

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу  
Факультет автоматизації та енергетики  
Кафедра інформаційно-вимірювальних технологій та енергетичного  
менеджменту

Крицький Іван Васильович

(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК 620.179

(індекс)

## **БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА**

**Розроблення пристрою для вихрострумовеого контролю  
геометричних розмірів труб**

(назва роботи)

Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка

(назва освітньої програми)

175 - Інформаційно-вимірювальні технології

(шифр і назва спеціальності)

**Робота містить результати власних досліджень, використання ідей,  
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело:**

Здобувач освітнього ступеня І.В. Крицький

(підпис, ініціали та прізвище здобувача)

Науковий керівник Середюк Орест Євгенович д.т.н., проф.

(підпис, прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання керівника)

Допущено до захисту

Завідувач кафедри

Віталій ЦИХ

(посада) (підпис) (дата) (ініціали та прізвище)

**Івано-Франківськ – 2025**

**Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу**

(повне найменування закладу вищої освіти)

Факультет автоматизації та енергетики

Кафедра інформаційно-вимірювальних технологій та енергетичного менеджменту

Освітній рівень перший (бакалаврський)

Спеціальність 175-Інформаційно-вимірювальні технології

(шифр і назва)

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Завідувач кафедри ІВТЕМ

В.С. Цих

«    »      20   року

**З А В Д А Н Н Я  
НА БАКАЛАВРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТОВІ**

Крицькому Івану Васильовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розроблення пристрою для вихрострумowego контролю геометричних розмірів труб

керівник роботи Середюк Орест Євгенович., д.т.н., проф.,

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом закладу вищої освіти від "30" квітня 2025 року № 269/7

2. Строк подання студентом роботи 20.06.2025

3. Вихідні дані до роботи матеріал труби – сталева, внутрішній діаметр  $28\pm 0,3$ мм; зовнішній діаметр труби 32 мм; тип вихрострумowego перетворювача – внутрішній прохідний

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

1. Аналіз існуючих методів для неруйнівного контролю геометричних розмірів труб

2. Обґрунтування та розрахунок вузлів пристрою вихрострумowego вимірювання геометричних розмірів труб

3. Конструювання і метрологічний аналіз пристрою контролю геометричних розмірів труб

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

1. Конструкція вихрострумowych перетворювачів

2. Алгоритм розрахунку вихідного сигналу перетворювача

3. Градувальна характеристика вихрострумowego перетворювача

4. Метрологічна модель вихрострумowego вимірювача

## 6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
4	Кривенко Г.М., доц. каф. ТЗНС та БП		
нормо контроль	Лютак З.П., проф. каф. ІВТЕМ		

7. Дата видачі завдання 05.05.2025р.

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів бакалаврської роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1.	<i>Вступ</i>	15.05.2025	
2.	<i>Аналіз існуючих методів для неруйнівного контролю геометричних розмірів труб</i>	01.06.2025	
3.	<i>Обґрунтування та розрахунок вузлів пристрою вихрострумове вимірювання геометричних розмірів труб</i>	10.06.2025	
4.	<i>Конструювання і метрологічний аналіз пристрою контролю геометричних розмірів труб</i>	15.06.2025	
5.	<i>Охорона праці</i>	15.06.2025	
6.	<i>Оформлення бакалаврської роботи</i>	20.06.2025	

Студент \_\_\_\_\_  
( підпис )

Крицький І.В.  
(прізвище та ініціали)

Керівник роботи \_\_\_\_\_  
( підпис )

Середюк О.Є.  
(прізвище та ініціали)

## РЕФЕРАТ

Бакалаврська робота містить: 84 с., 20 рис., 10 табл., 30 джерел, 7 аркушів креслень.

Тема бакалаврської роботи – «Розроблення пристрою для вихрострумowego контролю геометричних розмірів труб».

Предмет дослідження – пристрій для вимірювання геометричних розмірів труб вихрострумовим методом.

Мета роботи – розробити пристрій для вимірювання геометричних розмірів труб вихрострумовим методом, розробити конструкцію вихрострумowego перетворювача.

Останніми роками все більшого значення набуває застосування опосередкованих методів контролю геометричних і якісних параметрів виробничих об'єктів. Актуальність такого застосування пояснюється тим, що під час експлуатації промислових об'єктів є ряд їх вузлів і складових, якісні характеристики яких неможливо виміряти в експлуатаційних умовах. Типовим прикладом такого застосування може бути контроль геометричних розмірів трубопроводів всередині теплообмінних апаратів або трубопроводів, які розміщені під поверхнею землі. Тому перспективною є розробка пристроїв для неруйнівного контролю геометричних розмірів трубних виробів.

ВИХОСТРУМОВИЙ МЕТОД, ГЕОМЕТРИЧНІ РОЗМІРИ,  
ВИХОСТРУМОВИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ, ТРУБИ.

## **ABSTRACT**

The bachelor's thesis contains: 84 pages, 20 figures, 10 tables, 30 sources, 7 sheets of drawings.

The topic of the bachelor's thesis is "Development of a device for eddy current measurement of geometric dimensions of pipes".

The subject of research - a device for measuring the geometric dimensions of pipes by eddy current method.

The purpose of the work is to develop a device for measuring the geometric dimensions of pipes by the eddy current method, to develop the design of the eddy current converter.

In recent years, the use of indirect methods of control of geometric and qualitative parameters of production facilities has become increasingly important. The relevance of this application is due to the fact that during the operation of industrial facilities there are a number of their components and components, the quality characteristics of which cannot be measured in operational conditions. A typical example of such an application may be the control of the geometric dimensions of pipelines inside heat exchangers or pipelines that are located below the ground. Therefore, the development of devices for non-destructive testing of the geometric dimensions of pipe products is promising.

**OUTPUT CURRENT METHOD, GEOMETRIC DIMENSIONS, VIDEO CURRENT CONVERTER, PIPES.**

## ЗМІСТ

Вступ	7
1. Аналіз існуючих методів для неруйнівного контролю геометричних розмірів труб	8
1.1 Магнітний контроль геометричних розмірів виробів	8
1.2 Електричний контроль геометричних розмірів виробів	12
1.3 Електромагнітний контроль геометричних розмірів виробів	14
2. Обґрунтування та розрахунок вузлів пристрою вихрострумowego вимірювання геометричних розмірів труб	19
2.1 Фізичні основи вихрострумowego контролю	19
2.2 Вибір конструкції вихрострумowego давача	22
2.3 Контроль циліндричних об'єктів зовнішніми прохідними ВСП	25
2.4 Контроль циліндричних об'єктів внутрішніми прохідними ВСП	28
2.5 Методи формування вихідного сигналу ВСП	30
2.6 Розрахунок вихрострумowego перетворювача	33
2.6.1 Геометричний розрахунок вихрострумowego перетворювача	33
2.6.2 Електричний розрахунок вихрострумowego перетворювача	35
2.6.3 Тепловий розрахунок вихрострумowego перетворювача	42
2.7 Аналіз напрямків оптимізації системи контролю	43
2.8 Розрахунок генератора	53
2.8.1 Розрахунок принципової схеми	54
2.8.2 Розрахунок ступінчастого подільника напруги	55
2.8.3 Розрахунок підсилювача з спільним емітером.	56
3. Конструювання і метрологічний аналіз пристрою контролю геометричних розмірів труб	60
3.1 Конструювання вихрострумowego первинного перетворювача	60
3.2 Метрологічний аналіз пристрою контролю геометричних розмірів труб	61
4. Основи забезпечення безпечної експлуатації пристрою для	66

вихрострумового вимірювання геометричних розмірів труб	
4.1 Забезпечення безпечних і здорових умов праці	66
4.2 Аналіз потенційних небезпек і шкідливості виробничого середовища	67
4.3 Забезпечення нормальних умов праці виробничого середовища	68
4.3.1 Розрахунок освітлення в приміщені	71
4.3.2 Розрахунок шуму	76
4.4 Забезпечення безпеки технологічних процесів, монтажу і експлуатації обладнання	77
4.5 Пожежна безпека та безпека в надзвичайних ситуаціях	78
Висновки	80
Список використаних джерел	81

## ВСТУП

Останніми роками все більшого значення набуває застосування опосередкованих методів контролю геометричних і якісних параметрів виробничих об'єктів, насамперед конкретних виробів. Актуальність такого застосування пояснюється тим, що під час експлуатації промислових об'єктів є ряд їх вузлів і складових, якісні характеристики яких неможливо виміряти в експлуатаційних умовах. Ці параметри в переважній більшості є такими, які формують безпечну експлуатацію об'єктів. Особливістю є те, що якісні чи геометричні параметри вимірювалися і контролювалися на момент монтажу об'єктів, тобто контролювалися їх окремі складові. При експлуатації можуть змінюватися якісні характеристики, наприклад механічні і фізичні властивості трубопроводів для газових мереж, а також змінюватися розміри зовнішніх або внутрішніх діаметрів трубопроводів внаслідок їх корозії. Поряд з цим часто відсутня можливість безпосереднього прямого вимірювання як якісних так і геометричних параметрів, бо практично відсутня можливість реалізувати такі вимірювання. Прикладом можуть бути контроль геометричних розмірів трубопроводів всередині теплообмінних апаратів або трубопроводів, які розміщені під поверхнею землі. Тому актуальним є розроблення пристроїв для неруйнівного контролю геометричних розмірів трубних виробів. Перевагою практичного застосування цього методу є можливість досліджувати з внутрішньої поверхні геометричні розміри, якісні характеристики матеріалу трубопроводів, а також наявність дефектів на внутрішній і зовнішній поверхнях трубопроводів. Одним із методів, який може контролювати вказані параметри є вихрострумний метод. Саме вирішенню питань щодо розроблення пристрою для вихрострумного вимірювання геометричних розмірів труб реалізовано в даній бакалаврській роботі.

# 1. АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ МЕТОДІВ ДЛЯ НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ ГЕОМЕТРИЧНИХ РОЗМІРІВ ТРУБ

## 1.1 Магнітний контроль геометричних розмірів виробів

Магнітний вид неруйнівного контролю призначений для контролю виробів з феромагнітних матеріалів, тобто таких, які можуть змінювати свої магнітні властивості при впливі на них зовнішнього магнітного поля. Цей процес передбачає застосування намагнічування або контактування об'єкту з магнітним елементом.

Вимірювання магнітним методом переважно здійснюються при контролі дефектів, якісних характеристик матеріалів, а також геометричних розмірів товщини покриттів на виробках, у яких магнітні властивості покриттів відрізняються від магнітних властивостей об'єкта. Також набули практичного застосування, хоча і значно меншого, магнітні товщиноміри для вимірювання товщини виробів із феромагнітних матеріалів [1].

Основними приладами для вимірювання геометричних розмірів магнітним видом є магнітні товщиноміри, які реалізують контроль товщини захисного лакофарбового або гальванічного покриттів на виробках з феромагнітних матеріалів.

Найбільш поширеними є магнітовідривні товщиноміри, принцип дії яких ґрунтується на вимірюванні значення зусилля відриву або притягання постійного або електромагніту до досліджуваного об'єкту [3].

Сила притягання залежить від квадрату магнітної індукції між постійним магнітом і поверхнею феромагнітного матеріалу. Залежність магнітної індукції від товщини неферомагнітного покриття показане на рис. 1.1.

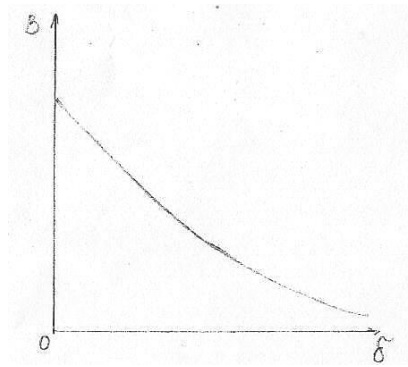


Рисунок 1.1 – Залежність магнітної індукції від товщини  
неферромагнітного покриття

В магнітних вимірювачах гометричних розмірів використовують залежність магнітного опору ділянки магнітного поля від зазору, що показано на рис. 1.2.

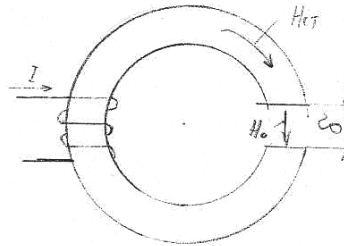


Рисунок 1.2 – Ілюстрація принципу магнітної товщинометрії

При малому зазорі  $\delta$  в магнітопроводі і зазорі створюється однорідна напруженість магнітного поля. Тоді у відповідності до закону повного струму матимемо:

$$H_{cm} \cdot l_{cm} + H_o \cdot \delta = I \cdot W, \quad (1.1)$$

де  $l_{cm}$  – довжина магнітопровода давача;  $W$  – число витків котушки;  $H_{cm}$ ,  $H_o$  – напруженість магнітного поля в осерді і зазорі;  $I$  – струм обмотки збудження.

Якщо зазор малий ( $\delta \ll l_{cm}$ ), то  $B_{cm} = B_o$  і напруженість магнітного поля в осерді становить:

$$H_{cm} = \frac{B_o}{\mu_0 \cdot \mu_r} \quad (1.2)$$

При цьому залежність магнітної індукції від зазору записується формулою:

$$B_o = \frac{I \cdot W \cdot \mu_0 \cdot \mu_r}{l_{cm} + \mu_r \cdot \delta} \quad (1.3)$$

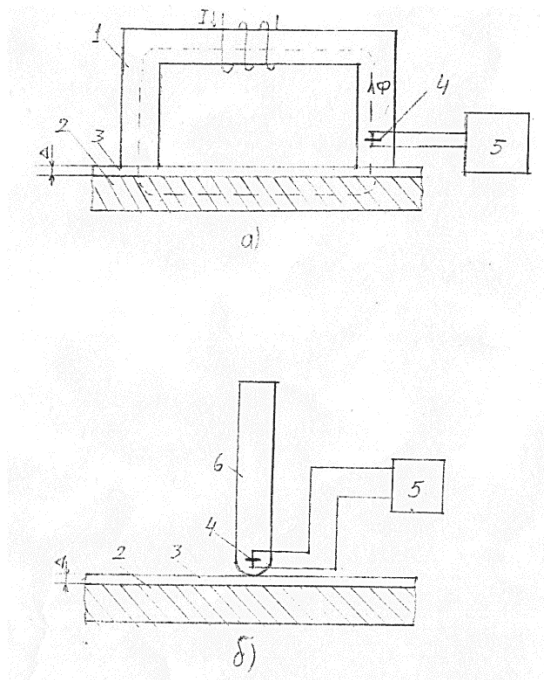
Даний метод можна застосувати для визначення діаметра неферромагнітних циліндричних об'єктів на ферромагнітній основі. Суттєвий недолік приладів пондеромоторної дії – циклічність процесу вимірювання і складність вимірювання зусилля при відриві магніту. Тому є затрудненою автоматизація такого вимірювального процесу.

В цій області добре зарекомендували себе магнітовідривні прилади Н.С. Акулова МТА-1 та МТА-2, яким характерні достанько висока точність вимірювань і незначна залежність показів від ряду заважаючих факторів [2].

Пристрої пондеромоторної дії знайшли широке використання закордоном, зокрема в США, Німеччині, Англії. Особливий інтерес викликає пристрій типу “ Мікротест ” ( Німеччина ), який має декілька модифікацій. Характеристики деяких приладів пондеромоторної дії наведені в [2].

Друга група приладів для визначення геометричних розмірів об'єктів становить прилади для визначення геометричних розмірів об'єктів становить прилади магнітостатичного типу. Їх дія базується на оцінюванні магнітних характеристик між електромагнітом або постійним магнітом і поверхнею ферромагнітного виробу. Схема дії магнітостатичних товщиномірів з перетворювачами Холла показана на рис. 1.3. Товщиноміри такого типу являються прилади фірми Кварц (Швейцарія).

В більшості сучасних магнітних товщиномірів використовується двохполюсна магнітна система з постійними стержневими і П-подібними магнітами. Найпростішими прикладами такого типу являється товщиноміри, в яких застосовується П-подібного магніту проходить поряд з використанням механічної магнітозрівноваженої системи, що знаходиться в міжполюсному просторі магніта [1].



а) з П – подібним електромагнітом ; б) зі стрижневим постійним магнітом : 1 – електромагніт , 2 – феромагнітна деталь , 3 – немагнітне покриття , 4 – перетворювач Холла , 5 – вимірювальний пристрій , 6 – постійний магніт.

Рисунок 1.3 – Схема дії магнітних товщиномірів

За величиною магнітного потоку, які створюються в осерді електромагніта або потоку, який є в постійному магніті роблять висновоб’єкті контролю про товщину неферомагнітного покриття.

До найпростіших приладів такого типу відносять товщино міри, в яких в якості індикатора використовується магніточутлива система, наприклад, “Elcometr 211” [3].

Як бачимо, прилади магнітостатичного типу можна викоритовувати для визначення внутрішнього діаметру неферомагнітних труб шляхом визначення товщини стінки труби, в отвір якого портібно внести феромагнітний об’єкт певної конфігурації для проведення контролю.

До недоліків магнітостатичних товщиномірів належить, по-перше, те, що значна відстань між полюсами не дозволяє контролювати малорозмірні деталі. По-друге, в них суттєво позначається вилив краю деталі, оскільки

область, де розділяється постійне магнітне поле у феромагнетичну, дуже значне.

Значно меншого поширення набули магнітні товщиноміри для вимірювання товщини виробів з феромагнітних матеріалів. Це пояснюється складністю створення таких приладів з малою похибкою, особливо при вимірюванні великих товщин. Дія таких приладів базується на магнітостатичному принципі. Перетворювачі таких приладів представляють собою двополюсні циліндричні магніти з перетворювачами Холла.

Відомим є створений магнітний мікрометр для вимірювання товщини стінки феромагнітних труб в поточному виробництві. Вимірювання проводять методом мостової схеми, два плеча якої складають еталонна і досліджувана труба, два других – осердя електромагніта. В перемичці моста в якості вимірювального елемента застосовується ферозонд. Прилад призначений для вимірювання труб діаметром 30-102 мм з товщиною стінки 1,5-8 мм. Похибка вимірювань 3-4% при швидкості проведення контролю до 2,5 м/с. Відомими є створені прилади для вимірювання товщини жерсті для консервних банок, трансформаторного заліза і феромагнітних листів. Границі вимірювань приладів становлять 0-600 мкм або 0-2500 мкм [3].

## **1.2 Електричний контроль геометричних розмірів виробів**

Електричні методи контролю базуються на створенні у об'єкті контролю електричного поля або на безпосередні дії на нього електричного збурення. Також при електричному контролі може відбуватися дія на об'єкт збурення неелектричного походження, яке викликає появу електричного сигналу [2].

Одним з методів електричного контролю для визначення геометричних розмірів, а також діаметра циліндричних об'єктів являється електроємнісний метод контролю.

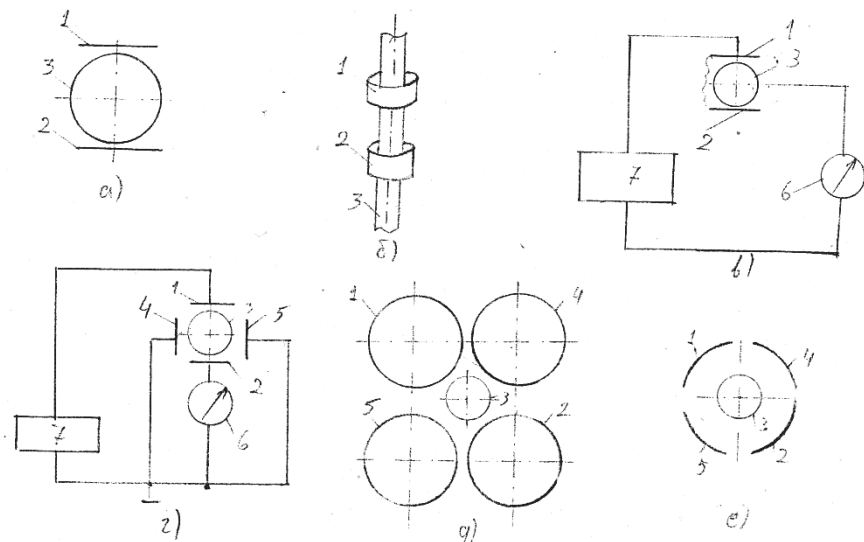
Цей вид передбачає внесення об'єкта контролю або його частини в електростатичне поле. При цьому визначають досліджувані характеристики по викликаній зворотній реакції матеріалу на збуджуюче електростатичне поле.

Як джерело поля використовується конденсатор, який виконує функцію первинного електроємнісного давача, який здійснює перетворення фізичних і геометричних параметрів об'єкта контролю в електричний параметр. Зворотна реакція такого перетворювача проявляється як зміна його інтегральних параметрів.

Для контролю розмірів поперечного січення циліндричних об'єктів застосовують прохідні перетворювачі (рис.1.4).

В залежності від схеми включення електродів і контрольованого об'єкта конструкції перетворювачів бувають двох – або трьохзатискуваними, їх робота базується на вимірюванні повної або часткової ємності. Область застосування цього методу полягає у контролі геометричних розмірів неелектропровідних об'єктів, насамперед діелектричних [1].

Ще один метод, який можна застосовувати для визначення діаметра циліндричних об'єктів – метод електричного опору. Метод базується на вимірюванні електричної ділянки об'єкта контролю. Вимірювання проходить з використанням чотирьохзондового способу. Опір даного об'єкта контролю залежить від його розміру, тому в такому разі діаметр циліндричних об'єктів може виступати інформативним параметром контролю. Недолік цього методу полягає в необхідності контакту з об'єктом контролю, що затрудняє автоматизацію їх контролю.



1 – висоб’єкті контролюопотенціальний електроліз , 2 –  
 низькопотенціальний електрод , 3 – контрольований об’єкт, 4 і 5 – охоронні  
 електроди , 6 – індикатор , 7 – джерело живлення.

а – в – з вимірюванням повної ємності , г – з вимірюванням часткової  
 ємності , д – е – з вимірюванням перехресної ємності.

Рисунок 1.4 – Конструкції прохідних електроємнісних перетворювачів

### 1.3 Електромагнітний контроль геометричних розмірів виробів

Електромагнітний метод контролю носить ще одну назву, яка поширена в техніці – вихрострумівий контроль. Він базується на взаємодії створюваного перетворювачем електромагнітного поля з аналогічним полем цього типу вихрових струмів, які генеруються в електропровідному об’єкті контролю або в електропровідній частині об’єкта контролю. Густина вихрових струмів є функцією від багатьох факторів, що хаіаактеризують об’єкт. Ними можуть бути геометричні розміри, магнітні і електричні властивості об’єкта контролю, частота збудження, а також взаємне розташування вихрострумівого перетворювача (ВСП) та об’єкта контролю. Конструктивно ВСП виготовляються як індуктивні котушки [4].

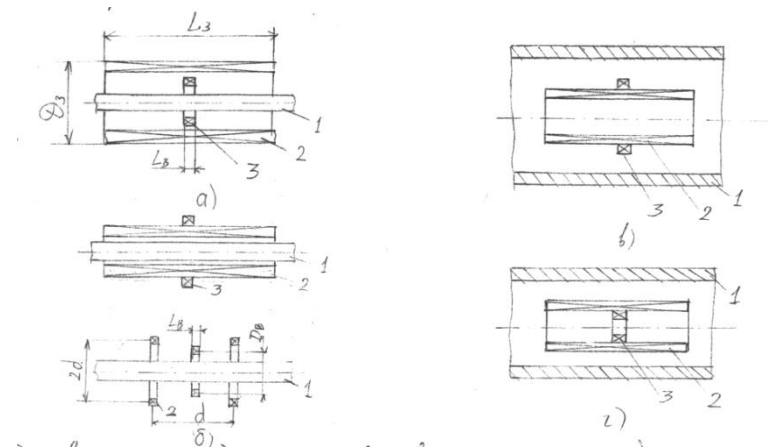
У вихрострумівому контролі всі види перетворювачів мають назву вихрострумівих. Вихідний сигнал у них може бути у двох видах:

- у вигляді комплексної напруги, яка має дійсну і уявну частини;
- у вигляді комплексного опору вимірювальної обмотки, який також має дійсну і уявну частини.

В залежності від форми об'єктів контролю використовуються різні види ВСП. Вони можуть бути прохідними при контролі трубних або циліндричних виробів. Їх конструкція може бути накладними перетворювачами, які при контролі реалізують накладання на зовнішню поверхню плоского або круглого об'єкта контролю. Також можуть бути занурювані ВСП, які занурюються в рідину, внаслідок чого відбувається зміна напруги у вимірювальній обмотці [9].

При контролі труб ВСП можуть знаходитися на її зовнішній поверхні або знаходитися всередині труби, що відображено на рис. 1.5.

Для контролю діаметра циліндричних об'єктів доцільно використовувати прохідні ВСП. Прохідні ВСП бувають зовнішніми і внутрішніми (рис. 1.5).



1 – контрольований об'єкт, 2 – збуджувальна котушка, 3 – вимірювальна котушка. а – б – зовнішні прохідні ВСП, в – г – внутрішні прохідні ВСП

Рисунок 1.5 – Прохідні ВСП

Для контролю діаметра циліндричних об'єктів застосовують внутрішні, зовнішні та екранні прохідні ВСП. Вибір типу прохідного перетворювача при контролі параметрів циліндричних об'єктів визначається перш за все

конструктивними особливостями. Так, контроль прутків, біметалевих та багатошарових циліндрів здійснюється за допомогою зовнішніх ВСП.

Для вихрострумowego контролю важливим є визначення оптимальних умов контролю, що визначається чутливістю ВСП до контрольованого параметра, наприклад геометричних розмірів чи якісних характеристик матеріалу. Чутливість визначається зміною багатьох вихідних сигналів, які формуються системою обробки інформації вихрострумowego приладу. Таким сигналом може бути амплітуда чи фаза вихідної напруги, значення дійсної чи уявної частини вихідної напруги, а також модульоване значення вихідного сигналу. Переважно найбільш впливовим фактором на зміну чутливості є частота живлення обмотки збудження ВСП. Використовувані сигнали при функціонуванні вихрострумowego контролю будуть описані в наступному розділі при реалізації розрахунку ВСП [11].

Оскільки для контролю геометричних розмірів об'єктів можуть бути використані різні методи неруйнівного контролю, кожен з яких має свої технічні характеристики та особливості застосування. В таблиці 1.1 наведений порівняльний аналіз видів неруйнівного контролю

Таблиця 1.1 Порівняння видів неруйнівного контролю

Кількісні характеристики	Види неруйнівного контролю		
	Магнітний	Електричний	Вихрострумовой
1. Діапазон вимірювання	0-40 мм	0-25 мм	мікрометри – десятки міліметрів
2. Робоча частота	до 1 кГц	до 30 МГц	до 135 МГц
3. Шорсткість поверхні об'єкта контролю	не більше $R_z 20$	не рекомендується	не рекомендується
4. Основна похибка	до 10 %	до 5-7 %	до 5 %

5. Контрольовані матеріали	1) ізоляційні по об'єкті контролю покриття на феромагнітних основах 2) феромагнітні матеріали	Металічні вироби	1) ізоляційні по об'єкті контролю покриття на електропровідних основах, 2) електропровідні по об'єкті контролю покриття на ізоляційних основах, 3) електропровідні по об'єкті контролю покриття на електропровідних основах
----------------------------	--	------------------	---

Таблиця 1.2 Порівняння методів контролю по визначенню діаметрів труби

Вид контролю	Кількісні характеристики	Переваги	Недоліки
Магнітний	Діапазон вимірювання : 0 – 400 мм; основна похибка : 3 – 5 % (магнітовідривні товщиноміри). Для магнітопроводів $K_z$ не більше 20. Контроль феромагнітних виробів. Похибка індукційних приладів 5 %.	Простота приладів, можливість автоматизації	Необхідність намагнічування, циклічність процесу вимірювання магнітовідривних приладів. Вплив стану поверхні на результати.
Електричний	Робоча частота до 30 МГц. Похибка вимірювань 5 – 7 %. Широкий діапазон вимірювання. Контроль металічних виробів. Сила струму, що підводиться до об'єкта контролю : 1 – 10 А.	Можливість автоматизації процесу контролю.	Складність обробки інформації через наявність багатопараметричного сигналу, вплив зовнішніх завод.
Вихрострумний	Робоча частота до 135 МГц. Діапазон вимірювання: мікрометри – десятки міліметрів. Контроль феромагнітних та неферомагнітних виробів. Висока чутливість від 2 до 6	Висока точність приладів, чутливість, можливість автоматизації процесу, широкий діапазон вимірювання, широка номенклатура матеріалів виробів.	При збільшенні розмірів об'єкта контролю, збільшується ВСП, вплив зовнішніх електромагнітних полів.

Контроль об'єктів з циліндричними порожнинами при односторонньому доступі зі сторони порожнини, наприклад внутрішнього

діаметра труб, може здійснюватися прохідними ВСП лише внутрішнього типу.

Поряд з ним одношарові і багатшарові труби можна контролювати як зовнішніми, внутрішніми, так і екранними перетворювачами. Коли конструктивні особливості перетворювачів не мають великого значення необхідно співставити чутливості кожного типу перехідного ВСП до змін контрольованого і заважаючих параметрів труби [11].

## 2. ОБГРУНТУВАННЯ ТА РОЗРАХУНОК ВУЗЛІВ ПРИСТРОЮ ВИХРОСТРУМОВОГО ВИМІРЮВАННЯ ГЕОМЕТРИЧНИХ РОЗМІРІВ ТРУБ

### 2.1 Фізичні основи вихрострумowego контролю

Метод вихрових струмів заснований на контролі залежності інтенсивності і розподілу вихрових струмів в об'єкті від його основних параметрів і взаємного положення ВСП і об'єкта. Змінний струм, прикладений до котушки ВСП, створює електромагнітне поле, яке індукуює вихрові струми в струмопровідних об'єктах. На рис. 2.1 представлена загальна функціональна схема контролю вихровими струмами за допомогою накладних перетворювачів. Густина вихрових струмів досягає максимального значення на поверхні об'єкту контролю діаметр якого близький до діаметра збуджувальної котушки, і прямує до нуля вздовж напрямку осі ВСП при  $r \rightarrow \infty$ , а також вона зменшується і по глибині об'єкта контролю [12]. Для наближеного визначення глибини проникнення електромагнітного поля накладного ВСП в об'єкт контролю можна застосувати формулу і обчислити глибину проникнення плоскої хвилі  $\delta$  у метрах:

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \cdot \mu_a \cdot \sigma}}, \quad (2.1)$$

де  $\omega$  - колова частота струму збудження ВСП;  $\mu_a$  - абсолютна магнітна проникність, Гн/м;  $\sigma$  - питома електрична провідність матеріалу об'єкта контролю, См/м.

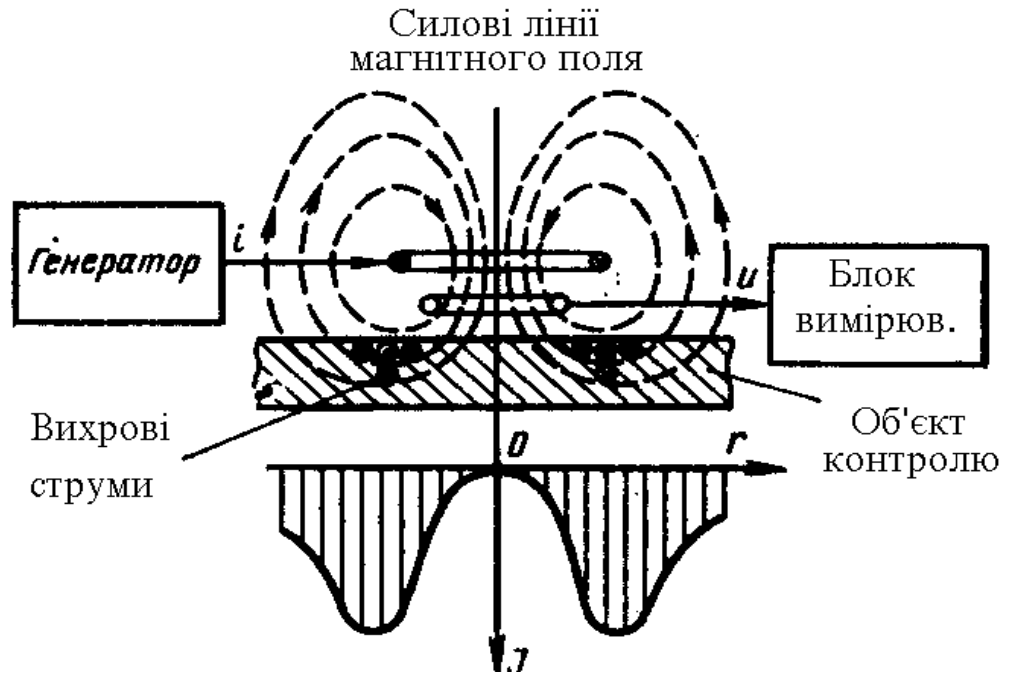


Рисунок 2.1 – Схема проведення вихрострумowego контролю за допомогою накладного ВСП

Величина  $\delta$  визначає згасання магнітного поля в  $e$  раз у відношенні до напруженості магнітного поля на поверхні об'єкта. Формула (2.1) завищує значення глибини проникнення, але воно тим ближче до реального значення, чим більшим, є так званий узагальнений параметр [7]

$$\beta = R\sqrt{\omega \cdot \mu_a \cdot \sigma}, \quad (2.2)$$

де  $R$  - радіус збуджуючої обмотки ВСП.

Наприклад при значенні  $\beta = 1.5$  реальне значення глибини  $\delta$  менше від знайденого за формулою (2.1) в 2.2 рази, а при  $\beta = 5$  - в 1.5 рази.

При відомому значенні  $\beta$  визначити  $\delta$  можна за наступною формулою:

$$\delta = \frac{R\sqrt{2}}{\beta} \quad (2.3)$$

Формулу (2.1) також можна використовувати для оцінки глибини проникнення магнітного поля в довгий циліндр чи трубу. Фактичне значення

глибини проникнення оцінене за рівнянням (2.1) для прохідного ВСП з однорідним магнітним полем зовнішнього типу перевищує розраховане значення [7].

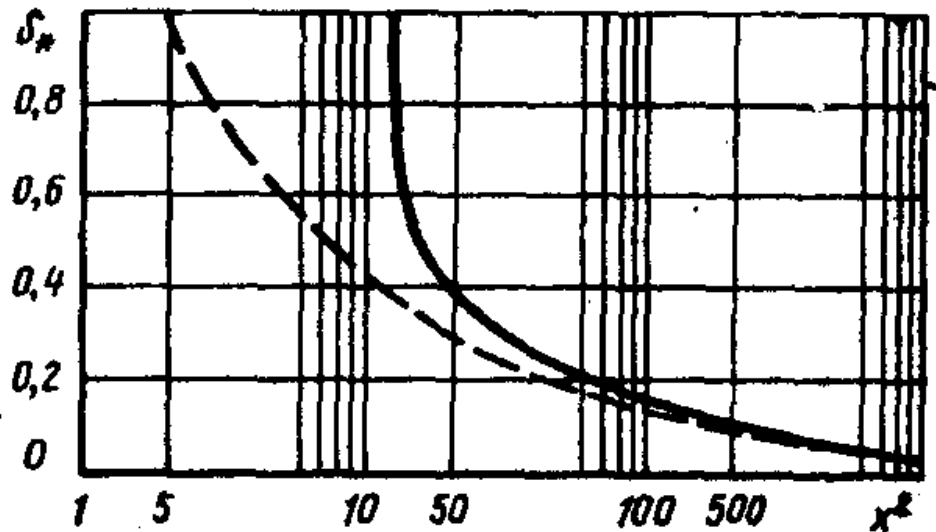


Рисунок 2.2 – Залежність відносної глибини  $\delta_*$  проникнення магнітного поля прохідного ВСП з однорідним полем в круговий циліндр від параметра  $x^2$  (суцільна лінія – дійсні значення, пунктирна - наближені)

На рисунку 2.2 показані графіки зміни відносної глибини проникнення  $\delta_* = \delta/R$  і квадрату узагальненого параметра контролю  $x$ :

$$x = R\sqrt{\omega \cdot \mu_a \cdot \sigma}, \quad (2.4)$$

де  $R$  – зовнішній радіус труби ( $\delta_* = \frac{\sqrt{2}}{x}$ ).

Для умов якщо середовище є лінійним та магнітне поле є осесиметричним і монохроматичним значення комплексної ЕРС складає:

$$\left. \begin{aligned} \dot{E} &= -j\omega \cdot w_B \cdot \dot{\Phi}; \\ \dot{E} &= -j\omega \cdot w_B \cdot l \cdot \dot{A}, \end{aligned} \right\} \quad (2.5)$$

де  $l$  – довжина контуру вимірювальної котушки.

Для спрощення розрахунків переважно користуються значенням відносної ЕРС [5]:

$$\dot{E}_* = \frac{\dot{E}}{E_0}, \quad (2.6)$$

де  $E_0$  – значення початкової ЕРС, при в відсутності об'єкту у зоні контролю [7].

Тому можна розрахувати:

$$\dot{E}_* = -j\dot{\Phi} / \Phi_0 = -f\dot{\Phi}_* = -j\dot{A} / A_0 = -jA_*, \quad (2.7)$$

де  $\Phi_0$  і  $A_0$  – модулі векторів магнітного потоку і векторного потенціалу.

Значення комплексного опору параметричного ВСП можна визначити виразом:

$$Z = \dot{U} / \dot{I}_3 = -\frac{\dot{E}}{\dot{I}_3}, \quad (2.8)$$

де  $\dot{I}_3$  - струм збудження в обмотці ВСП.

Нормоване до початкового індуктивного опору значення комплексного опору параметричного ВСП можна розрахувати:

$$Z_* = \frac{Z}{\omega \cdot L_0} = \dot{U}_* = -\dot{E}_*. \quad (2.9)$$

## 2.2 Вибір конструкції вихрострумове давача

По робочому положенню відносно контрольованого об'єкта ВСП бувають накладними, прохідними, комбінованими.

Накладні ВСП зазвичай мають форму одної або декількох обмоток, до країв яких контактує поверхня об'єкту контролю (рис. 2.3). Котушки таких перетворювачів можуть бути круглими коаксіальними (рис. 2.3, а), прямокутними (рис. 2.3, б), прямоб'єкті контролюються хрестоподібними (рис. 2.3, в) або із взаємноперпендикулярними осями (рис. 2.3, г) [2].

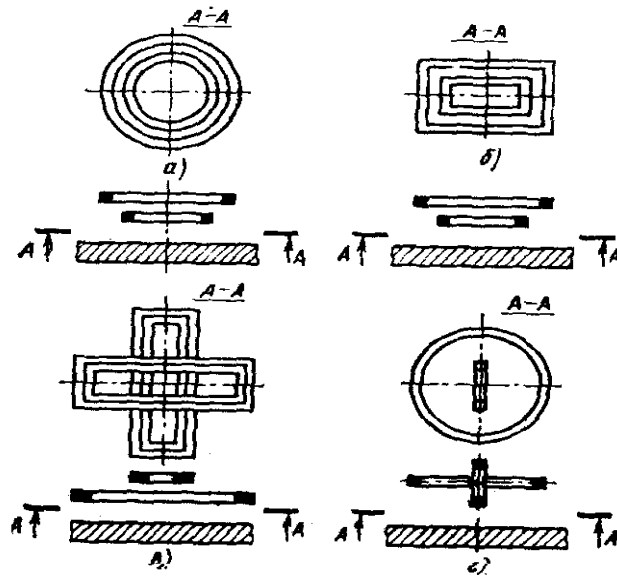
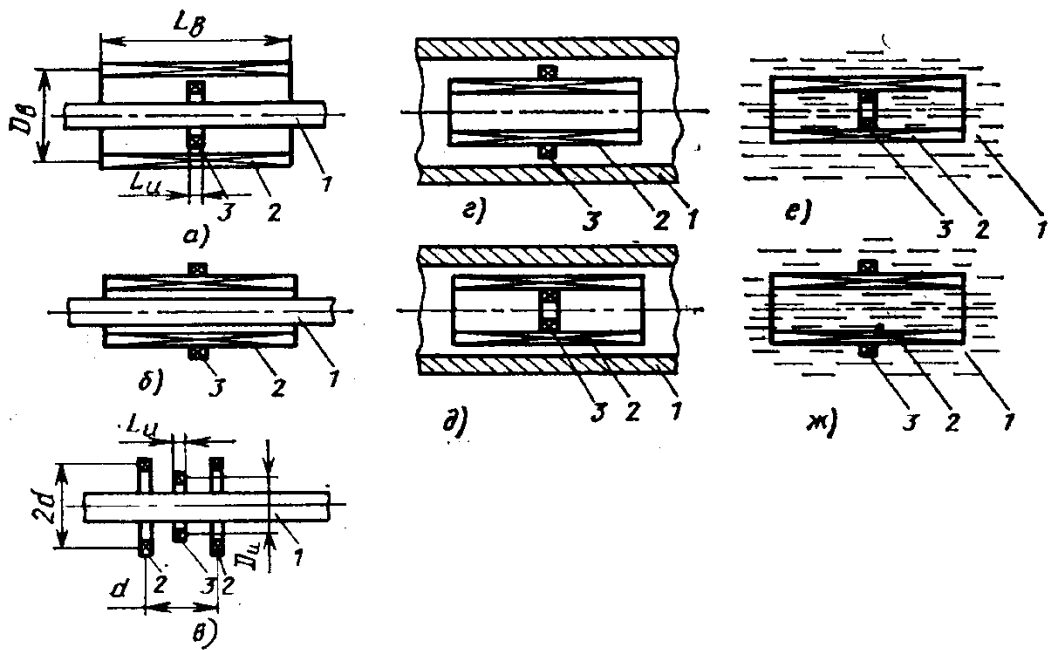


Рисунок 2.3 - Види накладних перетворювачів

Накладні ВСП можуть бути з феромагнітним осердям і без нього. При наявності осердя зростає чутливість, але зменшується зона контролю за рахунок контролю локалізації магнітного потоку.

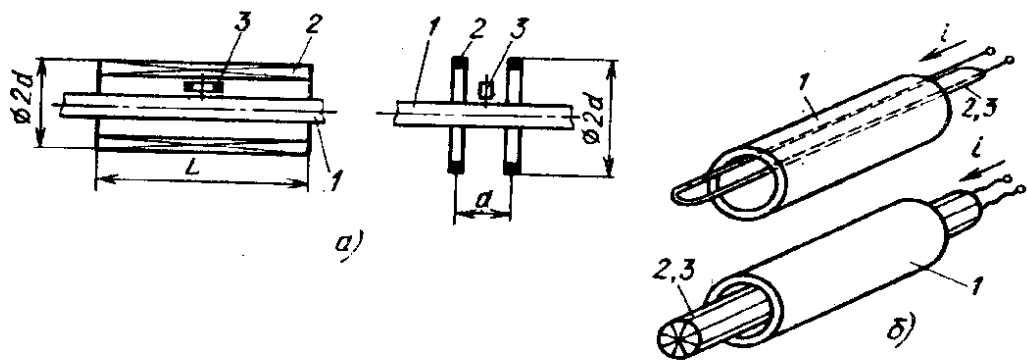
Прохідні ВСП класифікують на зовнішні, внутрішні і занурювальні. У прохідних ВСП під час процесу контролю вони проходять або ззовні об'єкту, охоплюючи його (рис. 2.4, а-в), або всередині нього (рис. 2.4, г-д), або занурюються у рідкий об'єкт (рис. 2.4, е-ж).

Комбіновані ВСП є за своєю суттю комбінацією накладних і прохідних ВСП (рис. 2.5) [1].



1 – контрольований об’єкт; 2 – збуджувальна котушка; 3 – вимірювальна котушка

Рисунок 12.4 - Види прохідних перетворювачів



1 – контрольований об’єкт; 2 – збуджувальна котушка; 3 – вимірювальна котушка

а – з прохідною збуджувальною і накладною вимірювальною обмотками; б – лінійні.

Рисунок 2.5 – Види комбінованих ВСП

По способу перетворення інформаційних параметрів об’єкта у сигнал давача ВСП класифікуються на трансформаторні (містять не менше двох обмоток) і параметричні (однообмоткові).

Параметричні ВСП хоча і простіші, однак в них більш суттєва залежність вихідного сигналу від температури у порівнянні з трансформаторними. В залежності від з'єднання обмоток розрізняють абсолютні і диференціальні ВСП. Останні забезпечують більш суттєве підвищення відношення корисного сигналу до завади, так як в них вихідний сигнал визначається приростом контрольованого параметра [4].

В абсолютних ВСП вихідний сигнал визначається абсолютним значенням параметрів контролю.

Накладними ВСП контролюють об'єкти з плоскими поверхнями і об'єкти складної форми. Ці перетворювачі використовують також, коли потрібно забезпечити локальну і високу чутливість контролю. Накладними і прохідними ВСП контролюють лінійно-протяжні об'єкти. Їх використовують при масовому контролі дрібних виробів. За допомогою внутрішніх прохідних ВСП контролюють внутрішню поверхню труб, а також стінки отворів у різних деталях. Прохідні ВСП дають інтегральну оцінку контрольованого параметра вздовж периметра об'єкта, тому вони мають меншу чутливість до локальних варіацій їх властивостей [8].

### 2.3 Контроль циліндричних об'єктів зовнішніми прохідними ВСП

Зовнішніми прохідними ВСП як правило контролюють геометричні розміри, циліндричних об'єктів круглого перерізу. Для визначення умов контролю необхідно встановити залежність вихідної ЕРС від параметрів об'єкта контролю, тобто його електричних і магнітних властивостей.

Для цієї мети необхідно знайти розподіл напруженості магнітного поля  $H$  і обчислюють магнітний потік  $\Phi$  в об'єкті контролю або його векторний потенціал  $A$  і визначають значення миттєвого  $e(t)$  або комплексне значення ЕРС вимірювальної обмотки  $\dot{E}$ :

$$e(t) = -W_B \frac{\partial \Phi}{\partial t} \quad (2.10)$$

$$\dot{E} = -jW_B \omega \cdot l \cdot \dot{A} \quad , \quad (2.11)$$

де  $l$  - довжина контуру вимірювальної обмотки;  $W_B$  - кількість витків вимірювальної обмотки.

З врахуванням геометричних розмірів ОК і ВСП формула (2.11) матиме вигляд:

$$\dot{E} = -j\pi \cdot \mu_0 \cdot \omega \cdot W_B \dot{H}_0 \left[ R_B^2 - R^2 + \frac{2\mu \cdot R I_1(\tilde{k}R)}{\tilde{k} I_0(\tilde{k}R)} \right] \quad , \quad (2.12)$$

де  $\dot{H}_0$  - напруженість магнітного поля за межами об'єкту контролю;  $R_B$  - радіус контуру, який охоплюється вимірювальною обмоткою ВСП;  $R$  - радіус об'єкту контролю;  $\mu$  - відносна магнітна проникність ОК;  $\mu_0$  - магнітна стала;  $I_0, I_1$  - циліндричні функції I роду 0-го та 1-ого порядку;  $\omega$  - кругова частота струму збудження ВСП;  $\tilde{k}^2$  - комплексний параметр, який визначається функціональною залежністю від абсолютної магнітної проникності  $\mu_a$ , питомої електропровідності  $\sigma$  і частоти струму збудження  $\omega$  [5]:

$$\tilde{k}^2 = -j\mu_a \cdot \omega \cdot \sigma \quad (2.13)$$

За відсутності об'єкту контролю в середині перетворювача, на його виході є ЕРС "холостого ходу", яка визначається:

$$\dot{E}_0 = -W_B \frac{d\Phi}{dt} = -j\pi \cdot \mu_0 \omega \cdot \dot{H}_0 R_B^2 \cdot W_B \quad , \quad (2.14)$$

де  $\dot{E}_0$  - ЕРС холостого ходу (комплексна величина).

Значення відносної вихідної напруги вимірювальної обмотки можна обчислити за виразом [7]:

$$\dot{U}_* = -\dot{E}_* = \frac{\dot{E}}{E_0} = j \left[ 1 - \eta + \eta \cdot \mu \frac{2 I_1(\tilde{k}R)}{\tilde{k}R I_0(\tilde{k}R)} \right] \quad (2.15)$$

де  $\eta$  - коефіцієнт заповнення, який визначається радіусом  $R$  циліндра і радіусом обмоток збуджувальної  $R_z$  або вимірювальної  $R_B$  з врахуванням нижче вказаних умов:

$$\eta = \left( \frac{R}{R_B} \right)^2 \quad \text{при } R_B \leq R_z \quad (2.16)$$

$$\eta = \left( \frac{R}{R_z} \right)^2 \quad \text{при } R_B > R_z \quad (2.17)$$

Застосувавши поняття для ефективної магнітної проникності циліндра:

$$\tilde{\mu}_{\text{эф}} = \frac{2}{\tilde{k}R} \frac{I_1(\tilde{k}R)}{I_0(\tilde{k}R)} \quad (2.18)$$

і виконавши заміну  $\tilde{k}R = \tilde{x}$ , маємо:

$$\tilde{\mu}_{\text{эф}} = \frac{2}{\tilde{x}} \frac{I_1(\tilde{x})}{I_0(\tilde{x})} \quad (2.19)$$

Параметр  $\tilde{\mu}_{\text{эф}}$  комплексна величина яка показує як зменшується магнітний потік через вплив вихрових струмів для об'єкту контролю немагнітного типу.

Як правило на практиці виконується компенсація ЕРС холостого ходу, тому для розрахунків можна використати значення відносної внесеної напруги ВСП, яку можна обчислити згідно виразу [1]

$$\dot{U}_{\text{вн}^*} = \frac{\dot{U} - \dot{U}_0}{U_0} = j\eta(\tilde{\mu}_{\text{эф}} \cdot \mu - 1) \quad (2.20)$$

На рис. 2.6 приведені годографи відносної напруги перетворювача  $\dot{U}_*(x^2)$  для електропровідного, немагнітного циліндра ( $\sigma \gg \omega \cdot \varepsilon_a$ ,  $\mu = 1$ ) при  $\eta = 0.25; 0.5; 0.75; 1$ . З рис. 2.6 видно, що зміни  $R$  і  $\sigma$  циліндра викликають протилежні зміни векторів напруги. Це дозволяє окремо проводити контроль для вказаних параметрів. Найоптимальнішими умовами роздільного контролю  $R$  і  $\sigma$  вважаються, коли кути між годографами  $\dot{U}_*(\eta)$  і  $\dot{U}_*(\tilde{x})$  прямують до  $\pi/2$ . При  $x \rightarrow \infty$  ці кути досягають величини  $\pi/4$ .

## 2.4 Контроль циліндричних об'єктів внутрішніми прохідними ВСП

Для контролю пустотілих циліндричних об'єктів (труби, балони і т.п.) іноді доцільно використовувати внутрішні прохідні перетворювачі, котушку збудження яких як правило виготовляють з великим (більше 3) співвідношенням довжини до діаметра. Для розрахунку такого перетворювача, який повинен знаходитися у середині труби з внутрішнім радіусом  $R_2$  і зовнішнім  $R_1$ , значення відносної напруги можна розрахувати:

$$\dot{U}_* = -j \frac{\frac{2\mu_2 F_{01}(\tilde{x}_{21}, \tilde{x}_{22})}{\tilde{x}_{22} F_{00}(\tilde{x}_{21}, \tilde{x}_{22})}}{1 - \frac{2\mu_2 F_{01}(\tilde{x}_{21}, \tilde{x}_{22})}{\tilde{x}_{22} F_{00}(\tilde{x}_{21}, \tilde{x}_{22})}}, \quad (2.21)$$

де  $F_{00}(\tilde{x}_{21}, \tilde{x}_{22}) = k_0(\tilde{x}_{21})I_0(\tilde{x}_{22}) - I_0(\tilde{x}_{21})k_0(\tilde{x}_{22})$  і  $F_{01}(\tilde{x}_{21}, \tilde{x}_{22}) = k_0(\tilde{x}_{21})I_1(\tilde{x}_{22}) + I_0(\tilde{x}_{21})k_1(\tilde{x}_{22})$  - комплексні функції, які містять  $I_0, I_1$  - функції Бесселя I роду, відповідно нульового та першого порядків, а також  $k_0, k_1$  - функції Бесселя II роду, відповідно нульового та першого порядків;  $\tilde{x}_{21}, \tilde{x}_{22}, \tilde{k}_2$  - комплексні параметри, які визначаються виразами:

$$\tilde{x}_{21} = \tilde{k}_2 R_1; \quad (2.22)$$

$$\tilde{x}_{22} = \tilde{k}_2 R_2; \quad (2.23)$$

$$\tilde{k}_2 = \sqrt{-j\omega \cdot \sigma_2 \mu_2 \cdot \mu_0}. \quad (2.24)$$

При цьому виді контролю також вводять узагальнені параметри:

$$x = |\tilde{x}_{22}| = R_2 \sqrt{\omega \cdot \sigma_2 \mu_2 \cdot \mu_0} \quad (2.25)$$

і

$$\alpha_{21} = \frac{R_2}{R_1} \quad (2.26)$$

У виразах (2.21) – (2.26) індекс 2 стосується параметрів ОК зі сторони ВСП, тобто таких, які відносяться до радіуса  $R_2$ [7].

На рис. 2.6 приведені годографи  $\dot{U}_{\text{вн}^*}$  внутрішнього прохідного ВСП для труб з різним відношенням  $\alpha_{21} = \frac{R_2}{R_1}$ . На цьому графіку суцільними лініями зображено залежності  $\dot{U}_{\text{вн}^*}(\alpha_{21})$  для різних значень параметра  $\tilde{x}_{22} = \tilde{k}_2 \cdot R_2$ . Пунктирні лінії з'єднують точки годографів, що відповідають  $\alpha_{21} = \text{const}$ , тобто відповідають незмінній товщині стінки труби. Гранична крива при зменшенні  $\alpha_{21}$  - годограф для нескінченно товстої труби (штрих пунктирна крива).

З приведених на рис. 2.6 годографів видно, що даним прохідним ВСП, (аналогічно як і зовнішнім прохідним ВСП) можна виконувати контроль  $\sigma$  і товщини стінки труби, оскільки вектори приросту напруги для внутрішнього прохідного перетворювача зумовлені змінами електропровідності і товщини стінки об'єкту контролю, мають різні напрями на комплексній площині. Кут між цими векторами для приростів напруг при сталому внутрішньому радіусі труби із зростанням  $\tilde{x}_{22}$ , тобто з ростом частоти, збільшується.

Суцільними лініями на рис. 2.6 представлені зміни вихідного сигналу перетворювача в залежності від зміни розмірів об'єкту контролю, тобто фіксується зміна коефіцієнта  $\alpha$ . При цьому узагальнений параметр  $\tilde{x}_{22}$  вздовж даної лінії є незмінним.

У випадку зміни параметра  $x$  і незмінного  $\alpha$  вихідний сигнал перетворювача змінюється вздовж пунктирної лінії, тобто таким чином можна визначати електричні і магнітні властивості об'єкту контролю. При одночасній зміні кількох параметрів  $m$ ,  $\sigma$ ,  $R_2$  тоді треба виконати інтерполяцію за різними  $x$  та  $\alpha$  ( $(0 \leq \alpha \leq 1)$ ,  $\alpha_{21} = 0$ ) [9].

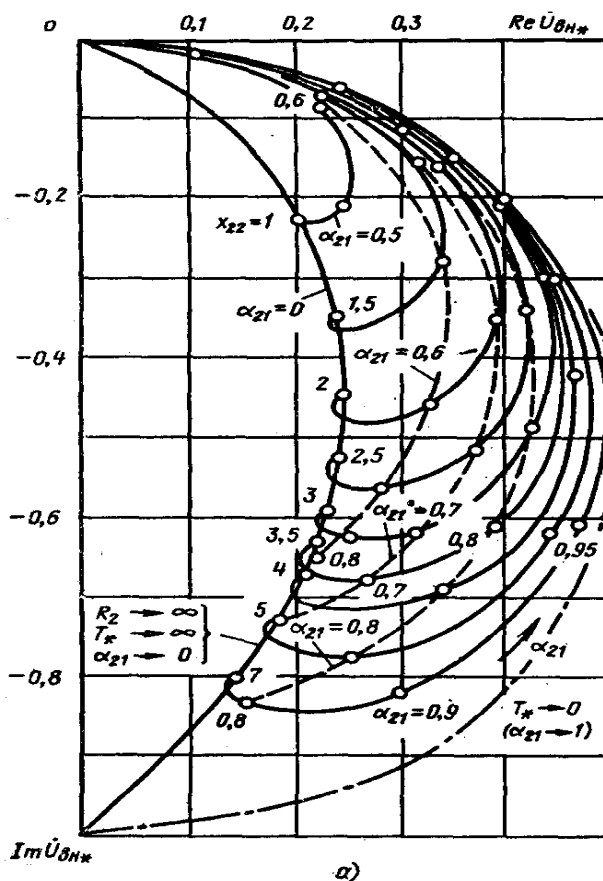


Рисунок 2.6 – Годографи  $\dot{U}_{вн*}$  відносної вносимої напруги внутрішнього прохідного ВСП при контролі неферомагнітних труб

## 2.5 Методи формування вихідного сигналу ВСП

Структурна схема вихрострумовевого пристрою контролю та конструкція ВСП залежать від призначення пристрою та способу виділення інформації при контролі параметрів об'єкта. Розглянемо деякі з них.

Сигнали перетворювача (зміна напруги або опору) володіють комплексним характером, який представляють за допомогою діаграм у комплексних площинах для напруги  $\dot{U}$  та опору  $\dot{Z}$ . Таким чином, при проведенні контролю об'єктів на однаковій частоті сигнал володіє двома параметрами (амплітуда фаза  $\dot{U}$ ; дійсна і уявна складові  $\dot{U}$  або  $\dot{Z}$ ; модуль і аргумент  $\dot{Z}$ ). Це дозволяє реалізовувати двохпараметровий контроль на

практиці, якщо вплив параметрів об'єкта контролю на параметри сигналу різні [7, 12].

При використанні двохпараметрового контролю в якості інформативного параметру можна використовувати амплітуду напруги ВСП, або проекцію векторів приросту напруги на вибраний напрям в комплексній площині, або можна обрати одну із складових (дійсна чи уявна) комплексної напруги, або їх комбінацію.

Амплітуда напруги може певним чином залежати від варіації фактору  $p_n$ , якщо початок координат для площини  $\dot{U}_{\text{вн}}$  зміщено в точку К (рис. 2.7, а) на нормалі NN до лінії впливу подавлюваного фактору в точці А ( $p_{\text{по}}, p_{\text{ко}}$ ), яка відповідає об'єкту контролю з номінальними параметрами. Початок координат можна змістити введенням компенсуючої напруги  $\dot{U}_k$  послідовно з вимірювальною обмоткою ВСП. Якщо зміна  $p_n$  викликає зміщення кінця вектора  $\dot{U}_{\text{вн}}$  з точки А в точку В, то різниця модулів векторів  $\dot{U}_A$  та  $\dot{U}_B$  становить  $\Delta U = U_B - U_A \approx 0$ . При зміні  $p_k$  вздовж контрольованого параметра (точка С) отримуємо  $\Delta U = U_A - U_C$  або у вигляді формули

$$\Delta U = S_k \cdot \Delta p_k \cdot \sin \alpha, \quad (2.27)$$

де  $S_k = \frac{\partial U}{\partial p_k}$  - чутливість ВСП до контрольованого параметра  $p_k$  (по модулю  $U$ );  $\alpha$  - кут між напрямками зміни параметрів  $p_k$  і  $p_n$ ;  $\Delta p_k$  - приріст контрольованого параметра;  $U_A$  - модуль вектора напруги, який відповідає стандартному зразку.



Отриманий сигнал від блоку 2 перетворювача, збуджується генератором 1, посилюється підсилювачем 3. Для детектування використовується амплітудний детектор 4. Отримана постійна напруга з виходу детектора 4 подається на індикатор 5. В даній схемі присутній компенсатор (блок 2) який дозволяє зміщувати точку компенсації в положення, яке потрібне для умови зменшення впливу завад [6].

## 2.6 Розрахунок вихрострумowego перетворювача

### 2.6.1 Геометричний розрахунок вихрострумowego перетворювача

Основною суттю даних розрахунків для геометричних параметрів це знаходження розмірів вимірювальної і збуджуючої обмоток, а також габаритних розмірів котушки виходячи з кількості витків, діаметру і типу дроту, а також форми каркасу котушок і контрольованого об'єкту.

Внутрішній діаметр контрольованої групи становить  $28 \pm 0,3$  мм. Враховуючи наявність у ВСП центруючих ременів зазор між об'єкті контролю та збуджуючого обмоткою становить 3 мм. Тому вибираємо діаметр збуджуючої обмотки рівний 22 мм (рис. 2.8).

З [12] відомо, ще перехідні ВСП мають однорідне магнітне поле в зоні контролю, в результаті чого роздільне зміщення однорідного об'єкті контролю не впливає на вихідний сигнал перетворювача. Для цього довжина  $L_3$  збуджуючої обмотки має бути не менше ніж в 3-4 рази більше за її діаметр.

Тому довжина збуджуючої обмотки становить  $L_3 = 88$  мм (рис. 2.8).

З електротехнічного довідника для збуджуючої обмотки вибираємо дріт типу ПЄВ-1-0.5 діаметром 0.5 мм (з врахуванням ізоляції).

Визначаємо число витків збуджувальної обмотки :

$$W_3 = \frac{L_3}{d_0}, \quad (2.28)$$

де  $d_0$  - діаметр дроту.

Отже,  $W_3 = 176$  витків.

На зовнішню поверхню збуджуючої обмотки наносимо тонку ізоляційну плівку товщиною 0.2мм.

Конструктивною особливістю внутрішнього прохідного ВСП є той факт, що довжина вимірюваної обмотки повинна бути набагато менша за довжину збуджувальної обмотки, що забезпечує однорідне магнітне поле в зоні контролю [5].

Вибираємо довжину вимірювальної обмотки рівну  $L_B = 10$  мм.

З довідника для вимірювальної обмотки вибираємо дріт ізоляцією типу ПЄВ-1-0,1 діаметром 0.1мм.

Визначаємо число витків вимірювальної обмотки :

$W_B = 100$  витків.

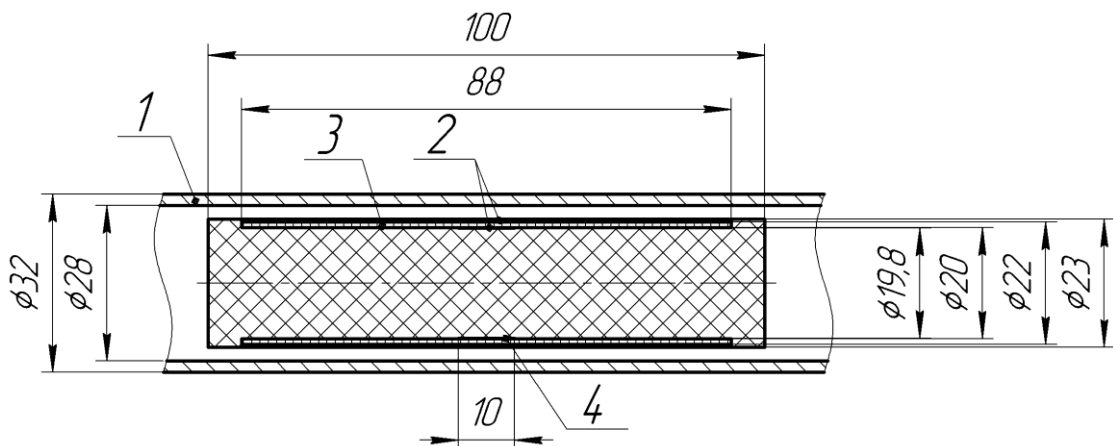
Між збуджуючою та вимірювальною обмотками поміщаємо електричну ізоляційну прокладку товщиною 0,5 мм (рис. 2.8).

Визначаємо діаметр вимірювальної обмотки :

$$D_B = D_3 - 2 \cdot d_0 - 2h \quad (2.29)$$

де  $D_3$  - діаметр збуджуючої обмотки;  $d_0$  - діаметр дроту збуджуючої обмотки;  $h$  - товщина ізоляційної прокладки між обмотками.

Отже,  $L_B = 20$  мм .



1 – об'єкт контролю ( труба ), 2 – діелектричні ізоляційні прокладки, 3 – збуджуюча обмотка, 4 – вимірювальна обмотка.

Рисунок 2.8 - Схема з об'єктом контролю:

### 2.6.2 Електричний розрахунок вихрострумів перетворювача

Електричний розрахунок внутрішнього прохідного ВСП здійснимо за наступним алгоритмом [8] :

1.Визначення колової частоти струму збудження ВСП.

Для цього скористаємося формулою для наближеної оцінки глибини проникнення електромагнітного поля ВСП в об'єкт контролю [1] :

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \cdot \mu_a \cdot \sigma}}, \quad (2.30)$$

де  $\omega$  - колова частота струму збудження ВСП;  $\mu_a$  - абсолютна магнітна проникність,  $\frac{Гн}{м}$ ;  $\sigma$  - питома електрична провідність матеріалу об'єкту контролю,  $\frac{См}{м}$ .

Оскільки товщина стінки труби становить 2мм, тому вибираємо значення  $\delta = 2$  мм.

Для Ст.10 параметри наступні :  $\mu_r = 20$  (відносна магнітна проникність);  $\sigma = 6,66 \cdot 10^6 \frac{См}{м}$  (питома електрична провідність ).

$$\omega = \frac{2}{\delta^2 \cdot \mu_a \cdot \sigma}. \quad (2.31)$$

Отже,  $\omega = 3016 \frac{рад}{с}$ .

2. Обчислення узагальнених параметрів згідно даних об'єкта контролю і значення контрольованого параметра.

Перший узагальнений параметр визначається з виразу :

$$X = \frac{D_E \cdot \sqrt{\omega \cdot \sigma \cdot \mu_a}}{\sqrt{\mu_r}}, \quad (2.32)$$

де  $D_E$  - еквівалентний діаметр, який в даному випадку рівний внутрішньому діаметру труби  $D_E = D_2$  [2].

Отже,  $x = 0,98$ .

Другий узагальнений параметр визначається з виразу :

$$\alpha_{21} = \frac{R_2}{R_1} = \frac{D_2}{D_1}, \quad (2.33)$$

де  $D_1, D_2$  - відповідно зовнішній та внутрішній діаметр труби.

Отже,  $\alpha_{21} = 0,875$ .

3. Розрахунок коефіцієнта заповнення.

Оскільки в нашому випадку радіус вимірювальної обмотки менший від радіуса збуджувальної обмотки, то коефіцієнт заповнення визначається :

$$\eta = \left(\frac{R_3}{R_2}\right)^2. \quad (2.34)$$

де  $R_3$  - радіус обмотки збудження;  $R_2$  - внутрішній радіус труби.

Отже,  $\eta = 0,82$ .

4. За допомогою годографа відносної вносимої напруги внутрішнього прохідного ВСП при зміні параметрів труби знаходимо значення відносної

вносимої напруги (точка А на годографі) :  $\dot{U}_{вн}^* = 0,0853 - j \cdot 0,0124$  (В).

5. Розрахунок початкової напруги при відсутності об'єкта контролю :

$$E_0 = \frac{\mu_0 \cdot \omega \cdot W_B \cdot W_3 \cdot \pi \cdot R_g^2}{L_3}, \quad (2.35)$$

отже,  $E_0 = 237,89$  мВ.

6. Знаходження абсолютного значення внесеної напруги  $\dot{U}_{вн}$  з виразу:

$$U_{вн} = E_0 \cdot \dot{U}_{вн}^*. \quad (2.36)$$

Звідси,  $\dot{U}_{вн} = 0,02029 - j \cdot 0,00294$  (В).

7. Розрахунок вихідної (результуючої) напруги  $\dot{U}$  ВСП :

$$\dot{U} = E_0 \cdot \dot{U}^* , \quad (2.37)$$

де

$$\dot{U}^* = \dot{U}_{вн}^* + j . \quad (2.38)$$

Звідси  $\dot{U}^* = 0,0353 + j \cdot 0,9876$  В.

Підставляючи одержане значення у формулу (2.7), одержимо :

$$\dot{U}^* = 0,02029 + j \cdot 0,23494 \text{ В} .$$

У формулі (2.38)  $\dot{U}^*$  - це відносна вихідна напруга вимірювальної обмотки ВСП, а фізичний зміст цієї формули відповідає перенесенню початку координат  $(0; -j)$ .

Для побудови гранувальної характеристики даного ВСП, тобто залежності вихідної напруги  $\dot{U}^* = \dot{U}_{вн}^* + j$  від внутрішнього діаметра труби  $U_{вх}$ , потрібно знати, в яких межах змінюється  $D_2$ . Згідно завдання :  $D_2 = 28 \pm 0,3$  мм .

Для побудови характеристики використаємо такі значення  $D_2$  :  
 $D_{21} = 27,6$  мм;  $D_{22} = 27,7$  мм;  $D_{23} = 27,8$  мм;  $D_{24} = 27,9$  мм;  $D_{25} = 28$  мм;  
 $D_{26} = 28,1$  мм;  $D_{27} = 28,2$  мм;  $D_{28} = 28,3$  мм.

Відповідно цим значенням  $D_2$  відповідають наступні значення узагальненого параметра  $\alpha_{21}$  :  $\alpha_{21(1)} = 0,862$ ;  $\alpha_{21(2)} = 0,865$ ;  $\alpha_{21(3)} = 0,868$  ;  
 $\alpha_{21(4)} = 0,871$ ;  $\alpha_{21(5)} = 0,875$  ;  $\alpha_{21(6)} = 0,878$  ;  $\alpha_{21(7)} = 0,881$  ;  $\alpha_{21(8)} = 0,884$  .

Кожному значенню  $D_2$  відповідають наступні значення відносної вносимої напруги, визначені за годографом :

$$\dot{U}_{вн1}^* = (0,0932 - j \cdot 0,014) \text{ В};$$

$$\dot{U}_{вн2}^* = (0,0913 - j \cdot 0,0137) \text{ В};$$

$$\dot{U}_{вн3}^* = (0,0895 - j \cdot 0,0132) \text{ В};$$

$$\dot{U}_{вн4}^* = (0,0879 - j \cdot 0,0128) \text{ В};$$

$$\dot{U}_{вн5}^* = (0,0853 - j \cdot 0,0124) \text{ В};$$

$$\dot{U}_{вн6}^* = (0,0835 - j \cdot 0,0122) \text{ В};$$

$$\dot{U}_{вн7}^* = (0,0815 - j \cdot 0,012) \text{ В};$$

$$\dot{U}_{вн8}^* = (0,08796 - j \cdot 0,0118) \text{ В}.$$

Відповідно їм значення абсолютного значення внесеної напруги такі (визначені по формулі (2.36):

$$\dot{U}_{вн1} = (0,0221 - j \cdot 0,0033) \text{ В};$$

$$\dot{U}_{вн2} = (0,0217 - j \cdot 0,0032) \text{ В};$$

$$\dot{U}_{вн3} = (0,0212 - j \cdot 0,003) \text{ В};$$

$$\dot{U}_{вн4} = (0,0209 - j \cdot 0,003) \text{ В};$$

$$\dot{U}_{вн5} = (0,0202 - j \cdot 0,0029) \text{ В};$$

$$\dot{U}_{вн6} = (0,0198 - j \cdot 0,0029) \text{ В};$$

$$\dot{U}_{вн7} = (0,0193 - j \cdot 0,0028) \text{ В};$$

$$\dot{U}_{вн8} = (0,0189 - j \cdot 0,0028) \text{ В}.$$

За формулою (2.38) визначаємо відповідні їм значення відносної вихідної напруги :

$$\dot{U}_1^* = (0,0932 + j \cdot 0,986) \text{ В};$$

$$\dot{U}_2^* = (0,0931 + j \cdot 0,9863) \text{ В};$$

$$\dot{U}_3^* = (0,0895 + j \cdot 0,9868) \text{ В};$$

$$\dot{U}_4^* = (0,0879 + j \cdot 0,9872) \text{ В};$$

$$\dot{U}_5^* = (0,0853 + j \cdot 0,9876) \text{ В};$$

$$\dot{U}_6^* = (0,0835 + j \cdot 0,9878) \text{ В};$$

$$\dot{U}_7^* = (0,0815 + j \cdot 0,988) \text{ В};$$

$$\dot{U}_8^* = (0,0796 + j \cdot 0,9882) \text{ В}.$$

За формулою (2.37) визначаємо відповідні значення результуючої вихідної напруги ВСП :

$$\dot{U}_1 = (0,0221 + j \cdot 0,2345) \text{ В};$$

$$\dot{U}_2 = (0,0217 + j \cdot 0,2346) \text{ В};$$

$$\dot{U}_3 = (0,0213 + j \cdot 0,2347) \text{ В};$$

$$\dot{U}_4 = (0,0209 + j \cdot 0,2348) \text{ В};$$

$$\dot{U}_5 = (0,0203 + j \cdot 0,2349) \text{ В};$$

$$\dot{U}_6 = (0,0198 + j \cdot 0,2350) \text{ В};$$

$$\dot{U}_7 = (0,0193 + j \cdot 0,23504) \text{ В};$$

$$\dot{U}_8 = (0,0189 + j \cdot 0,23508) \text{ В}.$$

Отримані значення вихідної напруги належать до комплексних чисел.

В такому разі здійснимо побудову двох характеристик: характеристики залежності амплітуди вихідної напруги від внутрішнього діаметра та характеристики залежності фази вихідної напруги від внутрішнього діаметра. Амплітуда та фаза вихідної напруги відповідно визначається з виразів :

$$|\dot{U}| = \sqrt{[\text{Re}(\dot{U})]^2 + [\text{Im}(\dot{U})]^2}, \quad (2.39)$$

$$\phi = \text{arctg} \frac{\text{Im}(\dot{U})}{\text{Re}(\dot{U})}, \quad (2.40)$$

де  $\text{Re}(\dot{U})$ ,  $\text{Im}(\dot{U})$  – відповідно дійсна та уявна частина вихідної напруги.

Отже,

$$\left| \dot{U}_1 \right| = 0,23553 \text{ В}; \quad \phi_1 = 84,61;$$

$$\left| \dot{U}_2 \right| = 0,23560 \text{ В}; \quad \phi_2 = 84,71;$$

$$\left| \dot{U}_3 \right| = 0,23566 \text{ В}; \quad \phi_3 = 84,81;$$

$$\left| \dot{U}_4 \right| = 0,23572 \text{ В}; \quad \phi_4 = 84,91;$$

$$\left| \dot{U}_5 \right| = 0,23577 \text{ В}; \quad \phi_5 = 85,06;$$

$$\left| \dot{U}_6 \right| = 0,23583 \text{ В}; \quad \phi_6 = 85,18;$$

$$\left| \dot{U}_7 \right| = 0,235831 \text{ В}; \quad \phi_7 = 85,3;$$

$$\left| \dot{U}_8 \right| = 0,2358838 \text{ В}; \quad \phi_8 = 85,4.$$

Визначаємо активний, індуктивний та повний опори вимірювальної та збуджувальної обмоток.

Активний опір котушки визначається за формулою:

$$R = \rho \cdot \frac{L}{S}, \quad (2.41)$$

де  $L$  - довжина дроту обмотки,  $S$  – площа попереднього січення дроту,  $\rho$  - питомий опір котушки.

$$L = W \cdot \pi \cdot D, \quad (2.42)$$

де  $D$  - діаметр дроту.

Підставляючи вирази (2.41) та (4.42) у формулу (2.40), отримаємо :

$$R = \frac{4 \cdot \rho \cdot W \cdot D}{d_0^2}. \quad (2.43)$$

Активний опір обмотки збудження становить :

$$R = 0,99 \text{ Ом.}$$

Активний опір вимірювальної обмотки становить :

$$R = 12,8 \text{ Ом.}$$

Індуктивний опір котушки визначається з виразу :

$$X_L = \omega \cdot L. \quad (2.44)$$

де  $L$  індуктивність котушки , яка для одношарової котушки становить:

$$L = \frac{0,01 \cdot D - W^2}{\frac{l}{D} + 0,44}, \text{ мкГн} \quad (2.45)$$

де  $W$  - кількість витків;  $l$  - довжина намотки, см;  $D$  - діаметр котушки , см;

Індуктивність збуджуючої обмотки :

$$L_3 = 153,5 \text{ мкГн.}$$

Індуктивність вимірювальної обмотки :

$$L_B = 212,7 \text{ мкГн.}$$

Індуктивний реактивний опір котушки збудження становить :

$$X_{L3} = 0,463 \text{ Ом.}$$

Індуктивний реактивний опір вимірювальної котушки :

$$X_{LB} = 0,641 \text{ Ом.}$$

Повний опір котушки визначається за формулою (для модуля) :

$$|R_{II}| = \sqrt{X_L^2 + R_2} \quad (2.46)$$

Повний опір збуджуючої обмотки (для модуля) :

$$|R_{I3}| = 1,09 \text{ Ом.}$$

Повний опір вимірювальної обмотки :

$$|R_{IB}| = 12,81 \text{ Ом.}$$

Повний опір збуджуючої обмотки :

$$R_{I3} = 0,463 \cdot j + 0,99 \text{ Ом.}$$

Повний опір вимірювальної обмотки :

$$R_{IB} = 12,8 + j \cdot 0,641 \text{ Ом}$$

### 2.6.3 Тепловий розрахунок вихрострумowego перетворювача

Температурний розрахунок перетворювача здійснюється з метою перевірки його температурного режиму (при відомому або заданому значенні робочого струму в обмотці котушки, при заданому допустимому потужно-температурному режимі роботи обмотки) [5].

З цією метою використовується формула :

$$Q = \frac{P}{\lambda \cdot S_{OX}} \leq [Q], \quad (2.47)$$

де  $Q, [Q]$  - робоча і максимально допустима температура обмотки котушки відповідно,  $^{\circ}C$ ;  $S_{OX}$  - площа поверхні охолодження обмотки,  $m^2$ ;  $P$  - розсіювана активна потужність електричного струму в обмотці, Вт;  $\lambda$  - коефіцієнт, що характеризує потужно - температурний режим роботи обмотки,  $\frac{Wm}{cm^2 \cdot ^{\circ}C}$ .

Тепловий розрахунок приведено для обмотки збудження як для більш теплонапруженої в перетворювачах електромагнітного контролю.

При знаходженні площі поверхні охолодження  $S_{OX}$  обмотки необхідно враховувати площу як внутрішньої так і зовнішньої  $S$  поверхні обмотки, тобто :

$$\begin{aligned} S_{OX} &= S_B + S, & (2.48) \\ S_B &= \pi \cdot D_0 \cdot l, \\ S_B &= 5,8 \cdot 10^{-3} m^2, \\ S_3 &= \pi \cdot l \cdot D_3, \end{aligned}$$

де  $D_3 = D_B + 2 \cdot d_0 + 2 \cdot h$ ,  $d_0$  - діаметр дроту;  $h$  - товщина ізоляційної прокладки.

Отже,  $D_3 = 23 \cdot 10^{-2} \text{ м}$ .

Звідси,  $S_3 = 6,35 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$ .

Отже,  $S_{OX} = 12,15 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$ .

Знайдене значення активного опору котушки становить  $R = 0,99 \text{ Ом}$ .

Визначаємо допустиме значення струму в обмотці за формулою :

$$I_{\text{дон}} = \sqrt{\frac{\lambda \cdot S_{OX} \cdot [Q]}{R}}. \quad (2.49)$$

Вибираємо значення  $\lambda = 10 \frac{\text{Вт}}{(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})}$ ,  $[Q] = 40^\circ\text{C}$ ;

Отже  $I_{\text{дон}} = 2,2 \text{ А}$ .

Для недопущення перегріву обмотки вибираємо робочий струм дещо нижчий за допустимий :  $I_{\text{роб}} = 1,5 \text{ А}$ .

Визначаємо робочу температуру обмотки котушки за формулою :

$$Q = \frac{I_{\text{роб}}^2 \cdot R}{\lambda \cdot S_{OX}}; \quad (2.50)$$

$Q = 18,3^\circ\text{C}$ .

При такій температурі обмотки котушки не відбувається її перегрів і це зумовлює нормальний режим роботи ВСП.

## 2.7 Аналіз напрямків оптимізації системи контролю

Для визначення напрямків оптимізації системи контролю необхідно проаналізувати який з методів виділення інформації забезпечить найкращу чутливість даного приладу, тобто можливість швидше і якісніше виявити внутрішній діаметр труби та відхилення від нього [6].

В даному випадку для оцінки параметрів об'єкті контролю застосовується амплітудний метод виділення інформації. При визначенні оптимальних умов контролю будь-якого параметру об'єкті контролю

необхідно знайти похідні даного вихідного сигналу по даному контрольованому параметру.

Аналіз напрямків оптимізації системи контролю будемо проводити наступним чином. Задамося декількома можливими значеннями внутрішнього діаметра труби (беремо 5 значень) і проаналізуємо зміну вихідного сигналу по амплітуді і по фазі, швидкість зміни вихідного сигналу при зміні значення внутрішнього діаметра труби. Аналіз проведитимемо для 3х різних значень частоти збуджень.

Задаємося різними значеннями внутрішнього діаметру труби :  $D_{21} = 31$  мм ,  $D_{22} = 29$  мм ,  $D_{23} = 27$  мм,  $D_{24} = 25$  мм,  $D_{25} = 23$  . Для того щоб визначити оптимальну колову частоту струму збудження розрахунок ведемо для трьох різних значень частоти :  $\omega_1 = 7 \text{крад}/\text{с}$  ,  $\omega_2 = 27,7 \text{крад}/\text{с}$  ,  $\omega_3 = 150 \text{крад}/\text{с}$  .

Роруховуємо узагальнені параметри для різних значень діаметра  $D_2$  при частоті  $\omega_1 = 7 \text{крад}/\text{с}$  за формулою (2.36) та (2.38) :

$x_{11} = 1,66;$	$\alpha_{21} = 0,96;$
$x_{12} = 1,56;$	$\alpha_{21} = 0,9;$
$x_{13} = 1,45;$	$\alpha_{21} = 0,84;$
$x_{14} = 1,34;$	$\alpha_{21} = 0,78;$
$x_{15} = 1,24;$	$\alpha_{21} = 0,71.$

При частоті  $\omega_2 = 27,7 \text{крад}/\text{с}$  :

$x_{21} = 3,3;$
$x_{22} = 3,1;$
$x_{23} = 2,9;$
$x_{24} = 2,6;$
$x_{25} = 2,4.$

При частоті  $\omega_3 = 150 \text{крад}/\text{с}$  :

$$x_{31} = 7,7;$$

$$x_{32} = 7,2;$$

$$x_{33} = 6,7;$$

$$x_{34} = 6,2;$$

$$x_{35} = 5,7.$$

За годографом визначаємо значення відносної вносимої напруги :

1) для частоти  $\omega_1 = 7 \text{ крад} / \text{с}$  :

$$\dot{U}_{вн1}^* = (0,06 - j \cdot 0,01) \text{ В};$$

$$\dot{U}_{вн2}^* = (0,12 - j \cdot 0,02) \text{ В};$$

$$\dot{U}_{вн3}^* = (0,185 - j \cdot 0,048) \text{ В};$$

$$\dot{U}_{вн4}^* = (0,24 - j \cdot 0,09) \text{ В};$$

$$\dot{U}_{вн5}^* = (0,28 - j \cdot 0,12) \text{ В}.$$

2) для частоти  $\omega_2 = 27,7 \text{ крад} / \text{с}$  :

$$\dot{U}_{вн1}^* = (0,2 - j \cdot 0,035) \text{ В};$$

$$\dot{U}_{вн2}^* = (0,39 - j \cdot 0,215) \text{ В};$$

$$\dot{U}_{вн3}^* = (0,44 - j \cdot 0,36) \text{ В};$$

$$\dot{U}_{вн4}^* = (0,425 - j \cdot 0,385) \text{ В};$$

$$\dot{U}_{вн5}^* = (0,385 - j \cdot 0,485) \text{ В}.$$

3) для частоти  $\omega_3 = 150 \text{ крад} / \text{с}$  :

$$\dot{U}_{вн1}^* = (0,49 - j \cdot 0,55) \text{ В};$$

$$\dot{U}_{вн2}^* = (0,29 - j \cdot 0,84) \text{ В};$$

$$\dot{U}_{вн3}^* = (0,29 - j \cdot 0,795) \text{ В};$$

$$\dot{U}_{вн4}^* = (0,21 - j \cdot 0,79) \text{ В};$$

$$\dot{U}_{вн5}^* = (0,19 - j \cdot 0,78) \text{ В}.$$

Використовуємо формули (2.36) – (2.38) , отримуємо значення відносної вихідної напруги :

Для частоти  $\omega_1 = 7 \text{ крад} / \text{с}$  :

$$\dot{U}_1 = (0,0331 + j \cdot 0,5466) \text{ В};$$

$$\dot{U}_2 = (0,0622 + j \cdot 0,541) \text{ В};$$

$$\dot{U}_3 = (0,1021 + j \cdot 0,5256) \text{ В};$$

$$\dot{U}_4 = (0,1325 + j \cdot 0,5024) \text{ В};$$

$$\dot{U}_5 = (0,1545 + j \cdot 0,4858) \text{ В}.$$

Для частоти  $\omega_2 = 27,7 \text{ крад} / \text{с}$  :

$$\dot{U}_1 = (0,4368 + j \cdot 2,1075) \text{ В};$$

$$\dot{U}_2 = (0,8517 + j \cdot 1,7144) \text{ В};$$

$$\dot{U}_3 = (0,9609 + j \cdot 1,3977) \text{ В};$$

$$\dot{U}_4 = (0,9282 + j \cdot 1,3431) \text{ В};$$

$$\dot{U}_5 = (0,8408 + j \cdot 1,1247) \text{ В}.$$

Для частоти  $\omega_3 = 150 \text{ крад} / \text{с}$  :

$$\dot{U}_1 = (30,772 + j \cdot 28,26) \text{ В};$$

$$\dot{U}_2 = (18,212 + j \cdot 10,048) \text{ В};$$

$$\dot{U}_3 = (18,212 + j \cdot 12,874) \text{ В};$$

$$\dot{U}_4 = (13,187 + j \cdot 13,188) \text{ В};$$

$$\dot{U}_5 = (11,932 + j \cdot 13,816) \text{ В}.$$

Відповідно амплітуда і фаза даних напруг становить :

Для частоти  $\omega_1 = 7 \text{ крад}/\text{с}$  :

$$\left| \dot{U}_1 \right| = 0,5476 \text{ В}; \quad \phi_1 = 86,53;$$

$$\left| \dot{U}_2 \right| = 0,545 \text{ В}; \quad \phi_2 = 83,02;$$

$$\left| \dot{U}_3 \right| = 0,535 \text{ В}; \quad \phi_3 = 79,0;$$

$$\left| \dot{U}_4 \right| = 0,519 \text{ В}; \quad \phi_4 = 75,2;$$

$$\left| \dot{U}_5 \right| = 0,5097 \text{ В}; \quad \phi_5 = 72,3.$$

Для частоти  $\omega_2 = 27,7 \text{ крад}/\text{с}$  :

$$\left| \dot{U}_1 \right| = 0,5476 \text{ В}; \quad \phi_1 = 78,29;$$

$$\left| \dot{U}_2 \right| = 0,545 \text{ В}; \quad \phi_2 = 63,58;$$

$$\left| \dot{U}_3 \right| = 0,535 \text{ В}; \quad \phi_3 = 55,49;$$

$$\left| \dot{U}_4 \right| = 0,519 \text{ В}; \quad \phi_4 = 55,35;$$

$$\left| \dot{U}_5 \right| = 0,5097 \text{ В}; \quad \phi_5 = 53,21.$$

Для частоти  $\omega_3 = 150 \text{ крад}/\text{с}$  :

$$\left| \dot{U}_1 \right| = 41,78 \text{ В}; \quad \phi_1 = 42,56;$$

$$\left| \dot{U}_2 \right| = 20,79 \text{ В}; \quad \phi_2 = 28,88;$$

$$\left| \dot{U}_3 \right| = 22,3 \text{ В}; \quad \phi_3 = 35,2;$$

$$\left| \dot{U}_4 \right| = 18,65 \text{ В}; \quad \phi_4 = 45;$$

$$\left| \dot{U}_5 \right| = 18,25 \text{ В}; \quad \phi_5 = 49,2.$$

Будуємо характеристики залежності амплітуди та фази відповідної напруги від внутрішнього діаметру труби для всіх трьох частот (рис. 2.9).

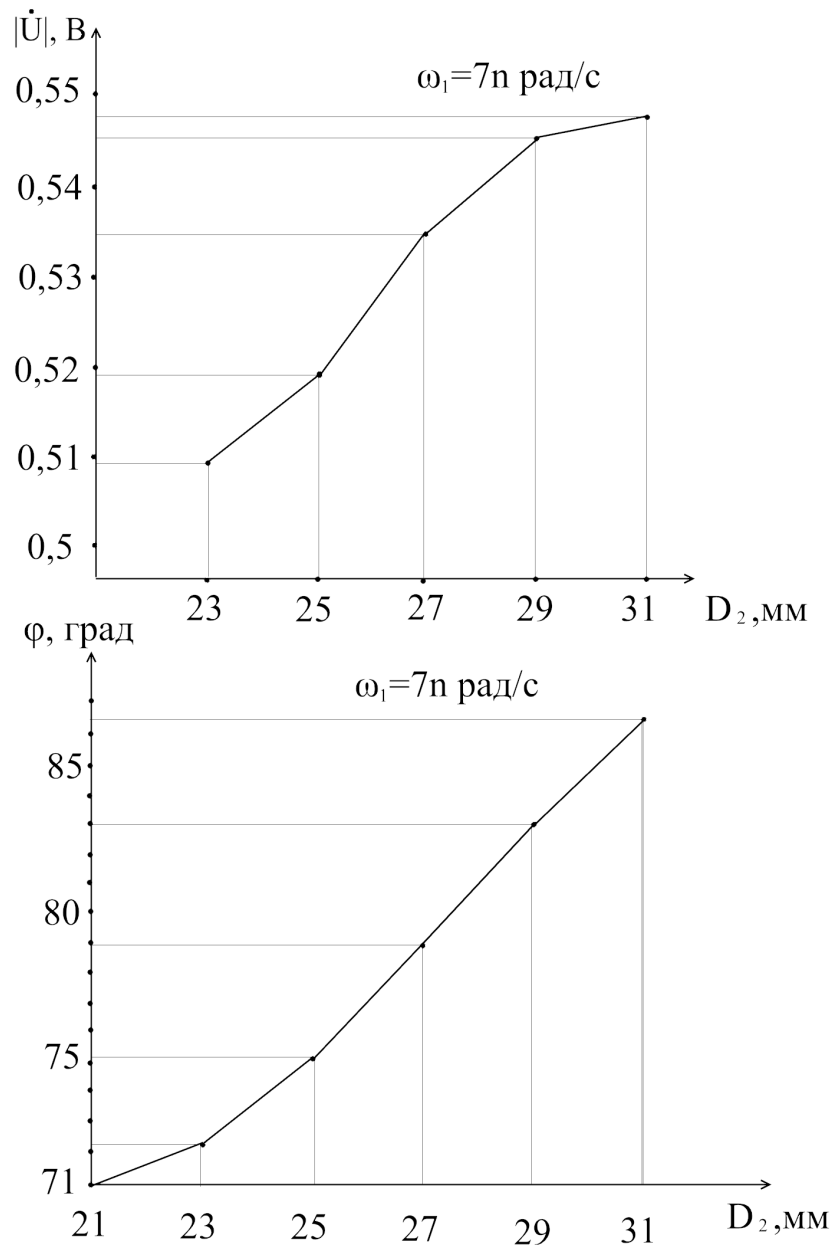


Рисунок 2.9 – Залежність амплітуди вихідної напруги (а) та фази (б) від значення внутрішнього діаметра при частоті  $\omega_1 = 7 \text{ крад/с}$ .

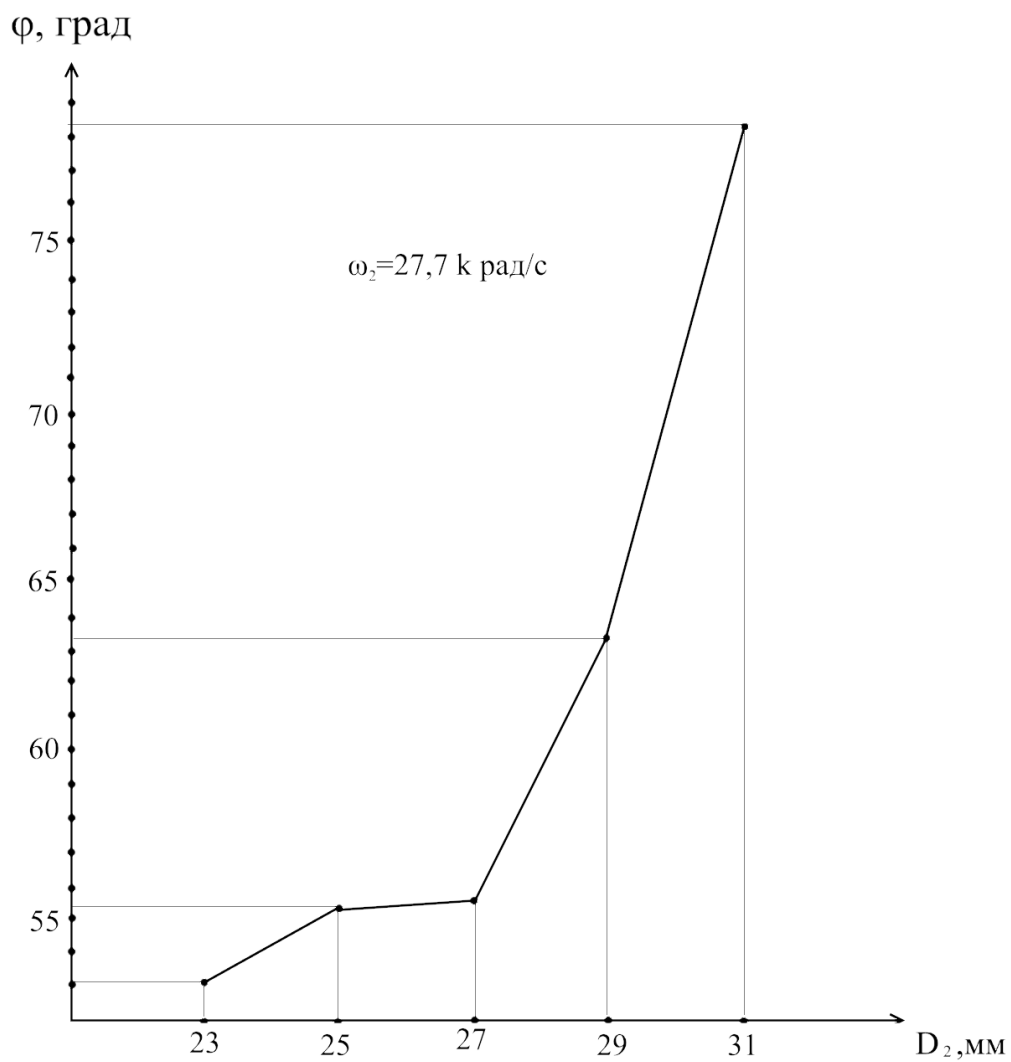
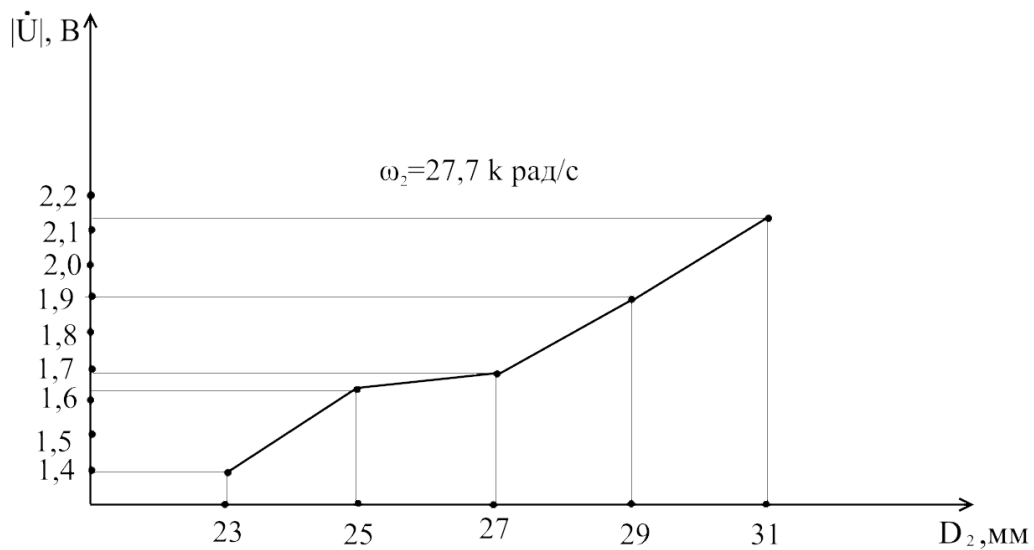


Рисунок 2.10 – Залежність амплітуди вихідної напруги (а) та фази (б) від значення внутрішнього діаметра при частоті  $\omega_1 = 27,7 \text{ крад/с}$

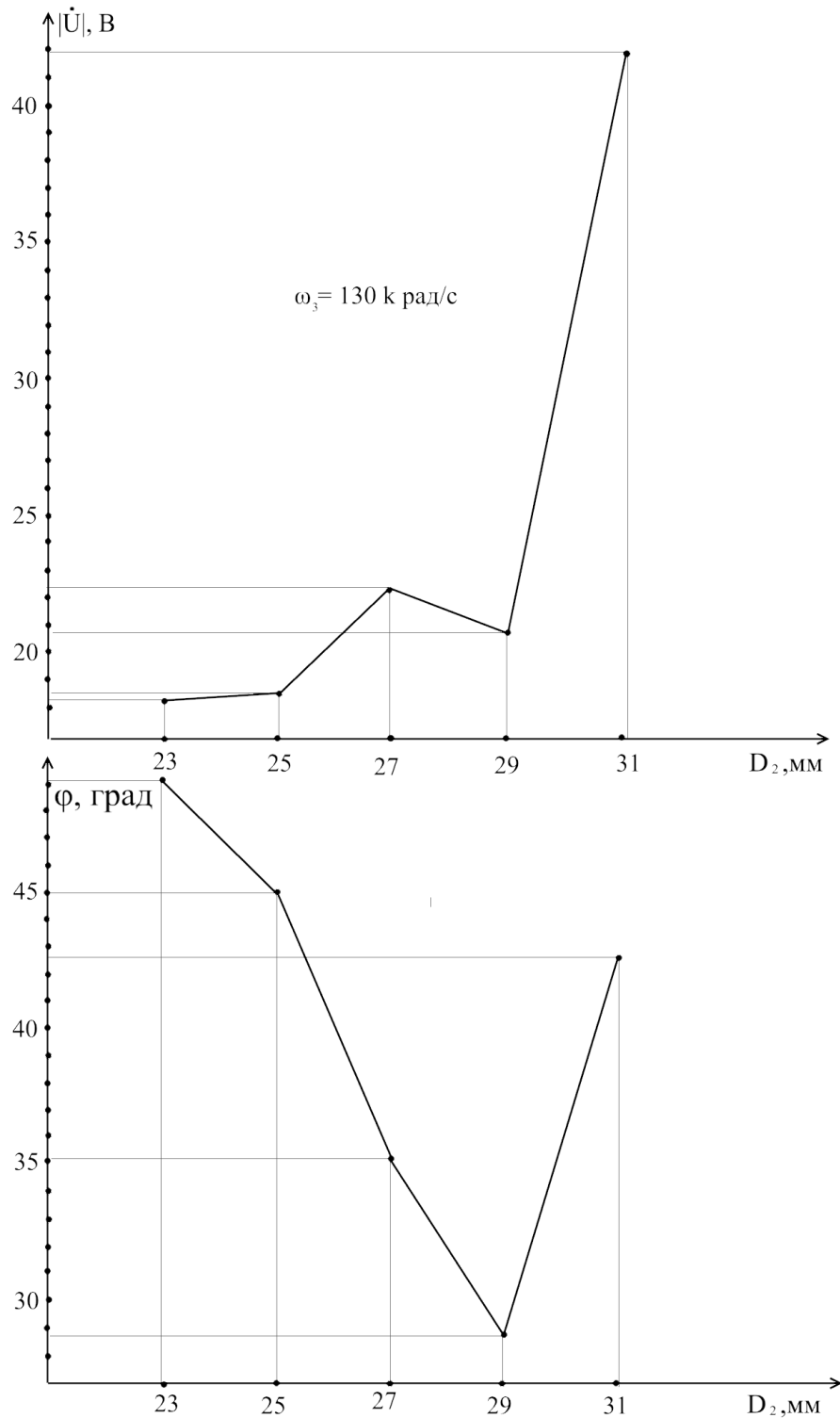


Рисунок 2.11 – Залежність амплітуди вихідної напруги (а) та фази (б) від значення внутрішнього діаметра при частоті  $\omega_3 = 150 \text{ крад/с}$ .

Як видно із залежностей, найкраще для контролю тонкостінних труб (коли  $D_2 \rightarrow D_1$ ) користуватися амплітудним методом виділення з частотою збудження  $150 \text{ крад/с}$  і фазовим методом виділення інформації при частоті  $27,7 \text{ крад/с}$ . В цих випадках чутливість системи контролю збільшується в декілька раз (рис. 2.9). Досить висока чутливість контролю тонкостінних труб фазовим методом виділення інформації при частоті струму збудження  $150 \text{ крад/с}$ . Тобто, бачимо для контролю тонкостінних труб можна використовувати обидва методи виділення інформації при досить високій частоті збудження.

Для контролю внутрішнього діаметра в широкому діапазоні доцільно користуватися фазовим методом виділення інформації з частотою збудження  $7 \text{ крад/с}$  (рис. 2.9.); так як ця характеристика має практично лінійний характер.

Робимо висновок, що контроль з дуже високою частотою збудження найкраще проводити виключно для тонкостінних труб. Для контролю діаметра в широкому діапазоні можна використати частоту збудження рівну  $7 \text{ крад/с}$ .

Розрахункові значення чутливості ( $S_{R2} = \frac{\Delta | \dot{U} |}{\Delta D_2}$ ).

При амплітудному методі виділення інформації :

1) для частоти збудження  $\omega_1 = 7 \text{ крад/с}$  :

$$S_{R2(1)} = 0,0049 \cdot \frac{B}{\text{мм}} ;$$

$$S_{R2(2)} = 0,0077 \cdot \frac{B}{\text{мм}} ;$$

$$S_{R2(3)} = 0,005 \cdot B / \text{мм};$$

$$S_{R2(4)} = 0,0013 \cdot B / \text{мм}.$$

2) для частоти збудження  $\omega_2 = 27,7 \text{ крад} / \text{с}$  :

$$S_{R2(1)} = 0,115 \cdot B / \text{мм};$$

$$S_{R2(2)} = 0,03 \cdot B / \text{мм};$$

$$S_{R2(3)} = 0,11 \cdot B / \text{мм};$$

$$S_{R2(4)} = 0,12 \cdot B / \text{мм}.$$

3) для частоти збудження  $\omega_3 = 150 \text{ крад} / \text{с}$  :

$$S_{R2(1)} = 0,2 \cdot B / \text{мм};$$

$$S_{R2(2)} = 1,82 \cdot B / \text{мм};$$

$$S_{R2(3)} = -0,75 \cdot B / \text{мм};$$

$$S_{R2(4)} = 0,5 \cdot B / \text{мм}.$$

При фазовому методі виділення інформації ( $S_{R2} = \frac{\Delta | \dot{U} |}{\Delta U_2}$ )

1) для частоти збудження  $\omega_1 = 7 \text{ крад} / \text{с}$  :

$$S_{R2(1)} = 0,1 \cdot B / \text{мм};$$

$$S_{R2(2)} = 1,9 \cdot B / \text{мм};$$

$$S_{R2(3)} = 2,1 \cdot B / \text{мм};$$

$$S_{R2(4)} = 1,75 \cdot B / \text{мм}.$$

2) для частоти збудження  $\omega_2 = 27,7 \text{ крад} / \text{с}$  :

$$S_{R2(1)} = 1,07 \cdot B / \text{мм};$$

$$S_{R2(2)} = 0,07 \cdot B / \text{мм};$$

$$S_{R2(3)} = 4,4 \cdot B / \text{мм};$$

$$S_{R2(4)} = 7,35 \cdot B / \text{мм}.$$

3) для частоти збудження  $\omega_3 = 150 \text{ крад} / \text{с}$  :

$$S_{R2(1)} = -2,1 \cdot B / \text{мм};$$

$$S_{R2(2)} = -4,9 \cdot B / \text{мм};$$

$$S_{R2(3)} = -3,16 \cdot B / \text{мм};$$

$$S_{R2(4)} = 6,84 \cdot B / \text{мм}.$$

## 2.8 Розрахунок генератора

Розглянемо склад схеми та призначення елементів. VT1 - біполярний транзистор - підсилюючий елемент. Rн- навантаження, на якому виділяється підсилений сигнал. Як - колекторне навантаження, транзистора за постійним струмом. Ек -джерело живлення каскаду (колекторного кола) [18].

Зазначимо: VT1 разом із Rк і Ек утворюють головне коло підсилювача, у якому здійснюється підсилення сигналу. Решта елементів схеми виконують допоміжну роль.

Так, дільник напруги R1, R2 задає режим спокою класу А, подаючи на вхід каскаду постійну напругу Ud. Ре Се- забезпечують температурну стабілізацію режиму спокою. С1,С2 -розділяючі конденсатори: С1 виключає потрапляння постійної напруги Ud на джерело вхідного сигналу; С2 виключає потрапляння постійної напруги на колекторі Uок на навантаження (конденсатори розділяють ланцюги за постійним струмом і з'єднують за змінним).

Вхідний сигнал, що підлягає підсиленню, подається на клема (1)-(2):  
Едж -джерело вхідного сигналу;  $R_{дж}$  — його внутрішній опір.

Для цієї схеми необхідно дотримуватись таких співвідношень:

$$\frac{1}{\omega_n C1} \ll R_{ex} \quad (2.51)$$

$$\frac{1}{\omega_n C2} \ll R_n \quad (2.52)$$

$$\frac{1}{\omega_n C_e} \ll R_e \quad (2.53)$$

де  $\omega$  - нижня межа діапазону частот підсилюваного сигналу. Навантаження каскаду за змінним струмом:

$$R_n = \frac{R_n R_k}{R_n + R_k} \quad (2.54)$$

RC- ланка служить для обертання фази на певний кут.

Подільник забезпечує розподіл напруги на відповідні діапазони : 0 - 5 В, 0 -0,5 В, 0 - 0,05 В, 0 - 0,005 В. Далі сигнал потрапляє на підсилювач з спільним колектором. Після підсилювача стоїть атенюатор синусоїдального сигналу, що дозволяє зменшувати амплітуду і подається на двотактний підсилювач на транзисторах різного типу провідності, який працює в режимі класу В. Він служить для підсилення потужності вихідного сигналу.

### 2.8.1 Розрахунок принципової схеми

Розрахунок RC ланки [14].

Вихідні дані:  $R_{вх}=5$  кОм,  $R=4$  кОм,  $f=20000$  Гц, отже

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R4} = \frac{1}{R_{ex}}; \quad (2.55)$$

$R4 = R5 = R8 = R9 = 20$  кОм,

$$f = \frac{\sqrt{70}}{10 \cdot 2\pi RC}; \quad (2.56)$$

$$C = \frac{\sqrt{70}}{2\pi fR \cdot 10}; \quad (2.57)$$

$$C1=C4=C5=C7=13.3 \cdot 10^{-9} \Phi;$$

### 2.8.2 Розрахунок ступінчастого подільника напруги

Для того, щоб здійснити розрахунок подільника нам необхідно обрахувати значення опорів R10, R11, R12, R13, R14, R15, R16, R17, при R16=R14=R12=R10=1 кОм, U<sub>1</sub>=0.005В, U<sub>2</sub>=0.05В, U<sub>3</sub>=0.5В, U<sub>4</sub>=5В.

Розрахунок опора R17:

$$I_{R17} = \frac{U_2 - U_1}{R16} = 0,000045 \text{ A}$$

$$R17 = \frac{U_1}{I_{17}} = \frac{0,005}{0,000045} = 111,1 \text{ Ом}$$

Опору R15 .

$$I_{R14} = \frac{U_3 - U_2}{R14} = \frac{0,45}{1000} = 0,00045 \text{ A}$$

$$I_{R15} = I_{R14} - I_{R17} = 0.00045 - 0.000045 = 0.000405 \text{ A}$$

$$R15 = \frac{U_2}{I_{R15}} = \frac{0,05}{0,00045} = 123,5 \text{ Ом}$$

Опору R13

$$I_{R12} = \frac{U_4 - U_3}{R12} = 0,0045 \text{ A}$$

$$I_{R13} = I_{R12} - I_{R14} = 0.00405 \text{ A}$$

$$R13 = \frac{U_3}{I_{R13}} = 123,5 \text{ Ом}$$

$$R11 = R13 = R15 = R17 = 123.5 \text{ Ом}$$

Знайдемо еквівалентний опір подільника:

$$R_{\text{екв.под}} = R10 + R12 + R14 + R16 + 1/R11 + 1/R13 + 1/R15 + 1/R17 = 4 \text{ кОм}$$

### 2.8.3 Розрахунок підсилювача з спільним емітером [14].

Вихідні дані: амплітудне значення напруги на виході каскаду  $U_{\text{вих.}} = 7,1$  В; напруга джерела живлення  $E_K = 25$  В; нижня межа частот  $f_H = 50$  Гц;

Розрахунок:

1) допустима напруга між колектором та емітером повинна перевищувати напругу джерела живлення

$$U_{K_{\text{max}}} > E_K \quad (2.58)$$

2) значення струму у величина допустимого струму колектора повинна перевищувати максимальне колекторному колі транзистора

$$I_{K_{\text{max}}} = I_{\text{ок}} + I_{\text{км}} \quad (2.59)$$

де  $I_{\text{ок}}$  - струм спокою у колі колектора;  $I_{\text{км}}$  - амплітуда змінної складової струму у колі колектора;

$$I_{\text{км}} = U_{\text{ВИХ.Т}} / R_{\text{н}\sim} \quad (2.60)$$

$$R_{\text{н}\sim} = R_{\text{н}} - R_3 / R_{\text{н}} + R_3 \quad (2.61)$$

$R_{\text{н}\sim}$  - еквівалентний опір навантаження каскаду за змінним струмом. При цьому  $R_3$  є навантаженням за постійним струмом.

$$R_{\text{еквRC}} = \sqrt{X_C^2 + R_3^2} \quad (2.62)$$

$$X_C = \frac{1}{\omega C} \quad (2.63)$$

$$\omega = 2\pi f \quad (2.64)$$

$R_{\text{ЕКВ. RC}} = 240$  кОм  $R_{\text{н}} = 3,934$  Ом  $R_3 = 4$  кОм. де  $X_C$  - ємнісний опір,  $\omega$  - кутова частота.

Виходячи з того, що даний каскад є підсилювачем потужності, для забезпечення максимальної передачі потужності задаємо:  $R_6 = R_{\text{н}}$ .

Тобто  $R_6 = 4$  кОм.

$$R_{H\sim} = (4-4)/(4+4)$$

$$R_{H\sim} = 2 \text{ кОм.}$$

$$I_{K\text{м}} = 7,1/2000 = 0,00355 \text{ А}$$

Для забезпечення економічності каскаду за мінімальних нелінійних викривлень обирають

$$I_{0K} = (1,05 \dots 1,1) \cdot I_{K\text{м}} = 0,0039 \text{ А.} \quad (2.65)$$

Знаходимо напругу між колектором та емітером транзистора у режимі спокою:

$$U_{0K} = U_{\text{ВИХ. м}^+} + U_{\text{ОСМ}}, \quad (2.66)$$

де  $U_{\text{ОСМ}}$  - напруга між колектором та емітером, нижче якої при роботі каскаду виникають значні нелінійні викривлення через те, що у робочу зону потрапляють ділянки характеристик транзистора зі значною кривизною. Для малопотужних транзисторів, як правило, задають  $U_{\text{ОСМ}} = 1 \text{ В}$ . Тоді

$$U_{0K} = 7,1 + 1 = 8,1 \text{ В}$$

Знаходимо потужність, що виділяється на колекторі транзистора:

$$P_K = I_{0K} \cdot U_{0K} = 0,032 \text{ Вт.}$$

Знаходимо опір навантаження у колі колектора.

$$R_3 = 4 \text{ кОм}$$

Потужність, що розсіюється в резисторі:

$$P = I^2 R \quad (2.67)$$

Отже  $P_{R_6} = I_{0K}^2 R_6 = (0,0039)^2 \cdot 4000 = 0,062 \text{ Вт}$ . Знаходимо опір резистора  $R_4$  у колі термостабілізації:

$$R_4 = \frac{E_K - U_{0K}}{I_{0K}} = 347 \text{ Ом} \quad (2.68)$$

Потужність, що розсіюється в  $R_4$

$$P_{R_4} = I_{0K}^2 \cdot R_4 = (0,0039)^2 \cdot 350 = 5,4 \cdot 10^{-3} \text{ Вт.} \quad (2.69)$$

Знаходимо ємність конденсатора  $C_3$ , що шунтує  $R_4$  на частоті  $f_H$

$$C_3 = \frac{10^6}{2\pi f_H \cdot 0,1 \cdot R_H} \quad (2.70)$$

$$C6 = \frac{10^6}{2\pi \cdot 50 \cdot 0,1 \cdot 4000} = 8,09 \text{ мкФ}$$

де множник  $10^6$  дозволяє отримувати значення ємності у мікрофарадах

$$U_{C6} = I_{0K} \cdot R4 = 0,0039 \cdot 350 = 1.37 \text{ В.} \quad (2.71)$$

Знаходимо величину струму спокою бази транзистора:

$$I_{0B} = I_{0K} / h_{21} \cdot E_{\min} \quad (2.72)$$

$$I_{0B} = 0,0039 / 50 = 7.9 \cdot 10^{-5} \text{ А}$$

Оскільки у відкритому стані транзистора напруга між його базою та емітером становить близько 0,6 В, то напруга спокою бази -  $U_{0B} = 0,6 \text{ В}$

Знаходимо величини опорів резисторів дільника R1, R2. Дільник під'єднано до напруги.

$$U_D = E_K = 30 \text{ В.}$$

Величина струму в дільнику вибирається у межах:

$$I_D = (2 \dots 5) I_{0B}, \quad (2.73)$$

що забезпечує незалежність задання режиму спокою транзистора при зміні його параметрів під впливом температури, при заміні на інший і т.п.

$I_D = 5 \cdot 7.9 \cdot 10^{-5} = 1,582 \cdot 10^{-4} \text{ А}$  Падіння напруги на резисторі R4 складає:

$$U_{R4} = (I_{0K} + I_{0B}) R4 \quad (2.74)$$

$$U_{R4} = (0,0039 + 7.9 \cdot 10^{-5}) 350 = 1.4 \text{ В}$$

Тоді

$$R1 = \frac{U_D - U_{R4} - U_{0B}}{I_{0B} + I_D} = 9,894 \cdot 10^4 = 100 \text{ кОм}$$

$$R1 = \frac{U_{R4} + U_{0B}}{I_D} = 1,264 \cdot 10^4 = 13 \text{ кОм}$$

$$P_{R1} = (I_{0B} + I_D)^2 \cdot R = 5.457 \cdot 10^{-3} \quad (2.75)$$

$$P_{R2} = (I_D^2 \cdot R2) = 3.164 \cdot 10^{-4} \quad (2.76)$$

Знаходимо ємність конденсатора C2:

$$C6 = \frac{10^6}{2\pi f_n \cdot 0,1 \cdot (R_{n\sim} + R_n)}$$

$$C6 = \frac{10^6}{2\pi \cdot 50 \cdot 0,1 \cdot (2000 + 4000)} = 0,539 \text{ мкФ}$$

$$U_{C2} = 1,5 \cdot E_K = 1,5 \cdot 25 = 37,5 \text{ В} \quad (2.77)$$

$$C1 = \frac{10^6}{2\pi f_n \cdot 0,1 \cdot R_{H1}}$$

$$R_{H1} = (R_{2,3} R_T) / (R_{2,3} + R_T) \quad (2.78)$$

$R_{H1}$  еквівалентний опір навантаження опорів  $R_2, R_3$  і транзистора VT2

$$R_{2,3} = (R_2 \cdot R_3) / (R_2 + R_3) = 11,5 \text{ кОм} \quad (2.79)$$

$$R_T = 1,2 \text{ кОм}$$

$$R_{H1} = 1,1 \text{ кОм}$$

$$C1 = \frac{10^6}{2\pi f_n \cdot 0,1 \cdot 1100} = 2,894 \text{ мкФ}$$

### 3. КОНСТРУЮВАННЯ І МЕТРОЛОГІЧНИЙ АНАЛІЗ ПРИСТРОЮ КОНТРОЛЮ ГЕОМЕТРИЧНИХ РОЗМІРІВ ТРУБ

#### 3.1 Конструювання вихрострумowego первинного перетворювача

Конструкція ВСП формується принципами призначення приладу і алгоритмом опрацювання інформації про параметри об'єкту контролю [13].

При конструюванні перетворювача слід враховувати умови праці, зручність у використанні а також економність, естетику, тобто зовнішній вигляд перетворювача.

На приведеному ескізі перетворювача одношарова вимірювальна обмотка 8. довжиною 10 мм намотана на діелектричний корпус 1. Діаметр дроту вимірювальної обмотки 0.1 мм. Поверх неї нанесено ізоляційна діелектрична плівка товщиною 0.5 мм. Збуджуюча обмотка 7 намотана так як це вказано на ескізі. Довжина збуджуючої обмотки  $L_3 = 88$  мм, її діаметр  $D_3 = 22$  мм. Поверх збуджуючої обмотки наносять ізоляційну плівку 3 товщиною 0.5 мм і заливають її компаундом.

Рух ВСП по трубі під час контролю здійснюється за допомогою центруючих роликів 2. (по 4 ролики кріпляться на задній і передній частині ВСП). Вони розміщені у спеціальних вирізах у діелектричному каркасі і кріпляться до нього за допомогою осей 4. Діаметр роликів становить  $d_p = 6$  мм, ширина 1 мм.

Отже, загальна довжина перетворювача складає  $L = 100$  мм. Для здійснення зворотньо- поступального руху ВСП у трубі до його задньої поверхні кріпиться діелектричний стержень 10. круглого січення діаметра 4мм. Кінець стержня може кріпитися до рухомої частини механізму, який здійснюватиме контроль автоматично, без участі оператора.

З корпуса вихрострумowego перетворювача виходять 4 виводи, об'єднані коаксіальним кабелем 9 для забезпечення ізоляції. Кабель закінчується роз'ємом типу СНП – 10.

На ескізі ВСП зображений в поєднанні з об'єктом контролю. За межами перетворювача знаходиться зворотньо – поступальний механізм, який здійснює рух ВСП по трубі.

Даний перетворювач зображено з двох проєкцій з дотриманням основних вимог до його виготовлення.

### **3.2 Метрологічний аналіз пристрою контролю геометричних розмірів труб**

Досвід показує, що рішення більшості завдань, пов'язаних з машинним проектуванням, технологією, експериментом, як у наукових дослідженнях, так і на виробництві сполучено з більшими зусиллями по обґрунтуванню вірогідності інформації, точності вимірів і поданні правильності отриманих результатів. Все це змушує приділяти велику увагу прикладної метрології, що представляє собою науково-технічну дисципліну, що опирається на фундаментальну метрологію, приладобудування й комплекс практичних заходів щодо метрологічного забезпечення [16].

Техніка нерозривно пов'язана з експериментом: дослідницьким, виробничим (переважно технологічним) і контрольним для визначення якості продукції. Кожний вив експерименту вимагає застосування певних правил і технічних засобів. У результаті експерименту одержують інформацію, що використовується для прийняття організаційно-технічних рішень по керуванню технологічними процесами, машинами, складними системами й т. п. Аналіз виробництва показує, що в цей час виникла необхідність перегляду прийомів метрологічного забезпечення, уточнення основних понять метрології й розгляди метрології як науково-технічної дисципліни. В отримані об'єктивної вимірювальної інформації, що забезпечує вірогідність і порівнянність виконуваних вимірів, вироблених у різних умовах і розосереджених у просторі й часі, вирішує наука, називана метрологією. Головним у метрології є розробка методів і засобів, що забезпечують єдність

і визначальну точність операцій вимірів. При цьому операція виміру, що вважається основної (єдиної) серед всіх інформаційно-пізнавальних операцій, повинна бути доповнена операціями контролю й випробувань. Наслідку, що впливають із закону розвитку науки, свідчать про залежності темпів наукового й технічного розвитку від прогресу в області вимірів. Багато навчань указували на необхідність введення міри, у якій «з'єднані абстрактно виражені якість і кількість» [19].

У сучасних умовах метрологічне забезпечення придбало від науково-технічної й організаційної діяльності наукових установ і виробничих; підприємств, адміністративних органів і окремих фахівців, спрямованої на досягнення єдності й необхідної точності: вимірів – контролю й випробувань, підтримка парку контрольовано-вимірювальних засобів, засобів наукового приладобудування й технологічного встаткування у виправленому стані [10].

Метрологічне забезпечення регламентується ДСТУ, декретами й законами України, міжнародними угодами. Метрологічне забезпечення можна тлумачити як у широкому, так і у вузькому змісті відбиваючи наукову й практичну частини метрології. У широкому змісті метрологічне забезпечення розглядається як область, що охоплює теорію, методи, засоби й організаційні правила забезпечення єдності й точності вимірів, контролю й випробувань із метою забезпечення високої ефективності виробництва, експлуатації технічних об'єктів і вірогідності наукового експерименту [15].

Нормативно-правовою основою метрологічного забезпечення досліджень, виробництва й експлуатації всіх видів техніки, засобів вимірів і контролю служать стандарти, що встановлюють систему одиниць фізичних величин, метрологічні характеристики, єдині методи вимірів, контролю й випробувань [16].

Практичною основою метрологічного аналізу опосередкованого методу вимірювань геометричних розмірів трубних виробів є застосування відомих методологічних підходів, які визначають технічні характеристики розроблюваних систем контролю у поєднанні з метрологічними параметрами

тому основною метрологічною характеристикою при визначенні геометричних розмірів труб є похибка. Вона може бути виражена в абсолютних і відносних одиницях. Оскільки абсолютна похибка характеризує метрологічно точність кожного окремого вимірювання, то для оцінювання метрологічних характеристик приладів використовується відносна похибка. Ця похибка дає можливість у відсотках оцінити точність вимірювання конкретного параметра, який передбачається вимірюванням певною інформаційно-вимірювальною системою.

Розроблений пристрій вимірювання геометричних розмірів труби буде характеризуватися складовими різних видів похибок. Найбільш суттєвий поділ згідно основних принципів метрології будемо вважати таким, що стосується методичної та інструментальної похибки [10]. Методична похибка залежить від факторів і взаємодії параметрів, які формуються методичними складовими вимірювання. Такими факторами є найважливіший вплив від точності використання і побудови годографа, який формує кількісний зв'язок між геометричними розмірами труби і вихідним сигналом перетворювача. Кількісно ця похибка повинна подаватися у спеціалізованих довідниках з неруйнівного контролю, але про неї в них нічого не повідомляється. Тому це значення похибки на стадії проектування можна вибрати в межах 0,2-0,4%, а далі за результатами метрологічних досліджень створеного вимірювального засобу можна оцінювати її конкретне кількісне значення.

Другою складовою методичної похибки можна розглядати вплив супутніх факторів, які можуть методично вплинути на результати вимірювань. Такими факторами може бути вплив форми об'єкта контролю, тобто відхилення контрольованого об'єкта від циліндричності труби. Методично на результат також впливає зміна шорсткості поверхні об'єкта контролю яку необхідно вибирати при розробці вимірювача. Також на результати контролю методично впливає зміна матеріалу труби, бо ці параметри приводять до зміни узагальненого параметра і як наслідок до зміни інформативного сигналу. Ще однією складовою методичної похибки є

зміна температури об'єкта контролю, що може привести також до зміни геометричних розмірів як труби так і обмоток вихрострумowego перетворювача.

Друга складова похибки вимірювача є інструментальною. На неї впливають метрологічні характеристики використовуваних вимірювальних і перетворювальних вузлів вимірювача. На сам перед це є похибка вимірювання числового значення напруги вихідного сигналу вихрострумowego перетворювача. Оскільки ця напруга по різному може бути визначена згідно алгоритму отримання вихідного сигналу, то враховуючи що при формуванні вихідного сигналу здійснюється компенсація напруги холостого ходу, необхідно враховувати як інструментальну похибку системи обробки інформації. Остання в свою чергу складається із двох компонентів: похибка алгоритму обробки вихідного сигналу і похибки вимірювання напруги холостого ходу яка, формує вимірювальний вихідний сигнал.

При експериментальній оцінці похибки розробленого вимірювача використовують еталонні зразки які дозволяють в практичних умовах визначити похибку розробленого вимірювача. Але похибка еталонного зразка також має місце, бо еталонний зразок хоча і можна розглядати як результат істинного вимірювання, однак її необхідно враховувати при оцінюванні похибки розроблюваного вимірювача [1].

Охарактеризовані складові похибок розроблюваного вимірювача можна сформуванати у його метрологічну модель, графічне подання якої наведено на рисунку 3.1

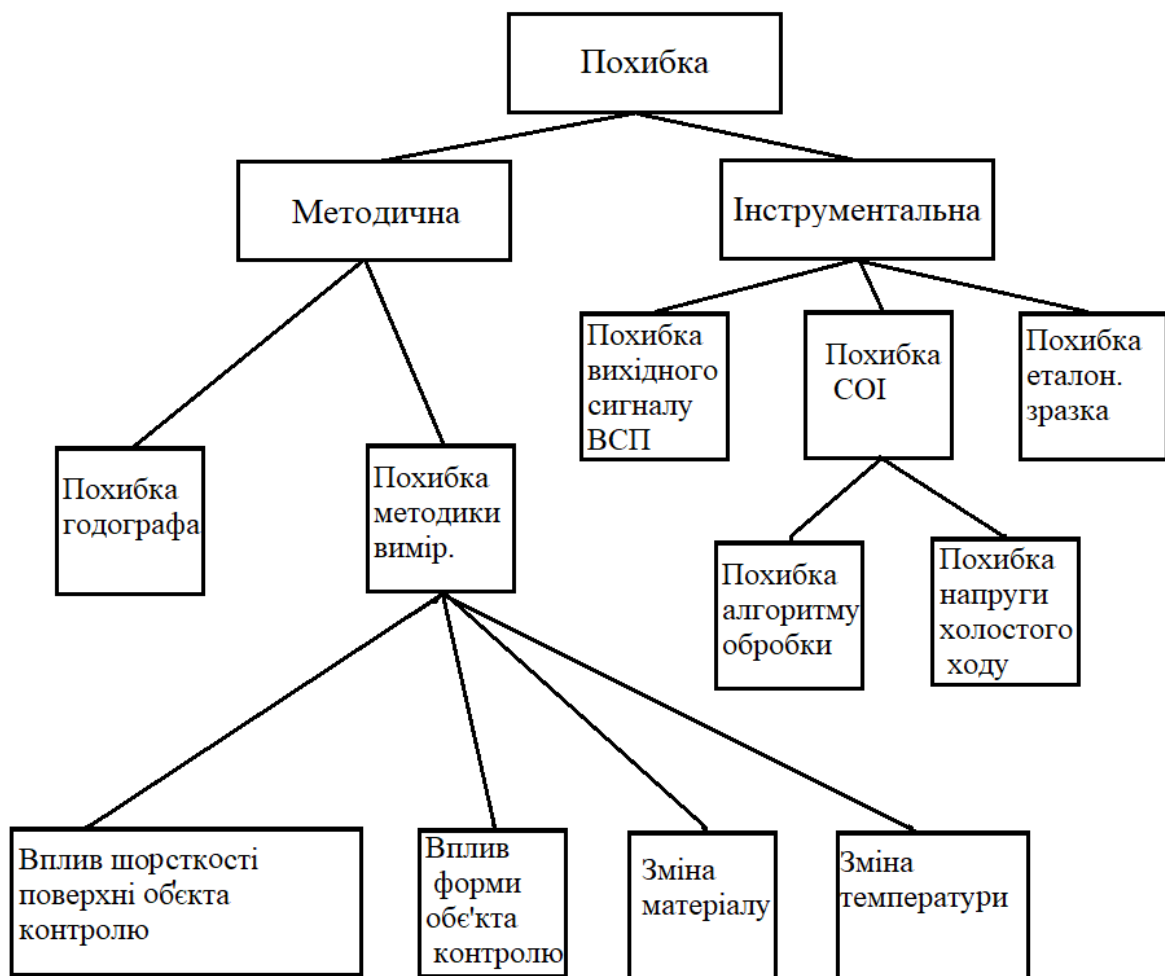


Рисунок 3.1 – Метрологічна модель вихрострумовеого вимірювача

## 4 ОСНОВИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ БЕЗПЕЧНОЇ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ПРИСТРОЮ ДЛЯ ВИХРОСТРУМОВОГО ВИМІРЮВАННЯ ГЕОМЕТРИЧНИХ РОЗМІРІВ ТРУБ

### 4.1 Забезпечення безпечних і здорових умов праці

Відповідно до чинного законодавства в нашій країні про охорону праці, технічні умови та умови праці на робочому місці повинні відповідати правилам і нормам охорони праці. Тому правила і норми охорони праці є основними критеріями оцінки праці з метою створення здорових і безпечних умов праці.

У процесі праці людина взаємодіє з знаряддями праці, різними особливостями виробництва, іншими людьми. Крім того, на неї впливають різні фактори виробничого середовища, в якому виконується робота (температура, вологість, шкідливі речовини, рух повітря, шум, різні випромінювання тощо). Все це разом характеризує умови праці. Безпосередньо при розробленні, експлуатації та налаштуванні пристрою для вихрострумове вимірювання геометричних розмірів труб може виникнути ряд небезпечних факторів, які приводять до виробничого травматизму. Приведемо розподіл за характером травм у приладобудівній галузі (в % від загального числа нещасних випадків за 2009-2014 р.) на рисунку 4.1.

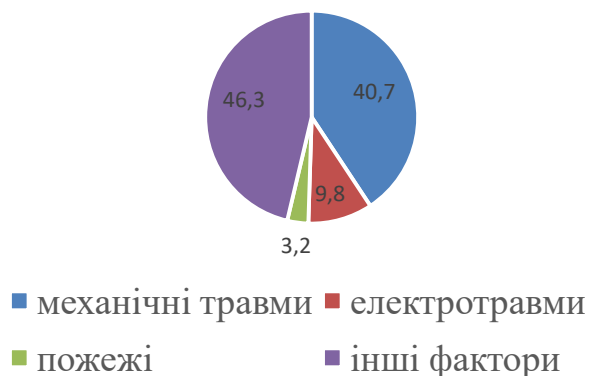


Рисунок 4.1 - Розподіл за характером травм у приладобудівній галузі  
(у % від загального числа нещасних випадків)

Виробничі фактори, що викликають механічне пошкодження, можна розбити в такому порядку: обладнання, інструменти, транспортні засоби, падаючі предмети, падіння з висоти. Усі працівники на заводах і лабораторіях приладобудівної галузі повинні знати законодавство про охорону праці, правила техніки безпеки та пожежної безпеки, виробничої гігієни, вони повинні створювати і підтримувати безпечні та здорові умови праці, проводити профілактичні роботи з усунення причин нещасних випадків. , вибухи та пожежі .

Стан природного середовища людини є однією з найактуальніших глобальних проблем сучасності. Природа - це цілісна система з великою кількістю збалансованих зв'язків. Невідповідність цих зв'язків призвела до змін у кругообігу матерії та енергії, які встановилися в природі роками.

Розквіт індустрії спричинив важкі порушення в обігу таких речовин, як сірка, двоокис вуглецю, азот та інших. В даний час через велику кількість відходів промислового походження порушуються умови, які дозволяли природі у минулі часи успішно справлятися з утилізацією відходів з допомогою бактерій.

## **4.2 Аналіз потенційних небезпек і шкідливості виробничого середовища**

До шкідливих виробничих факторів при розробленні, експлуатації та налаштуванні пристрою для вихрострумового вимірювання геометричних розмірів труб можна віднести:

- підвищена або понижена вологість, температура повітря;
- недостатність або нерівномірність освітлення та ін.

В таблиці 4.1 наведені допустимі значення небезпечних виробничих факторів при використанні розробленого приладу.

Таблиця 4.1 – Потенційно небезпечні виробничі фактори при використанні приладу для вимірювання геометричних розмірів труб

Джерело небезпек	Небезпечний фактор	Фактичне значення	Нормативне значення	Характер дії
Прилад для вимірювання геометричних розмірів труб	Шум	L=96дБ f <sub>с.Т</sub> = 125 Гц	L=74дБ f <sub>с.Т</sub> =125 Гц	Роздратування, втома, втрата слуху
	електричний струм	U=220В I=10А f=50Гц	U<42 В I<0,05А f=50Гц	Електротравми різного ступеня

#### 4.3 Забезпечення нормальних умов праці виробничого середовища

У виробничому середовищі, необхідні метеорологічні особливості які відображаються такими параметрами як температурою, вологістю, швидкістю руху повітря на робочих, і являються важливими для санітарно-гігієнічних характеристик виробничих процесів. Оптимальні значення метеорологічних умов у різних зонах виробничих приміщень представлені у таблиці. 4.2 [20].

Таблиця 4.2 - Оптимальні значення сприятливих метеорологічних умов в робочих зонах лабораторії

Виробниче приміщення	Категорія важкості робіт	Період року	Температура, град С	Відносна вологість	Швидкість руху повітря, м/с
Лабораторія	I а - легка	холодний	21-23	40-60	0,1
		теплий	22-24	40-60	0,2

При проектуванні виробничих приміщень необхідно враховувати санітарні норми для необхідних виробничих процесів, і дотримуватися певних норм щодо корисної площі для робітників, а також певних нормативів до площ для розміщення виробничого обладнання і необхідну ширину для проходів, які забезпечують безпечну роботу і зручне обслуговування обладнання дані санітарні вимоги до будівель представлені в [21].

Необхідний Об'єм для виробничого приміщення де виконується розроблення та налаштування пристрою для вихрострумового вимірювання геометричних розмірів труб, повинно бути не менше  $15\text{м}^3$  на одного працівника і площею не менш  $4,5\text{ м}^2$ . Необхідна висота приміщення від підлоги до стелі не менше 3.2 м, або низу виступаючих із стелі конструктивних елементів 2.6 м.

Для забезпечення притоку чистого повітря і заданих необхідних метеорологічних умов на робочих місцях використовують вентиляцію. Так як в даному приміщенні відсутні викиди шкідливих речовин, то для забезпечення персоналу свіжим повітрям будемо використовувати природну вентиляцію так як вона має просту будову, не потребує енергетичних витрат і спеціального обслуговування.

Побутові приміщення це приміщення які призначені для розміщення служби побуту, і також санітарно-гігієнічного обслуговування робітників. До таких приміщень відносять гардероб, душові, оздоровчий пункт, кімнати для паління, туалет, буфет.

Також необхідно щоб побутові приміщення були ізольовані від виробничих. Перелік санітарно-побутових приміщень представлена в таблиці 4.3.

Для забезпечення сприятливих умов праці, які сприяють підвищенню продуктивності праці використовують освітлювальні установки що виключають швидке стомлювання та які відповідають наступним вимогам.

Значення освітленості на робочих місцях повинна відповідати здоровим умовам праці які зазначені у гігієнічних нормах.

Згідно з діючими нормами [22], для робіт при яких виконуються спостереження під час вимірювань, мінімальна освітлюваність становить для ламп розжарення - 150лк, для газорозрядних ламп-200лк.

Для уникнення втомлюваності очей необхідним параметром є рівномірне освітлення на робочих поверхнях, і в межах оточуючого простору.

Таблиця. 4.3 - Перелік санітарно-побутових приміщень

Назва приміщення	Норма площі на одного працівника м <sup>2</sup>	Фактична площа м <sup>2</sup>	Кількість працюючих	Примітка
Гардеробна	0,7	0,85	8	Відповідає встановленим нормам
Душова	0,54	0,54		
Туалет	0,1	од		
Кімната для паління	0,2	0,2		
Буфет	0,7	0,8		

Для того щоб підвищити рівномірність освітленості здійснюють фарбування стелі, стін, обладнання в світлий колір. Також не обхідною умовою є відсутність прямих і відбитих відблисків у полі зору що викликає осліплення.

Значення освітленості повинно бути сталим в часі. Часта її зміна особливо з великою амплітудою викликають переадаптацію зору і ведуть до його швидкої втоми. Також необхідно вибрати найкращу направленість світлового потоку. Найбільш ефективна видимість отримується при падінні

світла на поверхню під кутом  $60^\circ$  до її нормалі. Слід вибирати освітлюючі пристрої із спектральною характеристикою близькою до сонячної – правильну світлопередачу забезпечують природне освітлення і штучні джерела світла. Джерело освітлення не повинно створювати додаткові небезпечні фактори і бути зручною, надійною в експлуатації.

В таблиці 4.4 представлені характеристика освітленості, які необхідно використовувати при роботі з вимірювальними приладами.

Таблиця 4.4 – Необхідні значення штучної освітленості на робочому місці

Назва приміщення	Освітленість лк Загальне освітлення	Освітленість лк Комбіноване освітлення	Тип світильника
Лабораторія	200	300	ЛСП02

#### 4.3.1 Розрахунок освітлення в приміщенні

Для забезпечення необхідних нормальних умов праці в лабораторії під час проведення експериментальних досліджень необхідно крім природного освітлення ще і штучне освітлення. Якість якого, а також його рівномірність буде впливати на продуктивність і безпеку праці а також і збереження зору.

При проектуванні освітлення, необхідно врахувати наступні особливості:

- освітленість необхідна для якісного спостереженнями під час проведення експерименту, має забезпечуватись нормованим значенням освітленості і її якості;

- як джерело світла, необхідно обирати з різних умов, які повинні задовольняти функціональні та економічні вимоги;

- елементи освітлювальних установок необхідно щоб відповідали вимогам якості, довговічності, економічності і технічним умовам де їх будуть застосовувати.

Проведемо розрахунок для необхідної освітленості у приміщенні лабораторії, для початку оберемо необхідне джерело світла.

Із широкою номенклатури джерел освітлення, які випускає наша промисловість, для освітлення лабораторії найбільше підходять лампи розжарення або люмінесцентні лампи.

Люмінесцентні лампи це газорозрядні лампи принцип дії яких базується на використанні електричного розряду в газах і їх сумішах для утворення видимого випромінювання.

За різновидами розряду в них можна виділити лампи дугового розряду з гарячими катодами (загального і спеціального призначення) і тліючого розряду з холодними катодами ( для сигналізації і світлової реклами). Дугова люмінесцентна лампа загального призначення це скляна трубка прямої або зігнутої форми, внутрішня поверхня якої покрита люмінофором. На кінцях трубки впаяні вольфрамові нитки приєднані до двоштирових цоколів. У трубку вводять дозовану кількість ртуті та інертного газу, основне призначення якого є поліпшення запалювання і зменшення розпилення ниток у процесі горіння. У парах ртуті при електричному розряді ультрафіолетове випромінювання, яке діє на люмінофор, перетворюється у видиме. Зміною складу люмінофору досягається зміна спектрального складу видимого випромінювання ламп. Люмінесцентні лампи з дуговим розрядом у парах ртуті за кольором випромінювання світлового потоку поділяються на ЛЛ білого кольору (ЛБ), холодно-білого (ЛХБ), тепло-білого світла(ЛТБ), денного світла (ЛД).

Найширше використовують лампи типу ЛБ, світловий потік яких дуже близький до світлового потоку ламп розжарення.

Після оцінки всіх переваг та недоліків представлених ламп в якості джерела світла в лабораторії для контролю якості балонів високого тиску

вибираємо люмінесцентні лампи: вони мають довгий термін служби приблизно 1500 год. (лампи розжарення - 1000год.), світлова віддача 45-60 лм/Вт (лампи розжарення 7-19.7 лм/Вт).

Розрахунок електричного освітлення виробничих приміщень передбачає такі етапи:

- вибір виду і системи освітлення;
- вибір джерела світла і світильників;
- розміщення і встановлення світильників;
- світлотехнічний розрахунок.

При виборі виду і системи освітлення спочатку треба вибрати тип освітлення. Існує два типи освітлення: загальний та комбінований (до загального освітлення додається місцеве освітлення робочих місць).

Систему загального освітлення застосовують для освітлення всього приміщення, в тому числі і робочих поверхонь. Загальне освітлення може здійснюватись двома способами: з рівномірним і нерівномірним розміщенням світильників у приміщенні.

Оскільки в нашому приміщенні технологічне устаткування розміщене рівномірно, то вибираємо загальне рівномірне освітлення.

Як вже було сказано вище, завдяки своїй високій світловій віддачі, а також достатньо хорошій кольоропередачі, в якості джерела світла вибираємо люмінесцентні лампи.

При розміщенні світильників краще розташовувати їх правильними симетричними рядами, створюючи при цьому відносно рівномірну освітленість по всій площі. Світильники з люмінесцентними лампами бажано розміщувати рядами, паралельно до стін з вікнами.

Тепер проведемо розрахунок освітлення приміщення, де здійснюється розроблення та налаштування пристрою для вихрострумовеого вимірювання геометричних розмірів труб [23].

Розміри приміщення: довжина  $a = 10\text{м}$ ;

ширина  $b = 8\text{м}$ ;

висота  $h = 4.2$ .

Розрахункова площа знаходиться на висоті 0,9 м. Ряди світильників ЛСП02 з люмінесцентними лампами типу ЛБ встановлені на висоті  $h_p = 2,9$  м.

Згідно [22] необхідно забезпечити освітленість  $E_{\text{норм}} = 300$  лк. Коефіцієнт запасу для люмінесцентних ламп приймаємо  $k = 1.3$ .

Коефіцієнт відбиття підлоги  $P_{\text{п}} = 10\%$ , стін  $P_{\text{с}} = 30\%$ , стелі  $P_{\text{ст}} = 50\%$ .

Рекомендований освітлювач в поперечній площині має криву світлорозподілу типу Д, тобто косінусний розподіл. Тому відстань між світильниками слід взяти  $= 1.4$ .

Відстань між рядами світильників знаходиться за наступною формулою:

$$L = h_p * \lambda, \quad (4.1)$$

де  $h_p$  - розрахункова висота

$$L = 2.9 * 1.4 = 4.06 \text{ (м)}.$$

З невеликим відхиленням приймаємо  $L = 4$  м, що суттєво полегшить виготовлення установки.

Число рядів світильників дорівнює:

$$n' = b / L, \quad (4.2)$$

$$n' = 8 / 4 = 2.$$

Визначимо відстань від крайнього ряду світильників до стіни:

$$L_c = (8 - 4 * 1) / 2 = 2 \text{ (м)}.$$

Подальші розрахунки проводимо за методом коефіцієнта використання. Цей метод дає змогу визначити світловий потік ламп, необхідний для створення нормованої освітленості з урахуванням світла відбитого стінами і стелею приміщення.

Світловий потік ламп у кожному світильнику, необхідний для створення заданої мінімальної освітленості дорівнює, лм:

$$\Phi = (E * S * k_3 * z) / N * \eta, \quad (4.3)$$

де  $E$  - мінімальна нормована освітленість, лк;  $S$  - площа освітлювального приміщення або поверхні,  $\text{м}^2$ ;  $k_3$  - коефіцієнт запасу;  $z$  - коефіцієнт

нерівномірності освітлення, що характеризує відношення середньої освітленості до мінімальної,  $z = E_{cp}/E_{min}$ ;  $N$  - кількість світильників;  $\eta$  - коефіцієнт використання світлового потоку джерела світла .

Коефіцієнт використання світлового потоку  $\eta$  є складною функцією багатьох змінних; при розрахунку його визначають за таблицями з урахуванням типу світильника, коефіцієнтів відбиття стін  $p_s$ , підлоги  $p_p$ , стелі  $p_{st}$  та індексу приміщення:

$$i = S/h * (a + b), \quad (4.4)$$

де  $S$ - площа приміщення,  $m^2$ ;  $h$ - висота підвісу світильників над розрахунковою поверхнею,  $m$ ;  $a$  і  $b$  - сторони приміщення,  $m$ .

Коефіцієнт нерівномірної освітленості значною мірою залежить від відношення відстані між світильниками до висоти їх підвісу і становить для світильників з люмінесцентними лампами  $z=1.1$ . Знайдемо індекс приміщення:

$$i=10*8/2.9(10 + 8)=1.53.$$

Згідно з [23] коефіцієнт використання світлового потоку  $\eta=0.46$

Визначимо потрібний світловий потік ламп в кожному із рядів світильників:

$$\Phi = 300*1.1*80*1.3/0.46*2.9 = 25727.13 \text{ (лм)}.$$

Якщо вибрати світильник з двома лампами по 40 Вт і потоком по 3000 лм, то необхідне число освітлювачів в ряді:

$$N = \Phi/3000*2,$$

$$N = 25727.13/3000*2 = 4.5878-5.$$

При довжині одного світильника 1.24 м загальна довжина становить:

$$L'=5*1.24=6.2(m).$$

Відстань між світильниками в ряді дорівнює:

$$l' = 10-6,2/6 = 0.6(m).$$

Загальна потужність ламп освітлювальної установки:

$$P=h_p * N * l' * 40, \quad (4.5)$$

$$P=2.9*5*2*40=1160 \text{ (Вт)}.$$

Отже, ми провели розрахунок освітлювальної установки для даного приміщення і виявили, що найбільш оптимальним варіантом буде система освітлення, яка складається з двох рядів люмінесцентних ламп загальною потужністю 1160 Вт; в кожному ряді по 5 ламп.

#### 4.3.2 Розрахунок шуму

Оскільки у нас рівень звукового тиску у лабораторії може перевищувати допустимий, то потрібно визначити величину додаткового звукопоглинання для розрахункової точки розташованої на віддалі  $r=5\text{м}$  від джерела шуму і вибрати конструкцію звукопоглинача.

Розміри приміщення: довжина  $a = 10\text{м}$ ;

ширина  $b=8\text{м}$ ;

висота  $h= 4.2$ .

Об'єм приміщення буде становити  $V=336\text{м}^3$

Візьмемо загальну площу огорожувальних поверхонь  $S=235\text{ м}^2$ .

Для прикладу візьмемо рівень звукової потужності  $L_n = 96\text{ дБ}$  в другій октавній смузі, з середньгеометричною частотою  $125\text{ Гц}$ . Аналогічно проводимо розрахунок для всіх октавних смуг з різними середньгеометричними частотами.

Визначаємо величину граничного радіуса за формулою (4.6):

$$r_{\text{гр}}=0.2\sqrt{V_{125}/n} \quad (4.6)$$

Для  $V=336\text{м}^3$  знаходимо постійну приміщення за таблицею[24].

Визначаємо  $V_{125}$  за графіком[24]:

$$V_{1000} = 600\text{м}^2, \text{ а } V_{125} = 372\text{м}^2 \text{ при } \mu = 0,62.$$

При таких вихідних даних :

$$r_{\text{гр}}=0.2\sqrt{V_{125}}=0.2\sqrt{372}=3.86\text{м}$$

Величина очікуваного звукового тиску визначається за формулою (4.7):

$$L=L_p + 10\lg(\alpha/S+4/B_{\text{ш}}) \quad (4.7)$$

$$L=96+10\lg(1/157+4/372)=78.34\text{дБ}$$

а потім за формулою (4.8) знаходимо  $\Delta L_n$  :

$$\Delta L=L-\Delta L_{доп} \quad (4.8)$$

$$\Delta L=78.34-74=4.34\text{дБ}$$

При визначенні  $\Delta L_n$  як  $\Delta L_{доп}$  приймаємо криву граничного спектра ГС-75.

В зоні відбитого звуку величини  $\Delta L_n$  такі , що звукопоглинальне личкування може забезпечити необхідне зниження рівня звукового тиску. За графіками [25] знаходимо величину  $\Delta A_n$  додаткового звукопоглинання.

Конструкція личкування вибирається за табл.[25]. Вибираємо плити Вініпор напівжорсткості товщиною 50мм з повітряним прошарком 150мм .

#### **4.4 Забезпечення безпеки технологічних процесів, монтажу і експлуатації обладнання**

При контролі геометричних розмірів труб розробленим приладом основною небезпекою в процесі його експлуатації може бути ураження електричним струмом при пробиванні на корпус або при зношуванні ізоляції.

Тому для забезпечення безпечної роботи з приладом персоналу, необхідно дотримуватись наступних правил [22]:

- частини приладів, які в робочому стані приладу знаходяться під напругою, повинні бути недоступні дотику до них і захищені корпусом або ізоляцією;

- ізоляція, яка призначена для захисту від ураження електричним струмом, повинна мати необхідну електричну і механічну міцність;

- зовнішні органи керування (кнопки, ручки і т.п.) повинні бути виготовлені з ізолюючого матеріалу;

- підстройка регулюючими елементами, які розміщені в середині корпусу і регулюються за допомогою інструмента через отвір в корпусі з надписом, який вказує на призначення елемента, не повинна призводити до небезпечного враження електричним струмом;

- металічні частини приладу, які стають доступні після зняття кришки, не повинні знаходитись під напругою. Частини, які доступні в умовах експлуатації приладу, теж не повинні знаходитись під напругою;

- доступні металічні частини приладу, які при пошкодженні приладу можуть бути під напругою повинні бути з'єднанні разом і, в залежності від номінальної напруги ланцюга, мати пристрій для підключення до захисної системи. Опір з'єднання не повинен перевищувати 1 Ом.

#### **4.5 Пожежна безпека та безпека в надзвичайних ситуаціях**

Пожежна безпека виробничих приміщень визначається пожежною небезпекою технологічного обладнання та апаратів, конструктивними і технологічними рішеннями.

Пожежна безпека може бути організована шляхом інтенсивної пожежної профілактики та активного пожежного захисту. Поняття про пожежну профілактику включає комплекс заходів, які необхідні для попередження пожежі і зменшення її наслідків.

Розглянемо профілактичні методи боротьби з пожежами:

- організаційні (правильне утримання приміщень, протипожежний інструктаж, видання наказів по питаннях посиленої пожежної безпеки);

- технічні (дотримання протипожежних правил, норм при встановленні електроустановок, опалення, вентиляції);

- режимні (заборона паління в невстановлених місцях, проведення пожежонебезпечних робіт в приміщенні лабораторії);

експлуатаційні (своєчасні профілактичні огляди, ремонти устаткування) .

Необхідно передбачити безпечну евакуацію людей на випадок пожежі. У відповідності з [27] кількість евакуаційних виходів з будівель повинна становити не менше двох.

Велику роль в боротьбі з пожежами відіграє система виявлення і сповіщення про пожежу, яка може бути представлена ручною або автоматичною пожежною сигналізацією. Роль автоматичних систем зростає з підвищенням рівня автоматизації, коли із процесу виробництва виводиться обслуговуючий персонал, який одночасно виконував функції спостереження і повідомлення про пожежу під час роботи.

Найменування приміщення	Категорія виробничих вибухо і пожежній безпеці	Клас приміщення	Клас приміщення по степені пожежної безпеки	Характеристика по степені небезпеки ураження електричним струмом
Лабораторія	Д	В-Ia	П-11	2 клас

#### Висновок до розділу

В розділі висвітлено значення охорони праці, оцінено потенційні небезпеки виробничих факторів при роботі з розробленою системою, подано характеристики та значення різних параметрів для створення нормальних умов праці. Ми провели розрахунок освітлювальної установки для даного приміщення. Також ми розрахували величину необхідного звукопоглинання і вибрали конструкцію звукопоглинача.

## ВИСНОВКИ

На основі аналізу існуючих методів для неруйнівного контролю геометричних розмірів труб було обрано вихрострумний метод як найбільш інформативний метод для вимірювання геометричних розмірів.

Завданням бакалаврської роботи було розробити пристрій вимірювання геометричних розмірів вихрострумним методом для цього було проведено геометричний і електричний розрахунок для вихрострумного перетворювача, для обмеження нагріву перетворювача було проведено його тепловий розрахунок, для збудження коливань було розроблено конструкцію генератора і проведено розрахунок його параметрів.

Для кращого і ефективнішого використання розробленого приладу було здійснено розробку конструкції вихрострумного первинного перетворювача, а також метрологічний аналіз розробленого пристрою для контролю геометричних розмірів труб.

Для забезпечення безпечних умов праці було представлено характеристики для створення нормальних умов праці, проведено розрахунок освітленості установки і величину необхідного звукопоглинання і було обрано кращу конструкцію звукопоглинача.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Середюк О.Є., Барна О.Б., Криницький О.С. Електричний, магнітний та електромагнітний види неруйнівного контролю в нафтогазовій галузі: навчальний посібник. – Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2017. – 348 с.
2. Середюк О.Є. Електричний, магнітний та електромагнітний види контролю: конспект лекцій. МВ 02070855-801-01. - Івано-Франківськ: Факел, 2001.-170с.
3. Фізичні основи неруйнівного контролю: навчальний посібник / Р.Т. Боднар, В.Т. Камінський, І.С. Кісіль, З.П. Лютак, О.Є. Середюк – Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2013. – 384 с.
4. Поліщук Є.С. Методи та засоби вимірювань неелектричних величин. – Львів: Вид. Державного університету "Львівська політехніка", 2000.-360с.
5. Онгірська Н. Г. Розрахунок параметрів накладних вихрострумових перетворювачів в залежності від геометричних розмірів тріщин / *Методи та прилади контролю якості*. – 1999. – № 3. – С. 8-11.
6. Тетерко А.Я., Назарчук З.Т. Селективна вихрострумова дефектоскопія.– Львів: НАН України, Фізико-механічний інститут ім. Г.В.Карпенка, 2004.–248с.
7. Онгірська Н. Г., Горбатенко М. Ю. Розрахунок параметрів котушки вихрострумового перетворювача при довільному положенні дефектів у контрольованому об'єкті / *Методи та прилади контролю якості*. – 2000. – № 5. – С. 26 - 28.
8. Маєвський С. М., Онгірська Н.Г. Методика розрахунку параметрів вихрострумових перетворювачів / *Методи та прилади контролю якості*. – 1999. – № 3 – С. 3-7.
9. Неруйнівний контроль. Вихрострумовий контроль. Загальні вимоги ДСТУ ISO 15549:2015 (ISO 15549:2008, IDT). – [Чинний від 2016-01-01]. – К.: Держстандарт України, 2015. – 8 с. – (Національний стандарт України).
10. Метрологія і технологічні вимірювання у нафтовій та газовій промисловості: навчальний посібник/ С.А. Чеховський, І.С. Петришин, Н.М.

Піндус, С.П. Ващишак, М.А. Кононенко, В.М. Романів, О.Є. Середюк. Л.А. Витвицька / за ред. С.А. Чеховського. - Івано-Франківськ : ІФНТУНГ, 2010.- 534с.

11. Неруйнівний контроль. Контроль вихрострумівий. Словник термінів ДСТУ EN ISO 12718:2016 (EN ISO 12718:2008, IDT; ISO 12718:2008, IDT) – [Чинний від 2016-08-01]. – К.: Держстандарт України, 2016. – 41 с. – (Національний стандарт України).

12. Неруйнівний контроль. Контроль вихрострумівий. Загальні вимоги і рекомендації ДСТУ EN 12084:2005 (EN 12084:2001, IDT) – [Чинний від 2008-01-01]. – К.: Держстандарт України, 2005. – 16 с. – (Національний стандарт України).

13. Кісіль І.С. Конструювання вимірювальних приладів: навч. посібник. – Івано-Франківськ: Факел, 2004. – 324с.

14. Задерейко О.В., Панов Л.І., Циганов О.В. Конструювання і технологія радіоелектронної апаратури: Навч. посіб. - О.: Наука і техніка, 2007. - 122 с.

15. Карпаш О.М. Технічна діагностика бурового та нафтогазового обладнання: навч. посібник. – Івано-Франківськ.: ІФНТУНГ, 2007. – 272 с.

16. Кісіль І.С. Метрологія, точність і надійність засобів вимірювань: навч. посібник. Івано-Франківськ.: Факел, 2002. – 400с.

17. ДСТУ EN 1330-1:2016 (EN 1330-1:2014, IDT) Неруйнівний контроль. Термінологія. Частина 1. Перелік загальних термінів.

18. Електроживлення електронних засобів: Практикум [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студ. спеціальності 171 "Електроніка" / КПІ ім. Ігоря Сікорського; укладачі В. В. Макаренко, В. В. Пілінський, В. Б. Швайченко. – Електронні текстові данні. – К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 110 с.

19. Середюк О.Є., Витвицька Л.А., Лютак З.П. Основи кваліметрії та сертифікації в нафтогазовій галузі: навч. посібник. – Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2014.- 294с.

20. Кривенко Г. М., Семчук Я. М., Стеліга І. І., Лялюк-Вітер Г. Д., Шиманський В. Я.. Охорона праці: методичні вказівки до виконання розділу "Охорона праці" випускної кваліфікаційної роботи бакалавра. ІваноФранківськ: ІФНТУНГ, 2021. 84 с.

21. ДСТУ-Н Б А.3.2-1:2007 Система стандартів безпеки праці. Настанова щодо визначення небезпечних і шкідливих факторів та захисту від їх впливу при виробництві будівельних матеріалів і виробів та їх використанні в процесі зведення та експлуатації об'єктів будівництва

22. ДСанПіН 3.3.2-007-98 Державні санітарні правила і норми. Гігієнічні вимоги до організації роботи з візуальними дисплейними терміналами електронно-обчислювальних машин. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0007282-98#Text>

23. ДСанПіН 3.3.6.096-2002 Державні санітарні норми і правила при роботі з джерелами електромагнітних полів. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0203-03#Text>

24. Наказ МОЗУ №30 від 23.02.2000р. «Про затвердження списків і введення в дію гігієнічних регламентів шкідливих речовин у повітрі робочої зони і атмосферному повітрі населених місць» URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0030282-00#Text>

25. ДСН 3.3.6.042-99 Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/va042282-99#Text>

26. ДБН В.2.5-28-2018 Інженерне обладнання будинків і споруд, Природне і штучне освітлення.

27. НАПБ А.01.001-2014 Правила пожежної безпеки в Україні

28. Жидецький В. Ц., Джигирей В. С., Сторожук В. М. та ін. Практикум із охорони праці. Навчальний посібник / За ред. канд. техн. наук, доцента В. Ц. Жидецького - Львів: Афіша, 2000. - 352 с.

29. ДСТУ EN 60051-6:2015 Прилади прямої дії електровимірювальні аналогові, показувальні та допоміжні частини до них.

30. ДСТУ Б В.2.5-82:2016 Електробезпека в будівлях і спорудах. Вимоги до захисних заходів від ураження електричним струмом.