскому багатопрхідному ( $t_1=0,01 \cdot 10^{-3}$  м) і врізному безцентровому ( $t_2=10^{-3}$  м) шліфуванні найбільш використовуваних загартованих підшипникових сталей ШХ15 і 15Г1, що здійснюється з досить високою питомою продуктивністю обробки  $Q_{num} = 500 \text{ мм}^3/(\text{мм} \cdot \text{хв})$ , яка наведена в таблиці 1. [2-5, 9]

Таблиця 1

Розрахункові значення параметрів  $\tau$ ,  $V_{piз}$ ,  $\bar{l}_1$ ,  $z$ ,  $\theta$ ,  $\frac{Q_1}{Q}$ ,  $\frac{Q_2}{Q}$ ,  $\frac{Q_2}{Q_1}$ ,  $\frac{\bar{l}_1}{l_2}$ ,  $V_\theta$ ,  $\frac{V_\theta}{V_{piз}}$ ,

( $\lambda=50 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ ;  $c=175,9 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ ;  $\rho=15 \cdot 10^3 \text{ кг}/\text{м}^3$ ;  $2R_{кр}=0,3 \text{ м}$ ).

Вид шліфування	$\tau \cdot 10^{-2}$ , с	$V_{piз} \cdot 10^{-3}$ , м/с	$\bar{l}_1 \cdot 10^{-2}$	$z \cdot 10^{-2}$	$\theta$ , К	$\frac{Q_1}{Q}$	$\frac{Q_2}{Q}$	$\frac{Q_2}{Q_1}$	$\frac{\bar{l}_1}{l_2}$	$V_\theta \cdot 10^{-3}$ , м/с	$\frac{V_\theta}{V_{piз}}$
Плоске багатопрхідне	0,15	5,6	0,2	7,5	463	0,04	0,92	17,0	0,03	75,2	13
Врізне безцентрове	171	0,55	2,9	22,6	1382	0,15	0,81	5,23	0,12	2,52	4,1

Параметри сталого теплового процесу ( $z \rightarrow 1$ ), описувані залежностями:

$$\tau = \frac{\lambda}{c \cdot \rho \cdot V_{piз}^2}; l_2 = \frac{\lambda}{c \cdot \rho \cdot V_{piз}}; \theta = \frac{\sigma}{c \cdot \rho}; V_{piз} = V_{dem} \cdot \sqrt{\frac{t}{2 \cdot R_{кр}}}, \quad (13)$$

розраховані для умов шліфування суцільними кругами і характеризуються досить великими значеннями, що свідчить про наявність несталого теплового процесу. Сталій тепловий процес реалізується за умови запровадження для шліфування переривчастих шліфувальних кругів.

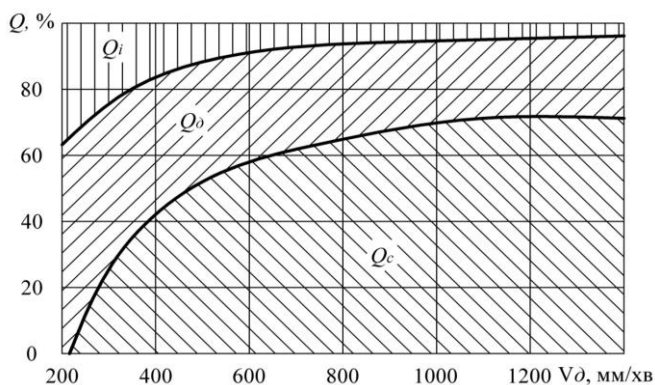


Рис. 1.1. Розподіл тепла  $Q$  між елементами технологічної системи

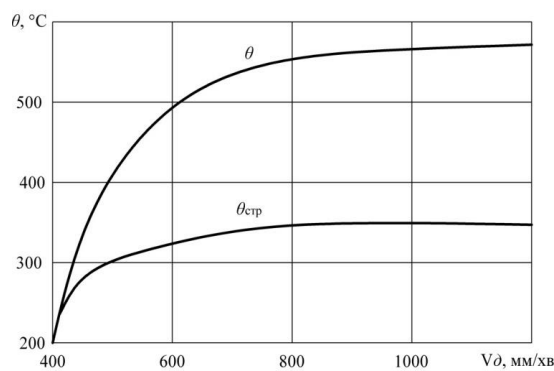


Рис. 1.2. Вплив швидкості різання  $V$  на температуру шліфування  $\theta$  і середню температуру стружки  $\theta_{стр}$  (сталь ШХ15)

На рис. 1.2 зображено вплив швидкості різання на розподіл тепла між стружкою, деталлю та інструментом. Як видно, розподіл тепла між стружкою, деталлю та інструментом безпосередньо залежить від швидкості різання. З рис. 1.2 видно, що кількість тепла, яке йде в стружку, зі збільшенням швидкості різання від 0 до  $V = 800$  мм/хв, збільшується наближуючись до 20%. Даний результат було підтверджено теоретичними дослідженнями [5].

Тобто кількість тепла, що йде в стружку, зростає, а те тепло, що йде в деталь та інструмент – зменшується. Такий характер розподілу тепла зумовлений збільшенням температури різання зі збільшенням швидкості різання, рис. 1.1.

Отже, для даних умов оброблення величина  $z$  наближається до граничного значення  $z \rightarrow 1$ , за якого тепловий процес під час шліфування стабілізується. Цим доведено можливість реалізації на практиці значень  $z$ , які близькі до граничного значення:  $z \rightarrow 1$ . [1-7]

Час досягнення визначеної температури залежить від швидкості джерела, що дозволяє змінювати цей час у широких межах. Після того, як процес шліфування припинився, настає невеликий часовий проміжок, протягом якого поверхня охолоджується потоком ЗОР. Проміжок часу між двома сусідніми робочими виступами повинен бути таким, щоб поверхня могла охолонути на визначену величину. Оскільки поверхня в перерві між робочими циклами вільна, теплообмін здатний істотно змінити її температуру.

**Висновки.** Визначені основні умови зменшення температури і відповідно підвищення якості оброблення кілець роликотітаників на операціях безцентрового шліфування, які полягають в зменшенні кількості тепла, що передається в деталь та збільшення кількості тепла, що передається в стружку, за рахунок зменшення величини припуску, швидкості переміщення теплового джерела в глибину поверхневого шару і застосування переривчастих шліфувальних кругів.

#### Інформаційні джерела

1. Якимов А.В. Прерывистое шлифование / А.В. Якимов, Ю.А. Бояршинов и др. // Вестник машиностроения. – 1967. – №3. – С. 76-78.
2. Марчук В.І. Класифікація та походження температурних дефектів на операціях безцентрового шліфування поверхонь обертання / Марчук, І.В. Марчук, М.В. Олексин, А.М. Ештеїві / Матеріали Шістнадцятої міжнародної молодіжної науково-технічної конференції «Машинобудування очима молодих: прогресивні ідеї-наука-виробництво», м. Суми, 26-29 жовтня 2016 р. – Суми: Сумський державний університет, 2016. – С. 102–103.
3. Новиков Ф.В., Яценко С.М. Новый упрощенный подход к расчету температуры поверхностного слоя детали при ее механической обработке. – Физические и компьютерные технологии. – Труды 11-й Международной научно-технической конференции, 2-3 июня 2005 г. – Харьков: ХНПК «ФЭД», 2005. – С.137–146.
4. Марчук І.В., Марчук В.І., Модель стабілізації високочастотних коливних процесів в динамічній системі круглого врізного шліфування. Збірник наукових праць. – Луцьк: ЛНТУ, 2016. – Перспективні технології та прилади №9. - С.75-83.
5. Марчук І.В. Керування температурою на безцентрово-шліфувальних операціях / М.В. Олексин, А.М. Ештеїві // “Перспективні технології та прилади”. Збірник наукових праць. Випуск 10(1). м. Луцьк, червень 2017 р. – Луцьк: Луцький НТУ, 2017. – С. 133–138.
6. Марчук І.В. Технологічне керування температурою під час безцентрового шліфування функціональних поверхонь обертання/ Марчук В.І. // «Наукові нотатки». Випуск 61. м. Луцьк, 2018 – Луцьк: Луцький НТУ, 2018. – С. 142-147
7. Марчук І.В. Технологічне забезпечення точності шліфування поверхонь обертання підшипників / І.В. Марчук, А.М. Ештеїві, М.В. Олексин / Наукові нотатки: Міжвуз. зб. Луцького національного технічного університету (за напрямком “Інженерна механіка”). Вип. 57. – Луцьк: Луцький НТУ, 2017. – С. 123–127.
8. Марчук І.В. Монографія// Технологічні основи забезпечення й стабілізації якості поверхонь обертання на операціях механічного оброблення // Луцьк: ІВВ Луцького НТУ, 2019.
9. Ештеїві А.М. Автореферат дисертації на здобуття наук.ступеня к.т.н. Технологічне забезпечення якості та точності шліфування кілець роликотітаників в умовах переналаджувального виробництва. Луцьк 2017. 8-14С.

**L. Sachkovska**

Lutsk National Technical University

### **SIMULATION OF TEMPERATURE PROCESSES OF INTERMITTENT GRINDING OF SURFACES BY ROTATION OF ROLLER BEARING RINGS**

*In this work, a series of experimental studies was conducted, which confirmed the results of modeling temperature processes in the area of centerless intermittent grinding of the rolling bearing surfaces of roller bearings. The dependences between the grinding temperature, the tangential component and the radial component during intermittent grinding with circles with different numbers of grooves have been experimentally established. Based on the use of the proposed prefabricated design of the intermittent grinding wheel, a highly efficient technology of centerless grinding of the surfaces of roller bearing rings with the ability to control the grain size of the prefabricated, working, calibration and care cutting zone. The combination of different grain sizes in the design of the prefabricated grinding wheel made it possible to improve the quality of ground surfaces to Ra 1.0-1.4  $\mu\text{m}$ , reduce and stabilize the temperature in the grinding zone to 450 ° C and remove from the process of grinding the base surface of the ring one semi-roughing operation .*

**Key words:** circle, groove, tool, ring, temperature, quality.

**Сачковска Л.А.**

Луцкий национальный технический университет

### **МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПРОЦЕССОВ ПРЕРЫВИСТОГО ШЛИФОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ ВРАЩЕНИЯ КОЛЕЦ РОЛИКОПОДШИПНИКОВ**

*В данной работе проведена серия экспериментальных исследований, подтвердила результаты моделирования температурных процессов в зоне бесцентрового прерывистого шлифования поверхностей колец качения роликоподшипников. Экспериментально установлены зависимости между температурой шлифовки, тангенциальной составляющей и радиальной составляющей при прерывистого шлифования кругами с разными числами канавок. На основе использования предложенной сборной конструкции прерывистого шлифовального круга разработана высокоэффективная технология бесцентрового шлифования поверхностей колец роликоподшипников с возможностью управлением зернистостью сборной, рабочей, калибровочной и выходжувальной зоны резания. Сочетание различной зернистости в конструкции сборной шлифовального круга позволило улучшить показатели качества шлифованных поверхностей до Ra 1,0-1,4 мкм, снизить и стабилизировать температуру в зоне шлифования до 450 ° C и исключить из технологического процесса шлифования базовой поверхности кольца одну операцию напивчорнового шлифовки .*

**Ключевые слова:** круг, канавка, инструмент, кольцо, температура, качество.

УДК 621.923

DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2313-5352-2020-16-16>

Сергеев А. С., Андилахай В. А., к. т. н.

ГВУЗ «ПДТУ», г. Мариуполь, Украина

## ВЫСОКОЭФФЕКТИВНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ФИНИШНОЙ ОБРАБОТКИ ОТВЕРСТИЙ ЦИЛИНДРОВ

*Предложена технология внутреннего шлифования цилиндров с применением мягкого войлочного круга с наклеенным абразивным порошком, которая позволяет резко снизить высоту микронеровностей поверхности, полученную на предшествующей операции растачивания за счет изменения направления главного движения резания путем установления оси вращения шлифовального круга с индивидуальным приводом перпендикулярно оси вращения обрабатываемого отверстия цилиндра. В результате изменяется направление обработочных следов и тем самым обеспечивается увеличение срока службы уплотнений поршней (штоков) в процессе работы пневмо- и гидроцилиндров, компрессоров, двигателей внутреннего сгорания. Предлагаемая технология внутреннего шлифования обеспечивает увеличение производительности окончательной обработки за счет снижения основного (машинного) времени, например, в сравнении с хонингованием. Достигается снижение трудоемкости обработки отверстия в целом за счет исключения необходимости переустановки заготовки и выверки на другом станке. Обеспечивается возможность обработки цилиндров малой жесткости благодаря отсутствию вибраций из-за применения мягких абразивных кругов.*

**Ключевые слова:** внутреннее шлифование, мягкий войлочный круг, абразивный порошок, растачивание, шероховатость поверхности, производительность обработки

**Постановка проблемы в общем виде и ее связь с важнейшими научными и практическими задачами.** Создание конкурентоспособной машиностроительной продукции и выход на мировые рынки требует непрерывного совершенствования технологий изготовления деталей машин при обеспечении высоких показателей качества, точности, производительности и одновременном снижении себестоимости. В успешном решении этих задач важная роль принадлежит развитию финишных методов абразивной обработки, располагающих значительными технологическими возможностями с точки зрения повышения точности обработки и уменьшения шероховатости обрабатываемой поверхности. Особенно эффективно применение методов обработки свободным абразивом. Однако они характеризуются повышенной трудоемкостью и относительно низкой производительностью обработки. Значительно большей производительности можно достичь при шлифовании, которое, к сожалению, не позволяет добиться таких высоких показателей шероховатости поверхности, как методы обработки свободным абразивом. Поэтому важно совершенствовать методы шлифования с целью существенного уменьшения шероховатости поверхности – ниже уровня, достигаемого при обработке свободным абразивом. Настоящая работа посвящена исследованию возможностей уменьшения шероховатости поверхности за счет применения мягких шлифовальных кругов на финишных операциях обработки отверстий в цилиндрах.

**Анализ последних достижений и публикаций.** Проблеме уменьшения шероховатости поверхности при шлифовании постоянно уделяется значительное внимание [1-3]. Так, в работах [4, 5] показано, что уменьшая разновысотное расположение абразивных (или алмазных) зерен на рабочей поверхности круга, можно существенно уменьшить шероховатость поверхности. В работе [6] показана целесообразность применения алмазных кругов на мягких связках для уменьшения шероховатости поверхности. Установлено, что эффект обработки достигается в результате увеличения количества одновременно работающих зерен шлифовального круга. Это подтверждает правильность предложенного в работе подхода, основанного на применении мягких шлифовальных кругов, для решения задачи существенного уменьшения шероховатости поверхности на финишных операциях абразивной обработки отверстий в цилиндрах.

**Цель работы** – определение условий уменьшения шероховатости обработанной поверхности и повышения производительности финишной обработки шлифованием отверстий в цилиндрах, направленной на совершенствование существующей технологии внутреннего шлифования.

**Матеріали досліджень.** Окончателна обробка внутрішньої поверхні циліндрів, традиційно, здійснюється на внутрішлифовальних станках. Недостатком такого способу є те, що заготовку після виконання операції растачивання необхідно переустановлювати з токарного станка на шлифовальний станок, а це вимагає значительного часу на виверку положення оброблюваного циліндра, переустановлюваного з токарного станка на внутрішлифовальний. Як правило, це призводить до втрати точності взаємного розташування поверхностей і осей. Не менш, а може найбільш важливим є те, що в процесі абразивної обробки обробочні риски, т. є. сліди, що утворюються від впливу абразивних зерен, направлені вздовж обробочних рисок, що утворилися після растачивання, т. є. перпендикулярно до напрямку оброблюваного отвору. Оскільки поршні (штоки) в процесі роботи пневмо- і гідроциліндрів, компресорів, двигачів внутрішнього згорання і т. п. переміщуються вздовж напрямку, т. є. вздовж оброблюваної, а відповідно, поперек обробочних рисок, останні піддаються підвищеному износу, що негативно впливає на довговічність ущільнень. Частично ці недоліки ліквіднуються хонінгуванням, яке характеризується низькою продуктивністю, відповідно, високою трудомісткістю, т. к. обробка здійснюється за рахунок зворотного-поступального руху абразивних брусків вздовж оброблюваного отвору, при одночасному обертанні хонінгуючої головки або оброблюваного циліндра. Причиною низької продуктивності хонінгування є зворотний-поступальний рух інструмента, який в кожен зворотний крок знижує швидкість до нуля, т. є. проходить через «крайні мертві точки».

В зв'язі з цим в роботі запропоновано спосіб і пристрій для внутрішнього шлифування попередньо расточеного отвору, який позбавлений перелічених недоліків [7]. Обробка циліндра здійснюється спочатку лезвийним, а потім абразивним інструментом на токарному станку без переустановки деталі, т. є. без зміни баз. Ось обертання шлифовального круга з індивідуальним приводом встановлюється перпендикулярно осі обертання оброблюваного отвору циліндра (рис. 1). В якості абразивного інструмента використовувався войлочний круг діаметром 175 мм, периферійна поверхня круга була покрита рідким стеклом, прокатана по абразивному порошку і висушена впродовж 1 години.



Рис. 1. Пристрій для обробки отвору циліндра абразивним інструментом

Після растачивання отвору пробний зразок пристрою встановлювали на токарний станок з висотою центрів 300 мм в резцедержачку або на місце резцедержачки і підключали електродвигач приводу абразивного круга. Виліт абразивного круга на пробному зразку пристрою - 600 мм. Мінімальний діаметр отвору, до якого застосовується виготовлений пристрій - 180 мм. Оскільки операції шлифування передують лезвийна обробка радіальна і торцева бієння повністю відсутні. Це дозволяє залишати мінімальний припуск на наступний перехід, т. к. виключається необхідність резервувати додатковий шар міжопераційного припуску, компенсуючого радіальне бієння



после смены баз. Поэтому припуск на окончательную обработку может быть соизмеримым с высотой микронеровностей, полученных после лезвийной обработки, т. е. растачивания. В результате растачивания была получена поверхность с шероховатостью  $R_a=3,2$  мкм.

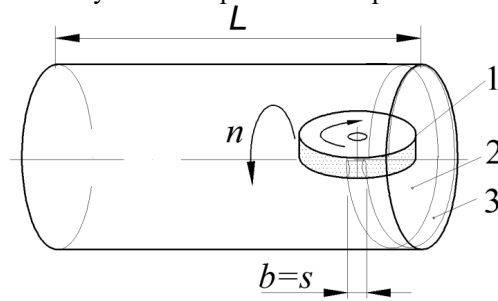


Рис. 2. Схема обработки отверстия цилиндра абразивным инструментом: 1 – войлочный круг с наклеенным абразивным порошком; 2- обрабатываемый цилиндр; 3 – шлифованная полоса;  $b$  – ширина пятна контакта;  $s$  – подача;  $n$  – частота вращения детали;  $L$  – длина детали

Режим абразивной обработки (рис. 2): скорость резания  $V = 750$  м/мин (12 м/с); продольная подача  $S = 2$  мм/об; частота вращения заготовки  $50$  мин<sup>-1</sup>; фактическая глубина шлифования  $t_{факт} = 2$  мкм. Следует учитывать, что глубина шлифования устанавливалась в виде прижима абразивного круга с натягом по отношению к обрабатываемой поверхности, равным 2 - 5 мм. Взаимосвязь между величиной натяга и фактической глубиной резания (шлифования) показана на рис. 3.

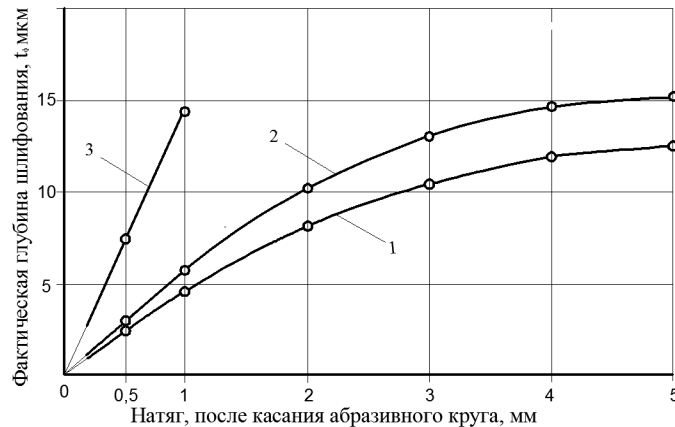


Рис. 3. Зависимость фактической глубины шлифования от установленной величины натяга, после касания абразивного круга: 1 – войлочный круг; 2 – фетровый круг; 3 – круг на вулканитовой связке

В результате абразивной обработки за один рабочий ход диаметр отверстия увеличивался на 2 – 4 мкм, что, в основном, соответствует сглаживанию обработочных рисок, образовавшихся после растачивания.

При предварительном подборе зернистости абразивного материала руководствовались следующими ограничениями: применение зернистости до F100 (по FEPA) сопровождается интенсивным засаливанием рабочей поверхности круга, а крупнозернистый абразив F24 и более в процессе обработки оставляет заметные обработочные риски и относительно быстро выкрашивается с поверхности войлочного круга. Таким образом, выбрана промежуточная фракция, т. е. применена зернистость абразивного материала F40.

Принятая скорость шлифования выбрана максимально возможной с учетом прочности войлочного материала при воздействии центробежной силы, а также с учетом стандартной частоты вращения асинхронного двигателя – 1400 об/мин. Диаметр войлочного круга выбран максимальным, вписывающимся в обрабатываемое отверстие, его диаметр 175 мм.

В результате обработки войлочным кругом с наклеенным порошком карбида кремния зеленого зернистостью F40 за один рабочий ход получена шероховатость  $R_a=1,25$  мкм, а после

второго рабочего хода  $R_a = 0,63$  мкм. Дальнейшая обработка, т. е. следующий рабочий ход осуществлялся с нанесением на периферию войлочного круга пасты ГОИ, в результате чего получена зеркальная поверхность.

Известно, что шероховатость поверхности измеряют в направлении, перпендикулярном направлению обработочных рисок. Однако в связи с тем, что очередной технологический переход выполняется инструментом, который оставляет обработочные следы, перпендикулярные предыдущему переходу, которым является растачивание и их направление совпадает с направлением движения поршня, то в соответствии функциональным назначением поверхности, шероховатость поверхности целесообразно измерять в направлении движения поршня.

Благодаря такому направлению обработочных следов, полностью исчезла необходимость прохождения периода приработки поршня с цилиндром на малых оборотах, например, двигателя внутреннего сгорания, компрессора, насоса и др.

Преимуществом метода является и то, что в процессе обработки не возникают вибрации детали и инструмента, особенно это важно при обработке тонкостенных цилиндров. С учетом этого свойства можно рассчитывать на значительное снижение металлоемкости проектируемых цилиндров, так как толщина их стенок, как правило, устанавливается при конструировании вместо расчетной, конструктивной с целью обеспечения жесткости в процессе обработки.

Перспективным является использование предлагаемой технологии для окончательной обработки внутренней поверхности гильз блока цилиндров двигателей внутреннего сгорания, так как толщина стенок в них должна быть расчетной, т. е. минимальной для скорейшей передачи тепла в охлаждающую жидкость зарубашечного пространства блока цилиндров.

Технология и устройство были применены при изготовлении пневмоцилиндров (диаметром отверстия 195 мм, длиной 400 мм), заготовкой послужила труба прокат 210, сталь 20. Восемь пневмоцилиндров с уплотнениями поршней резиновыми кольцами было установлено на автоматической линии ампулирования лекарственных средств, где они работают без ремонта на протяжении нескольких лет. Следует отметить, что сжатый воздух (0,4 МПа), перед подачей в пневмоцилиндр проходит подготовку в виде подмешивания в него масляного тумана.

**Выводы.** Предложенная технология внутреннего шлифования с применением мягкого войлочного круга с наклеенным абразивным порошком обладает следующими достоинствами:

- позволяет резко снизить высоту микронеровностей поверхности, полученную на предшествующей операции за счет изменения направления главного движения резания путем установления оси вращения шлифовального круга с индивидуальным приводом перпендикулярно оси вращения обрабатываемого отверстия цилиндра. В результате достигается изменение направления обработочных следов и тем самым обеспечивается увеличение срока службы уплотнений поршня;
- обеспечивает увеличение производительности окончательной обработки за счет снижения основного (машинного) времени, например, в сравнении с хонингованием;
- обеспечивает снижение трудоемкости обработки отверстия в целом за счет исключения необходимости переустановки заготовки и выверки на другом станке;
- обеспечивает возможность обработки цилиндров малой жесткости благодаря отсутствию вибраций из-за применения мягких абразивных кругов.

**Перспективы дальнейшей работы в данном направлении.** В дальнейших исследованиях необходимо провести экспериментальные исследования по оцениванию влияния различных характеристик мягких абразивных кругов на шероховатость обработанной поверхности. Это позволит разработать обобщающие практические рекомендации по совершенствованию существующей технологии внутреннего шлифования с точки зрения уменьшения шероховатости обработанной поверхности и повышения производительности обработки.

#### **Информационные источники**

1. Novoselov, Yu. K.: Dynamics of surface shaping in abrasive processing (LAP LAMBERT Academic Publishing. Saarbrucken, Deutschland, P.317 (2017)
2. Королев А.В. Исследование процессов образования поверхностей инструмента и детали при абразивной обработке / А.А. Королев. – Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1975. – 212 с.

3. Якимов А. В. Оптимизация процесса шлифования / А. В. Якимов. – Москва: Машиностроение, 1975. – 175 с.

4. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения / Под общ. ред. Ф.В. Новикова и А.В. Якимова. В десяти томах. – Т. 4. "Теория абразивной и алмазно-абразивной обработки материалов" – Одесса: ОНПУ, 2002. – 802 с.

5. Новиков Ф. В. Основы математического моделирования технологических процессов механической обработки: монография / Ф. В. Новиков. – Д. : ЛИРА, 2018. – 400 с.

6. Качество поверхности при алмазно-абразивной обработке / Э.В. Рыжов, А.А. Сагарда, В.Б. Ильицкий, И.Х. Чеповецкий. – К.: Наук. думка, 1979. – 244 с.

7. Сергеев О. С. Теоретичний аналіз технологічних можливостей зменшення шорсткості поверхні при абразивній обробці / О. С. Сергеев, О. О. Анділахай // Вісник Приазовського державного технічного університету: зб. наук. праць. Вип. 39. – Маріуполь: ДВНЗ «Приазов. держ. техн. ун-т», 2019. – С 86–93. – (Технічні науки). – Режим доступу: DOI: 10.31498/2225-6733.38.2019.

**Сергеев А. С., Анділахай В. А., к. т. н.**  
ДВНЗ «ПДТУ», м. Маріуполь, Україна

### **ВИСОКОЕФЕКТИВНА ТЕХНОЛОГІЯ ФІНІШНОЇ ОБРОБКИ ОТВОРІВ ЦИЛІНДРІВ**

*Запропоновано технологію внутрішнього шліфування циліндрів із застосуванням м'якого повстяного круга з наклеєним абразивним порошком, що дозволяє різко знизити висоту мікронерівностей поверхні, отриману на попередній операції розточування за рахунок зміни напрямку головного руху різання шляхом встановлення осі обертання шліфувального круга з індивідуальним приводом перпендикулярно осі обертання оброблюваного отвору циліндра. В результаті змінюється напрямок оброблювальних слідів і тим самим забезпечується збільшення терміну служби ущільнень поршнів (штоків) в процесі роботи пневмо- і гідроциліндрів, компресорів, двигунів внутрішнього згорання. Пропонована технологія внутрішнього шліфування забезпечує збільшення продуктивності фінішної обробки за рахунок зниження основного (машинного) часу, наприклад, в порівнянні з хонінгуванням. Досягається зниження трудомісткості обробки отвору в цілому за рахунок виключення необхідності переустановлення заготовки та вивірки на іншому верстаті. Забезпечується можливість обробки циліндрів малої жорсткості завдяки відсутності вібрацій через застосування м'яких абразивних кругів.*

**Ключові слова:** внутрішнє шліфування, м'який повстяний круг, абразивний порошок, розточування, шорсткість поверхні, продуктивність обробки

**Serhieiev A. S., Andilakhai V. A., Ph.D.**  
Higher educational institution "PDTU", Mariupol, Ukraine

### **HIGH EFFICIENCY FINISHING TECHNOLOGY CYLINDER HOLE**

*A technology has been proposed for internal grinding of cylinders using a soft felt wheel with glued abrasive powder, which can sharply reduce the surface microroughness obtained in the previous boring operation by changing the direction of the main cutting movement by setting the axis of rotation of the grinding wheel with an individual drive perpendicular to the axis of rotation of the cylinder bore. As a result, the direction of the processing traces changes, thereby increasing the service life of the piston seals (rods) during operation of the pneumatic and hydraulic cylinders, compressors, and internal combustion engines. The proposed internal grinding technology provides an increase in the productivity of the final processing by reducing the main (machine) time, for example, in comparison with honing. Achieving a reduction in the complexity of processing the hole as a whole by eliminating the need to reinstall the workpiece and alignment on another machine. It provides the possibility of processing cylinders of low rigidity due to the absence of vibrations due to the use of soft abrasive wheels.*

**Keywords:** internal grinding, soft felt wheel, abrasive powder, boring, surface roughness, processing performance

UDC 621.785.7: 621.873

DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2313-5352-2020-16-17>

**B.P. Sereda**<sup>1</sup>, Doctor of Tech. Sci., Prof., seredabp@ukr.net

**V.I. Voloh**, postgraduate

Dniprovsky State Technical University, Kamianske

## FORMATION OF STRUCTURE OF HOOKS OF LOADING LIFTS IN CONDITIONS OF SHS

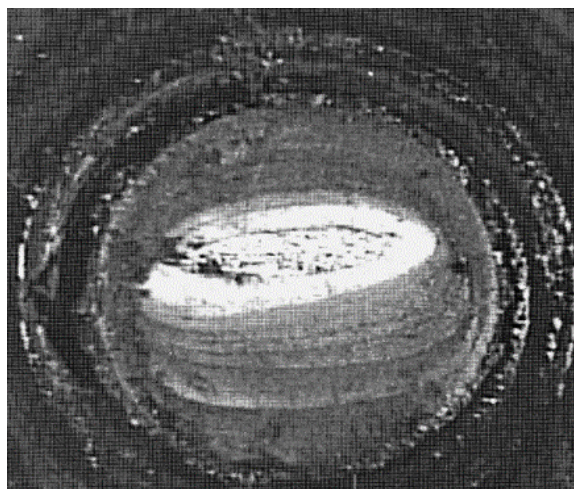
*The article deals with the formation of the structure of hoists for lifting cranes in order to prevent the development of cracks by forming the structure of steel 20 by treatment in the conditions of self-propagating high-temperature synthesis (SHS) to obtain fine-grained ferrite-perlite structure. The conducted researches allow to form a rational structure of steel to exclude the development of cracks in dangerous sections of lifting hooks of hoisting and transport mechanisms working in the shops of metallurgical production. The method of structure control after SHS is developed taking into account the influence of different diameters of hooks.*

**Keywords:** structure, correction factor, self-propagating high-temperature synthesis, crack, fatigue fracture, coercive force, microstructure, experimental sample.

### Problem statement

In the shops of the metallurgical industry the lifting hooks of the suspension of the crane beam 3 t are destroyed. On an external inspection of the destroyed hook it was found that its destruction occurred in cross section along the tangle at the point of transition to the threaded part of the hook, shown in Figure 1.

Analyzing the results of the snapshot of Fig. 1 of the zone of destruction obtained during metallographic research, it can be argued: the zone of fracture, characterized by the presence of a zone of fatigue and fragile destruction (zone of fracture) [1-2].



x100

Fig. 1 - breakage of the hook along the tensile transition with fatigue cracks: a - microstructure of the breakage of the hook

Fatigue fracture extends throughout the perimeter, preferably from two opposite sides of the workpiece surface, with a maximum propagation depth of up to 18 mm. The zone of fatigue fracture is characterized by the presence of 8 (eight) lines of zones of fatigue with different distances between them, which divide the fatigue fracture into several sections (the fronts of the fatigue crack propagation in time in several stages. The area of the home area is approximately 5%.

### Analysis of the destruction of the threaded part of the hook.

Gradually, the growing fatigue crack after 50-60% of life reaches a size that becomes visible to the naked eye. When the length and depth of the crack from 0.5 to 1 mm, it can no longer be considered as a micro crack, but as a crack in the engineering sense. After the zones of fatigue cracks occupy a sufficiently large part of the cross section of the hook, then in the rest of the final cross-

section, there are stresses that exceed the static strength of the material. This leads to a complete breakdown of the hook. Thus, two zones are distinguished on the surface of fractures formed during cyclic loading: the zone of gradual propagation of cracks with a relatively flat surface and the zone of fracture during the last cycles of loading.

After the crack is generated, each subsequent load cycle leads to its gradual growth. With cyclic loading on the hook "stretching - compression" the crack developed at right angles to the direction of the applied voltage. With little cyclic fatigue, the destruction of the hook occurred in the elastoplastic region within  $5 \cdot 10^4$  cycles. The fatigue lines resulting from the temporary stoppage of a crack upon termination of loading are a significant difference in the feature of fatigue fractures. The ratio of the size of the zone of gradual growth of cracks and zone of fracture is a measure of the magnitude of the cyclic stresses that led to the destruction. The cause of the failure of the crane - hook suspension hook is related to the development of fatigue cracks during operation.

In order to improve the structure of steel, steel was treated in SHS [3,4]. To establish the dependence on the influence of the number of special boundaries on the ferrite-pearlite structure of steel 20 and the relationship with the magnitude of the coercive force  $N_s$ , the heating of samples No. 1,2,3 according to the following scheme.

Sample №1- witness, sample №2 SHS treatment, heating at  $850^\circ\text{C}$  for 60 minutes, sample №2 SHS treatment, 180 minutes and air cooling.

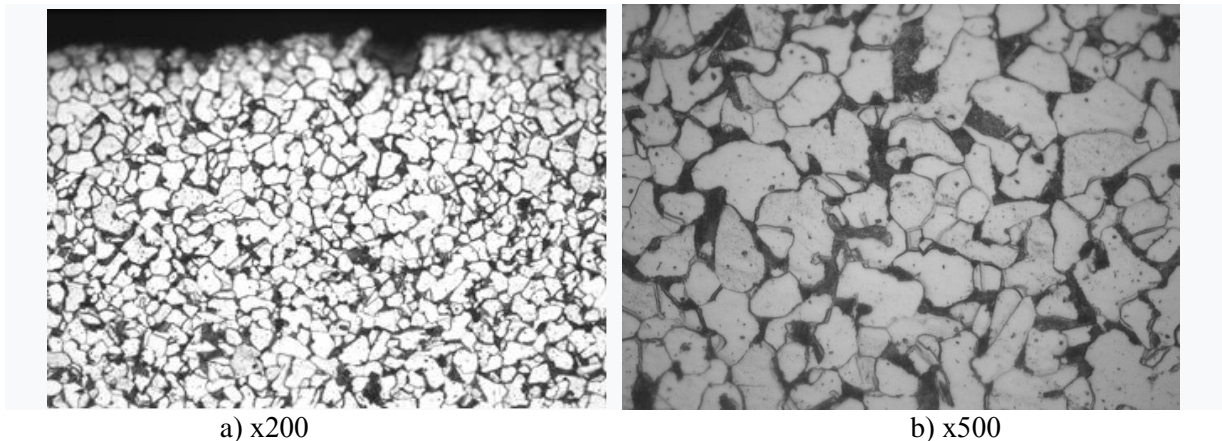


Fig.2 Metallographic structure of the sample-witness №1 of perlite-ferrite in the ratio of 20/80. The magnitude of the coercive force is  $H_c = 6,79 \text{ A/cm}$ . The average relative value of the number of special boundaries is 12,66%

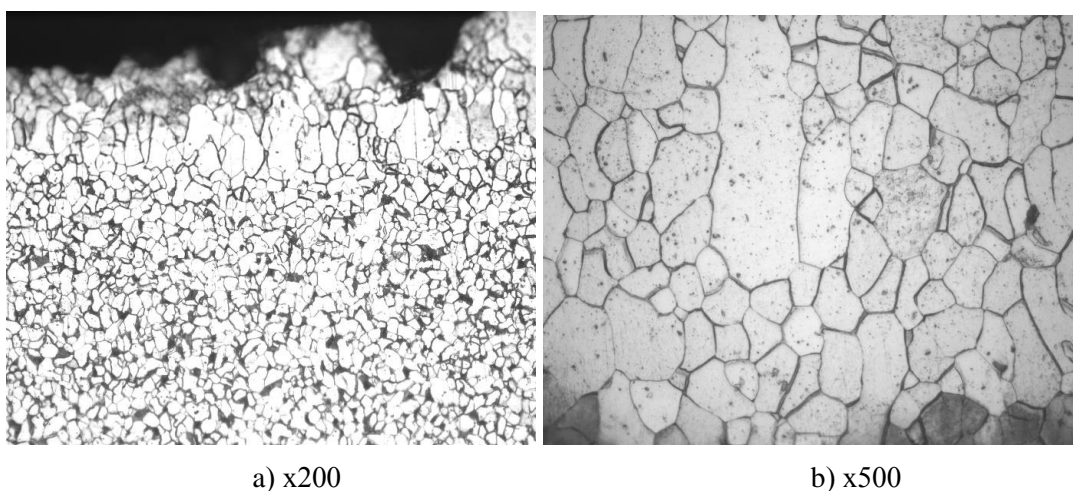


Fig. 3 Microstructure of hook after SHS processing (holding time 60 min) and cooling in air

The magnitude of the coercive force is  $H_c = 7,58 \text{ A/cm}$ , and the depth of the decarburized layer is from  $78,05$  до  $89,2 \mu\text{m}$ . The amount of pearlite decreased to 5%. The average relative value of the number of special borders is 19.66%



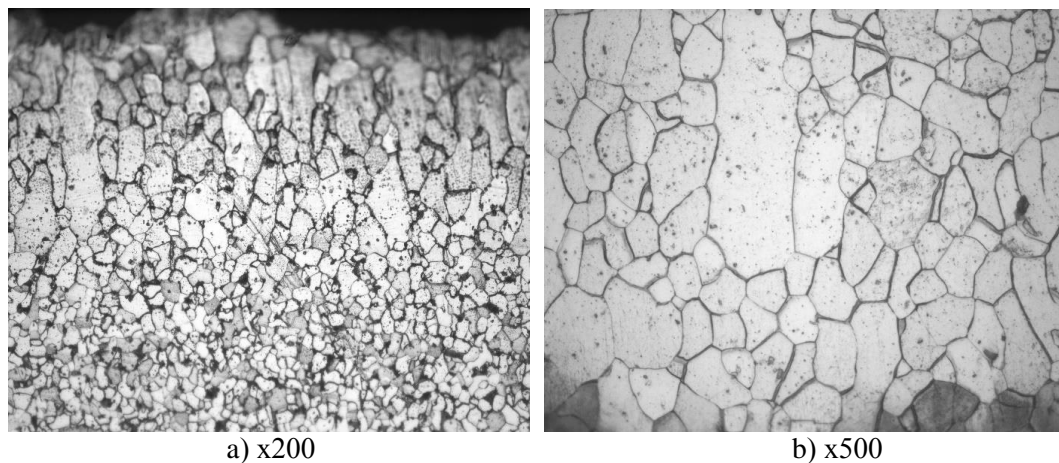


Fig.4 Microstructure of hook after SHS treatment (holding time 180 min) and cooling in air

The magnitude of the coercive force is  $H_c = 7,4$  A/cm and the depth of the carbonless layer is from 223 to 245  $\mu\text{m}$ . Analyzing the depth of the carbon-free layer on the sample, it can be established that the layer at a normalization of 3 hours (sample №3) increased by  $2,5 \div 2,8$  times as compared to sample №2. The preliminary analysis of the decrease in the coercive value can be explained by the decrease in the amount of perlite in the middle part of the sample, as well as the increased content of special low energy boundaries. The average relative value of the number of special borders is 34,45%.

The structure of the sample in such processing in the SHS environment is fine - grained and meets the requirements [5]. Studying the properties of steel shows promising management by creating special low energy boundaries in the structure. Increasing the relative number of special boundaries leads to a decrease in the grain energy of the boundary complex, which affects the magnetic properties of steel.

The increased content of special boundaries in the carbon-free layer compared to the parent metal can be explained by the absence of perlite or other low-mobility elements of the structure [6,7,8]. Thus, it can be assumed that the emergence and interaction of special boundaries in the SHS process contributes to the mechanism of cyclic growth and grinding of ferrite-perlite steel grain.

The control of the structure of hooks after SHS can be carried out using a magnetic coercimeter method of control. However, the disadvantage of the magnetic method of NC based on the coercive force of HC proposed in [9] is its sensitivity to local changes in the diameter of the threaded part of the shank of the hook, which creates additional difficulties in the interpretation of the control results. Where, when changing the physical properties of a metal section (for example, the loss of elastic properties of metal in an intertwining thread space), a distortion of the magnetic field occurs caused by a change in the magnetic properties of the metal at that site

Therefore, for more accurate determination of the resource of hooks by means of a magnetic method of control, it is recommended in addition [9] to use experimental samples with variable diameter with known chemical and mechanical properties and coercive force  $H_c$  [10].



Fig. 5 Experimental specimens of steel 20 for determining the correction factor: a) sample diameter from 12 to 64 mm, b) sample diameter from 70 to 170 mm

Using the correlation equation and calculations in [9], the formula for determining the tensile strength for hooks of load-lifting cranes was obtained.

$$H_c^B = 0,026 \times G_B - 3,2 \quad (1)$$

where:  $H_c^B$  - the calculated value of the coercive force to determine the strength of the hook shank in A / cm,

$G_B$  - is the tensile strength in MPa

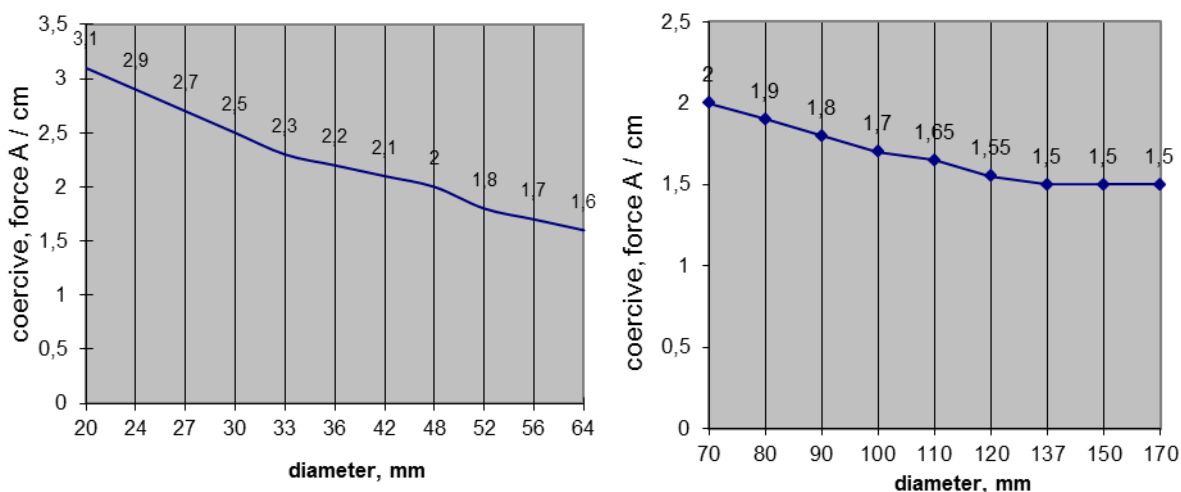


Fig. 6 The graph of the coercive force versus the diameter of the experimental sample with variable section: a) diameter from 20 to 64 mm, b) diameter from 70 to 170 mm

However, this formula does not take into account the correction factor determined by the experimental samples. After calculations, formula (1) takes the form

$$H_c^B = 0,026 \times G - 3,2 \quad (2)$$

where:  $H_c^A$  - the correction factor obtained when recalculated on the experimental samples

Using the formula and substituting the obtained correction factor in formula (2) we obtain the calculated value of the tensile strength.

### Conclusions:

In the course of the conducted researches it is established that after treatment in conditions of SHS of steel 20 after 3 hours of isothermal holding at 850 ° C leads to formation of fine-grained structure which increases the physical and mechanical properties of steel in 1,2-1,6 times

A method for controlling the structure of shanks of hoists of cranes is established and proposed, where it is necessary to take into account the correction factor for each diameter under which control is made, where the error from accounting for the difference of diameters is eliminated

The method of control for the control of shanks of hooks taking into account the difference of diameters MK 230-140-15 is developed. Patent for utility model received in Ukrpatent № 99528 dated 09.12.2015, "Experimental sample for control of mechanical stresses in steel products".

### References

1. Sereda B.P/ New materials in metallurgy: textbook. tool. for students. High schools /; ZDIA. - Zaporizhzhia: 2009. - 394 p.
2. Sereda B.P. Metal science and heat treatment of ferrous and non-ferrous metals: textbook. for students. University of Zaporozhye: ZDIA, 2008.- 302 p.
3. Sereda B.P. Surface hardening of materials working under conditions of complex influence of aggressive substances: monograph / Dnipro. state. tech. Universities (DDTU). - Kamenskoe: DDTU, 2019. - 172 p.



4. Sereda B.P., Kruglyak I.V., Zharebtsov O.A., Belokon Yu.O. Metal processing by pressure at non-stationary temperature conditions. Monograph.-.-Zaporozhye: ZDIA, 2009.- 252 p.
5. GOST 2105-75 Forged stamped hooks. Technical conditions
6. Bolshakov V.I., Sukhomlin V.I., Volokh V.I., Effect of annealing temperature on the formation of special boundaries in armco-iron / Construction, materials science, mechanical engineering // Sat. Scientific Trudov.Vyp. 80, - Dnepropetrovsk-, Higher Educational Institution "PGASA", 2015.- P.67-70.
7. Bolshakov V.I., Sukhomlin V.I., Sobolevsky S.I., Ovcharuk S.A., Volokh V.I., Effect of annealing on the structure and properties of cold-deformed low-carbon steel / Construction, materials science, mechanical engineering // Sat . Scientific Trudy.Vyp. 80, - Dnepr-, State Higher Educational Institution "PGASA", 2017.- P.37-41.
8. Sukhomlin V.I., Volokh V.I., Effect of normalization duration on the structure of magnetic properties and special boundaries in low-carbon steel. Science, Society, Education: Topical Issues and Development Prospects Materials of the First International Scientific and Practical Conference (Kharkiv metro station 16-17, 2019). M. Kharkiv, 2019.S. 271-276.
9. Demichev V.N. Evaluation and improvement of the operation safety of hook suspensions and hoisting cranes: dis. ... cand. tech. sciences / V.N. Demichev. - Novocherkassk, 2011. -- 181 p.
10. Pat. 99528 Ukraine, IPC G01L 1/12. An experimental sample for the control of mechanical stresses in steel parts / [Volokh VI, Sukhomlin VI, Mospan VV, Boyko VM, Motsniy VV ]; applicant and patentee Public Joint Stock Company «Dniprovsky Metallurgical Works named after F.E. Dzerzhinsky ». - № in 2014 13815; 23/02/2014; Publ. 10.06.2015, Bul.№11.

#### **ФОРМУВАННЯ СТРУКТУРИ ГАКІВ ВАНТАЖОПОДІЙОМНИХ КРАНІВ В УМОВАХ СВС**

*У статті розглянуто формування структури гаків вантажопідіймальних кранів з метою запобігання розвитку тріщин шляхом формування конструкції сталі 20 шляхом обробки в умовах само розповсюдженого високотемпературного синтезу (СВС) для отримання дрібнозернистої ферито-перлітової структури. Проведені дослідження дозволяють сформуванню раціональну структуру сталі для виключення розвитку тріщин на небезпечних ділянках підйомних гаків підйомно-транспортних механізмів, що працюють в цехах металургійного виробництва. Розроблена методика контролю структури після СВС з урахуванням впливу різних діаметрів гаків.*

**Ключові слова:** структура, поправочний коефіцієнт, саморозповсюджуючий високотемпературний синтез, тріщина, втомне руйнування, коерцитивна сила, мікроструктура, експериментальний зразок.

#### **Література**

1. Серєда Б. П. Нові матеріали в металургії : навч. посіб. для студ. ВНЗ /; ЗДІА. - Запоріжжя : 2009. - 394 с.
2. Серєда Б. П. Металознавство та термічна обробка чорних та кольорових металів: підруч. для студ. вузів.-Запоріжжя: ЗДІА, 2008.- 302 с.
3. Серєда Б. П. Поверхнєве зміцнення матеріалів працюючих в умовах комплексного впливу агресивних речовин : монографія / Дніпров. держ. техн. ун-т (ДДТУ). - Кам'янське : ДДТУ, 2019. - 172 с.
4. Серєда Б.П., Кругляк І.В., Жеребцов О.А., Белоконь Ю.О. Обробка металів тиском при нестационарних температурних умовах. Монографія.-.-Запоріжжя: ЗДІА, 2009.- 252 с.
5. ГОСТ 2105-75 Крюки кованые штампованные. Технические условия.
6. Большаков В.И., Сухомлин В.И., Волох В.И., Влияние температуры отжига на формирование специальных границ в армо-железе / Строительство, материаловедение, машиностроение //Сб. научн.трудов.Вып.80,- Днепропетровск-, ГВУЗ «ПГАСА», 2015.- С.67-70.
7. Большаков В.И., Сухомлин В.И., Соболевский С.И., Овчарук С.А., Волох В.И., Влияние отжига на структуру и свойства холоднодеформированной низкоуглеродистой стали / Строительство, материаловедение, машиностроение //Сб. научн.трудов.Вып.80,- Днепр-, ГВУЗ «ПГАСА», 2017.- С.37-41.
8. Сухомлин В.И., Волох В.И., Влияние длительности нормализации на структуру магнитные свойства и специальные границы в низкоуглеродистой стали. Science, Society,

Education: Topical Issues and Development Prospects матеріали тез доповідей I міжнародної науково-практичної конференції (м. Харків 16-17 грудня 2019р.). м. Харків, 2019. С.271-276.

9. Демичев В.Н. Оценка и повышение безопасности эксплуатации крюковых подвесок и грузоподъемных кранов: дис. ... канд. техн. наук / В.Н. Демичев. — Новочеркасск, 2011. — 181 с.

10. Пат. 99528 Україна, МПК G01L 1/12. Експериментальний зразок для контролювання механічних напружень у сталевих деталях / [Волох В.І., Сухомлин В.І., Мосьпан В.В., Бойко В.М., Моцний В.В. ]; заявник і патентовласник Публічне Акціонерне Товариство «Дніпровський металургійний комбінат імені Ф.Є. Дзержинського». - № у 2014 13815; заявл.23.02.2014; опубл.10.06.2015, Бюл.№11.

### **ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ КРЮКОВ ВАНТАЖОПОДЪОМНЫХ КРАНОВ В УСЛОВИЯХ СВС**

*В статье рассмотрено формирование структуры крюков грузоподъемных кранов с целью предотвращения развития трещин путем формирования конструкции стали 20 путем обработки в условиях же распространяемого высокотемпературного синтеза (СВС) для получения мелкозернистой феррито-перлитовой структуры. Проведенные исследования позволяют сформировать рациональную структуру стали для исключения развития трещин на опасных участках подъемных крюков подъемно-транспортных механизмов, работающих в цехах металлургического производства. Разработана методика контроля структуры после СВС с учетом влияния различных диаметров крюков.*

**Ключевые слова:** структура, поправочный коэффициент, саморозповсюджуючий высокотемпературний синтез, тріщина, усталостне руйнування, коерцитивна сила, мікроструктура, експериментальний образец.

### **ФОРМУВАННЯ СТРУКТУРИ КРЮКОВ ВАНТАЖОПІДЪОМНИХ КРАНІВ В УМОВАХ СВС**

*У статті розглянуто формування структури гаків вантажопідіймальних кранів з метою запобігання розвитку тріщин шляхом формування конструкції стали 20 шляхом обробки в умовах же розповсюдженого высокотемпературного синтезу (СВС) для отримання дрібнозернистої феррито-перлітової структури. Проведені дослідження дозволяють сформуванню раціональну структуру стали для виключення розвитку тріщин на небезпечних ділянках підйомних гаків підйомно-транспортних механізмів, що працюють в цехах металургійного виробництва. Розроблено методика контролю структури після СВС з урахуванням впливу різних діаметрів гаків.*

**Ключові слова:** структура, поправочний коефіцієнт, саморозповсюджуючий высокотемпературний синтез, тріщина, втомне руйнування, коерцитивної сила, мікроструктура, експериментальний зразок.

УДК 622.232

DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2313-5352-2020-16-18>

Стасюк В.М., к.т.н., Андрощук І.В., к.с.-г.н.

Луцький національний технічний університет

## ВПЛИВ ОКРЕМИХ КОНСТРУКТИВНИХ ПАРАМЕТРІВ ПРИВОДУ ІЗ ПНЕВМОМЕХАНІЧНОЮ СИСТЕМОЮ ПОВІТРОРозПОДІЛУ НА РОБОЧІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВІБРОУДАРНИХ МАШИН

*Завдання вибору оптимальних конструктивних параметрів приводів для забезпечення потрібних робочих характеристик віброударних пневматичних машин завжди актуальне, у тому числі й пневматичних приводів, системи повітророзподілу яких оснащені клапанними повітророзподільниками.*

*У статті наведені результати досліджень впливу окремих конструктивних параметрів приводу із пневмомеханічним розподілом стисненого повітря на робочі характеристики віброударних машин. В якості окремих конструктивних параметрів приводу вибрано: діаметри робочих вікон впускних елементів камер холостого та робочого ходів, діаметри впускних отворів і відстань між осями впускних елементів камери холостого ходу та впускними отворами. При цьому для вибору більш досконалої конструкції приводу розглядалися три його конструкції: із регульованим дроселем у кришці компенсаційної камери холостого ходу, із регульованим дроселем у кришці компенсаційної камери робочого ходу та без регульованих дроселів у кришках вищезазначених камер. В якості робочих характеристик віброударної машини вибрані: енергія удару, частота ударів, хід поршня-ударника та тривалість циклу.*

*Отримані результати досліджень дозволяють вибирати оптимальні величини конструктивних параметрів приводу із пневмомеханічною системою повітророзподілу для забезпечення потрібних робочих характеристик віброударної машини.*

**Ключові слова:** пневмопривод, енергія удару, частота ударів, хід поршня-ударника, тривалість циклу.

**Постановка проблеми.** Від правильності вибору конструктивних параметрів пневматичних приводів, зокрема, і з пневмомеханічним повітророзподілом, істотно залежить можливість досягнення заданих робочих характеристик віброударних машин, а також енергоємність їх робочих процесів. Тому дослідження пневматичних приводів на предмет визначення оптимальних величин їх конструктивних параметрів з метою забезпечення потрібних експлуатаційних показників при якомога менших енергозатратах (а енергія стисненого повітря досить дорога) є актуальним науковим і прикладним завданням.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Окремі результати досліджень пневматичних приводів під вищезазначеним кутом наведені в роботі [1]. Однак приводи із пневмомеханічними системами повітророзподілу для віброударних машин у цій роботі не розглядаються.

**Формулювання цілей статті.** Дослідити вплив окремих конструктивних параметрів приводу із пневмомеханічним розподілом стисненого повітря на робочі характеристики віброударних машин.

**Результати досліджень.** У роботі наведені результати досліджень впливу окремих конструктивних параметрів приводу із пневмомеханічною системою повітророзподілу на робочі характеристики віброударних машин на його основі без проміжних розрахунків. В якості досліджуваних конструктивних параметрів приводу вибрано:

- діаметри робочих вікон впускних елементів камер холостого та робочого ходів (відповідно  $d_{k1}$  і  $d_{k2}$ );
- діаметри впускних отворів ( $d_{в.о.}$ );
- відстань між віссю клапана пневморозподільника камери холостого ходу та віссю впускних отворів ( $l$ ).

Досліджувався вплив зазначених конструктивних параметрів на такі основні робочі характеристики віброударних машин:

- енергія удару ( $E_y$ );
- частота ударів ( $f$ );

- хід поршня-ударника ( $s$ );

- тривалість циклу ( $t_u$ ).

На наведених нижче рисунках відображені основні результати досліджень. На них:

-  $E_{y1}, f_1, s_1, t_{u1}$  – відповідно енергія удару, частота ударів, величина ходу поршня-ударника та тривалість циклу для приводу із регульованим дроселем у кришці компенсаційної камери холостого ходу;

-  $E_{y2}, f_2, s_2, t_{u2}$  – відповідно енергія удару, частота ударів, величина ходу поршня-ударника та тривалість циклу для приводу без регульованих дроселів у кришках компенсаційних камер холостого і робочого ходів;

-  $E_{y3}, f_3, s_3, t_{u3}$  – відповідно енергія удару, частота ударів, величина ходу поршня-ударника та тривалість циклу для приводу із регульованим дроселем у кришці компенсаційної камери робочого ходу.

Варіювання здійснювалось величиною одного (досліджуваного) конструктивного параметра, не змінюючи величини інших.

Залежності робочих характеристик віброударних машин від діаметрів робочих вікон впускних елементів камер холостого та робочого ходів (відповідно  $d_{k1}$  і  $d_{k2}$ ) зображені на рис. 1. При цьому під час досліджень величини  $d_{k1}$  і  $d_{k2}$  приймалися однаковими, визначеними за формулою:

$$d_{k1} = d_{k2} = \sqrt{\frac{4f_{np.пер.}}{\pi}} \cdot d_{ш},$$

де  $f_{np.пер.}$  – площа прохідного перерізу робочих вікон впускних елементів системи повітророзподілу, однакова в обох пневморозподільниках;  $d_{ш}$  – діаметр штока, однаковий в обох клапанах пневморозподільників.

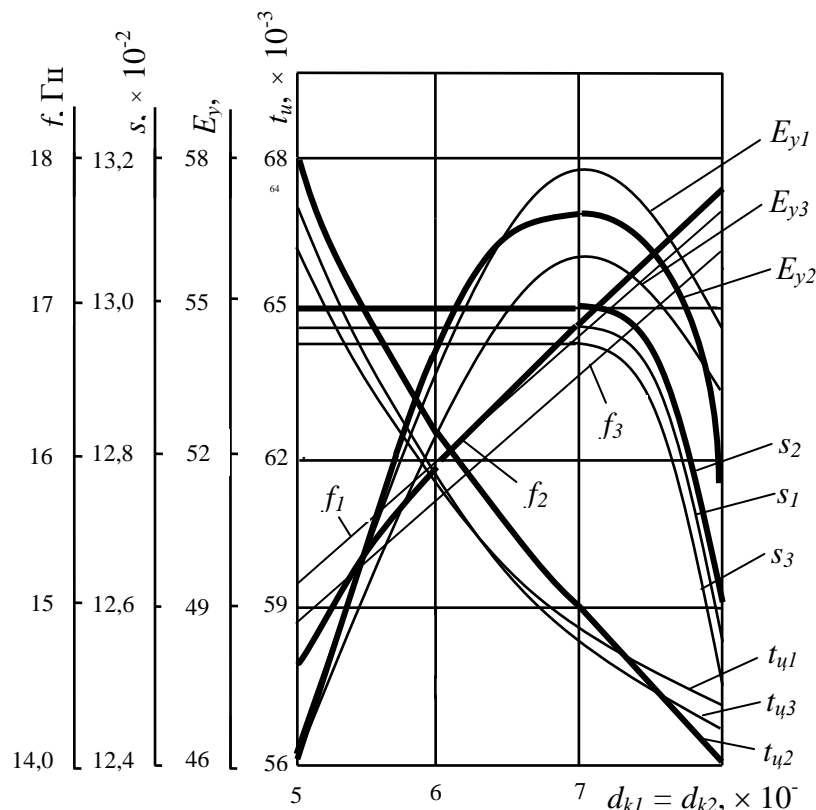


Рис. 1. Залежності робочих характеристик віброударних машин від величин діаметрів робочих вікон  $d_{k1}$  і  $d_{k2}$  впускних елементів системи розподілу стисненого повітря пневматичного приводу ( $l = 85 \times 10^{-3}$  м;  $d_{в.о.} = 5 \times 10^{-3}$  м)

Аналіз наведених графіків показує, що оснащення компенсаційної камери холостого ходу регульованим дроселем дозволяє досягнути збільшення енергії удару майже до 58 Дж при

величині діаметрів робочих вікон  $d_{k1}$  і  $d_{k2}$  впускних елементів системи повітророзподілу, рівних  $7 \times 10^{-3}$  м.

Отримання найвищої частоти ударів (до 18 Гц) забезпечує пневматичний привод, компенсаційні камери холостого та робочого ходів якого не оснащені регульованими дроселями. При цьому діаметри робочих вікон  $d_{k1}$  і  $d_{k2}$  впускних елементів системи повітророзподілу повинні становити  $8 \times 10^{-3}$  м.

Результати проведених досліджень свідчать, що хід поршня-ударника практично не залежить від величини діаметрів робочих вікон  $d_{k1}$  і  $d_{k2}$  впускних елементів системи повітророзподілу, і тільки коли вони перевищують  $7 \times 10^{-3}$  м, величина ходу починає інтенсивно зменшуватись.

Щодо тривалості циклу, то її найменші значення властиві для пневматичних приводів, компенсаційні камери холостого та робочого ходів яких не оснащені регульованими дроселями, при цьому при значеннях:  $d_{k1} = d_{k2} = 8 \times 10^{-3}$  м.

Залежності робочих характеристик віброударних машин від діаметра впускних отворів ( $d_{e.o.}$ ) у стінках пневмоциліндра приводу зображені на рис. 2.

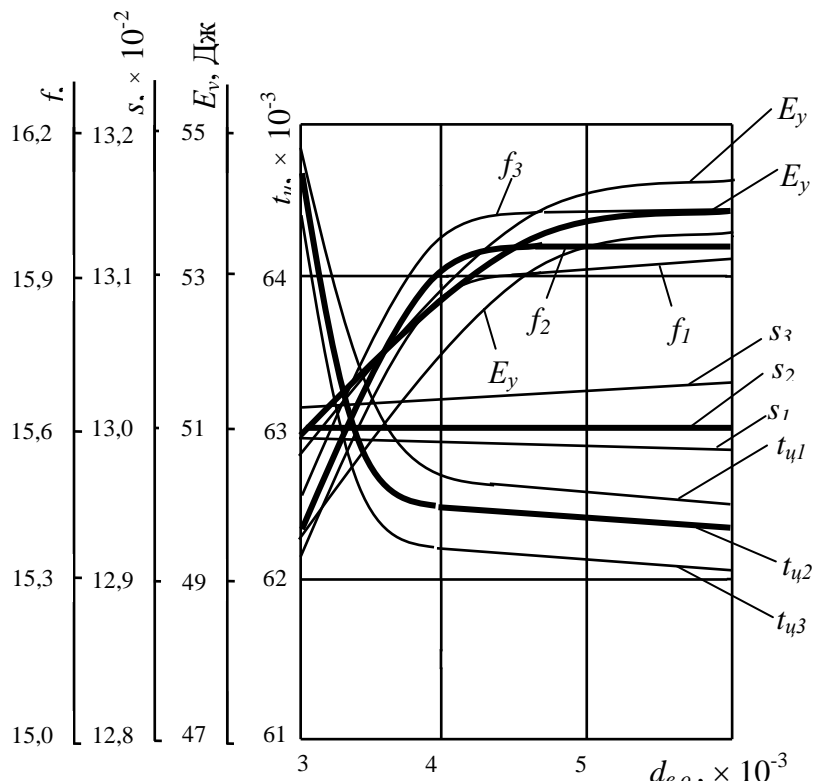


Рис. 2. Залежності робочих характеристик віброударних машин від діаметра впускних отворів  $d_{e.o.}$  у стінках циліндра приводу із пневмомеханічною системою розподілу стисненого повітря ( $l = 85 \times 10^{-3}$  м;  $d_{k1} = d_{k2} = 6 \times 10^{-3}$  м)

Аналіз наведених залежностей свідчить, що найвищої величини енергії удару (до 54 Дж) можна досягнути у випадку оснащення компенсаційної камери холостого ходу регульованим дроселем при  $d_{e.o.} = 6 \times 10^{-3}$  м.

Найвища частота ударів поршня-ударника властива для приводів, кришки компенсаційних камер робочого ходу яких оснащені регульованими дроселями – величина  $f_3$  у них перевищує 16 Гц.

Величина ходу поршня-ударника найвища при всіх значеннях  $d_{e.o.}$  також для пневматичних приводів, в яких одним із конструктивних елементів є регульований пневмодросель камери робочого ходу.

Тривалість циклу найменша для величини діаметра впускних отворів  $d_{e.o.} = 6 \times 10^{-3}$  м також для вищезазначених пневмоприводів.

Залежності робочих характеристик віброударних машин від відстані між осями впускних елементів камери холостого ходу та випускними отворами ( $l$ ) зображені на рис. 3. Їх аналіз показує, що:

- найбільша енергія удару забезпечується у випадку відсутності в кришках компенсаційних камер робочого та холостого ходів регульованих дроселів – її значення сягає 54 Дж;

- найвище значення частоти ударів у всьому діапазоні значень відстані між осями впускних елементів камери холостого ходу та випускними отворами  $l$  властиве для пневматичних приводів, компенсаційні камери холостого ходу яких оснащені регульованими дроселями;

- найменша тривалість робочого циклу властива для всього діапазону значень відстані  $l$  також для пневмоприводів із регульованими дроселями у компенсаційних камерах холостого ходу;

- найдовший хід у приводів без регульованих пневмодроселів, при цьому у інтервалі значень відстані між осями впускних елементів камери холостого ходу та випускними отворами від  $85,0 \times 10^{-3}$  м до  $88,6 \times 10^{-3}$  м.

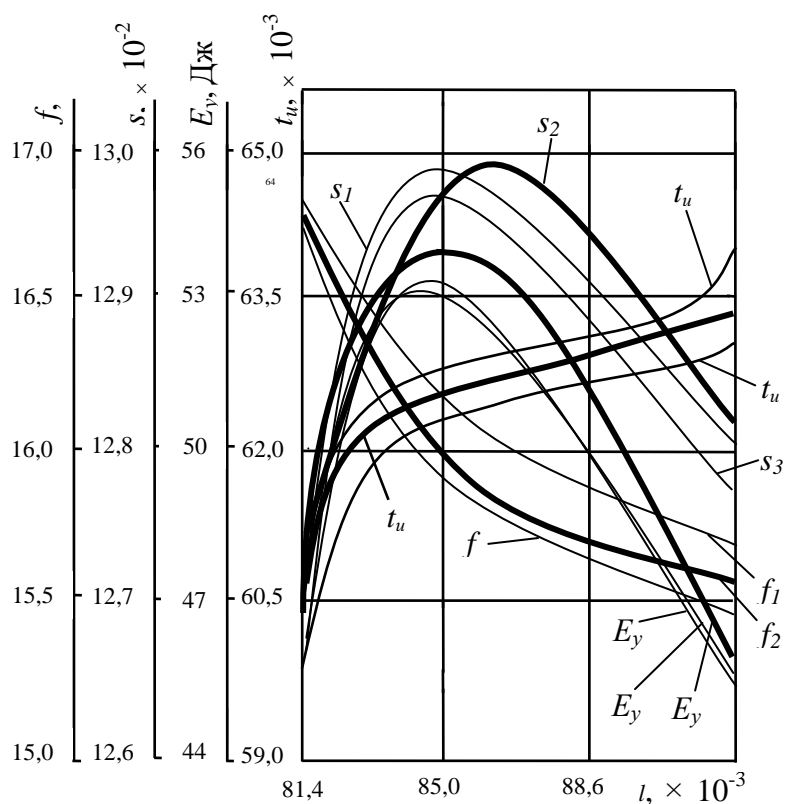


Рис. 3. Залежності робочих характеристик віброударних машин від величини відстані між осями впускних елементів камери холостого ходу та випускними отворами  $l$  циліндра пневматичного приводу ( $d_{k1} = d_{k2} = 6 \times 10^{-3}$  м;  $d_{e.o.} = 5 \times 10^{-3}$  м)

**Висновок.** Отримані залежності дозволяють вибрати оптимальні значення конструктивних параметрів приводів із пневмомеханічними системами повітророзподілу для забезпечення потрібних величин робочих характеристик віброударних машин на їх основі під час проектних робіт.

#### Інформаційні джерела

1. Кузнецов К.А. Разработка и исследование регулируемого поршневого вибровозбудителя с пневмоприводом для строительных технологий: Дис... канд. техн. наук: 05.02.03. – Вінниця, 1998. – 275 с.

**Стасюк В.М., к.т.н., Андрощук І.В., к.с.-х.н.**  
Луцкий национальный технический университет

### **ВЛИЯНИЕ ОТДЕЛЬНЫХ КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРИВОДА С ПНЕВМОМЕХАНИЧЕСКИЕ СИСТЕМОЙ ВОЗДУХОРАСПРЕДЕЛЕНИЯ НА РАБОЧИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВИБРОУДАРНЫХ МАШИН**

*Задание выбора оптимальных конструктивных параметров приводов для обеспечения нужных рабочих характеристик виброударных пневматических машин всегда актуально, в том числе и пневматических приводов, системы воздухораспределения которых оснащены клапанными воздухораспределителями.*

*В статье наводятся результаты исследований влияния отдельных конструктивных параметров привода с пневмомеханическим распределением сжатого воздуха на рабочие характеристики виброударных машин. В качестве отдельных конструктивных параметров привода выбраны: диаметры рабочих окон впускных элементов камер холостого и рабочего ходов, диаметры выпускных отверстий и расстояние между осями впускных элементов камеры холостого хода и выпускными отверстиями. При этом для выбора более совершенной конструкции привода рассматривались три его конструкции: с регулируемым дросселем в крышке компенсационной камеры холостого хода, с регулируемым дросселем в крышке компенсационной камеры рабочего хода и без регулируемых дросселей в крышках вышеупомянутых камер. В качестве рабочих характеристик виброударной машины выбраны: энергия удара, частота ударов, ход поршня-ударника и продолжительность цикла.*

*Полученные результаты исследований позволяют выбирать оптимальные величины конструктивных параметров привода с пневмомеханической системой воздухораспределения для обеспечения требуемых рабочих характеристик виброударной машины.*

**Ключевые слова:** пневмопривод, энергия удара, частота ударов, ход поршня-ударника, продолжительность цикла.

**Stasiuk V.M., Androschuk I.V.**  
Lutsk National Technical University

### **INFLUENCE OF SOME CONSTRUCTIVE PARAMETERS OF DRIVE WITH PNEUMO-MECHANIC SYSTEM OF AIR DISTRIBUTION ON WORKINGS CHARACTERISTICS OF VIBRO-PERCUSSION MACHINES**

*The choice of optimum constructive parameters of drives for providing of necessary workings characteristics of vibro-percussion pneumatic machines has always been actual, including pneumatic drives, air distribution systems of which are equipped with valvular air distributors.*

*The article presents the researches results of influence of some constructive parameters of the drive with the pneumo-mechanic distributing of compressed air on the workings characteristics of vibro-percussion machines. Some constructive parameters of the drive are determined: diameters of workings windows of the inlet elements of chambers of no-load and working motions, diameters of inlets and distance between the axes of the inlet elements of chamber of no-load and inlets. Thus for the choice of more perfect construction of the drive three constructions were examined: with the managed throttle in the lid of compensative chamber of no-load, with the managed throttle in the lid of compensative chamber of working motion and without the managed throttles in the lids of aforementioned chambers. Energy of blow, frequency of percussion, motion of piston-shock-worker and duration of cycle are chosen as the main workings characteristics of vibro-percussion machine.*

*The researches results allow to choose the optimum sizes of constructive parameters of the drive with the pneumo-mechanic system of air distribution for providing of necessary workings characteristics of vibro-percussion machine.*

**Keywords:** pneumo-drive, energy of percussion, frequency of percussion, motion of piston-shock-worker, duration of cycle.



УДК 669.295.539.121

DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2313-5352-2020-16-19>

Субботіна В.В., Білозеров В.В., Соболев О.В.

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

### ЕЛЕКТРИЧНА МІЦНІСТЬ ОКСИДНИХ ПОКРИТТІВ, СФОРМОВАНИХ МЕТОДОМ МІКРОДУГОВОГО ОКСИДУВАННЯ

У роботі наведені результати досліджень структури та властивостей покриттів на алюмінієвих сплавах Д16, АМг6 і АЛ25. Виявлені особливості морфології поверхні сплавів на основі алюмінію після МДО-оброблення. Дослідження кінетики формування товщини покриття показало, що реалізується практично лінійна залежність товщини від часу оксидування. Установлено, що фазовий склад покриттів різний для різних сплавів: основною фазою в покритті на сплаві Д16 є фаза  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  (60–70 %), на сплаві АМг6 –  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ , на сплаві АЛ25 – муліт  $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$  (60–70 %). Показана залежність електричної міцності від структурного стану. Установлено, що рентгеноаморфний стан МДО-покриттів дозволяє досягти високої електричної міцності ( $E = 10$  В/мкм) при великій швидкості формування таких покриттів. Ця технологія найбільш перспективною для одержання покриттів з високою електричною ізоляцією.

**Ключові слова:** МДО покриття, електроліт, товщина покриття, твердість, фазовий склад, електрична міцність.

#### Вступ

Оксидні покриття, сформовані на алюмінії і його сплавах, мають високу корозійну стійкість і високу адгезію з основою. У зв'язку із цим такі покриття знаходять усе більш широке застосування в різних галузях приладобудування, як в якості функціональних покриттів, так і в якості підшару для нанесення захисних покриттів.

Вивченню властивостей анодних оксидних покриттів присвячено досить багато робіт [1, 2], дослідження ж діелектричних властивостей оксидних покриттів, сформованих методом мікродугового оксидування (МДО), дотепер малочисленні [3, 4].

Різноманітність властивостей МДО-покриттів обумовлює широкі можливості використання їх при розв'язанні різних завдань, зокрема, для забезпечення електричної ізоляції.

Великий питомий електроопір оксидів алюмінії ( $R$  близько  $1 \cdot 10^{14}$  Ом•м) [2] обумовлює високі діелектричні властивості МДО-покриттів на алюмінії та його сплавах.

Ціль роботи – визначення електричної міцності покриттів залежно від їх структурного стану та складу електроліту при МДО-обробленні.

#### Матеріал і методика дослідження

У роботі проводилося формування покриттів на зразках діаметром 30 мм і товщиною 10 мм. Матеріалами для оксидування були Д16, АМг6, АЛ25. Хімічний склад сплавів наведено в таблиці 1.

Таблиця 1

Хімічний склад сплавів

Сплав	Основні компоненти, %					
	Cu	Mg	Mn	Ti	Si	Ni
Д16	3,8-4,9	1,2-1,8	0,9-0,9	-	-	-
АМг6	-	5,8-6,8	0,5-0,8	0,02-0,1	-	-
АЛ25	1,5-3,0	0,8-1,3	0,3-0,4	0,05-0,2	11,0-13,0	0,8-1,3

Мікродугове оксидування проводилося в циліндричній ванні ємністю 20 л, виготовленої з нержавіючої сталі, що має сорочку водяного охолодження і повітряний барботаж електроліту. Корпус ванни служив другим електродом. Температура електроліту підтримувалася в інтервалі 20–30 °С.

Процес проводився з використанням джерела живлення конденсаторного типу при щільності струму 20 А/дм<sup>2</sup> при анодно-катодному режимі.

Застосовувалися наступні методи дослідження:

© Субботіна В.В., Білозеров В.В., Соболев О.В.

- товщина покриття (загальна і зміцненого шару) визначалася за допомогою вихрового товщиноміру ВТ-10НЦ і металографічно на поперечних шліфах:
- мікротвердість вимірювалася на приладі ПМТ-3 при навантаженні 100 і 200 г;
- морфологія поверхні та шліфи аналізувалися металлографічно й на РЕМ;
- електрична міцність визначалася по пробивній напрузі на лабораторній установці при напрузі від 0 до 1000 В.

Формування покриттів проводилося в лужно-силікатному електроліті та силікатному. Лужно-силікатний електроліт - водяний розчин 1 г/л КІН + 6 г/л  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  (рідке скло,  $\rho = 1,4 \text{ г/см}^3$ ). Силікатний електроліт - водяний розчин рідкого скла ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) від 20 до 140 г/л.

#### Результати і їх обговорення

Дослідження кінетики формування товщини покриття показало, що реалізується практично лінійна залежність товщини від часу окисдування. Однак, швидкість формування покриттів для різних сплавів різна. Так, максимальна швидкість росту покриття спостерігається для сплаву Д16, мінімальна на сплаві АЛ25 (табл. 2). Відзначимо, що швидкість формування покриття в силікатному електроліті в 5–7 раз вище порівняно з лужно-силікатним електролітом.

Таблиця 2

Характеристика МДО-покриттів

Сплав	Швидкість формування, мкм/г	Фазовий склад	HV, кг/мм <sup>2</sup>	U <sub>пр</sub> , В	E, В/мкм
Д16	70-80	$\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3 + \gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$	1500–2000	800	5–11
АМг6	60-70	$\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$	1200–1500	800	~8
АЛ25	40-50	$3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 + \gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$	1000–1200	1000	12–15

Морфологія поверхні покриттів характеризується «пухирчастою» структурою (рис. 1), що свідчить про формування цих утворювань, головним чином, за механізмом екзотермічного окиснювання алюмінію. Очевидно, центр утворювань є каналом розрядів. При збільшенні товщини покриттів оксид алюмінію вихлюпується з каналу розряду, кристалізується й тоді чітко видні границі цих «пухирчастих» утворювань (рис. 1, б) і відкрита пористість. Можна чекати значну структурну неоднорідність по товщині покриття, що повинне позначитися на твердості покриття і його діелектричних властивостях.

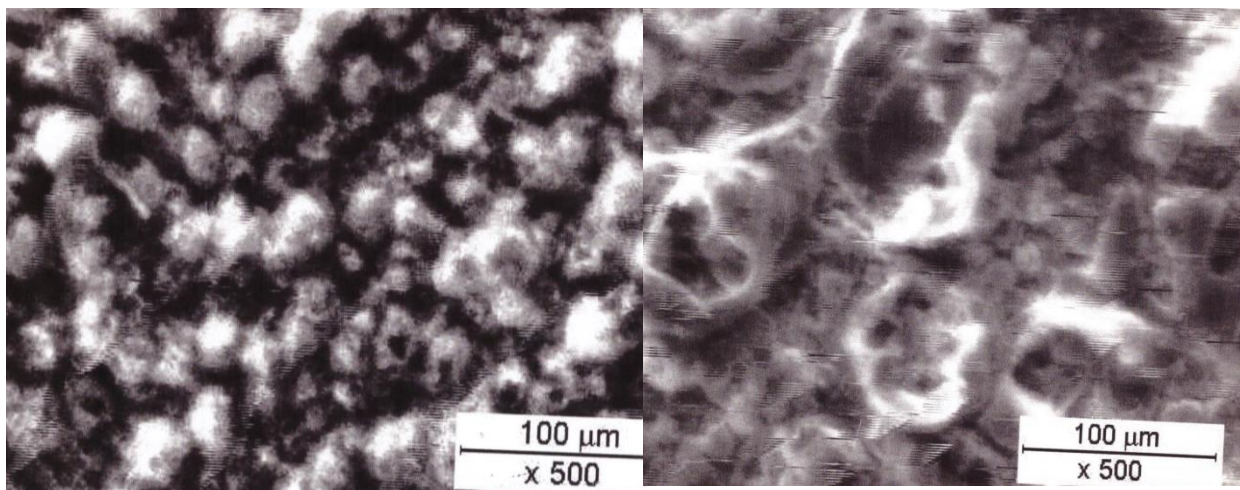
Морфологія зовнішньої поверхні мікродугового покриття залежить від режиму окисдування і визначається товщиною покриття, але вона залишається характерною для різних сплавів.

Рентгенівський фазовий аналіз покриттів (рис. 2), сформованих у лужно-силікатних електролітах показав, що покриття має кристалічна будова. Фазовий склад покриттів різний для різних сплавів. Так, основною фазою в покритті на сплаві Д16 є фаза  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  (60–70 %), на сплаві АМг6 –  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ , на сплаві АЛ25 – мулліт  $3 \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$  (60–70 %) (табл. 2).

Фазовий склад покриття визначає й твердість покриттів (табл. 2). Відзначимо, що твердість корунду ( $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ ) становить  $\sim 2400 \text{ кг/мм}^2$ ,  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3 \sim 1400 \text{ кг/мм}^2$ , мулліту  $\sim 1000 \text{ кг/мм}^2$ .

Таким чином, метод МДО дозволяє перетворити оброблювану поверхню у високотемпературні оксиди алюмінію, що мають високу твердість.

Пробивна напруга ( $U_{пр}$ ) і електрична міцність ( $E = U_{пр}/h$ ) для покриттів, сформованих у лужно-силікатному електроліті, залежно від товщини покриття наведені на рис. 3, 4. Характер змін  $U_{пр}$  і  $E$  можна пояснити структурними особливостями покриттів: пористістю, фазовим складом та їх розподілянням по товщині покриття. Ці фактори приводять до збільшення в покритті неоднорідності електричного поля. У результаті на локальних ділянках покриття зростає напруженість електричного поля і пробій наступає при більш низькій напрузі.



А б  
Рис. 1. Морфологія поверхні покриттів на сплаві Д16  
(електроліт – 1 г/л KOH + 6 г/л Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>):  
а – товщина покриття 50 мкм, б – товщина покриття 100 мкм

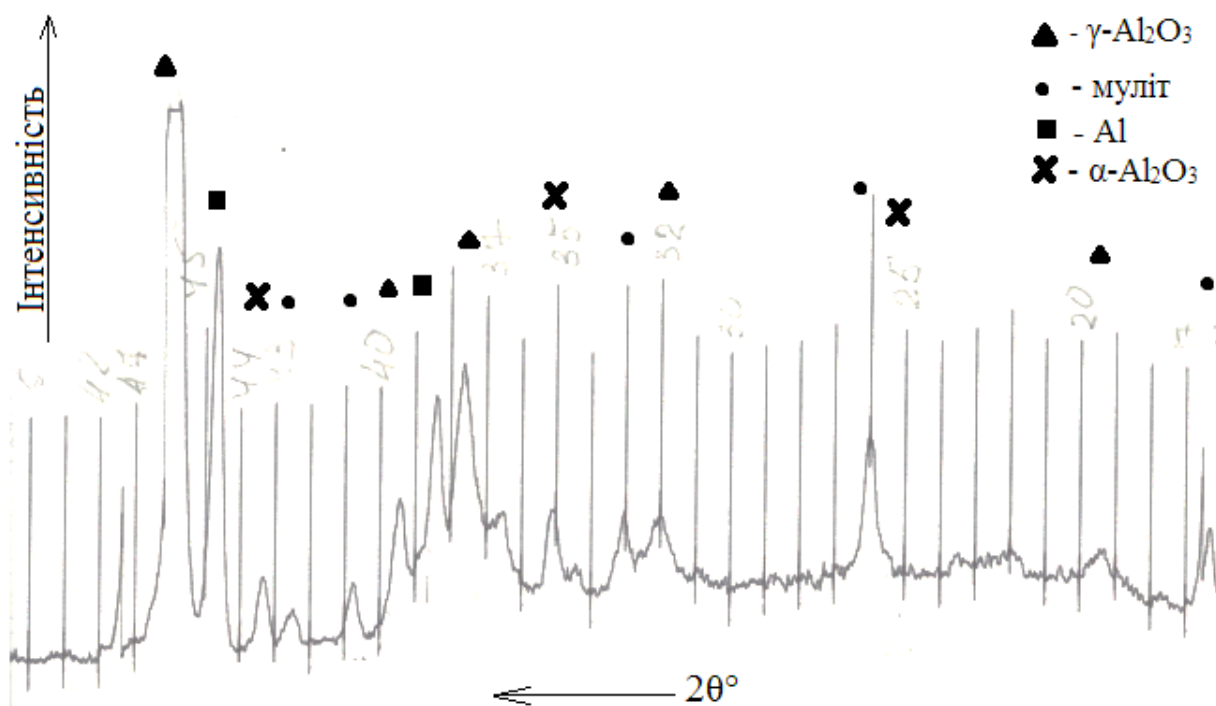


Рис. 2. Дифрактограма покриття сплаву Д16

Зменшення  $E$  із зростанням товщини покриття, тобто електричне знеміцнювання (див. рис. 4) пов'язують зі збільшенням середньої довжини пробігу електрона при збільшенні товщини діелектрика.

Проведене дослідження показало, що електрична міцність оксидних покриттів визначається структурним станом покриття. Найбільша електрична міцність (найбільша напруга пробою) спостерігається в покритті на сплаві АЛ25. Підвищений вміст кремнію, можливо, сприяє кращому сплавленні структурних складових у процесі МДО. Однофазність покриттів на сплаві АМг6 забезпечує сталість  $E$  для різних товщин. Гетерофазність покриттів на сплаві Д16 викликає електричне знеміцнювання.

Заслугує увагу силікатне покриття на сплаві Д16 (рис. 5). Досить висока електрична міцність ( $E = 9$  В/мкм) забезпечується рентгеноаморфним станом покриття. Враховуючи більші швидкості формування покриттів при вмісті рідкого скла більше 30 г/л можна рекомендувати саме ці покриття для забезпечення електричної ізоляції.

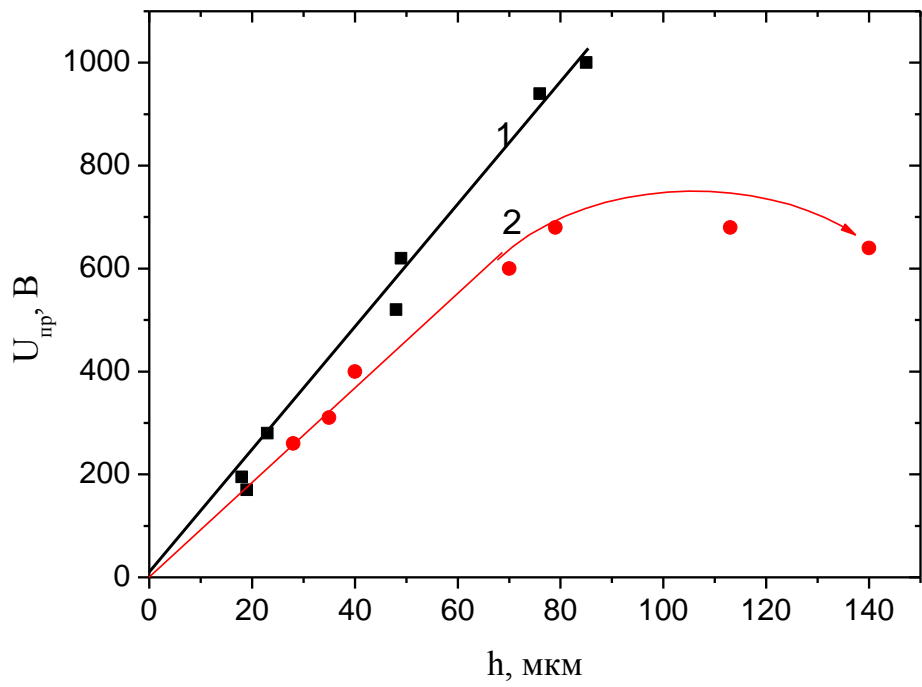


Рис. 3. Залежність пробивної напруги від товщини покриття (електорліт – 1 г/л КОН + 6 г/л  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ):  
1 – АЛ25, 2 – Д16 і АМг6

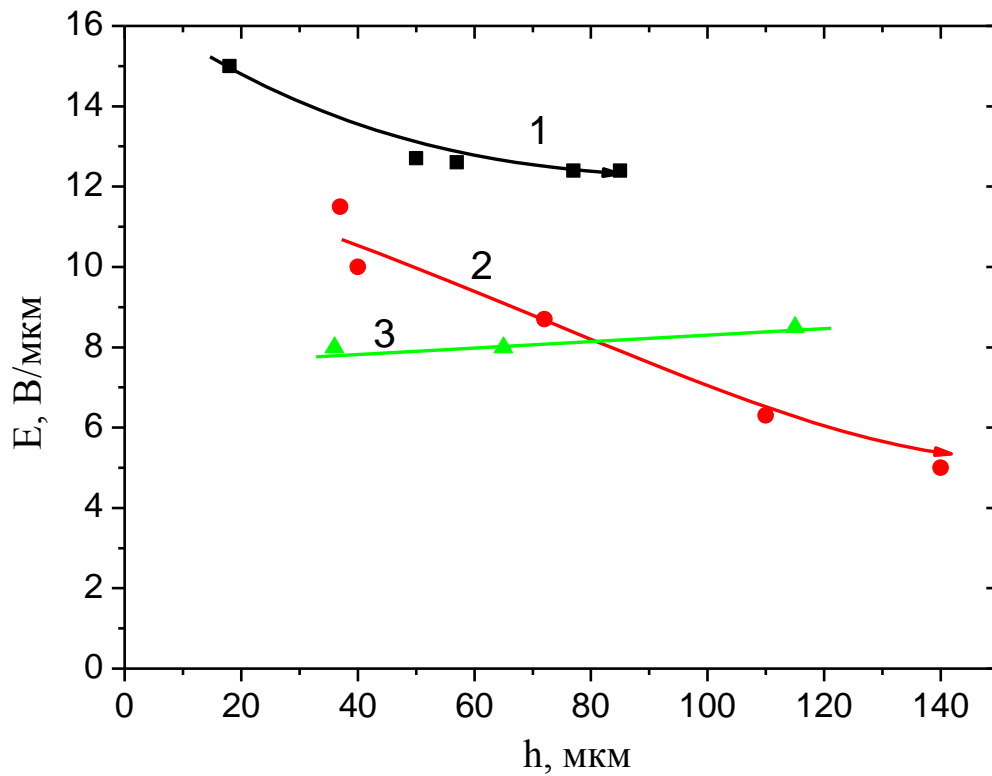


Рис. 4. Електрична міцність МДО-покриттів на різних сплавах:  
1 – АЛ25, 2 – Д16, 3 – АМг6

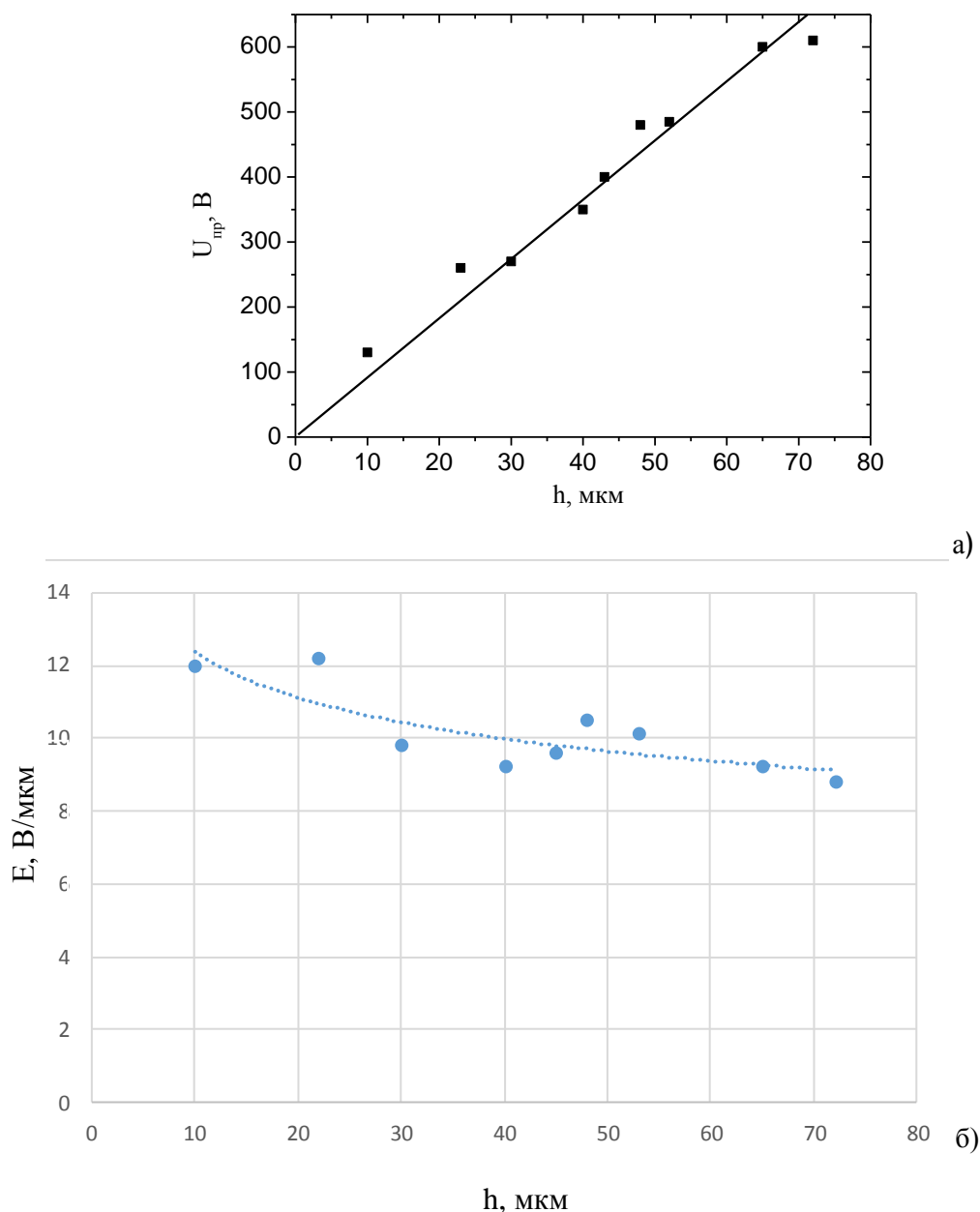


Рис. 5. Діелектричні властивості покриттів на сплаві Д16, сформованих у силікатному електроліті (50 г/л  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ )  
а) пробивна напруга, б) електрична міцність

Розроблені нами режими одержання МДО-покриттів із серії ізоляційних матеріалів. Такі матеріали показали високі функціональні властивості при їх використанні в якості ізоляційних при виготовленні каркасів котушок індуктивності, нагрівачів із блоком теплових трубок і напрямних роликів електроерозійних установок.

#### Висновки

1. Виявлені особливості морфології поверхні сплавів на основі алюмінію після них МДО-оброблення. Морфологія поверхні покриттів характеризується «пухирчастою» структурою, що свідчить про формування цих утворювань, головним чином, за механізмом екзотермічного окиснювання алюмінію.
2. Дослідження кінетики формування товщини покриття показало, що реалізується практично лінійна залежність товщини від часу окисдування.
3. Установлене, що покриття сформовані в лужно-силікатних електролітах мають кристалічну будову.

4. Фазовий склад покриттів різний для різних сплавів: основною фазою в покритті на сплаві Д16 є фаза  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  (60–70 %), на сплаві АМг6 –  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ , на сплаві АЛ25 – муліт  $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$  (60–70 %)

5. Установлено, що найбільша електрична міцність (найбільша напруга пробою) спостерігається в покритті на сплаві АЛ25. Однофазність покриттів на сплаві АМг6 забезпечує сталість Е для різних товщин. Гетерофазність покриттів на сплаві Д16 викликає електричне знеміцнювання.

6. Відносно висока електрична міцність ( $E = 10$  В/мкм) забезпечується рентгеноаморфним станом покриття на сплаві Д16. При цьому досягаються більші швидкості формування покриттів при вмісті рідкого скла більш 30 г/л, що дає змогу вважати таку технологію найбільш перспективною для одержання покриттів з високою електричною ізоляцією.

#### Список використаних джерел

1. Суминов И. В., Эпельфельд А. В., Людин В. Б., Крит Б. Л., Борисов А. М. Микродуговое оксидирование (теория, технология, оборудование). М. : ЭКОМЕТ, 2005. 368 с.
2. Физико-химические свойства окислов. Справочник под ред. Г. В. Самсонова, 1978, М. : Металлургия, 1978. 472 с. URL: <https://www.twirpx.com/file/594805/> (дата звернення: 17.06.2020).
3. Гуцаленко Ю.Г., Севидова Е.К., Степанова И.И., Стрельницкий В.Е. Оценка диэлектрических свойств микродуговых покрытий на деформируемых алюминиевых сплавах, ВАНТ. 2018. №2(114). С. 125–127. URL: [https://vant.kipt.kharkov.ua/ARTICLE/VANT\\_2018\\_2/article\\_2018\\_2\\_125.pdf](https://vant.kipt.kharkov.ua/ARTICLE/VANT_2018_2/article_2018_2_125.pdf) (дата звернення: 17.06.2020).
4. Павлюс С.Г., Соборницкий В.И., Шепрут Ю.А., Снежко Л.А., Черненко В.И. Диэлектрические свойства анодно-искровых силикатных покрытий на алюминии // Электронная обработка материалов. 1987. №3. С. 34–36.

**Субботина В.В., Белозеров В.В., Соболев О.В.**

Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»

#### ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ПРОЧНОСТЬ ОКСИДНЫХ ПОКРЫТИЙ, СФОРМИРОВАННЫХ МЕТОДОМ МИКРОДУГОВОГО ОКСИДИРОВАНИЯ

*В работе приведены результаты исследований структуры и свойств покрытий на алюминиевых сплавах Д16, АМг6 и АЛ25. Выявлены особенности морфологии поверхности сплавов на основе алюминия после их МДО-обработки. Исследование кинетики формирования толщины покрытия показало, что реализуется практически линейная зависимость толщины от времени оксидирования. Установлено, что фазовый состав покрытий различен для разных сплавов: основной фазой в покрытии на сплаве Д16 является фаза  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  (60–70 %), на сплаве АМг6 –  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ , на сплаве АЛ25 – муліт  $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$  (60–70 %). Показана зависимость электрической прочности от структурного состояния. Установлено, что рентгеноаморфное состояние МДО-покрытий позволяют достичь относительно высокой электрической прочности ( $E = 10$  В/мкм) при большой скорости формирования таких покрытий. Это делает такую технологию наиболее перспективной для получения покрытий с высокой электрической изоляцией.*

**Ключевые слова:** МДО покрытие, электролит, толщина покрытия, твердость, фазовый состав, электрическая прочность.

**Subbotina V.V., Belozarov V.V., Sobol O.V.**

National technical university «Kharkov polytechnic institute»

### **ELECTRICAL STRENGTH OF OXIDE COATINGS FORMED BY THE METHOD OF MICRO-ARC OXIDATION**

*The paper presents the results of studies of the structure and properties of coatings on aluminum alloys D16, AMg6 and AL25. The features of the surface morphology of aluminum-based alloys after their MAO treatment are revealed. A study of the kinetics of coating thickness formation showed that an almost linear dependence of the thickness on the time of oxidation is realized.*

*It was established that the phase composition of the coatings is different for different alloys: the main phase in the coating on D16 alloy is the  $\alpha$ - $Al_2O_3$  phase (60–70 %), on the AMg6 alloy –  $\gamma$ - $Al_2O_3$ , on the AL25 alloy –  $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$  mullite (60–70 %). The dependence of electric strength on the structural state is shown.*

*It was found that the X-ray amorphous state of the MAO coatings allows one to achieve a relatively high electric strength ( $E = 10 V / \mu m$ ) at a high rate of formation of such coatings. This makes this technology the most promising for producing coatings with high electrical insulation.*

**Key words:** MAO coating, electrolyte, coating thickness, hardness, phase composition, dielectric strength.



УДК 621.315.592

DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2313-5352-2020-16-20>Удовицька Ю.А., Луньов С.В., к.ф.-м.н., Кашицький В.П., к.т.н., Назарчук П.Ф., к.ф.-м.н.  
Луцький національний технічний університет

## РОЗРАХУНОК ВТРАТ ЕНЕРГІЇ ШВИДКИХ ЕЛЕКТРОНІВ ПРИ ПРОХОДЖЕННІ ЧЕРЕЗ ЕПОКСИКОМПОЗИТ

Проведені розрахунки коефіцієнта пропускання, радіаційних, іонізаційних та сумарних втрат для електронів з енергіями 10 MeV та 12 MeV при проходженні шару епоксидної смоли товщиною 5 мм з твердником ПЕПА 12 мас. ч. та з наповнювачами порошоків алюмінію та заліза вмістом 30 мас.ч. Було встановлено, що іонізаційні втрати енергії швидких електронів значно перевищують радіаційні і зростають при введенні в полімерну матрицю наповнювачів порошоків алюмінію та заліза. При цьому коефіцієнт пропускання електронного пучка стає меншим. Для шару епоксикомпозиту з наповнювачем порошку заліза такі втрати енергії електрона є найбільшими. Це пояснює високу радіаційну стійкість досліджуваних раніше монокристалів n-Ge з таким захисним шаром епоксипокриття до електронного опромінення з енергією 10 MeV. Шар епоксидно-діанової смоли марки ЕД-20 з наповнювачами порошоків алюмінію та заліза може бути перспективним матеріалом для створення відносно дешевих, легких та технологічних захисних покриттів елементів напівпровідникової електроніки від агресивної дії високоенергетичного електронного опромінення. Представлені теоретичні розрахунки можуть бути використанні при розробці та моделюванні на основі такого епоксикомпозиту захисних покриттів чутливих елементів або корпусів напівпровідникових датчиків, які перебувають в умовах підвищеної радіації.

**Ключові слова:** епоксикомпозит, наповнювачі порошоків алюмінію та заліза, іонізаційні та радіаційні втрати, коефіцієнт пропускання, захисні покриття, електронне опромінення.

### 1. Вступ

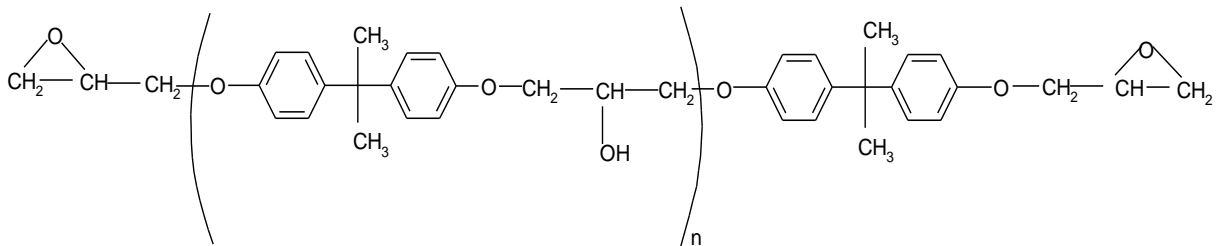
Полімерні матеріали широко використовуються в медицині, авіаційній і ракетокосмічній техніці, машинобудуванні, радіоелектроніці та інших галузях промисловості. Активне заміщення традиційних матеріалів полімерними відбувається в основному завдяки наповненим полімерним композиціям, компоненти яких при взаємодії один з одним і полімерною матрицею здатні надавати синергійний ефект [1]. Поєднання наповнювачів з полімерною матрицею дозволяє отримувати матеріали із заданими фізико-механічними та експлуатаційними властивостями, які можуть переважати аналогічні властивості металів та сплавів [2-6]. Виходячи з одержання необхідних властивостей полімерів, підбирається певне поєднання наповнювачів. В останні роки спостерігається стала тенденція зростання інтересів в області створення космічної техніки, яка має підвищену радіаційну стійкість. У зв'язку з цим розробляються нові види захисних матеріалів, в тому числі і полімерних [7-10]. Застосування чистих полімерів для елементів космічних апаратів практично неможливе в силу величезного комплексу недоліків: низька стійкість до радіації, повна або часткова втрата геометрії при 90 °С, легка займистість, значне розширення при нагріванні (лінійний коефіцієнт розширення в 10 разів більше, ніж для сталі), знижена теплопровідність [11-13]. При проходженні іонізуючого випромінювання через полімер зменшується інтенсивність гальмівного випромінювання, що є перевагою в порівнянні з радіаційно-захисними матеріалами з важких металів і є вирішальним фактором для застосування полімерів в космічному матеріалознавстві. Одним з найбільш негативних чинників космосу, що впливають на працездатність елементів з полімерів, є вплив швидких електронів. Опромінення матеріалів електронним пучком високих енергій викликає в них цілий комплекс фізико-хімічних процесів, які призводять до зміни їх мікроструктури та фізичних властивостей. Особливо чутливими до впливу радіації є напівпровідники. Використання епоксиполімерів в якості захисних покриттів елементів напівпровідникової електроніки дозволяє підвищити їх радіаційну стійкість та відповідно забезпечити стабільну роботу напівпровідникових приладів в умовах підвищеної радіації [14]. Тому цікавим як з теоретичної, так і практичної точок зору є дослідження екрануючої здатності епоксикомпозитного шару від електронного опромінення.

В роботі [14] досліджено дефектоутворення в монокристалах n-Ge при електронному опроміненні. Було встановлено, що в опроміненних монокристалах германію, покритих шаром епоксиполімеру з наповнювачем порошку заліза, утворилася найменша кількість радіаційних дефектів. Даний факт якісно був пояснений тим, що середній пробіг електронів в наповненому порошком заліза епоксиполімері є найменшим, порівняно з шаром епоксипокриття без наповнювачів та з наповнювачем порошку алюмінію. Для комплексного аналізу екрануючої здатності такого шару епоксипокриття необхідне проведення кількісних розрахунків та аналіз радіаційних втрат електронного пучка.

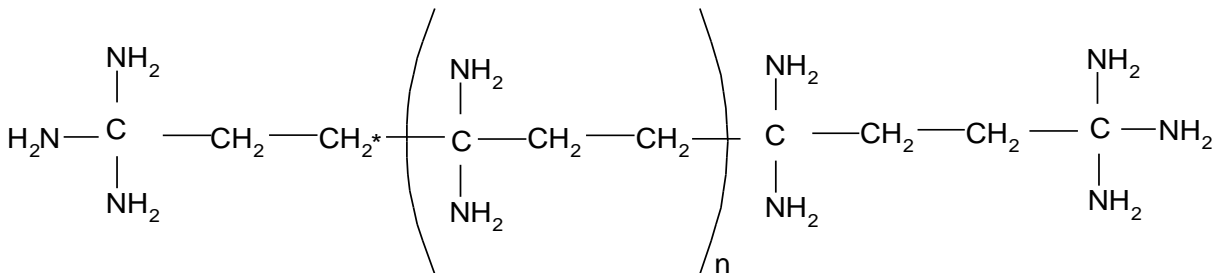
## 2. Результати теоретичних розрахунків та їх обговорення

В даній роботі проводились розрахунки коефіцієнта пропускання, радіаційних та іонізаційних втрат енергії електронів при проходженні шару епоксидної смоли з вмістом твердника ПЕПА 12 мас.ч., без наповнювачів та з наповнювачами порошків алюмінію та заліза вмістом 30 мас.ч.

Відомо [15], що макромолекула епоксидної смоли має таку будову:



атвердника поліетиленполіаміну наступну:



Тоді для 12 мас.ч. твердника ПЕПА, на одну молекулу припадає 5 молекул епоксидної смоли. Враховуючи кількість елементів в епоксидній смолі з твердником, їх масові та атомні числа, можна обчислити відсотковий вміст хімічних елементів (табл. 1).

Таблиця 1.

Елементний склад епоксидної смоли з твердником ПЕПА 12 мас. ч.

Вміст у відсотках різних хімічних елементів			
N	O	H	C
4,94	16,45	8,81	69,8

Густина епоксикомпозиту

$$\rho = \frac{m}{V}, \quad (1)$$

де  $m$  – маса епоксиполімеру, яка визначалась як різниця між масою напівпровідника, покритого шаром епоксикомпозиту, та масою зразка напівпровідника з олов'яними контактами;  $V$  – об'єм епоксикомпозиту.

Як показують розрахунки, епоксикомпозитний шар покриття без наповнювачів має густина  $\rho = 1,2 \text{ г/см}^3$ , а з наповнювачами порошків алюмінію та заліза  $1,871 \text{ г/см}^3$  та  $3,515 \text{ г/см}^3$  відповідно.

Іонізаційні втрати енергії електронів при проходженні шару речовини визначаються виразом [10]:

$$\left(-\frac{dE}{dx}\right)_{col} = K\rho \frac{Z}{A} \frac{1}{2\beta^2} \left[ \ln\left(\frac{m_e c^2 E_k}{I^2} \frac{\beta^2}{2(1-\beta^2)}\right) - (2\sqrt{1-\beta^2} - 1 + \beta^2) \ln 2 + 1 - \beta^2 + \frac{1}{8}(1-\sqrt{1-\beta^2})^2 \right], \quad (2)$$

де  $K=4\pi r_e^2 m_e c^2 N_A = 0,307 \text{ MeV}\cdot\text{г}/\text{см}^2$ ;  $m_e c^2 = 0,511 \text{ MeV}$  – енергія спокою електрона;  $r_e = e^2/m_e c^2 = 2,8 \cdot 10^{-13} \text{ см}$  – класичний радіус електрона;  $N_A = 6 \cdot 10^{23} \text{ 1/моль}$ ;  $\rho$  – густина речовини;  $I$  – середній іонізаційний потенціал атома речовини середовища;  $\beta = \sqrt{1 - \frac{(m_e c^2)^2}{(m_e c^2 + E_k)^2}}$  – Лоренц-фактор електрона з кінетичної енергією  $E_k$ .

Якщо речовина складається з атомів різного сорту, то кожен атом буде давати свій внесок в іонізаційні втрати енергії електронів. Тоді

$$\left(-\frac{dE}{dx}\right)_{col} = \sum_i \left(-\frac{dE}{dx}\right)_i, \quad (3)$$

де  $\left(-\frac{dE}{dx}\right)_i$  – внесок  $i$ -го елемента в складній речовині в іонізаційні втрати енергії електрона.

Перепишемо вираз (1) в більш зручному для аналізу вигляді:

$$\left(-\frac{dE}{dx}\right)_{col} = \rho \frac{Z}{A} F(E_k, I), \quad (4)$$

$$F(E_k, I) = \frac{K}{2\beta^2} \left[ \ln\left(\frac{m_e c^2 E_k}{I^2} \frac{\beta^2}{2(1-\beta^2)}\right) - (2\sqrt{1-\beta^2} - 1 + \beta^2) \ln 2 + 1 - \beta^2 + \frac{1}{8}(1-\sqrt{1-\beta^2})^2 \right]. \quad (5)$$

Тоді в нашому випадку внески кожного хімічного елемента в іонізаційні втрати рівні:

$$\left(-\frac{dE}{dx}\right)_{col}^C = \rho_C \frac{Z_C}{A_C} F(E_k, I_C), \quad (6)$$

$$\left(-\frac{dE}{dx}\right)_{col}^N = \rho_N \frac{Z_N}{A_N} F(E_k, I_N), \quad (7)$$

$$\left(-\frac{dE}{dx}\right)_{col}^O = \rho_O \frac{Z_O}{A_O} F(E_k, I_O), \quad (8)$$

$$\left(-\frac{dE}{dx}\right)_{col}^H = \rho_H \frac{Z_H}{A_H} F(E_k, I_H), \quad (9)$$

$$\left(-\frac{dE}{dx}\right)_{col}^{Al} = \rho_{Al} \frac{Z_{Al}}{A_{Al}} F(E_k, I_{Al}), \quad (10)$$

$$\left(-\frac{dE}{dx}\right)_{col}^{Fe} = \rho_{Fe} \frac{Z_{Fe}}{A_{Fe}} F(E_k, I_{Fe}), \quad (11)$$

Середні іонізаційні потенціали атомів мають наступні значення [15]:  $I_C \approx 78\text{eV}$ ,  $I_N \approx 80,5\text{eV}$ ,  $I_O \approx 95\text{eV}$ ,  $I_H \approx 19,2\text{eV}$ ,  $I_{Al} \approx 149,5\text{eV}$ ,  $I_{Fe} \approx 234\text{eV}$ .

Згідно з (3-11), сумарні іонізаційні втрати енергії електронів при проходженні шару епоксиполімеру без наповнювачів:

$$\left(-\frac{dE}{dx}\right)_{col} = \rho_C \frac{Z_C}{A_C} F(E_k, I_C) + \rho_N \frac{Z_N}{A_N} F(E_k, I_N) + \rho_O \frac{Z_O}{A_O} F(E_k, I_O) + \rho_H \frac{Z_H}{A_H} F(E_k, I_H). \quad (12)$$

Тоді іонізаційні втрати енергії електронів в досліджуваному епоксиполімері з наповнювачем порошку алюмінію

$$\left(-\frac{dE}{dx}\right)_{col} = \rho_C \frac{Z_C}{A_C} F(E_k, I_C) + \rho_N \frac{Z_N}{A_N} F(E_k, I_N) + \rho_O \frac{Z_O}{A_O} F(E_k, I_O) + \rho_H \frac{Z_H}{A_H} F(E_k, I_H) + \rho_{Al} \frac{Z_{Al}}{A_{Al}} F(E_k, I_{Al}), \quad (13)$$

а з наповнювачем порошку заліза

$$\left(-\frac{dE}{dx}\right)_{col} = \rho_C \frac{Z_C}{A_C} F(E_k, I_C) + \rho_N \frac{Z_N}{A_N} F(E_k, I_N) + \rho_O \frac{Z_O}{A_O} F(E_k, I_O) + \rho_H \frac{Z_H}{A_H} F(E_k, I_H) + \rho_{Fe} \frac{Z_{Fe}}{A_{Fe}} F(E_k, I_{Fe}). \quad (14)$$

Втрати енергії електрона на випромінювання визначаються виразом [10, 16]:

$$\left(-\frac{dE}{dx}\right)_{rad} = \rho \frac{Z^2}{A} \frac{K\alpha}{4\pi} \frac{\varepsilon}{m} G(E_k), \quad (15)$$

де  $F(x) = \int_0^x \frac{\ln(1+y)}{y} dy$ ;  $\varepsilon = E_k + m_e c^2$  – повна енергія електрона,  $p$  – імпульс електрона;

$$G(E_k) = \frac{K\alpha}{4\pi} \frac{\varepsilon}{m} \left[ \frac{12\varepsilon^2 + 4m_e^2 c^4}{3\varepsilon p} \ln\left(\frac{\varepsilon + p}{m_e c^2}\right) - \frac{(8\varepsilon + 6p)m_e^2 c^4}{3\varepsilon p^2} \left(\ln\left(\frac{\varepsilon + p}{m_e c^2}\right)\right)^2 - \frac{4}{3} + \frac{2m_e^2 c^4}{\varepsilon p} F\left(\frac{2p(\varepsilon + p)}{m_e^2 c^4}\right) \right]. \quad (16)$$

Враховуючи вклад кожного з елементів та наповнювачів сумарні втрати енергії електрона на випромінювання для шару епоксипокриття без наповнювачів та з наповнювачами порошоків алюмінію та заліза, можна записати:

$$\left(-\frac{dE}{dx}\right)_{rad} = \left( \rho_C \frac{Z_C^2}{A_C} + \rho_N \frac{Z_N^2}{A_N} + \rho_O \frac{Z_O^2}{A_O} + \rho_H \frac{Z_H^2}{A_H} + \rho_{Al} \frac{Z_{Al}^2}{A_{Al}} \right) G(E_k), \quad (17)$$

$$\left(-\frac{dE}{dx}\right)_{rad} = \left( \rho_C \frac{Z_C^2}{A_C} + \rho_N \frac{Z_N^2}{A_N} + \rho_O \frac{Z_O^2}{A_O} + \rho_H \frac{Z_H^2}{A_H} + \rho_{Al} \frac{Z_{Al}^2}{A_{Al}} + \rho_{Fe} \frac{Z_{Fe}^2}{A_{Fe}} \right) G(E_k), \quad (18)$$

$$\left(-\frac{dE}{dx}\right)_{rad} = \left( \rho_C \frac{Z_C^2}{A_C} + \rho_N \frac{Z_N^2}{A_N} + \rho_O \frac{Z_O^2}{A_O} + \rho_H \frac{Z_H^2}{A_H} + \rho_{Al} \frac{Z_{Al}^2}{A_{Al}} + \rho_{Fe} \frac{Z_{Fe}^2}{A_{Fe}} \right) G(E_k). \quad (19)$$

Втрати кінетичної енергії електрона з врахуванням іонізаційних та радіаційних втрат можна представити як:

$$\left(-\frac{dE}{dx}\right) = \left(-\frac{dE}{dx}\right)_{col} + \left(-\frac{dE}{dx}\right)_{rad}. \quad (20)$$

Тоді енергія електронного пучка при виході з шару епоксикомпозиту:

$$E_k = E_{k_0} - \left(-\frac{dE}{dx}\right) \cdot x, \quad (21)$$

де  $E_{k_0}$  – кінетична енергія падаючих на шар епоксикомпозиту електронів,  $x$  – товщина шару епоксипокриття.

Екрануючу здатність епоксикомпозитного шару від електронного опромінення можна охарактеризувати коефіцієнтом пропускання електронного пучка:

$$T = \frac{E_k}{E_{k_0}} \cdot 100\%. \quad (22)$$

Результати обчислень радіаційних, іонізаційних та сумарних втрат енергії електронів, а також коефіцієнту пропускання представлені в таблицях 2 та 3. Розрахунки проводились для енергії

електронів  $E_{k_0} = 10$  MeV, якими опромінювались досліджувані в роботі [14] монокристали германію, та енергії  $E_{k_0} = 12$  MeV. Друге вибране значення енергії є цікавим з фундаментальної точки зору дослідження механізмів дефектоутворення в германії, оскільки при енергіях  $E_{k_0} > 10$  MeV в монокристалах германію крім точкових дефектів утворюються області розвпорядкування [17].

Таблиця 2.

Втрати енергії електрона та коефіцієнт пропускання для епоксипокриття товщиною 5 мм, опроміненого електронами за енергії  $E_{k_0} = 10$  MeV

Тип покриття	Іонізаційні втрати $\left(-\frac{dE}{dx}\right)_{col}, \frac{MeV}{cm}$	Радіаційні втрати $\left(-\frac{dE}{dx}\right)_{rad}, \frac{MeV}{cm}$	Сумарні втрати $\left(-\frac{dE}{dx}\right), \frac{MeV}{cm}$	Кінетична енергія електрона $E_k, MeV$	Коефіцієнт пропускання електронного пучка $T, \%$
Епоксиполімер без наповнювача	2,640	0,150	2,790	8,605	86,05
Епоксикомпозит з наповнювачем порошку алюмінію	3,664	0,265	3,929	8,036	80,36
Епоксикомпозит з наповнювачем порошку заліза	4,431	0,400	4,831	7,585	75,85

Таблиця 3.

Втрати енергії електрона та коефіцієнт пропускання для епоксипокриття товщиною 5 мм, опроміненого електронами за енергії  $E_{k_0} = 12$  MeV

Тип покриття	Іонізаційні втрати $\left(-\frac{dE}{dx}\right)_{col}, \frac{MeV}{cm}$	Радіаційні втрати $\left(-\frac{dE}{dx}\right)_{rad}, \frac{MeV}{cm}$	Сумарні втрати $\left(-\frac{dE}{dx}\right), \frac{MeV}{cm}$	Кінетична енергія електрона $E_k, MeV$	Коефіцієнт пропускання електронного пучка $T, \%$
Епоксиполімер без наповнювача	2,682	0,180	2,862	10,569	88,08
Епоксикомпозит з наповнювачем порошку алюмінію	3,762	0,319	4,081	9,960	83,00
Епоксикомпозит з наповнювачем порошку заліза	4,503	0,480	4,983	9,509	79,24

### 3. Висновки

Як слідує з таблиць 2 та 3, іонізаційні втрати енергії швидких електронів є більшими на порядок за радіаційні. Найбільші сумарні втрати та відповідно найменший коефіцієнт пропускання є для шару епоксикомпозиту з наповнювачем порошу заліза. Це пояснює найбільшу радіаційну стійкість досліджуваних в роботі [14] монокристалів n-Ge з таким шаром епоксипокриття та найменшу концентрацію утворених при електронному опроміненні в цих монокристалах радіаційних дефектів. Епоксикомпозитне покриття з наповнювачами порошоків алюмінію та заліза дозволяє послабити електронний пучок з енергією  $E_{k_0} = 12$  MeV до енергії менше 10 MeV, що зменшить ймовірність утворення в монокристалах германію областей розвпорядкування, наявність яких суттєво знижує рухливість електронів.

Таким чином, одержаний шар епоксикомпозиту може бути перспективним матеріалом для створення відносно дешевих та технологічних захисних покриттів елементів напівпровідникової електроніки від агресивної дії високоенергетичного електронного опромінення. Представлені теоретичні розрахунки втрат енергії швидких електронів та коефіцієнта пропускання електронного пучка можуть бути використанні при розробці та моделюванні на основі епоксидної смоли з наповнювачами порошоків алюмінію та заліза захисних покриттів чутливих елементів або корпусів напівпровідникових датчиків для атомної та термоядерної енергетики, авіакосмічної промисловості.

### Література

1. Черкашина Н. И. и др. (2013). Синтез высокодисперсного гидрофобного наполнителя для полимерных матриц. Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова, 6, 156-159.
2. Садова О.Л., Кашицкий В.П., Люшук О.М. (2017). Вплив порошоків графіту на фізико-механічні властивості епоксикомпозитних матеріалів. Системи розроблення та постановлення продукції на виробництво. Індустрія 4.0. Сучасний напрям автоматизації та обміну даними у виробничих технологіях: матеріали II Міжнародної науково-практичної конференції, Суми, 22-26 травня 2017 р., Суми: СумДУ, 145-147.
3. Букетов А.В., Скирденко В.О. (2015). Дослідження впливу мікродисперсних наповнювачів на фізико-механічні властивості епоксикомпозитів. Фізико-хімічна механіка матеріалів, 51 (1), 43-49.
4. Малець В. М., Боярська І. В., Кашицкий В. П. (2016). Вплив зовнішніх фізичних полів на структурування епоксикомпозитів наповнених високодисперсним порошком заліза. Компрессорное и энергетическое машиностроение, 3, 37-39.
5. Боярська І. В., Кашицкий В. П., Савчук П. П. (2012). Розробка технології структурування епоксикомпозитів у полях струмів високої частоти. Наукові нотатки, 37, 50-53.
6. Савчук П. П., Кашицкий В. П., Будкіна О. Л., Кислюк О. П., Назаренко В. А. (2010). Технологічні аспекти формування епоксикомпозитних систем, наповнених дисперсними частинками сполук заліза. Наукові нотатки, 28, 453-456.
7. Pavlenko, V. I., et al. (2015). Study of the attenuation coefficients of photon and neutron beams passing through titanium hydride. Journal of Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques 9.3, 546-549.
8. Павленко В. И., Едаменко О. Д., Ястребинский Р. Н., Черкашина Н. И. (2011). Радиационно-защитный композиционный материал на основе полистирольной матрицы. Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова, 3, 113 – 116.
9. Едаменко, О. Д., Ястребинский, Р. Н., Соколенко, И. В., Ястребинская, А. В. (2012). Нанонаполненные полимерные композиционные радиационно-защитные материалы авиационно-космического назначения. Современные проблемы науки и образования, 6, 128.
10. Yastrebinski, R. N., Cherkashina, N. I., Yastrebinskaya, A. V., Noskov, A. V. (2016). Energy losses of fast electrons when passing through the radiation-protective iron-oxide composite. Problems of Atomic Science and Technology, 104(4), 9-14.
11. Черкашина Н. И. (2012). Моделирование воздействия космического излучения на полимерные композиты с применением программного комплекса GEANT4. Современные проблемы науки и образования, 3, 122.
12. Павленко В.И., Едаменко О.Д., Черкашина Н.И., Носков А.В. (2014). Суммарные потери энергии релятивистского электрона при прохождении через полимерный композиционный материал. Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования, 4, 101 – 106.

13. Соколенко И. В. и др. (2013). Моделирование прохождения высокоэнергетических электронов в высоконаполненном полимерном композите. Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова, 6, 145-148.
14. Udovyt'ska Yu.A., Maslyuk V.T. (2020). Development of epoxy composite protective coatings for increasing the radiation stability of n-Ge single crystals. *Funct. Mater.*, 27 (1), 24-28.
15. Stormand H., Israel H.I. (1970). Photon Cross Section from 1 keV to 100 MeV for Elements Z=1 to Z=100. *Nucl. Data Tables*, A7, 565.
16. Ахиезер А.И., Берестецкий В.Б. (1969). Квантовая электродинамика. М.: Наука, 623.
17. Luniov S. V., Zimych A. I., Nazarchuk P. F., Maslyuk V. T., Megela I. G. (2015). The impact of radiation defects on the mechanisms of electron scattering in single crystals n-Ge. *Journal of physical studies*, 19 (4), 4704.

**Удовицкая Ю.А., Лунёв С.В., Кашицкий В.П., Назарчук П.Ф.**

Луцкий национальный технический университет

### **РАСЧЕТ ПОТЕРЬ ЭНЕРГИИ БЫСТРЫХ ЭЛЕКТРОНОВ ПРИ ПРОХОЖДЕНИИ ЧЕРЕЗ ЭПОКСИКОМПОЗИТ**

*Проведены расчеты коэффициента пропускания, радиационных, ионизационных и суммарных потерь для электронов с энергиями 10 МэВ и 12 МэВ при прохождении слоя эпоксидной смолы толщиной 5 мм с отвердителем ПЕПА 12 мас. ч. и с наполнителями порошков алюминия и железа содержанием 30 мас.ч. Было установлено, что ионизационные потери энергии быстрых электронов значительно превышают радиационные и растут при введении в полимерную матрицу наполнителей порошков алюминия и железа. При этом коэффициент пропускания электронного пучка становится меньше. Для слоя эпоксикомпозита с наполнителем порошки железа такие потери энергии электрона есть наибольшими. Это объясняет высокую радиационную стойкость ранее исследуемых монокристаллов n-Ge с таким защитным слоем эпоксидного покрытия к электронному облучению с энергией 10 МэВ. Слой эпоксидно-диановой смолы марки ЭД-20 с наполнителями порошков алюминия и железа может быть перспективным материалом для создания относительно дешевых, легких и технологических защитных покрытий элементов полупроводниковой электроники от агрессивного воздействия высокоэнергетического электронного облучения. Представленные теоретические расчеты могут быть использованы при разработке и моделировании на основе такого эпоксикомпозита защитных покрытий чувствительных элементов или корпусов полупроводниковых датчиков, которые находятся в условиях повышенной радиации.*

**Ключевые слова:** эпоксикомпозит, наполнители порошков алюминия и железа, ионизационные и радиационные потери, коэффициент пропускания, защитные покрытия, электронное облучение.

**Udovyt'ska Yu.A., Luniov S. V., Kashytskyi V. P., Nazarchuk P.F.**

Lutsk National Technical University

### **CALCULATION OF THE ENERGY LOSSES OF FAST ELECTRONS PASSING THROUGH EPOXY COMPOSITE**

*Calculations of the transmission factor, radiation, ionization and total losses for electrons with the energies of 10 MeV and 12 MeV that passing a layer of epoxy resin with a thickness of 5 mm with PEPA hardener (12 parts by weight) and with fillers of the iron and aluminum powders (30 parts by weigh) were conducted. It was established that the ionization losses of energy of fast electrons far exceed the radiation losses and increasing when imposing aluminum and iron powder fillers into the polymer matrix. In so doing, the transmission factor of the electron beam becomes smaller. Such electron energy losses for the epoxy composite layer with iron powder filler are greatest.*

*This explains the high radiation resistance of the previously investigated n-Ge single crystals with such a protective epoxy coating layer to electron irradiation with energy of 10 MeV. A layer of*



*epoxy resin ED-20 with aluminum and iron powder fillers may be promising material for creating relatively cheap, lightweight and technological protective coatings of elements of semiconductor electronics against the aggressive action of high-energy electron irradiation. The presented theoretical calculations can be used in the development and in modeling of such epoxy composite protective coatings of sensitive elements or semiconductor enclosures, which are in conditions of a high radiation.*

**Key words:** *epoxy composite, aluminum and iron powder fillers, ionization and radiation losses, transmission facto, protective coatings, electron irradiation.*

УДК 378.018.43

DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2313-5352-2020-16-21>

Чеховський С. А., Піндус Н. М., Ключко Н. Б., Піндус О.В.

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

## ДИСТАНЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ НАВЧАННЯ ЯК ОРГАНІЗАЦІЯ НАВЧАЛЬНО-МЕТОДИЧНОЇ СПІВПРАЦІ ВИЩИХ ЗАКЛАДІВ ОСВІТИ УКРАЇНИ

**Анотація.** У статті подано організаційні та методичні особливості дистанційних технологій навчання в аспекті методичної співпраці вищих закладів освіти України з метою забезпечення академічної мобільності здобувачів вищої освіти. Розкрито особливості дистанційного навчання, яке успішно реалізується в Івано-Франківському національному технічному університеті нафти і газу (ІФНТУНГ), зокрема, шляхом організації курсів підвищення кваліфікації науково-педагогічних працівників. Розглянуто реалізацію віртуальних пристроїв, які застосовуються при проведенні лабораторних занять для моделювання і дослідження електронних вузлів і пристроїв у складі інформаційно-вимірювальних систем для студентів різних спеціальностей. Подано обґрунтування можливості спільної освітньої діяльності закладів освіти України з використанням дистанційних технологій навчання на підготовку та формування фахівця нового покоління, готового успішно конкурувати на ринку праці, а також на підвищення якості освіти як головного чинника інтегрування в європейській освітній простір.

**Ключові слова:** дистанційне навчання; електронний курс; віртуальні лабораторні стенди.

**Постановка проблеми.** Сучасний рівень освіти України характеризується переходом до застосування інформаційних систем та комп'ютерно-орієнтовних технологій, а оскільки саме в інформаційному суспільстві інтелектуальні процеси стають масовими, більшість зайнятих безпосередньо у виробництві складатимуть працівники інтелектуальної діяльності.

До випускників, зокрема, технічних вищих навчальних закладів висуваються додаткові освітні та практичні вимоги, які можна отримати скориставшись широким полем можливостей власне дистанційної форми освіти. Потреба сучасного суспільства у спеціалістах зумовлює необхідність пошуку нових конструктивних ідей для вирішення проблеми оптимізації та інтенсифікації навчання, здобування нових знань та удосконалення рівня теоретичної та практичної підготовки. Об'єктивною тенденцією у вищих закладах освіти є скорочення кількості аудиторних годин та збільшення годин, що відводяться на самостійну роботу студентів. Трансформується роль викладача у навчальному процесі: поступово зменшується функція викладача як основного джерела інформації, відбувається перехід до організатора та консультанта самостійної роботи студентів. Усе це потребує пошуку більш ефективних засобів навчання, які б виконували у навчальному процесі інформуючу, формуючу, систематизуючу, контролюючу та мотивуючу функції.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Як показав аналіз публікацій за тематикою дистанційного навчання проблеми такої форми здобування вищої освіти в останні роки стали предметом інтенсивних досліджень у методичному, науковому та технологічному плані. Практично в усіх закладах вищої освіти України в тій чи іншій формі здійснюється таке навчання, має місце значний інтерес у закордонних публікаціях. Кількість публікацій різних авторів, за нашими спостереженнями, перевищує сотню найменувань щорічно (у поданому нами переліку літературних джерел [1-5] наведені тільки ті, які, на нашу думку, найбільш повно відображають сучасний стан розв'язання актуальних проблем дистанційного навчання та у достатньо повній мірі висвітлюють методичні аспекти такого навчання). Але, на нашу думку, залишається актуальною проблемою при впровадженні у ВНЗ дистанційної форми навчання надання якісних освітніх послуг шляхом застосування сучасних інформаційно-комунікаційних технологій, особливо в галузі технічної освіти на рівні відповідної підготовки науково-педагогічних працівників.

З огляду на це, **метою статті** є висвітлення змісту, структури та етапів навчання на очно-дистанційних курсах підвищення кваліфікації науково-педагогічних працівників, основним завданням яких є освоєння ними методів та засобів створення електронних навчальних курсів

та віртуальних лабораторних стендів для підвищення академічної мобільності здобувачів вищої освіти.

**Методика дослідження.** Курси підвищення кваліфікації науково-педагогічних працівників Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу (ІФНТУНГ) стали підґрунтям для створення комплексу навчально-методичних матеріалів та надання на сучасному рівні освітніх послуг, які об'єднані в єдиний педагогічний сценарій, створений для організації індивідуального та групового навчання з використанням дистанційних технологій, в основі яких лежать електронні курси (ЕК).

Організація навчального процесу регламентована Центром дистанційного навчання (ЦДН) університету за трьома етапами із контролем навчальних досягнень слухачів, організацією методичної допомоги та консультивання, особистим спілкування у режимі «on-line», з використанням платформи дистанційного навчання та відео конференцій. Здійснено перевірку та апробацію випускних робіт слухачів курсів підвищення кваліфікації. Обґрунтовано та виписано критерії та організовано внутрішню вузівську сертифікацію електронних курсів.

Результати завершення слухачами курсів підвищення кваліфікації та отримані навички впроваджено в освітній процес ІФНТУНГ при сумісному навчанні студентів на магістерській програмі в Краківській гірничо-металургійній академії (Польща), а також навчання за програмою академічного обміну в Поморській академії м.Слупськ (Польща).

Варто зазначити складність створення ЕК для технічних спеціальностей з урахуванням специфіки різних напрямків підготовки фахівців для нафто-газового комплексу України. ЕК були впроваджені в широкий спектр надання освітніх послуг для навчання студентів за ліцензованими в університеті нафти і газу спеціальностями.

Автори пропонують ознайомитися з особливостями дистанційного навчання, яке реалізується в Івано-Франківському національному технічному університеті нафти і газу. Зокрема, в основу покладені напрацювання кафедри метрології та інформаційно-вимірювальної техніки у створенні віртуальних лабораторних стендів при вивченні студентами дисциплін, пов'язаних з застосуванням засобів вимірювання.

Кафедрою метрології та інформаційно-вимірювальної техніки розроблено: базу тестів для самоперевірки знань студентів та перевірки базового рівня знань; електронні лабораторні та практичні курси з базових дисциплін, довідкові матеріали, навчально-методичні інструменти для відпрацювань пропусків занять, забезпечення самостійної роботи студентів тощо.

При організації дистанційного навчання з технічних дисциплін особливої уваги заслуговує розробка лабораторного практикуму, оскільки саме можливість дистанційного проведення лабораторних занять дозволяє студентам набувати не тільки теоретичних знань, але й практичних навичок. Актуальність застосування власне дистанційного лабораторного практикуму зумовлена, зокрема, ще й тим, що дозволяє реалізувати засвоєння студентами різноманітних віртуальних лабораторних стендів, створених в окремих вищих навчальних закладах. Таке поєднання суттєво розширює доступ студентів до ресурсів вищої освіти, а саме: використання віртуальних технологій у дистанційному навчанні дозволяє забезпечити можливість роботи з лабораторною установкою чи тренажером декільком користувачам одночасно; стимулює самостійну роботу студента.

Розглянемо основні принципи реалізації віртуальних лабораторних стендів.

У випадку, коли для проведення лабораторного заняття достатньо моделі досліджуваного об'єкта (зокрема це стосується робіт з обробки даних та робіт, призначенням яких є ознайомлення з роботою того чи іншого приладу) достатньою умовою є детальне відтворення в інтерфейсі віртуального стенду зовнішнього вигляду та елементів керування реальної установки, а також реалізації математичної моделі залежностей між вхідними та вихідними величинами.

Розглянута реалізація віртуальних пристроїв широко застосовується у електроніці для моделювання і дослідження електронних вузлів і приладів. Типовим представником такого класу продуктів є програма Electronics WorkBench, яка дозволяє досліджувати електронні схеми довільної складності і містить інформацію про широкий спектр електронних пристроїв. Це створює можливість проводити вимірювання за допомогою віртуального засобу вимірювальної техніки (ЗВТ), який за своїми метрологічними характеристиками є аналогічним до реального приладу. Тобто з'являється можливість дослідити поведінку засобів вимірювання на їх математичній моделі, виявити можливі проблеми при використанні даного приладу і дослідити його роботу в умовах експлуатації.

Дистанційні лабораторні стенди такого типу можна оптимально реалізувати за допомогою web-програмування, яке забезпечує виконання роботи у веб-переглядачі переважно без встановлення додаткового програмного забезпечення на комп'ютер користувача. В цьому випадку математичну модель досліджуваного процесу чи приладу рекомендується реалізувати в межах окремого класу чи групи класів, що дозволить спростити модифікацію такого програмного забезпечення.

Прикладом такого підходу є віртуальна лабораторна установка для перевірки технічного манометра з пружиною Бурдона за допомогою вантажопоршневої установки, розміщена на web-сайті кафедри (рис. 1). Об'єктом дослідження є еталонна вантажопоршнева установка, для якої було реалізовано математичну модель залежності переміщення поршня 1 від тиску, що задається кількістю обертів гвинта 2. Установка використовується для перевірки деформаційних засобів вимірювання тиску, які представлені у роботі пружинним манометром 3 із одновитковою трубчастою пружиною.

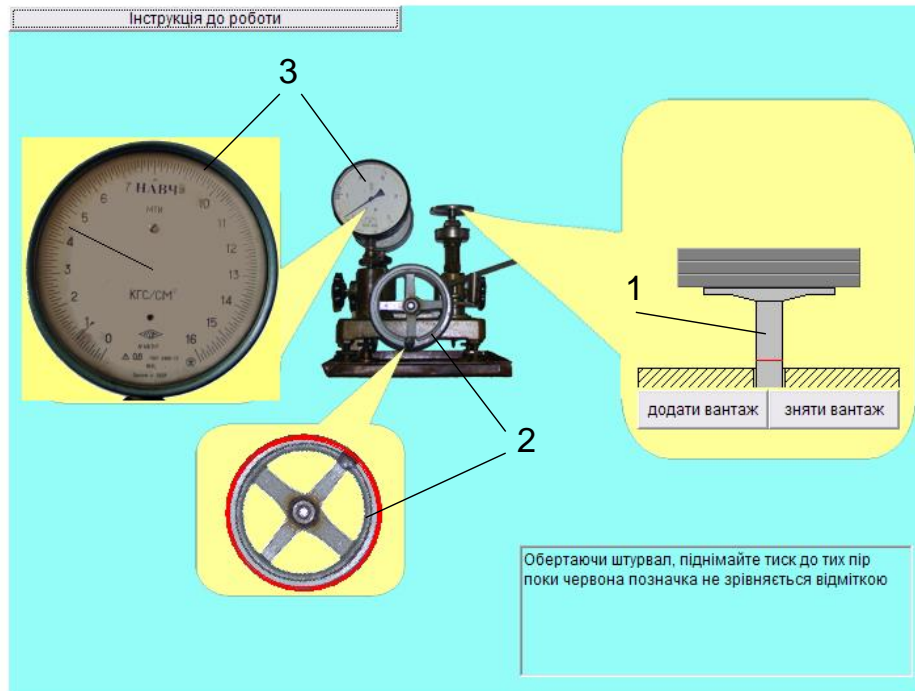


Рис. 1. Віртуальна лабораторна робота з перевірки пружинного манометра за допомогою вантажопоршневої установки

Оскільки такі програмні продукти зазвичай не прив'язані до апаратного забезпечення, вони можуть використовуватися практично на будь-яких комп'ютерах, що задовільняють мінімальним системним вимогам.

Іншим підходом є створення лабораторних стендів, в яких програмне забезпечення є частиною інформаційно-вимірювального комплексу. Таке програмне забезпечення може бути розроблене на будь-якій (переважно високорівневій) мові програмування: широка номенклатура первинних та вторинних перетворювачів зі стандартним струмовим вихідним сигналом дозволяє підключати їх до стандартних портів вводу-виводу і отримувати вимірну інформацію.

Основною особливістю такого підходу є дворівнева реалізація вимірювального комплексу, причому апаратна частина займається збиранням і попередньою обробкою (оцифруванням та лінеаризацією) даних, а програмна – кінцевою обробкою, представленням і зберіганням чи передачею інформації.

Для забезпечення можливості дистанційного навчання оптимальною є розробка лабораторних стендів із використанням засобів, здатних здійснювати керування процесом та збором даних через мережу, наприклад за допомогою вбудовання інтерфейсу віртуального приладу у веб-сторінку і виконання коду програми на віддаленому сервері. Типовими представниками такого підходу є лабораторні стенди, реалізовані із використанням LabView. Власне програмна частина LabView дозволяє створювати складні вимірювальні пристрої і системи за допомогою графічного інтерфейсу, використовуючи прості схематичні позначення

елементів. Логіку роботи системи і спосіб взаємодії з користувачем визначає сама LabView, опираючись на інформацію про властивості окремих модулів і задані взаємозв'язки між ними. Для роботи із давачами у LabView використовуються спеціальні плати розширення, що підключаються до стандартних портів вводу-виводу комп'ютера, на якому запускається програма.

Слід зазначити, що LabView дозволяє створювати також і лабораторні роботи першого типу.

Таким чином, нами розроблена така поетапна послідовність навчання на курсах підвищення кваліфікації науково-педагогічних працівників університету, що, як на нашу думку, дозволяє максимально реалізувати ідею створення електронних курсів:

- перший етап реалізовано при проходженні організаційно-настановчої сесії з очною формою навчання. В програму навчання даного етапу включено проведення занять з методичного, інформаційного та програмного забезпечення, вхідне діагностування, ознайомлення та обмін передовим досвідом у сфері професійної діяльності, консультації щодо особливостей проектування електронного курсу (ЕК) та використання програмних можливостей навчальної програми Moodle.

- другий етап – дистанційний. Основне завдання етапу-якісне забезпечення та супровід самостійної роботи слухачів з використанням технологій дистанційного навчання шляхом проведення керованої самостійної роботи слухачів використовуючи всі види консультування та здійснення поточного контролю при проектуванні електронного курсу та виконанні випускних робіт.

- третій етап – покликаний до здійснення узагальнення отриманих знань та навиків використання технологій дистанційного навчання та підведення підсумків. Дану залікову сесію організовано як очну форму навчання. Основні завдання етапу: оцінювання якості та відповідності до вимог освітніх планів і програм спроектованих електронних курсів, повнота використання можливостей програмних продуктів та технологій проектування ЕК, систематизація знань та вмінь слухачів, виявлення ступеня задоволення слухачів результатами підвищення кваліфікації. Реалізація завдань третього етапу відбувається через проведення вихідного тестування, проведення занять та консультацій, захист випускних робіт, атестацію ЕК та підсумкове анкетування.

**Результати дослідження.** У результаті навчання слухачі курсів підвищення кваліфікації продемонстрували методичні розробки ЕК на високому професійному рівні. Опосередковано про якість курсів можна судити за відгуками студентів у процесі апробації викладачами та студентами створених методичних та програмних продуктів. ЕК були впровадженні в широкий спектр надання освітніх послуг для навчання студентів за освітніми програмами при підготовці фахівців для нафто-газового комплексу України.

ЦДН університету тісно співпрацює з Навчально-консультаційним пунктом в м. Дрогобичі, який був створений на базі нафтового та механічного технікумів. Перебуваючи в структурі Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу, випускники коледжу мають можливість продовжувати навчання в інститутах споріднених спеціальностей для здобуття повної вищої освіти, а також в інших провідних вищих навчальних закладах України.

Принагідно зауважимо, що достатньо високий рівень бази ЕК на навчальній платформі Moodle ЦДН ІФНТУНГ спонукав до створення курсів у вільному доступі, оскільки саме цей напрямок став затребуваним, про що свідчать запити у форумах на сайті, які ми отримуємо від наших дописувачів. Є позитивні результати щодо засвоєння окремих ЕК з видачею відповідних сертифікатів як для громадян України так і для іноземних громадян. На рисунку 2, як приклад, подано фрагмент навчальної платформи Moodle, що використовується в освітньому процесі ІФНТУНГ.

В університеті широко використовується технологія дистанційного навчання при отриманні другої вищої освіти та організації навчального процесу на курсах підвищення кваліфікації. Започатковано проведення олімпіад для школярів з фізики, а також підготовчі курси для абітурієнтів та осіб, які прагнуть підвищити свої знання з математики, фізики, географії, історії України, української мови та літератури.

Наша спільна освітня діяльність зорієнтована на підготовку та формування фахівця нового покоління, здатного вирішувати економічні і соціальні проблеми підприємства, готового

успішно конкурувати на ринку праці, на підвищення якості освіти як головного чинника інтегрування в європейській освітній простір [5, 6].

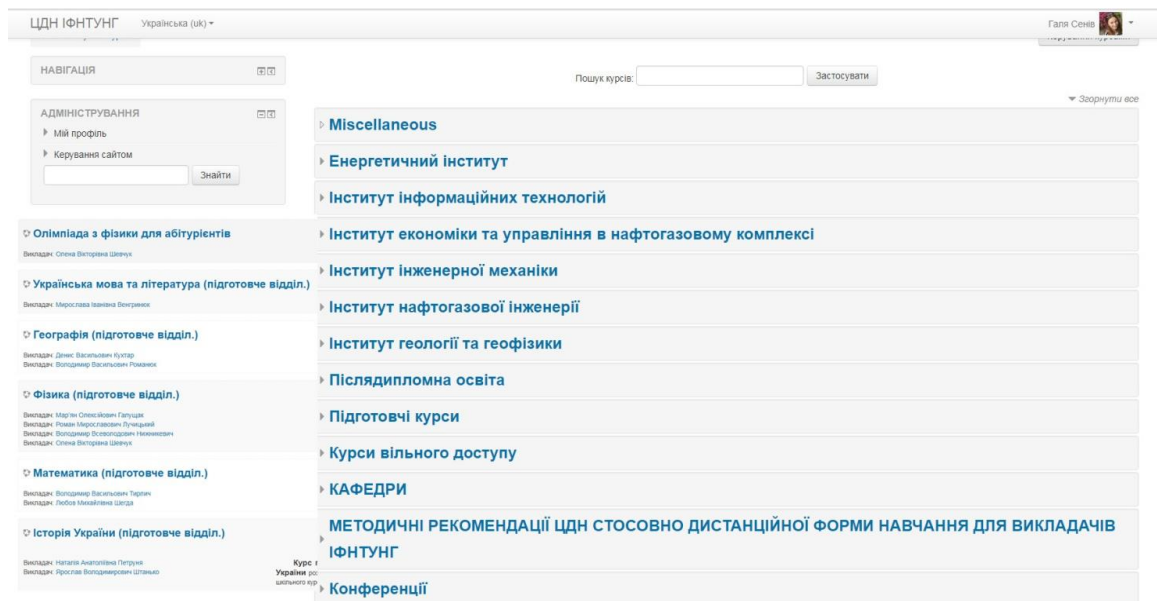


Рис. 2. Фрагмент навчальної платформи Moodle, що використовується в освітньому процесі ІФНТУНГ

**Висновки та перспективи подальших досліджень.** Курси підвищення кваліфікації науково-педагогічних працівників ІФНТУНГ проведено за навчальними планами для очно-дистанційної форми навчання, включаючи сертифікацію ЕК.

В основу діяльності працівників університетського ЦДН при проведенні даних курсів покладено реалізацію методів і засобів організаційного, методичного та програмного забезпечення при проектуванні ЕК з метою підвищення якості викладання за рахунок впровадження в навчальний процес інноваційних педагогічних технологій.

Поєднання напрацьованих у різних навчальних закладах методологій дистанційного навчання, зокрема – електронних навчальних курсів, з запропонованим нами підходом до створення віртуальних лабораторних стендів дозволяє суттєво розширити співробітництво у впровадженні інноваційних технологій у вищій школі України.

#### Список використаних джерел

1. В. Ю. Биков, “Інноваційний розвиток засобів і технологій систем відкритої освіти”, Сучасні інформаційні технології та інноваційні методики у підготовці фахівців: методологія, теорія, досвід, проблеми: Зб.наук. праць: Редкол.: І.А.Зязюн (голова) та ін. – Випуск 29. – Київ-Вінниця: ТОВ фірма «Планер», 2012. – С. 32-40.
2. Вдовичин Т.Я. Застосування технологій відкритої освіти для інформатизації навчального процесу / Т.Я. Вдовичин, А.В. Яцишин // Інформаційні технології в освіті: зб. наук. пр. – Вип. 16. – Херсон: ХДУ, 2013. – С. 134-140.
3. Триус Ю. В. Система електронного навчання ВНЗ на базі Moodle: Методичний посібник / Ю. В. Триус, І. В. Герасименко, В. М. Франчук // за ред. Ю. В. Триуса. – Черкаси.: Чабаненко Ю. А., 2012 – 220 с.
4. Шишкіна М. П. Перспективні технології розвитку систем електронного навчання / М. П. Шишкіна // Інформаційні технології в освіті. — 2011. — № 10. — С. 132–139.
5. Биков В.Ю., Кухаренко В.М., Сиротенко Н.Г., Рибалко О.В., Богачков Ю.М. Технологія розробки дистанційного курсу: Навчальний посібник/За ред. В.Ю.Бикова та В.М.Кухаренка – К.:Міленіум, 2008. – 324с.
6. Чеховський С.А., Піндус Н.М. Характеристика впровадження дистанційної форми навчання в ІФНТУНГ: Дистанційна освіта: стан і перспективи для технічних спеціальностей. Перша всеукр. наук.-метод. конф. 10-12 жовтня 2012р., м. Івано-Франківськ: зб. тез доп. - Івано-Франківськ, ІФНТУНГ. 2012. С. 8-10.



7. Піндус Н.М., Сенів Г.О., Єрмолаєв Д.С. Функціональні, організаційні та освітні характеристики роботи центру дистанційного навчання: Дистанційна освіта: стан і перспективи для технічних спеціальностей. Перша всеукр. наук.-метод. конф. 10-12 жовтня 2012р., м. Івано-Франківськ: зб. тез доп. - Івано-Франківськ, ІФНТУНГ. 2012. С. 68-69.

8. Крижанівський Є.І. Галушак М.О. Чеховський С.А. Піндус Н.М., Остапів В.В. Дистанційне навчання – дієва форма міжнародного співробітництва у впровадженні інноваційних технологій у вищій школі: Міжнародний науковий вісник. Кошице, 2010 вип. 1(20) С.81-84

9. Галушак М.О, Чеховський С.А., Піндус Н.М. Національний університет – стан і перспективи дистанційного навчання для технічних спеціальностей: Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ // Всеукраїнський науково-технічний журнал - 2013, вип.1(46)

10. Чеховський С.А., Піндус Н.М., Марчук Т.З. Перспективи розвитку дистанційного навчання для технічних спеціальностей: Метрологія та прилади / Науково-виробничий журнал. - 2013 вип. №2 І п (41) С.262-267 Харків.

**Чеховский С.А., Пиндус Н.М., Ключко Н.Б., Пиндус О.В.**

Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа, м. Ивано-Франковск, Украина.

#### **ДИСТАНЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ОБУЧЕНИЯ КАК ОРГАНИЗАЦИЯ УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОГО СОТРУДНИЧЕСТВА ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ УКРАИНЫ**

***Аннотация.** В статье представлены организационные и методические особенности дистанционных технологий обучения в аспекте методического сотрудничества высших учебных заведений Украины с целью обеспечения академической мобильности соискателей высшего образования. Раскрыты особенности дистанционного обучения, успешно реализуемые в Ивано-Франковском национальном техническом университете нефти и газа (ИФНТУНГ), в частности, путем организации курсов повышения квалификации научно-педагогических работников. Рассмотрено реализацию виртуальных устройств, применяемых при проведении лабораторных занятий для моделирования и исследования электронных узлов и устройств в составе информационно-измерительных систем для студентов различных специальностей. Подано обоснование возможности совместной образовательной деятельности учебных заведений Украины с использованием дистанционных технологий обучения для подготовки и формирования специалиста нового поколения, готового успешно конкурировать на рынке труда, а также на повышение качества образования как главного фактора интеграции в европейское образовательное пространство.*

***Ключевые слова:** дистанционное обучение; электронный курс, виртуальный лабораторный стенд.*

**Chehovsky S.A., Pindus N.M., Klochko N.B., Pindus O.V.**

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

#### **REMOTE LEARNING TECHNOLOGIES AS THE ORGANIZATION OF EDUCATIONAL AND METHODOLOGICAL COOPERATION OF HIGHER EDUCATIONAL INSTITUTIONS OF UKRAINE**

***Annotation.** The article presents the organizational and methodological features of distance learning technologies in the aspect of methodological cooperation of higher educational institutions of Ukraine in order to ensure academic mobility of higher education applicants. The features of distance learning, successfully implemented at the Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas (IFNTUNG), in particular, through the organization of continuing education courses for scientific and pedagogical workers, are disclosed. The implementation of virtual devices used in laboratory studies for modeling and research of electronic components and devices as part of information-measuring systems for students of various specialties is considered. Substantiation is given of the possibility of joint educational activities of educational institutions of Ukraine using remote learning technologies to prepare and form a specialist of a new generation who is ready to successfully compete in the labor market, as well as to improve the quality of education as the main factor of integration into the European educational space.*

***Key words:** remote learning; electronic course, virtual laboratory stand.*



УДК 621.18

DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2313-5352-2020-16-22>

Шинкарук Х.М., Чеховський С.А.

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

## ОСОБЛИВОСТІ РОБОТИ ТЕРМОКАТАЛІТИЧНОГО ДАВАЧА В СЕРЕДОВИЩІ ПРИРОДНОГО ГАЗУ

*В роботі детально розглянуто принцип роботи та особливості функціонування термокаталітичних давачів та наведено короткі відомості про їх розвиток. Враховуючи вимоги, яким повинен відповідати давач, вибрано для дослідження найбільш оптимальний. Проведено експериментальні дослідження чутливості термокаталітичних давачів, з використанням природного газу різного складу, визначеного хроматографічним методом. Одержані результати свідчать про можливість застосування давачів в якості чутливих елементів для контролю якості природного газу. Вказані проблемні питання, пов'язані з нестабільністю сенсорів в процесі експлуатації. Встановлено що термокаталітичні давачі не можуть забезпечити безперервний контроль якості газу тривалий період часу, оскільки в процесі експлуатації знижується його чутливість.*

**Ключові слова :** термокаталітичний давач, природний газ, теплота згорання природного газу.

**Вступ.** На сьогоднішній день, у зв'язку з збільшення тарифів на природний газ в побутовій сфері актуальним є питання контролю його якості, оскільки в Україні оплата за спожитий газ проводиться за його об'єм. Визначення показників якості природного газу може бути здійсненена тільки в лабораторних умовах хроматографічним або калориметричним методом, що є дорогавартісною процедурою. Тому для контролю якості природного газу в режимі реального часу поряд із відомими методами перспективним є застосування термохімічних методів, які мають такі переваги, як селективність, високу чутливість, достатню точність вимірювання.

З метою створення приладу для контролю теплоти згорання природного газу, що реалізується на основі термохімічного методу [1], необхідно дослідити особливості роботи термокаталітичного перетворювача та підібрати найбільш оптимальний для роботи в середовищі природного газу.

Останнім часом темі дослідження роботи термокаталітичних давачів та каталітичного покриття присвячено ряд робіт [2,3,4], зусилля дослідників спрямовані на поліпшення характеристик використовуваних давачів, розробку нових конструктивних рішень, використання нових матеріалів і технологій виготовлення, що сприятиме розширенню сфери їх застосування.

**Виклад основного матеріалу.** Принцип дії термокаталітичного перетворювача полягає у безполуменовому спалюванні горючих компонент на активному елементі.

В електрохімічних сенсорах чутливим є електрохімічний елемент(комірка). Первинні інформаційні сигнали про досліджуване явище чи об'єкт, виникають у вигляді можливості змінити властивості елемента: різниці потенціалів або електропровідності, електричного струму або вольтамперної характеристики, динаміки їх зміни.

В основі термокаталітичного методу покладено каталітичне окислення молекул контрольованих речовин на поверхні чутливого елемента термокаталітичного сенсора і перетворенням тепла, що виділяється в електричний сигнал.

Каталітичне спалювання принципово відрізняється від горіння в традиційному розумінні, оскільки паливо окислюється на поверхні твердих каталізаторів взагалі без утворення полум'я. Дія каталізаторів в процесі повного окислення (або гетерогенного «горіння») паливно-повітряних сумішей схематично можна уявити як хімічну взаємодію компонентів палива з поверхневим киснем каталізатора з подальшою регенерацією відновленої поверхні каталізатора киснем газової фази. Залежно від активності каталізатора, яка визначається енергією зв'язку поверхневого кисню з активним компонентом каталізатора, процес повного окислення багатьох речовин може протікати при температурах 300-700 ° С. Як зазначено вище, термокаталітичний давач являє собою резистивний елемент, у якого змінюється опір в залежності від хімічного складу навколишнього середовища. У цих давачів

чутливий елемент складається з пари платинових спіралей (пеллісторів). Платинова спіраль покривається керамікою.

Один з пеллісторів покривається шаром активного каталізатора, в той час як другий залишається без покриття.

Вимоги, яким повинен відповідати каталізатор чутливого елемента термокаталітичного сенсора вуглеводнів, такі:

1. Окислювати більше 99% компонентів суміші при безперервній подачі його на поверхню аналізованого газового потоку.
2. Зберігати працездатність в широкому інтервалі температур.
3. Присутність води не повинно впливати на ступінь окислення вуглеводнів.
4. Вплив сірковмісних з'єднань і металів, присутніх в аналізованому газовому середовищі повинен бути незначним.

Важливою характеристикою каталізатора на рівні з активністю і стабільністю (тривалістю життя) є і селективність (вибірковість дії).

Метал, який використовується для виготовлення чутливих елементів (пеллісторів), повинен відповідати ряду вимог. Він повинен володіти високою відтворюваністю значень електричного опору при нагріванні до робочих температур і не окислюватися при тривалій роботі [5]. Як правило, вибирають такий метал, який в діапазоні застосовуваних температур має монотонну залежність опору від температури  $R=R(T)$  і досить високе значення температурного коефіцієнта опору  $\alpha$ .

Чиста платина чи не найбільше відповідає всім основним вимогам, що пред'являються до металів для виготовлення чутливого елемента термокаталітичних здавачів, в основі роботи яких покладена залежність опору від температури (рисунок 1).

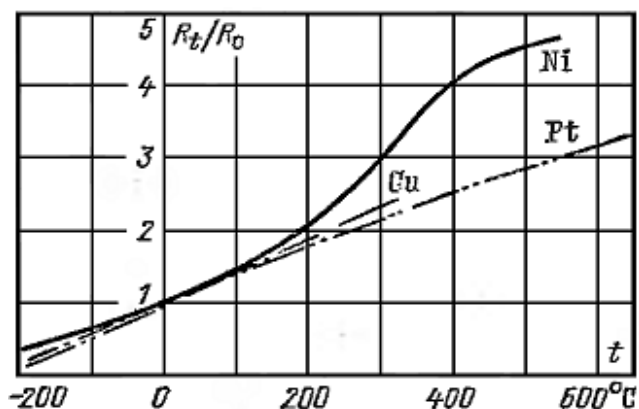


Рис. 1. Залежність відношення  $R_t / R_0$  для нікелю, міді і платини від температури

Каталізатори, що містять метали платинової групи, є найбільш перспективними для повного окислення метану завдяки високій активності при досить низьких температурах (400-500 °C). Тому вони часто використовуються при виготовленні чутливих елементів термокаталітичних сенсорів на метан.

При цьому каталізатор, що знаходиться в складі чутливого елемента, працює в так званому внутрішньо дифузійному режимі, при якому конверсія залежить тільки від концентрацій кисню і метану і не залежить від швидкості реакції і температури.

Сучасні термокаталітичні давачі, що виготовляються в даний час, як в Україні, так і за кордоном, мають незначні габарити. Камера реакції виконується з кераміки або металокераміки з внутрішнім діаметром 5-6 мм. Для виключення впливу робочого та порівняльного елементів один на одного вони розділені екраном, тобто ефективний діаметр камер, в яких розташовані елементи, буде не більше 3 мм, що практично виключає вільну конвенцію. Доставка компонентів аналізованої суміші і теплообмін з середовищем в таких датчиках здійснюється за рахунок дифузії і теплопровідності як в кондуктометричних датчиках.

В якості сенсорів метану були обрані термокаталітичні сенсори ТХМ-2,8-1 (Виробник «Укрсенсор», м. Дніпро), чутливий елемент яких складається з вимірювального та компенсаційних елементів, які розміщені в вибухонепроникній оболонці і які представляють

собою спіралі з платинової дротини малого перерізу, яка закріплена на підтримуючих пристроях. Додатково вимірювальний елемент покритий каталітичним матеріалом.

Принцип дії таких сенсорів полягає в безполуменовому спалюванні (окисленні) горючого газу на поверхні каталітично активної речовини і вимірюванні кількості тепла, що виділяється пропорційно концентрації горючого газу (наприклад, метану) в аналізованому повітрі.

Для забезпечення процесу окислення платинову спіраль нагрівають до 400-450 ° С. При виділенні тепла відбувається зміна опору R спіралі з платинового дроту на величину  $\Delta R$ .

#### Експериментальні дослідження та їх обговорення.

Експериментальні дослідження чутливості термокаталітичних давачів в середовищі природного газу здійснювалося на експериментальній установці, схема якої приведена на рисунку 2.

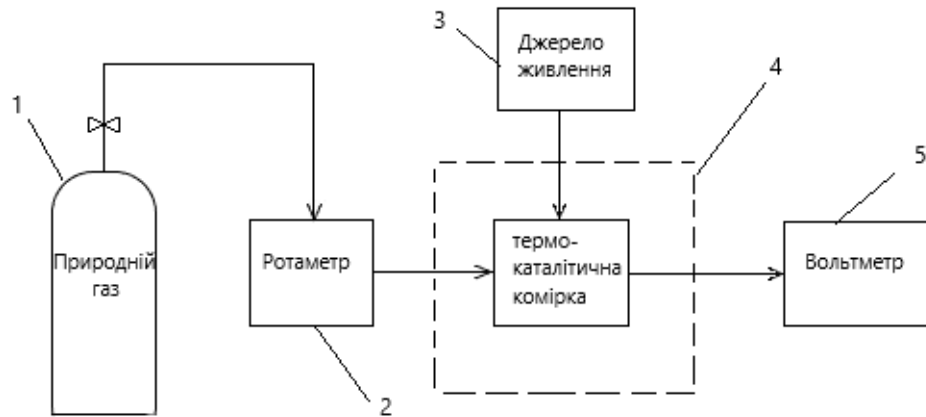


Рис. 2. Функціональна схема експериментального вимірювального стенду.

1 – балон заповнений природнім газом; 2 – ротаметр; 3 – універсальне джерело живлення; 4 – мостова вимірювальна схема з випробувальним термокаталітичним давачем; 5 – електронний вольтметр.

Експериментальна установка включає: електронний вольтметр, джерело живлення, балони з природнім газом, ротаметр.

Дослідження термокаталітичного перетворювача проводилися при температурі повітря в приміщенні  $25 \pm 2$  °С в такій послідовності:

- випробувальна камера установки продувалася чистим атмосферним повітрям;
- термокаталітичний давач встановлювався в випробувальну камеру, підключався в мостову вимірювальну схему з мілівольтметром;
- на мостову вимірювальну схему від блоку живлення подавалося стабілізована напруга, відповідна номінальній величині напруги живлення давача;
- через 15 хвилин (після повного прогріву давача і встановлення показань) проводилася балансуюча мостової вимірювальної схеми (встановлювалося  $U_{вих} = 0$ );
- в випробувальну камеру подавалася газова суміш, причому витрата подавання в камеру газової суміші встановлювалася таким чином, щоб за час 5хв обсяг газової суміші, поданої в камеру на два порядки перевищив обсяг випробувальної камери;
- через 5 хв після початку подачі газової суміші з інтервалом в 5 с відбувалося зняття 10 показань з мілівольтметра і визначалося середнє значення  $U_{вих}$ ;

Експериментальні дослідження повторювалися для чотирьох сумішей природного газу, різного складу, визначеного хроматографічним методом.

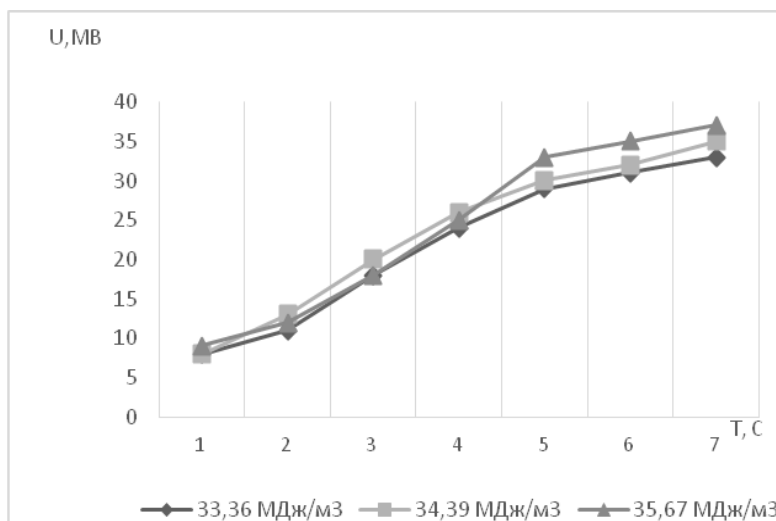


Рис. 3. Перехідні процеси на термокаталітичному давачі при використанні природного газу з різною теплою згорання.

В результаті експериментального дослідження отримано зміну напруги на виході мостової схеми підключення термокаталітичного давача протягом певного періоду часу (рисунок 3). Як видно з рисунку, використовуючи газ з різною теплою згорання отримуємо на виході різну напругу, що свідчить про чутливість термокаталітичного давача на різний компонентний склад природного газу. Проте після тривалого випробування давачів їхня чутливість значно знижувалася.

Причинами зниження чутливості термокаталітичних давачів, що виникають в процесі їх експлуатації, в основному, пов'язують зі зміною чутливості термогрупи, обумовленої зміною температури елементів, їх старінням, отруєнням каталізатора, зниженням дифузійної провідності газообмінного фільтра, відходом нуля вимірювального моста, а також неоднозначністю роботи термокаталітичних датчиків в області високих концентрацій горючих компонентів аналізованого газу.

Наявність в природному газі вищих гомологів метану і водню сприяє збільшенню швидкості каталітичної реакції окислення метану на порівняльному елементі і збільшує ймовірність виникнення збоїв в роботі термокаталітичного давача.

Накопичення продуктів термічної деструкції вуглеводнів на поверхні термоелементів термокаталітичних датчиків є небажаним процесом, так як призводить до зміни їх каталітичної активності, а крім того, призводить до зміни колірного забарвлення порівняльного термоелемента і умов теплообміну між елементами і навколишнім середовищем, що спричиняє за собою зсув нуля та зниження чутливості давача.

**Висновки.** Результати експериментальних досліджень свідчать про те, що термокаталітичний давач може бути використаний для контролю якості природного газу, оскільки чутливий до газу з різною теплою згорання. Перевагами давачів є висока чутливість, селективність, швидкодія, стабільність властивостей при експлуатації, мала споживана потужність, невисока вартість і простота виготовлення, можливість серійного виготовлення. Проте його застосування для безперервного контролю теплоти згорання природного газу в побуті є неможливим, тому що в процесі експлуатації знижується його чутливість та давач потребує постійного калібрування. Тому в подальшому дослідженні необхідно розробити режими роботи при яких можна забезпечити достатню точність вимірювання та збільшити термін експлуатації термокаталітичних давачів.

#### Інформаційні джерела

- 1.Шинкарук Х.М. Застосування термокаталітичного методу для визначення теплотворної здатності природного газу / Х.М. Шинкарук, С.А. Чеховський // Системи обробки інформації. – 2018. – № 4(155). – С. 161-165
- 2.Гринчук, А.П. Разработка газовых сенсоров для контроля горючих газов / А.П. Гринчук, И.А. Таратын, В.В. Хатько // Приборы и методы измерений. – 2010. – № 1. – С. 51–55.

3. Таратын, И.А. Особенности сенсорного отклика термokatалитических газовых сенсоров с различным типом нагревателя / И.А. Таратын, В.В. Хатько // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Серия В. Промышленность. Прикладные науки. – 2011. – № 3. – С. 53–57.
4. Голованов В.В. Адсорбция и каталитическое окисление метана сенсорами на основе легированного платиной оксида индия / В.В. Голованов, Б.В. Назарчук, В.В. Голованова // Журнал нано- та електронної фізики Том 8 № 4(1), 2016.
5. Герашенко О.А., Федоров В.Г., «Теплові і температурні вимірювання»: Довідкове керівництво. Київ: «Наукова думка», 1965.
6. Ф.Ф. Волькенштейн, Электронные процессы на поверхности полупроводников при хемосорбции М.: Наука: 1987.

**Шинкарук Х.М., Чеховский С.А.**

Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа, ул. Карпатская, 15, г. Ивано-Франковск, Украина, 76000  
kh.shynkaruk@gmail.com

**ОСОБЕННОСТИ РАБОТЫ ТЕРМОКАТАЛИТИЧЕСКОГО ДАТЧИКА В СРЕДЕ ПРИРОДНОГО ГАЗА**

*В работе подробно рассмотрены принцип работы и особенности функционирования термokatалитических датчиков и приведены краткие сведения об их развитии. Учитывая требования, которым должен соответствовать датчик, выбрано для исследования наиболее оптимальный. Проведены экспериментальные исследования чувствительности термokatалитических датчиков, с использованием природного газа различного состава, определенного хроматографическим методом. Полученные результаты свидетельствуют о возможности применения датчиков, в качестве чувствительных элементов для контроля качества природного газа. Указаны проблемные вопросы, связанные с нестабильностью сенсоров в процессе эксплуатации. Установлено, что термokatалитические датчики не могут обеспечить непрерывный контроль качества газа длительный период времени, поскольку в процессе эксплуатации снижается их чувствительность.*

**Ключевые слова:** термokatалитический датчик, природный газ, теплота сгорания природного газа.

**Shinkaruk H., Chekhovsky S.**

Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, ul. Karpatskaya, 15, Ivano-Frankivsk, Ukraine, 76000  
kh.shynkaruk@gmail.com

**PECULIARITIES OF OPERATION OF THE THERMOCATALYTIC SENSOR IN THE NATURAL GAS**

*The work describes in detail the principle of operation and features of the functioning of the thermocatalytic sensors and provides brief information about their development. Considering the specified requirements, which the sensor must comply with, the most optimal one is chosen for research. Experimental studies of the sensitivity of thermocatalytic sensors were carried out using natural gas of various compositions determined by the chromatographic method. The results obtained indicate the possibility of using sensors as sensitive elements for monitoring the quality of natural gas. The indicated problematic issues related to the instability of sensors during operation. It has been established that thermocatalytic sensors cannot provide continuous monitoring of gas quality for a long period of time, since its sensitivity decreases during operation.*

**Key words:** thermocatalytic sensor, natural gas, calorific value of natural gas.

UDC 621.822

DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2313-5352-2020-16-23><sup>1</sup> Dzhuguryan T.G.,<sup>2</sup> Marchuk V.I., Marchuk I.V.<sup>1</sup> Szczecin Maritime Academy, Poland<sup>2</sup> Lutsk National Technical University

### CALCULATION OSCILLATIONS OF VARIOUS ELEMENTS OF THE ELASTIC SYSTEM OF THE CENTER-FREE GRINDING MACHINE SASL 5AD

*During the design of operations of centerless intermittent grinding of surfaces there is a need to identify the natural frequencies of oscillations of the elements of the technological system of grinding. The method of calculation of rigidity, vibration resistance and forced oscillations of the elements of the circular grinding machine is offered in the article. Carrying out of experimental researches of rigidity of elastic system of the SASL 5AD grinding machine. We conducted preliminary experimental studies to measure the oscillations of various elements of the elastic system of the SASL 5AD grinding machine in the horizontal plane by piezoelectric sensors during grinding with continuous and discontinuous circles with different geometric parameters.*

**Keywords:** machine, system, oscillations, spindle, polished surface

**Introduction.** Calculation of natural frequencies of oscillations is one of the tasks of dynamics of mechanical systems connected with definition of resonant modes of their work. A method for calculating the stiffness, vibration resistance and forced oscillations of grinding machines with a horizontal spindle is proposed. The elastic system of the machine was approximated by a mechanical model with 2 degrees of freedom. This technique allowed to make design changes at the design stage, which increased the rigidity of the machines by 70-90%, and also allows to predict changes in the design parameters of the elastic system of the machine in order to obtain regulated dynamic properties [1-5,7,8].

However, in the conditions of actual operation of the grinding machine, the change of dynamic characteristics is due to the change of the initial connection between the elements of the elastic system. Therefore, there is a need to determine the dynamic characteristics of elastic systems of different types of equipment, which provides for the introduction into the technological process of editing and balancing operations.

**Material and results of the study.** Experimental studies of the stiffness of the elastic system of the SASL 5AD grinder (the general view of which is shown in Fig. 1) in the horizontal plane by piezo acceleration sensors during grinding with continuous and discontinuous circles with different geometric parameters. The scheme of grinding of rings by an intermittent grinding wheel with the screw grooves inclined at an angle  $\alpha$  to an axis is shown in fig.



Fig.1. Centerless grinding machine SASL5AD (general view)



Fig.2. Working area of the SASL5AD centerless grinding machine

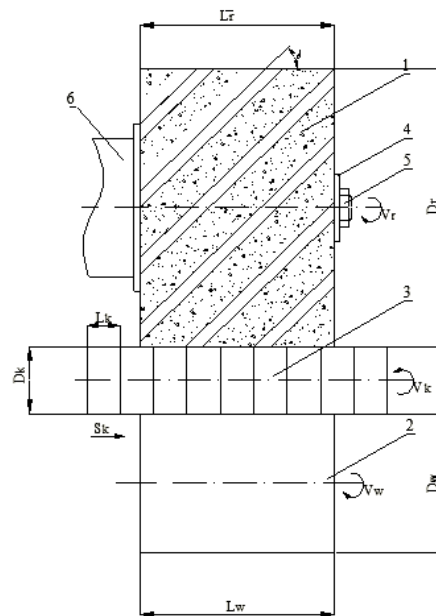


Fig. 3. Scheme of treatment of the base surface with an intermittent circle  
 1-grinding wheel with inclined grooves; 2- leading circle; 3 - processed rings; 4,5,6- elements of the machine spindle; Sk - supply; Dk is the outer diameter of the ring; Dr is the diameter of the grinding wheel, Dw is the diameter of the drive wheel

At the first stage of research, the calculated values of the natural frequencies of bending and torsional oscillations of the spindle of the machine SASL 5AD were obtained. The values of natural frequencies were determined using classical methods of oscillation theory [1, 2-7]. The spindle of the grinding wheel was replaced by a design scheme - a two-support cantilever beam with distributed mass (see Fig. 4), which consists of a single beam, because the spindle of the machine SASL 5AD has no pronounced diameter differences. At the ends of the beam were placed the concentrated masses of the grinding wheel and the drive pulley, which have the inertia of rotation. Hinged supports were placed in appropriate places. For the given calculation scheme, the differential equation of free bending oscillations has the form:

$$EIY^{IV} + m_0 \ddot{y} = 0 \quad , (1)$$

where  $E$  - modulus of elasticity;

$I$  - equatorial moment of inertia of the spindle cross section;



$m_0$  - mass per unit length of the beam;  
 $y(x, t)$  - vertical movement.

The solution of equation (1) is written in the form:

$$y(x, t) = U(x) \sin(\omega t + \varphi'). \quad (2)$$

Substituting (2) in (1) we obtain the equation of forms of oscillations of the beam:

$$U^{IV} - \alpha^4 U = 0, \quad (3)$$

where, 
$$\alpha^4 = \frac{\omega^2 m_0}{EI}.$$

The solution of equation (3) is written in Krylov functions [4]:

$$U(x) = C_1 K_1(\alpha x) + C_2 K_2(\alpha x) + C_3 K_3(\alpha x) + C_4 K_4(\alpha x), \quad (4)$$

where C1-C4 - steel.

In fig. In Fig. 5 shows a diagram of the spindle assembly of the centerless grinding machine.

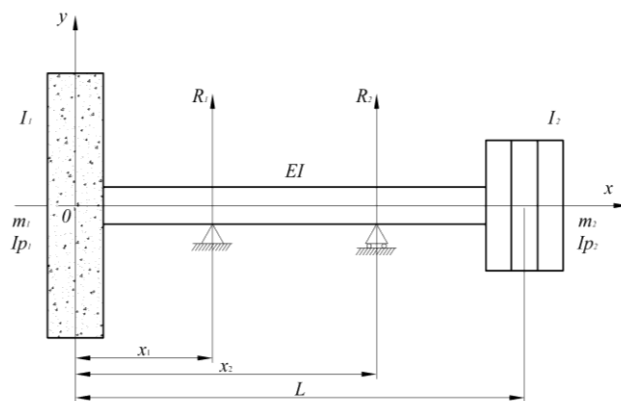


Fig. 4. The calculated scheme of the spindle assembly:  $X_1 = 0,109\text{m}$ ;  $X_2 = 0,355\text{m}$ ;  $L = 0,433\text{m}$ ;  $EI = 6140\text{kg} \cdot \text{m}^2$ ;  $m_1 = 0,358 \text{ kg} \cdot \text{sec}^2 / \text{m}$ ;  $m_2 = 0,08 \text{ kg} \cdot \text{sec}^2 / \text{m}$ ;  $I_{p1} = 0,0018\text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{sec}^2$ ;  $I_{p2} = 0,00012\text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{sec}^2$ ;  $I_1 = 0,0009\text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{sec}^2$ ;  $I_2 = 0,000077\text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{sec}^2$ .

Substituting the obtained solutions to the boundary conditions at the ends of the beam:

$$\left. \begin{aligned} m_1 \omega^2 U_1(0) - EI U_1'''(0) &= 0 \\ EI U_1''(0) + \omega^2 (I_{p1} - I_1) U_1'(0) &= 0 \end{aligned} \right\} x = 0; \quad (5)$$

$$\left. \begin{aligned} EI U_3'''(L) - m_2 \omega^2 U_3(L) &= 0 \\ EI U_3''(L) + \omega^2 (I_{p2} - I_2) U_3'(L) &= 0 \end{aligned} \right\} x = L,$$

where,  $I_1, I_2$  - equatorial moments of inertia of the grinding wheel and drive pulley;

$I_{p1}, I_{p2}$  - polar moments of inertia of the grinding wheel and drive pulley;

$m_1$  - weight of the grinding wheel;

$m_2$  - weight of the drive pulley,

and adding the conditions of zero deflection on the supports:

$$U_1(x_1) = 0; U_2(x_2) = 0, \quad (6)$$

we obtain a homogeneous system of six equations with six unknowns: C1, C2, C3, C4, R1, R2, where R1, R2 are the amplitude values of the reaction on the 1st and 2nd supports, respectively.

For a non-trivial solution of this system, it is necessary that the determinant be equal to zero. From this condition, the method of selection of acceptable geometric and mass parameters of the spindle, the pulley circle (Fig. 4.), are the values of natural frequencies. The first two values are:  $\omega_1 = 3580$  1 / sec,  $\omega_2 = 9270$  1 / sec.

The calculation of two low natural frequencies of torsional oscillations is performed by a similar method. The calculation scheme does not change, but only its torsional and mass characteristics are taken into account, respectively. [2, 3, 4, 5, 7].

The differential equation of free torsional oscillations has the form:

$$GIp \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} - \theta_0 \ddot{\theta} = 0, \quad (7)$$

where  $I_p$  - polar moment of inertia of the spindle cross section;  
 $G$  - shear module;  
 $\theta_0$  - moment of inertia of the mass per unit length of the rod;  
 $\theta$  - twisting angle.

The solution of equation (7) will take the form:

$$\theta(x, t) = \varphi(x) \sin(\omega_k t + \varphi''). \quad (8)$$

Substituting (8) into (7), we obtain the equation of the form of torsional oscillations:

$$\varphi'' + \beta^2 \varphi(x) = 0, \quad (9)$$

where  $\beta^2 = \frac{\omega_k^2 \theta_0}{GIp}$ .

The solution of equation (9) will take the form:

$$\varphi(x) = A \sin \beta x + B \cos \beta x, \quad (10)$$

where  $A$  and  $B$  are constants.

Subjecting the obtained equation to the boundary conditions at the ends of the beam:

$$\begin{aligned} GIp \varphi'(0) + Ip_1 \omega_k^2 \varphi(0) &= 0, x = 0 \\ GIp \varphi'(L) - Ip_2 \omega_k^2 \varphi(L) &= 0, x = L' \end{aligned} \quad (11)$$

we obtain a system of two equations with two unknowns  $A$  and  $B$ . Equating the determinant of the system to zero, the selection method finds the values of the natural frequencies of free spindle oscillations:  $\omega_{k1} = 8240$  and  $\omega_{k2} = 27400$  rad / sec.

The value of the first natural frequency of the spindle bending oscillations mounted on rigid supports was determined using an experimental setup and was  $\omega_{1\text{э}} = 7770$  1/sec

The relative error of theoretical calculation and experimental determination of natural frequencies for bending oscillations is equal to:

$$\Delta_U = \frac{\omega_1 - \omega_{1\text{э}}}{\omega_{1\text{э}}} \cdot 100\% = 6,04\% .$$

The theoretically calculated value of natural frequencies corresponds to the results of experiments. The values of the first two natural frequencies of bending and torsional oscillations are obtained as a result of solving the system of differential equations.

In order to simplify the solution of the problem and estimate the degree of discrepancy of the obtained frequencies with the exact solution, consider the beam (spindle) as a three-mass system and solve for it the problem of finding the natural frequencies of bending oscillations.

The frequency equation for a three-mass system has the form:

$$p^3 - (m_1\alpha_{11} + m_2\alpha_{22} + m_3\alpha_{33})p^2 + (m_1m_2f_{12} + m_2m_3f_{23} + m_1m_3f_{13})p - m_1m_2m_3f_{123} = 0, \quad (12)$$

where  $p = \frac{1}{\omega^{12}}$ ;

$\omega^{12}$  - natural frequency;

$\alpha_{ij}$  - coefficient of force on bending.

$$f_{ij} = \alpha_{ii}\alpha_{jj} - \alpha_{ij}^2;$$

$$f_{ikj} = f_{ij}\alpha_{kk} + f_{ik}\alpha_{jj} + f_{jk}\alpha_{ii} + 2(\alpha_{ij}\alpha_{jk}\alpha_{ik} - \alpha_{ii}\alpha_{jj}\alpha_{kk}).$$

From equation (12) we can obtain the first underestimated value of the natural frequency according to the Dunkerley formula:

$$\omega^{12} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n m_i \alpha_{ii}}, \quad (13)$$

where  $n$  - number of masses;

$\alpha_{ii}$  - find the following formulas:

$$\alpha_{11} = \frac{x_1^2 x_2}{3EI}; \alpha_{22} = \frac{(L-x_2)^2}{3EI} (L-x_1); \alpha_{33} = \frac{(x_3-x_1)^2 (x_2-x_3)^2}{3EI(x_2-x_1)}. \quad (14)$$

After substitution we get:

$$\alpha_{11} = 2,27 \cdot 10^{-7} \text{ М/кг}; \alpha_{22} = 1,07 \cdot 10^{-7} \text{ М/кг}; \alpha_{33} = 0,485 \cdot 10^{-7} \text{ М/кг}.$$

Substituting the values of  $m_i$  and  $\alpha_{11}$  to formula (13) we obtain the value of the first natural frequency  $\omega_1' = 3080 \text{ I/c}$ . The value of the natural frequency is found by formula (13), when replacing the spindle as a beam with a distributed mass on a beam with three concentrated masses greatly simplifies the calculations. The relative error of calculation when found an underestimated value of the frequency according to the Dunkerley formula, in comparison with the exact solution, is:

$$\Delta = \frac{3580 - 3080}{3580} \cdot 100\% = 14\%$$

Conclusions. The described method of determining the natural frequency of the spindle of the centerless grinding machine is used to predict the parameters of the microrelief of the ground surfaces of rotation at the stage of technological design.

#### References

1. Kudinov VA Dynamics of machines.- Mechanical Engineering, 1967. - 359p.
2. V.I. Marchuk, I.V. Marchuk, L.M. Ravenets, S.V. Marchuk. Modeling the dynamics of the process of centerless grinding of roller bearing rings. Advanced Technologies and Devices, 72-78.
3. V.I. Marchuk, I.V. Marchuk, A.M. Eshteivili. Model of stabilization of high-frequency oscillating processes in a dynamic system of round mortise grinding. Advanced Technologies and Devices, 75-82.
4. V. Marchuk, T. Dzhuguryan, I. Marchuk, N. Oleksyn, L. Sachkovska. Technological support for smoothing of the surface layer of parts. Advanced Technologies and Devices, 97-102.
5. T.G. Dzhuguryan, I.V. Marchuk. Features of centerless grinding of cylindrical surfaces of functional purpose by intermittent grinding wheels. Advanced Technologies and Devices, 115-118.
6. T.G. Dzhuguryan, V.I. Marchuk, I.V. Marchuk, M.V. Oleksyn, L.O. Sachkovskaya. Before determining the conditions for lowering the temperature of centerless grinding by discontinuous wheels. Prospective technologies and devices in 2018 №13, 48-52.

7. Marchuk V.I. Technological bases of quality assurance of working surfaces of rings of roller bearings [Text]: dis ... Dr. Tech. Sciences: 05.02.08 / Marchuk Victor Ivanovich; Lutsk state. Technical University - Lutsk, 2004. - 458 sheets + add.: 150 sheets. - sheet. 430-458

#### Список використаних джерел

1. Кудинов В.А. Динамика станков.- Машиностроение, 1967. – 359с.
2. В.І. Марчук, І.В. Марчук, Л.М. Равенець, С.В. Марчук. Моделювання динаміки процесу безцентрового шліфування кілець роликотішлипників. Перспективні технології та прилади, 72-78С.
3. В.І. Марчук, І.В. Марчук, А.М. Ештеівілі. Модель стабілізації високочастотних коливних процесів в динамічній системі круглого врізного шліфування. Перспективні технології та прилади, 75-82С.
4. V. Marchuk, T. Dzhuguryan, I. Marchuk, N. Oleksin, L. Sachkovska Technological support for smoothing of the surface layer of parts. Перспективні технології та прилади, 97-102.
5. Т.Г. Джугурян, І.В. Марчук. Особливості безцентрового шліфування циліндричних поверхонь функціонального призначення переривчастими шліфувальними кругами. Перспективні технології та прилади, 115-118.
6. Т.Г. Джугурян, В.І. Марчук, І.В. Марчук, М.В. Олексин, Л.О. Сачковська. До визначення умов зниження температури безцентрового шліфування переривчастими кругами. Перспективні технології та прилади 2018 р. №13, 48-52С.
7. Марчук В.І. Технологічні основи забезпечення якості робочих поверхонь кілець роликотішлипників [Текст] : дис... д-ра техн. наук: 05.02.08 / Марчук Віктор Іванович ; Луцький держ. технічний ун-т. - Луцьк, 2004. - 458 арк.+ дод.: 150арк. - арк. 430-458С.

<sup>1</sup> Джугурян Т.Г.,

<sup>2</sup> Марчук В.І., Марчук І.В.

<sup>1</sup>Щецінська Морська академія, Польща

<sup>2</sup>Луцький національний технічний університет

#### РОЗРАХУНОК КОЛИВАНЬ РІЗНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ПРУЖНОЇ СИСТЕМИ БЕЗЦЕНТРОВО- ШЛІФУВАЛЬНОГО АВТОМАТА SASL 5AD

*Під час проектування операцій безцентрового переривчастого шліфування поверхонь виникає необхідність виявлення власних частот коливання елементів технологічної системи шліфування. В статті запропоновано методіку розрахунку жорсткості, вібростійкості та вимушених коливань елементів кругло-шліфувального верстата. Проведенні експериментальні дослідження жорсткості пружної системи шліфувального верстата SASL 5AD. Нами проведено попередньо експериментальні дослідження по вимірюванню коливань різних елементів пружної системи шліфувального верстату SASL 5AD у горизонтальній площині давачами п'єзоприскорень під час шліфування суцільним та переривчастим кругами з різними геометричними параметрами.*

**Ключові слова:** верстат, система, коливання, шпindel, шліфована поверхня

<sup>1</sup> Джугурян Т.Г.,

<sup>2</sup> Марчук В.І., Марчук І.В.

<sup>1</sup>Щецинська Морская академия, Польша

<sup>2</sup>Луцький національний технічний університет

#### РАСЧЕТ КОЛЕБАНИЙ РАЗЛИЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ УПРУГОЙ СИСТЕМЫ БЕСЦЕНТРОВОГО ШЛИФОВАЛЬНОГО СТАНКА SASL 5AD

*При проектировании операций бесцентрового прерывистого шлифования поверхностей возникает необходимость выявления собственных частот колебания элементов технологической системы шлифования. В статье предложена методика расчета жесткости, виброустойчивости и вынужденных колебаний элементов кругло-шлифовального станка. Проведены экспериментальные исследования жесткости упругой системы шлифовального станка SASL 5AD. Нами проведено предварительно экспериментальные исследования по измерению колебаний различных элементов упругой системы шлифовального станка SASL 5AD в горизонтальной плоскости датчиками пьезоускорений во время шлифовки сплошным и прерывистой кругами с различными геометрическими параметрами.*

**Ключевые слова:** станок, система, колебания, шпindel, шлифованная поверхность

**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 (290x210 мм). Нумерацію сторінок не виконувати.

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

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

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

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

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

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

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

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

Основні наукові спеціальності:

- 131 Прикладна механіка;
- 132 Матеріалознавство;
- 133 Галузеве машинобудування;
- 151 Автоматизація та комп'ютерно інтегровані технології;
- 152 Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка;
- 153 Мікро-та наносистемна техніка;
- 163 Біомедична інженерія;
- 171 Електроніка.

## ПЕРСПЕКТИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ПРИЛАДИ

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

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

Статті приймаються в електронному вигляді – за електронною адресою: [confkptm@gmail.com](mailto:confkptm@gmail.com), в письмовому вигляді – за поштовою адресою: **43018, м. Луцьк, вул. Потебні, 56, каф. Приладобудування (каб. 40)**, 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, російською або англійською мовами. Вартість публікації становить **50 грн.** за 1 стор.

Оплата проводиться за реквізитами:

Картка Приват банку № 5168 7573 4753 6411

В призначенні платежу слід вказати «**За видання статті у збірнику «Перспективні технології та прилади» від (ШБ)**».

Квитанцію про сплату надіслати у сканованому вигляді за електронною адресою: [confkptm@gmail.com](mailto: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 технічного секретаря – **Марчук Ірини Вікторівни** за тел. **(0332) 26-49-43**, 095-862-18-12, або за електронною адресою: [confkptm@gmail.com](mailto:confkptm@gmail.com).





## НАУКОВЕ ВИДАННЯ

Комп'ютерний набір: Марчук І.В.  
Технічний редактор: Марчук І.В..  
Відповідальний за випуск Марчук В.І.  
Друкується в авторській редакції

Здано у виробн. 26.06.2020 р.  
Формат 60x84/16. Гарнітура Time New Roman. Папір офсетний.  
Ум. друк арк. 12,5. Обл.-вид. арк.12 Тираж 500 пр. Зам. № 59

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