

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»
Приладобудівний факультет
(повна назва інституту/факультету)

Кафедра приладів та систем неруйнівного контролю
(повна назва кафедри)

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

(підпис) (ініціали, прізвище)

“ ___ ” _____ 20__ р.

Дипломний проект

на здобуття ступеня бакалавра

зі спеціальності (спеціалізації) _____
(код та назва спеціальності)

на тему: Вихрострумний двочастотний дефектоскоп для контролю виробів з
неферромагнітних матеріалів

Виконав : студент IV курсу, групи

ПК-51

(шифр групи)

Салаков Андрій Андрійович

(прізвище, ім'я, по батькові)

(підпис)

Керівник д. т. н., професор Куц Ю.В.

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

(підпис)

Консультант Графічний ст. викл. Богдан Г.А.

(назва розділу)

(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище, ініціали)

(підпис)

Консультант _____

(назва розділу)

(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище, ініціали)

(підпис)

Рецензент _____

(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

(підпис)

Засвідчую, що у цьому дипломному проекті
немає запозичень з праць інших авторів без
відповідних посилань.

Студент _____

(підпис)

Київ – 2019 року

ВІДОМІСТЬ ДИПЛОМНОГО ПРОЕКТУ

№ з/п	Формат	Позначення	Найменування	Кількість листів	Примітка
1	A4		Завдання на дипломний проект	2	
2	A4	ДП ПК51.13.000 ПЗ	Пояснювальна записка	60	
3	A2	ДП ПК51. 01.000 ТК	Складальний кресленник. Трансформаторний прохідний вихрострумний перетворювач	1	
4	A3	ДП ПК51. 02.000 ТК	Каркас котушки	1	
5	A3	ДП ПК51. 03.000 ТК	Кришка	1	
6	A2	ДП ПК51. 04.000 ТК	Схема електрична структурна	1	
7	A2	ДП ПК51. 05.000 ТК	Схема електрична функціональна	1	
8	A2	ДП ПК51. 06.000 ТК	Алгоритм роботи приладу та обробки результатів	1	
9	A2	ДП ПК51. 07.000 ТК	Алгоритм навчання приладу	1	

				ДП ПК51.13.000.000		
	ПІБ	Підп.	Дата			
Розробн.	Салаков А.А.			Відомість дипломного проекту	Лист	Листів
Керівн.	Куц Ю.В.				1	1
Консульт.					КПШ ім. Ігоря	
Н/контр.	Лашко О.В.					
Зав.каф.	Протасов А.Г.				Сікорського Каф. ПСНК Гр. ПК-51	

**Пояснювальна записка до
дипломного проекту
на тему: «Вихрострумний двочастотний дефектоскоп
для контролю виробів з феромагнітних
матеріалів»**

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

Кафедра приладів та систем неруйнівного контролю

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Напрямок підготовки (програма професійного спрямування) – 6.051003
«Приладобудування»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Протасов А.Г.

«__» _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ

на дипломний проект студенту

Салаков Андрій Андрійович

1. Тема проекту «Вихрострумний двочастотний дефектоскоп для контролю виробів з неферомагнітних матеріалів», керівник проекту Куц Юрій Васильович, доктор технічних наук, професор, затверджені наказом по університету від «27» травня 2019 р. № 1384-с
2. Термін подання студентом проекту 12 травня 2019
3. Вихідні дані до проекту: циліндричні прутки з бронзи та дюралюмінію, діаметри яких становлять 34...35 мм, з кроком 0,1 мм.
4. Зміст пояснювальної записки

Вступ

1. Огляд методів і засобів вихрострумного двопараметрового контролю
2. Розрахунок системи вихрострумний перетворювач – об'єкт контролю
3. Управління генератором. Розробка алгоритму і програмного забезпечення

Висновок

Список використаних джерел

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслеників, плакатів, презентацій тощо) креслеників

- 1 – Трансформаторний прохідний вихрострумний перетворювач
- 2 – Каркас котушки
- 3 – Кришка
- 4 – Схема електрична структурна
- 5 – Схема електрична функціональна
- 6 – Алгоритм роботи приладу та обробки результатів
- 7 – Алгоритм навчання приладу
6. Консультанти розділів проекту*

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис
Графічний	ст. викл. Богдан Г.А.	
Електричний		

7. Дата видачі завдання _____

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проекту	Термін виконання етапів проекту	Примітка
1	Формулювання завдання проекту	15.03.2019	
2	Проведення аналітичного огляду	10.04.2019	
3	Розрахунок компонентів	25.05.2019	
4	Оформлення пояснювальної записки	04.06.2019	
5	Розробка креслеників	09.06.2019	

Студент

Салаков А.А.

Керівник проекту

Куц Ю.В.

Анотація

На дипломний проект студента четвертого курсу групи ПК-51 приладобудівного факультету Салакова Андрія з теми: «Вихрострумний двочастотний дефектоскоп для контролю виробів з неферомагнітних матеріалів».

В цій дипломній роботі був розроблений двопараметровий дефектоскоп для контролю прутків з неферомагнітних матеріалів діаметром 34-35 мм. Для прикладу були використані зразки з бронзи та дюралюмінію.

В першому розділі були представлені теоретичні відомості вихрострумного контролю, двопараметрового контролю, як різновид багатопараметрового контролю. Наведені теоретичні відомості про види та типи вихрострумних перетворювачів Також описані такі методи обробки сигналів, як амплітудний, фазовий та амплітудно-фазовий.

В розрахунковій частині роботи представлено розрахунки самого вихрострумного перетворювача, а також його роботу в двох режимах: перший – на високій частоті для контролю діаметру ОК, другий – на низькій частоті, для контролю питомої електропровідності ОК. Обґрунтований вибраний метод, та наведені графіки, які доказують, що обраний метод – найбільш правильний.

Третя частина – конструкторсько-технологічна описує технічні характеристики, та принцип роботи даного приладу. Наведена структурна схема приладу, та розроблена функціональна схема. Даний прилад відповідає всім поставленим завданням.

Summary

On the diploma project of the student of the fourth year, groups of PC-51 of the Faculty of Adjacent Andrii Salakov with those: “Eddy current two frequencies stethoscope for controlling products from non-ferromagnetic materials”

In this thesis two-parameter stethoscope was developed for controlling rods of non-ferromagnetic materials with a diameter of 34-35 mm. For example, samples from bronze and duralumin were used.

In the first section were presented theoretical information of eddy current control, two-parameter control, as a kind of multi-parameter control. The theoretical data on types and species of eddy current converters are described. Also, such methods of signal processing as amplitude, phase and amplitude-phase are described.

In the calculation part of the work presented calculations of the eddy current converter itself, as well as its work in two modes: the first - at high frequency to control the diameter of the OK, the second - at low frequency, to control the electrical conductivity OK. The chosen method is substantiated, and graphs are given that prove that the chosen method is the most correct one.

The third part - design and technological describes the technical characteristics, and the principle of this device. The block diagram of the device is given, and the functional scheme is developed. This appliance meets all the delivered tasks.

Зміст

Вступ	9
1. Огляд методів і засобів вихрострумowego двопараметрового контролю	13
1.1 Фізичні основи ВСК.....	13
1.2 Методи обробки сигналів двопараметрового контролю.....	17
1.2.1 Двопараметровий контроль, як різновид багатопараметрового контролю	17
1.2.2 Повний опір електричного ланцюга (імпеданс)	19
1.2.3 Фактори, які впливають на імпеданс системи	18
1.2.4 Зміна фази вихроструму за глибиною залягання.....	23
1.2.5 Амплітудний метод обробки сигналів	25
1.2.6 Фазовий метод обробки сигналів.....	28
1.2.7 Амплітудно-фазовий метод обробки сигналів	29
1.3 Огляд приладів ВСК.....	29
Висновки до розділу 1.....	33
2. Розрахунок системи вихрострумовой перетворювач – об'єкт контролю.....	34
2.1 Опис системи ВСП – ОК.....	34
2.2 Розрахунок вихрострумowego перетворювача.....	37
2.2.1 Розрахунок вихрострумowego перетворювача на високій частоті для бронзи	39
2.2.2 Розрахунок вихрострумowego перетворювача на високій частоті для дюралюмінію.....	42
2.2.3 Аналіз отриманих результатів та обґрунтування методу обробки.....	45

						<i>ПК51.13.0000.000 ПЗ</i>		
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.		Салаков А.А..			<i>Вихрострумовой двочастотний дефектоскоп для контролю виробів з неферромагнітних матеріалів</i>	Літ.	Арк.	Аркушів
Перевір.		Куц Ю. В.					6	
Реценз.						ПБФ		
Н. Контр.								
Затверд.		Куц Ю. В.						

2.2.4	Розрахунок чутливості приладу до зміни діаметру	45
2.2.5	Розрахунок вихрострумowego перетворювача на низькій частоті для бронзи	47
2.2.6	Розрахунок вихрострумowego перетворювача на низькій частоті для дюралюмінію.....	49
Висновки до розділу 2.....		52
3.	Управління генератором. Розробка алгоритму і програмного забезпечення .	53
3.1	Технічні характеристики.....	53
3.2	Розробка структурної схеми вихрострумowego дефектоскопу. Опис роботи .	54
3.3	Розробка електричної схеми	56
3.3.1	MHS-5200A-25M	56
3.3.2	Siglent SDS1072CML	56
3.4	Програмний код і алгоритм	57
Висновки до розділу 3.....		58
Висновки до роботи.....		59
Використана література.....		60

Перелік умовних позначень, символів, скорочень і термінів:

ОК – об'єкт контролю;

НК – неруйнівний контроль;

ВСК – вихрострумний контроль;

ВТП – вихрострумний перетворювач;

ВСНК – вихрострумний неруйнівний контроль;

ПК - персональний комп'ютер;

					ПК51.13.0000.000 ПЗ	
		№ докум.	Підпис			8

Вступ

В наш час промисловість набуває інтенсивного розвитку, де потрібна все більша точність до якості виготовленої продукції. Тому промислова галузь все частіше починає звертатися до неруйнівних методів контролю своєї продукції, що надає потужний поштовх для розвитку всіх методів НК. В наші дні, найпопулярнішими методами контролю для промисловості являються ультразвукові та вихроструміві методи НК.

Ультразвукові пристрої контролю, більш широко використовуються так, як вони мають менші габаритні розміри і більш універсальні. Лише за допомогою одного датчика, наприклад, для ультразвукового дефектоскопу, можна знаходити дефекти майже у всіх металах та їх сплавах. Але ультразвукові пристрої для НК мають досить малу швидкодію, а також слід пам'ятати, що ультразвук не любить матеріали з неоднорідною структурою.

Чого не скажеш про ВСК. Вихроструміві прилади промислового масштабу виготовляються строго під конкретну ціль (конкретний виріб). Хоча їх виготовлення і складніше, і дорожче, але воно виправдане. Так, як вихроструміві прилади мають гарну швидкодію. На сьогоднішній день, вихроструміві дефектоскопи можуть контролювати, наприклад металопрокат, зі швидкістю 2,5 м/с, при цьому на точність виміру така швидкість контролю зовсім не впливає.

Сьогодні жодна промисловість не обходиться без автоматизації. Це дозволяє не тільки збільшити об'єм випущеної продукції, а також досягти більш точного її виготовлення. Контроль якості цієї продукції теж активно використовує автоматизацію. Тому вихроструміві прилади, вже на етапі розробки, конструюються з можливістю подальшого автоматизування процесу контролю.

Ще однією особливістю ВСК є можливість багатопараметрового контролю. Тобто одночасних контроль двох і більше параметрів ОК. Використовуючи, при контролі, дві робочі частоти, та використовуючи визначенні методи обробки сигналів, можна контролювати два параметра ОК, при цьому придушуючи вплив на контроль зайвих факторів, що підвищує точність виміру контрольованих параметрів. Ця особливість і робить ВСК ще більш затребуваним на промисловості.

					ПК51.13.0000.000 ПЗ	9
		№ докум.	Підпис			

Ось чому, в промисловості для контролю конвеєрних (однакових) металевих виробів найчастіше використовують саме вихрострумові прилади НК. І метою даної дипломної роботи стало розроблення структурної і функціональної схеми вихрострумового дефектоскопу.

					ПК51.13.0000.000 ПЗ	
		№ докум.	Підпис			10

1. Огляд методів і засобів вихрострумового двопараметрового контролю

1.1 Фізичні основи ВСК

На сьогоднішній день неруйнівний контроль (НК) відіграє важливу роль для забезпечення якості та надійності за прийнятною ціною. Добре відомо, що наслідки можуть бути катастрофічними, якщо при виготовленні матеріалів, компонентів або конструкцій, завчасно не виявити дефекти. Уникнення збоїв, для забезпечення безпеки використання та надійності у широкому діапазоні промислових компонентів, є основними промисловими цілями неруйнівного контролю.

НК стикається з новими викликами для виявлення дефектів і контролю якості сучасних матеріалів таких, як багатокомпонентні структури, сплави кольорових металів для сучасних легких конструкцій, композитів, композитних вуглецевих смол, високоефективні термопластичні композити і металеві матричні композити [1].

Комплекс методів і засобів неруйнівного контролю матеріалів і виробів з метою виявлення дефектів називається дефектоскопією. Дефектоскопія включає в себе: розробку методів і апаратури (дефектоскопів); складання методик контролю; опрацювання результатів вимірювань дефектоскопів.

В результаті експлуатації у важких умовах або внаслідок недосконалості технології виготовлення виникають різноманітні дефекти: порушення цілісності або однорідності матеріалу, відхилення від заданих розмірів, хімічного складу або структури матеріалу, дефекти зміни фізичних властивостей матеріалів (електропровідність, щільність, магнітні, пружні властивості та інші) [2].

На сьогоднішній день існує широкий спектр методів НК, що ґрунтуються на різних фізичних принципах, але найбільш часто використовуються ультразвукові та вихрострумові методи, рентгенографія, методи, що використовують магнітні частинки та барвники. Проте, в останні роки, використання вихрострумових та ультразвукових методів НК різко збільшилося.

Базовий вихрострумний перетворювач (ВСП) для контролю об'єктів циліндричної форми являє собою циліндричну котушку зі змінним струмом, чи комбінацію з декількох котушок, що використовуються для створення електромагнітного поля та визначення електрорушійної сили як реакцію на взаємодію цього поля з об'єктом контролю, виготовленим з провідного матеріалу. Модифікація характеристик вихрових струмів, внаслідок наявності дефекту, призводить до зміни електричного імпедансу (повного опору кола змінного струму) катушки або зміни електрорушійної сили, що наводиться у вимірювальній котушці перетворювача. Інструменти НК реєструють ці зміни, що дозволяють виявити, та зрештою, оцінити ці дефекти [1].

ВСП за електричними властивостями сигналу поділяють на трансформаторні та параметричні. Для першої групи перетворювачів, сигналом слугує приріст комплексної електрорушійної сили (ЕРС), яка виникає в одній або декількох вимірювальних обмотках. Для них характерна велика температурна стабільність. Для другої групи перетворювачів, сигналом слугує приріст комплексного електричного опору. У такої групи перетворювачів, сигнал формується в тій же обмотці яка використовується для збудження в провідному матеріалі вихрових струм.

ВСП за способом розташування їх обмоток відносно об'єкту контролю (ОК) поділяють на прохідні та накладні. Так як задача стоїть контролювати прутки з неферомагнітних матеріалів виберемо прохідний вихрострумний перетворювач трансформаторного типу.

Найчастіше методи вихрострумного неруйнівного контролю (ВСНК) ґрунтуються на використанні гармонічних (синусоїдальних) сигналів для збудження електромагнітного поля та оцінки механічних та електрофізичних характеристик ОК. Для аналізу використовують такі інформативні параметри як амплітуда та фазовий зсув прийнятих сигналів відносно сигналу збудження. На такому методі ми і будемо базуватися. Також у ВСНК для комплексного оцінювання характеристик ОК використовують методи, які ґрунтуються на імпульсному збудженні вихрових струмів [3].

Як говорилося вище, зовнішні прохідні перетворювачі являють собою індуктивну котушку всередині якої проходить об'єкт контролю (див. рис. 1.1). Особливістю даного типу перетворювачів є їх простота, внаслідок чого вони широко використовуються для контролю в промисловості масових виробів таких як прокат труб, прутків і т. і. Ще однією їх особливістю є здатність працювати на великих швидкостях (для труб до 3 м/с, для контролю прутків до 50 м/с). Для пристроїв такого типу характерні: робота в широкому діапазоні діаметрів ОК (від 0,05 до 120 мм); можливість контролю ОК різноманітної поперечної форми (квадрат, трикутник, коло, еліпс і т.і.); простота та надійність конструкції [4].

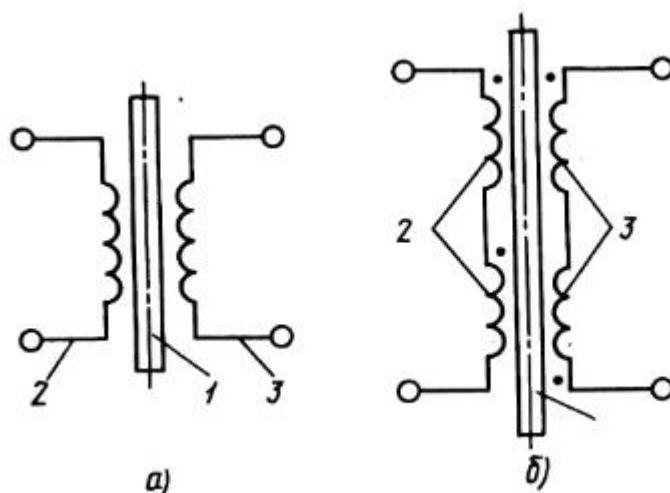


Рис. 1.1. ВСП трансформаторного типу: а – абсолютний; б – диференціальний

1 – ОК; 2 – збуджуюча котушка; 3 – вимірювальна котушка.

Розміри та електромагнітні параметри довгих циліндричних об'єктів з коловим перерізом, як однорідних так і багатошарових, слід контролювати за допомогою зовнішніх прохідних перетворювачів з однорідним магнітним полем в зоні контролю. Однорідне магнітне поле створюється двома шляхами. Найчастіше використовують циліндричну збуджуючу котушку з відношенням довжини l до діаметру $2R$, більшим 4 (див. рис. 1.2 - а). Інколи для того, щоб отримати однорідне магнітне поле, використовують дві короткі збуджуючі котушки у вигляді кілець Гельмгольца, відстань між якими a дорівнює їх радіусу R (див. рис. 1.2 - б) [4].

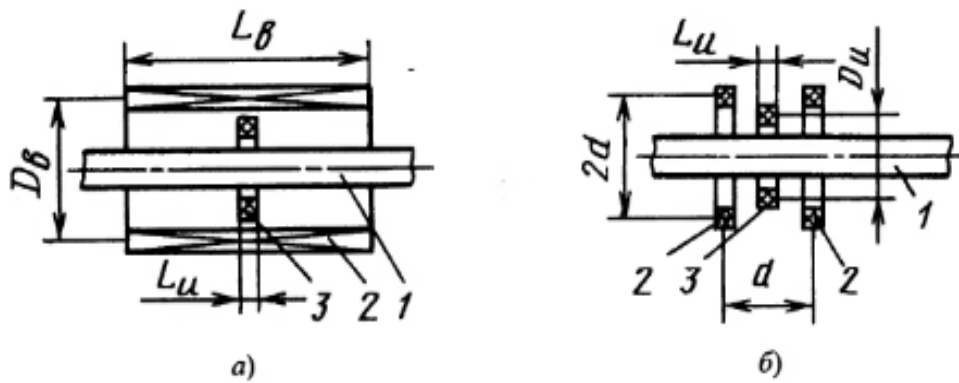


Рис. 1.2 Різновиди зовнішніх прохідних ВСП

1 – ОК; 2 – збуджуюча котушка; 3 – вимірювальна котушка;

d – відстань між збуджуючими котушками;

$l_в$ та l_u – довжина збуджуючої та вимірювальної котушки відповідно;

$D_в$ та D_u – діаметр збуджуючої та вимірювальної котушки відповідно.

Для знаходження оптимальних умов контролю для прохідного ВСП, який використовує однорідне змінне магнітне поле, що змінюється по синусоїдальному закону:

$$H = H_0 * \sin(\omega t) , \quad (1.1)$$

треба знати залежність ЕРС збуджуючої котушки ВСП, від параметрів ОК (див рис. 1.3)

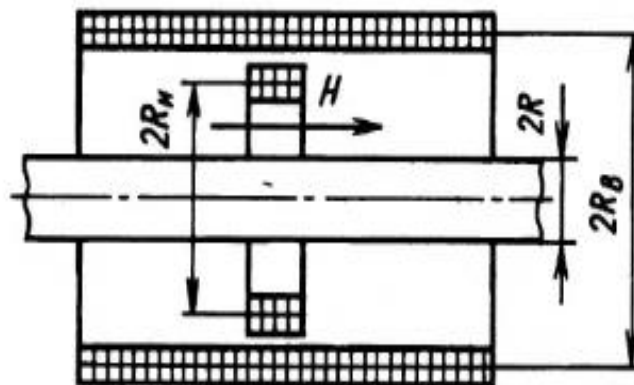


Рис. 1.3 Циліндр з коловим поперечним перерізом в ВСП

Для цієї мети визначається магнітний потік Φ в середині циліндра і напруженість магнітного поля H .

На основі закону електромагнітної індукції визначають ЕРС за формулою:

$$e(t) = -W_B * \frac{d\Phi}{dt} \quad (1.2)$$

де W_B – кількість витків вимірювальної котушки, Φ – магнітний потік, що проходить через цю котушку.

Для синусоїдального магнітного потоку комплексна амплітуда ЕРС дорівнює:

$$\dot{E} = \dot{E}_{OK} + \dot{U}_{BH} \quad (1.3)$$

де \dot{E}_{OK} – комплексна ЕРС холостого ходу, \dot{U}_{BH} – комплексна внесена напруга [4].

1.2 Методи обробки сигналів двопараметрового контролю

1.2.1 Двопараметровий контроль, як різновид багатопараметрового контролю

Двопараметровий контроль в наш час являє собою найбільш поширений в практиці ВСНК і використовується у тому випадку, коли сильний вплив на вихідні величини вимірювального перетворювача, крім контрольованого параметру чинить ще один – перешкоджаючий, зайвий (або стоонній) параметр. Використовують спеціальні методи та прийоми, котрі мають назву методів заглушення зайвого фактору. За їх допомогою суттєво зменшують вплив стороннього параметру на результат контролю.

Існують такі групи способів для виділення корисної інформації з заглушенням зайвого фактору:

- використання основних властивостей перетворювачів;
- використання двопараметрових способів для виділення корисної інформації шляхом усунення впливу факторів, що заважають;
- стабілізації умов контролю шляхом активного чи пасивного впливу на ОК чи ВСП;
- використання спектрального аналізу електричних сигналів.

Двопараметровий контроль ґрунтується на глибокому аналізі залежностей вихідних сигналів ВСП від контрольованого параметру і параметру, що подавляється. Завдяки цьому, такий аналіз дозволяє підібрати спосіб виділення корисної інформації, що забезпечить мінімальну похибку вимірювання в залежності від умов контролю [4].

З рис. 1.4 видно, що фаза внесеної напруги ВСП майже не залежить від зазору h_* , тому за цією фазою можна визначати питому електропровідність γ , при цьому придушується вплив зазору. Для отримання найбільшої чутливості до γ , умови контролю треба підбирати керуючись рис. 1.5 і рис. 1.9.

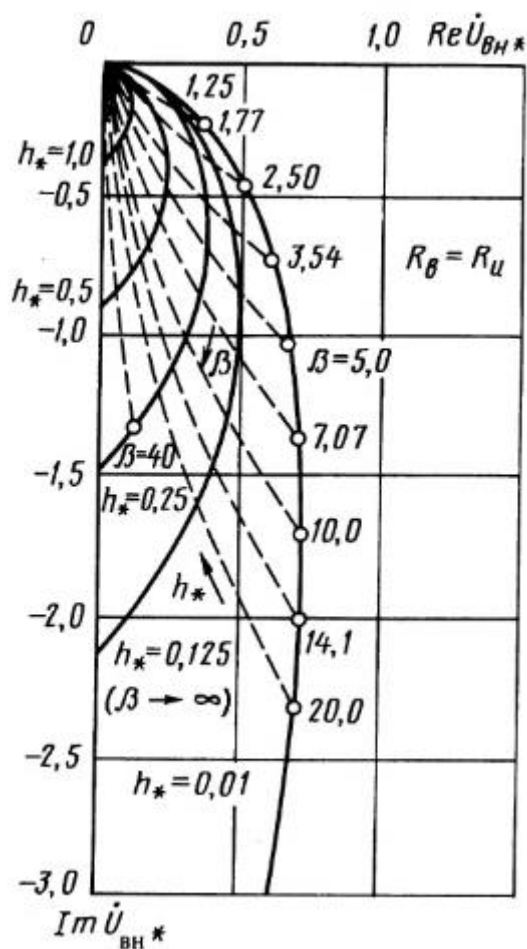


Рис. 1.4 Годографи відносної внесеної напруги накладного ВСП, над немагнітним середовищем

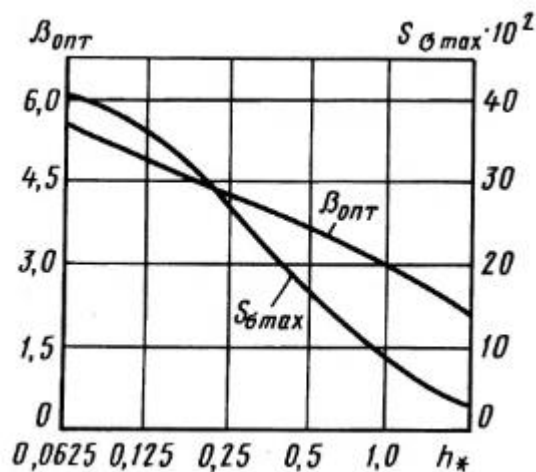


Рис. 1.5 Оптимальні значення узагальненого параметру та відповідні їм значення максимальної чутливості до питомої електричної провідності

Зазвичай чутливість до контрольованого параметру зменшується, при використанні контролю з придушенням зайвого фактору, але це компенсується підвищенням точності контролю оскільки похибка, яку вносить зайвий фактор зменшується на багато більше [4].

А ось багатопараметровий контроль використовується вже для контролю більш ніж двох параметрів. Розробка таких пристроїв складна, як у виготовленні, так і програмуванні, оскільки прилад повинен працювати в широкому діапазоні робочих частот та з різними типами ВСП.

1.2.2 Повний опір електричного ланцюга (імпеданс)

Відповідно до закону Ома при протіканні по ланцюгу постійного електричного струму, сила струму дорівнює відношенню падіння напруги до опору.

$$I = \frac{U}{R} \quad (1.4)$$

При протіканні по ланцюгу змінного електричного струму виникає вже реактивний опір. Повний електричний опір позначається літерою Z [5].

$$I = \frac{U}{Z} \quad (1.5)$$

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} \quad (1.6)$$

де Z – повний опір, R – активний опір, X_L – індуктивний опір, X_C – ємнісний опір.

Для індуктивного ланцюгу ($X_C = 0$), величина повного опору дорівнює:

$$Z = \sqrt{R^2 + X_L^2} \quad (1.7)$$

Індуктивний опір X_L визначається:

$$X_L = \omega L = 2\pi fL \quad (1.8)$$

де f – частота змінного струму, L – індуктивність.

Повний опір може бути записаний у комплексному виді:

$$\dot{Z} = R + jX \quad (1.9)$$

При вихрострумівому контролі майже всі прилади відображають сигнал у імпедансній площині. При вимірі різноманітних параметрів ВСНК в імпедансній площині отримуємо імпедансні діаграми або годографи. Для уникнення впливу конкретного вимірювального ланцюга, використовують нормовані діаграми. Таким чином ми виключаємо незмінну (неінформативну) частину опору, пов'язану з властивостями обмотки [5].

1.2.3 Фактори, які впливають на імпеданс системи

Знання факторів, що впливають на вимірювальний ланцюг та зображення цього впливу у комплексній площині, являє собою основу аналізу вихрострумівих сигналів. Так як вихрострумівий контроль чутливий одночасно к багатьом параметрам ОК, необхідно розглянути кожен параметр окремо. Усі фактори, що впливають на імпеданс та на утворення вихроструму в ОК, можуть бути поділені на дві основні групи:

1. Електрофізичні властивості та геометричні розміри ОК – електропровідність, магнітна провідність, товщина матеріалу, рельєф і т.д.
2. Особливості вимірювально ланцюга – робоча частота, електромагнітна залежність (взаємозв'язок), форма обмотки.

Перша група факторів не може бути змінена оператором так, як вона зв'язана з об'єктом, що контролюємо. Необхідно лише знати вплив кожного з цих факторів, та відокремити їх один від одного.

Друга група факторів вже може бути змінена оператором під безпосередній контроль. Так як вони є предметом вибору перед початком контролю.

На рис. 1.6 зображено ефект від зміни магнітної проникності. Хочу звернути вашу увагу на те, що незначні зміни магнітної проникності призводять до суттєвих змін імпедансу. При аналізі сигналів незначні зміни магнітної індукції можуть замаскувати вплив інших факторів. При чому магнітна проникність не постійна! Вона дуже залежить від струмів, що надходять до ВСП [5].

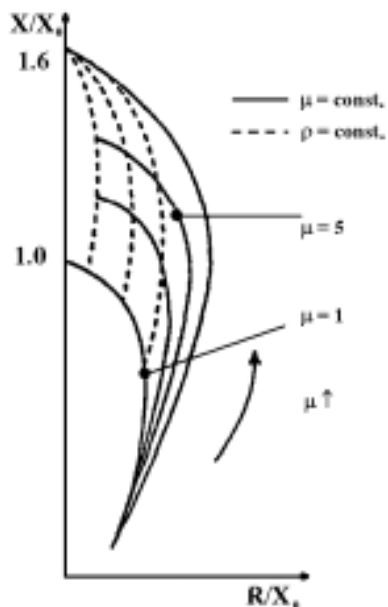


Рис. 1.6 Залежність складових імпедансу як функції магнітної проникності матеріалу ОК

Глибина проникнення вихрових струмів в неферромагнітний метал може досягати декількох міліметрів, тому є залежність імпедансу від товщини контрольованого матеріалу.

На рис. 1.7 зображено переміщення імпедансної точки при зміні товщини ОК від 0 до безкінечності для матеріалів Ti, Pb і Cu. Чим тонкіше матеріал, тим

відчутніше збільшується опір вихровим струмам, і імпедансна точка переміщується в гору по кривим годографа (рис. 1.7). Це говорить про те, що при збільшенні температури, появи тріщин або зменшенні товщини імпеданс буде збільшуватись [5].

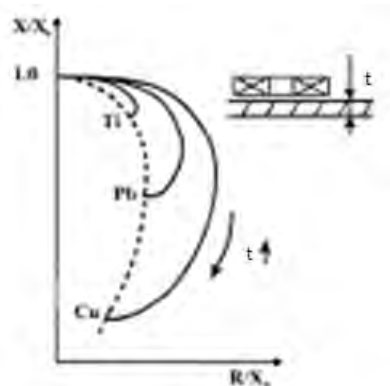


Рис. 1.7 Годограф імпедансу від товщини матеріалу t

Частота змінного струму є основним зовнішнім параметром системи, значення якої змінюється при вихрострумовому контролі для забезпечення оптимальних умов, щоб виявити та розпізнати дефект.

З рис. 1.8 видно, що зі збільшенням частоти імпеданс зменшується. Цей ефект виникає внаслідок того, що вихрові струми концентруються в тонкому верхньому шарі матеріалу. При зменшенні частоти, вихровий струм проникає глибше в матеріал і імпедансна точка знаходиться зверху кривої (рис. 1.8-а), тобто величина повного опору ланцюга збільшується. На рис. 1.8-б побудовані криві для 4-х різних частот та помічені точки для Титану, з чого добре видно, що імпеданс ланцюга зменшується, при збільшенні частоти [5].

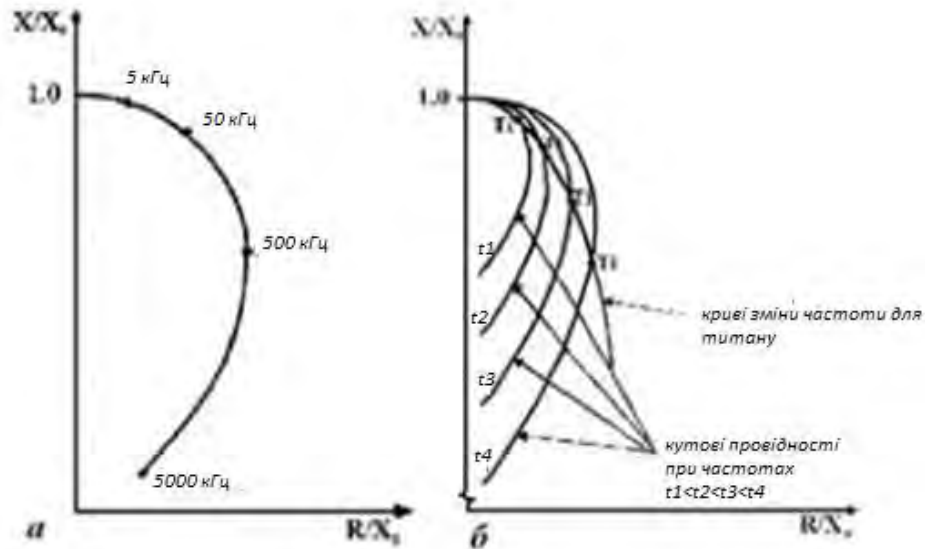


Рис. 1.8 Годограф зміни частоти

Вибір параметрів контролю представляє собою важкий процес, при якому дуже важливо, щоб фактори, які є другорядними, підтримувалися постійно. Тільки тоді можна сказати, що зміна імпедансу обумовлена лише тими факторами, які нас цікавлять. За ідентичних умов при збільшенні частоти з одної сторони, чутливість системи до ефекту підйому збільшується, з іншої, збільшення частоти призводить до збільшення чутливості до поверхневих дефектів [5].

1.2.4 Зміна фази вихроstromу за глибиною залягання

Вихрові струми, індуковані змінним магнітним полем, концентруються поблизу поверхні матеріалу під збуджуючою котушкою. Глибина їх проникання зменшується зі збільшенням частоти збуджуючого сигналу і являє собою функцію питомої провідності γ та магнітної проникності μ матеріалу.

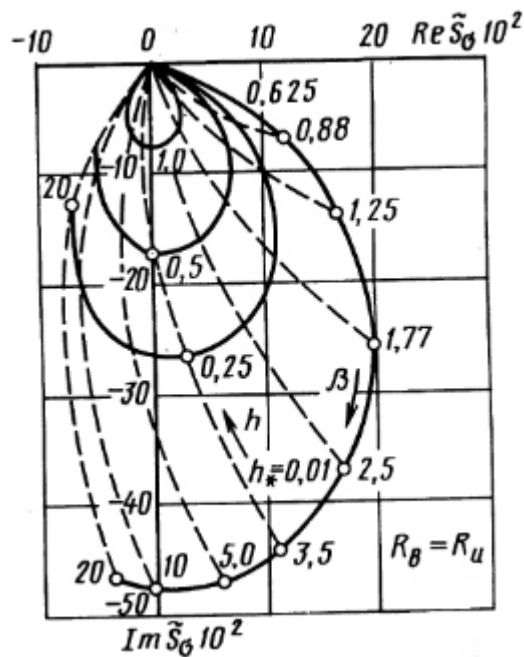


Рис. 1.9 Діаграма чутливості накладного перетворювача до зміни питомої електричної провідності на 1% для немагнітного середовища.

Зменшення щільності вихрових струмів в глибині матеріалу відомо як «скін-ефект» та полягає в наступному. Вихрові струми, що протікають в ОК, створюють магнітні поля, які протидіють основному, зовнішньому електромагнітному полю датчика.

Таким чином, основне магнітне поле датчика зменшується по мірі заглиблення в ОК. Вихрові струми, що знаходяться у поверхні ОК, екранують основне магнітне поле датчика. Поле з глибиною проникання слабне і щільність індукованих вихрострумів зменшується [5].

Протікання індукованих струмів описується рівнянням:

$$\nabla^2 I = \gamma \mu \frac{dI}{dt} \quad (1.10)$$

де I – щільність струму в матеріалі,

γ – питома провідність матеріалу,

μ – магнітна проникність матеріалу,

∇^2 – диференціальний оператор (оператор набла) другого порядку.

Вихроструми можна узагальнити наступним чином. При збільшенні частоти f , глибина проникнення δ вихрострумів зменшується, а їх фазове відставання збільшується. Зі збільшенням питомої провідності γ матеріалу, глибина проникнення δ зменшується, а їх фазове відставання збільшується. При збільшенні магнітної проникності μ матеріалу, глибина проникнення δ зменшується, а їх фазове відставання збільшується [5].

Вплив магнітної проникності на вихроструми неоднозначне оскільки магнітне поле обмотки за наявності феромагнітного матеріалу сильно збільшується, незважаючи на те, що поле вихрострумів слабне.

З цієї причини феромагнітні матеріали погано підходять для вихрострумовевого контролю. При використанні ВСНК з високою провідністю використовують струм низької частоти, і навпаки. Чим нижче частоти, тим більша глибина проникності, а фазове відставання вихрострумів менше.

Фазове відставання вихрострумів з глибиною грає важливу роль в імпедансному аналізі сигналів та при аналізі різних аномалій ОК [5].

1.2.5 Амплітудний метод обробки сигналів

Для початку розглянемо годограф внесених напруг $\dot{U}_{\text{вн}}$, які обумовленні контрольованим p_k та придушуваним p_n факторами (див. рис. 1.10). Модуль комплексної напруги (амплітуда напруги на ВСП), лише в невеликій частині може залежати від змін придушеного параметру, якщо робоча точка, зміщується з початку координат в точку K на комплексній площині $\dot{U}_{\text{вн}}$, розташованій на нормалі NN' до годографу $\dot{U}_{\text{вн}}(p_n)$ у точці A , відповідає ОК з номінальними параметрами (p_{k0}, p_{n0}) . Цього можна досягти шляхом віднімання компенсуючої напруги \dot{U}_k від напруги вимірювальної обмотки ВСП:

$$\dot{U}_A = \dot{U}_n - \dot{U}_k \quad (1.11)$$

де \dot{U}_n – початкова внесена напруга при p_{k0} та p_{n0} .

Якщо зміна придушеного фактору викликає зміщення кінця вектору $\dot{U}_{\text{вн}}$ із точки А в точку В, то різниця модулів векторів \dot{U}_A і \dot{U}_B дорівнює:

$$\Delta \dot{U} \cong \dot{U}_A - \dot{U}_B \cong 0 \quad (1.12)$$

У той же час при зміні контрольованого параметру p_k (відповідає точка С) маємо :

$$\Delta \dot{U} = \dot{U}_A - \dot{U}_C = S_k \Delta p_k \sin \alpha \quad (1.13)$$

де $S_k = \partial U / \partial p_k$ – модуль чутливості ВСП до контрольованого параметру p_k , α – кут в точці А між напрямками ліній впливу p_k та p_{Π} на комплексній площині.

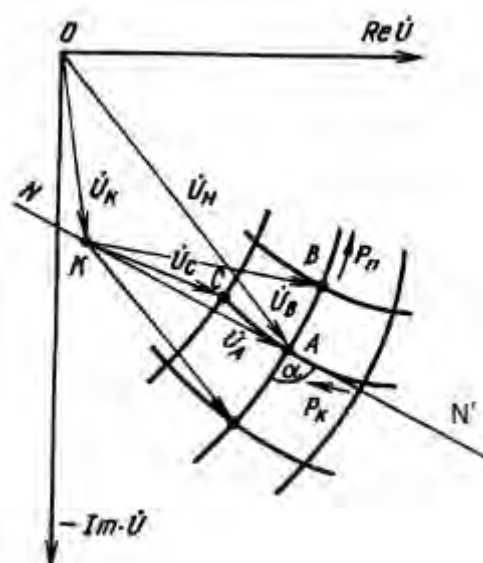


Рис. 1.10 Векторна діаграма внесених напруг, що ілюструє сутність амплітудного способу виділення корисної інформації

Використовувати амплітудний спосіб двопараметрового контролю доцільно, коли годографи $\dot{U}_{\text{вн}}(p_{\Pi})$ близькі до дуг концентрованих кіл, а кут α між дотичними до них годографами $\dot{U}_{\text{вн}}(p_k)$ є значним ($\pi/4 < \alpha < \pi/2$).

Важливо, щоб цей кут змінювався лише в малих межах за значної зміни параметрів p_k та p_{Π} . Якщо лінія впливу p_{Π} буде відрізнитися від окружності, а лінія впливу p_k – від прямої лінії, цей метод приведе до великих похибок. При чому похибки будуть тим більше, чим більша відмінність $\dot{U}_{\text{вн}}(p_{\Pi})$ від окружності, а $\dot{U}_{\text{вн}}(p_k)$ – від

прямої лінії. Оскільки вихідна напруга ВСП пропорційна $\sin\alpha$, то найкращі умови для виділення контрольованого параметра будуть у випадку $\alpha \rightarrow 90^\circ$.

Амплітудний метод краще за все підходить для контролю діаметра прутків прохідним ВСП, або товщини діелектричних покриттів накладними ВСП[4].

Схем приладу заснованого на використанні амплітудного способу послаблення впливу заважаючого фактору представлена на рисунку 1.11.

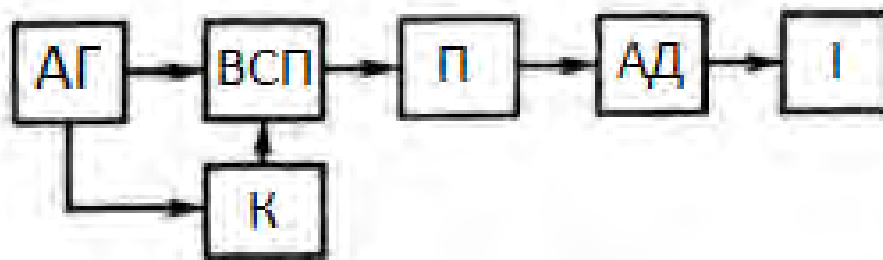


Рис 1.11 Структурна схема приладу заснованого на амплітудному методі виділення корисної інформації з сигналу ВСП

Автогенератор (АГ) синусоїдальних напруг забезпечує струм збудження ВСП і напругу компенсатора (К). Сигнали з ВСП посилюються підсилювачем (П) і детектуються амплітудним детектором (АД), а постійна напруга детектора подається на індикатор (І). Компенсатор дає змогу відрегулювати компенсуючу напругу по амплітуді і фазі так, щоб вона відповідала вимогам заглушення впливу заважаючого фактору. Компенсатор можна виконувати у вигляді різних пристроїв і, зокрема, у вигляді пристрою, зображеного на рисунку 1.12.

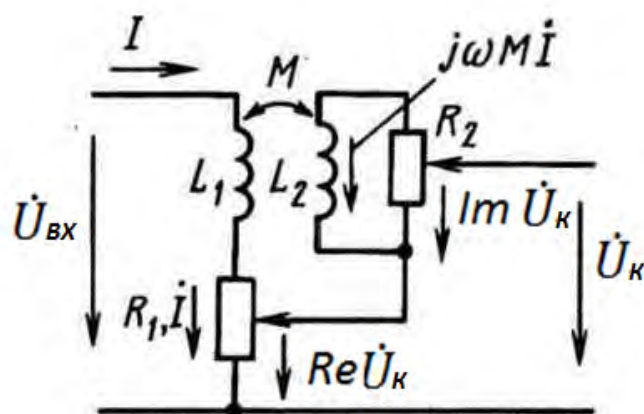


Рис 1.12 Схема компенсуючого пристрою

Компенсатор дозволяє плавно регулювати активну і реактивну складові його вихідної напруги. Режим роботи ВСП вибирається таким чином, щоб узагальнений параметр x відповідав робочій точці А (див. рис. 1.10), в якій найкращим чином виконується умова $\alpha \rightarrow 90^\circ$, а годографи $\dot{U}_{\text{вн}}(p_{\text{п}})$ наближаються до дуг кіл [4].

1.2.6 Фазовий метод обробки сигналів

Якщо початкова робоча точка К знаходиться на дотичній ГТ' (див. рис. 1.13) до ліній впливу $p_{\text{п}}$ у точці А, відповідає ОК з номінальними параметрами, то початкова фаза напруги майже не залежить від придушеного параметру $p_{\text{п}}$. З рис. 1.11 видно, що при переході з точки А в точку В (зміні параметру $p_{\text{к}}$), різниця аргументів вносимої напруги $\dot{U}_{\text{вн}}$ складає:

$$\varphi_{\text{В}} = \arg \dot{U}_{\text{внА}} - \arg \dot{U}_{\text{внВ}} \quad (1.14)$$

і змінюється в невеликому інтервалі, а при переході з точки А в точку С (зміні параметру $p_{\text{к}}$), різниця аргументів має більше значення і складає:

$$\varphi_{\text{С}} = \arg \dot{U}_{\text{внА}} - \arg \dot{U}_{\text{внС}} \quad (1.15)$$

Зміна контрольованого параметру $p_{\text{к}}$ при фазовому методі складає:

$$\Delta p_{\text{к}} = U_{\text{А}} \operatorname{tg} \varphi_{\text{С}} / S_{\text{к}} \sin \alpha \quad (1.16)$$

де $S_{\text{к}} = \partial U / \partial p_{\text{к}}$ – модуль чутливості ВСП до параметра $p_{\text{к}}$, α – кут в точці А між напрямками діній впливу $p_{\text{к}}$ та $p_{\text{п}}$ на комплексній площині.

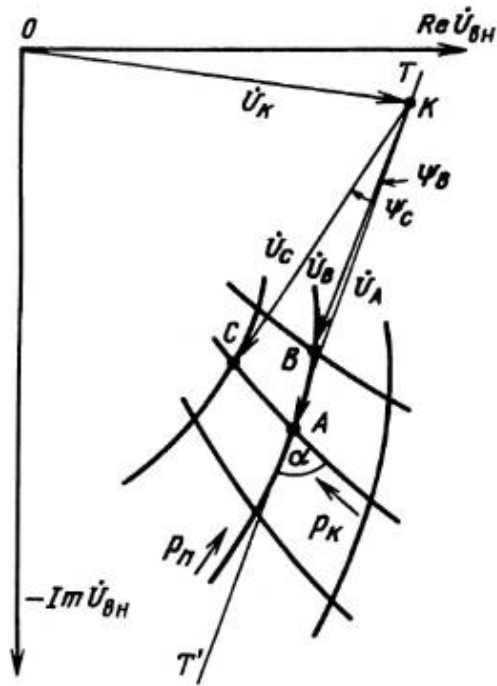


Рис. 1.13 Векторна діаграма фазового способу виділення корисної інформації

Фазовий метод використовують коли відбувається суміщення точки компенсації K з точкою перетину дотичних до ліній впливу p_n на комплексній площині. Використовувати фазовий спосіб двопараметрового контролю доцільно, коли лінії годографу $U_{вн}(p_n)$ представляють собою пучок променів, що сходяться в одній точці, а кут α між ними і годографами $U_{вн}(p_k)$ приблизно дорівнює $\pi/2$. Якщо годографи $U_{вн}(p_n)$ – не прямі лінії, виникає похибка, яка тим більша, чим більше їх відмінність від прямих [4].

Переваги цього методу у тому, що він послаблює вплив заважаючих факторів за рахунок того, що амплітудна нестабільність не впливає на похибку контролю.

1.2.7 Амплітудно-фазовий метод обробки сигналів

Проекція вектору напруги ВСП на напрям нормалі NN' до лінії впливу p_n у точці A (див. рис. 1.14), мало залежить від зміни придушеного параметру p_n . Відношення проєкцій напруг, обумовлених зміною контрольованого P_k та придушених факторів $P_n: \frac{P_k}{P_n} \gg 1$, так як $\sin\alpha \gg \sin\beta$, що видно з формул

$$\Pi_K = AC' = S_K \Delta p_K \sin \alpha \quad (1.17)$$

$$\Pi_{II} = AB' = S_{II} \Delta p_{II} \sin \beta \quad (1.18)$$

Такий спосіб ослаблення впливу заважаючого фактору називають способом проєкцій або амплітудно-фазовим способом двопараметрового ВСНК. Його раціонально використовувати, коли лінії p_K та p_{II} на комплексній площині \dot{U}_{BH} є майже паралельними прямими, а кут α між ними ледве відмінний від прямого. Зазвичай цей метод використовують, коли p_K та p_{II} змінюються у малих межах. Це пояснюється тим, що реальні годографи $\dot{U}_{BH}(p_K)$ і $\dot{U}_{BH}(p_{II})$ не є прямими, внаслідок чого виникає похибка, яка збільшується зі зростанням p_K та p_{II} . Тому режим контролю, при амплітудно-фазовим методом, вибирають таким, щоб ділянки годографів при заданих діапазонах зміни параметрів p_K та p_{II} були більш прямолінійними [4].

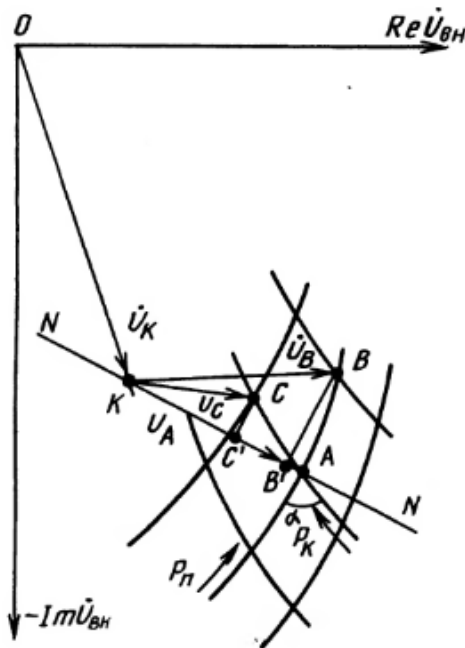


Рис. 1.14 Векторна діаграма амплітудно-фазового способу виділення інформації

При реалізації цього методу, зазвичай, начальну робочу точку К поєднують з точкою А, що відповідає номінальним значенням $p_{K \text{ ном}}$ та $p_{II \text{ ном}}$. В цьому випадку вихідна напруга ВСП, з урахуванням компенсуючої напруги,

наближається до нуля при номінальних параметрах ОК. Цей спосіб в пристроях ВСНК використовується найчастіше.

Узагальнені параметри α (для прохідного ВСП) і β (для накладного ВСП) потрібно обирати так, щоб кут між лініями впливу параметрів p_k та p_n був декілька десятків градусів, а також, щоб забезпечувалась достатня чутливість до контрольованого параметру p_k . Наприклад, для контролю товщини листа з неферромагнітних матеріалів, з усуненням фактору зазору, раціонально використовувати $\beta \cong 5$, при $N^* = 0,1$, та $\beta \cong 2,5$, при $N^* = 0,3$ [4].

1.3 Огляд приладів ВСК.

Провівши пошук на аналогічні прилади та переконуємось в тому, що пристрої вихрострумове контролю прохідного типу здебільшого адаптують під конкретні цілі виробництва, а отже і виготовлення цих пристроїв відбувається на замовлення. Здебільшого використовують перетворювачі накладного типу. Це пов'язано з більш широкими можливостями застосування пристроїв саме накладного типу. Але все ж таки, були знайдені прилади вихрострумове контролю з ВСП прохідного типу масового виробництва для дво- та багатопараметрового контролю.

Пошук аналогів проводився для того, щоб визначитись з діапазоном робочих частот на низкою інших характеристик.

Одним з таких приладів є ВД – 91 НМ (рис. 1.15). Це універсальний вихрострумівий багатоканальний дефектоскоп для багатопараметрового контролю. Це єдиний у світі багатоканальний дефектоскоп, що працює без втрати чутливості до контрольованому параметру через зміну товщини ізоляцію до 10 мм.

Він призначений для виявлення поверхневих та підповерхневих дефектів в ферромагнітних та неферромагнітних матеріалах і їх сплавів. Може використовуватися для автоматичного та ручного контролю трубного та листового металопрокату [6].



Рис. 1.15 Загальний вид вихрострумовеого приладу ВД – 91 НМ

Технічні характеристики та особливості:

1. Може використовувати амплітудний, фазовий та амплітудно-фазовий метод обробки сигналів.
2. Контроль об'єктів діаметром від 1 мм до 300 мм.
3. Можливість об'єднання в одну мережу.
4. Виявляє дефекти глибиною від 0,3 мм.
5. Працює зі змінним зазором до 10 мм.
6. Робоча частота ВСП в межах від 10 кГц до 500 кГц.

Наступний вихрострумовеий прилад, що був розглянутий – це структуроскоп АКА-3010 (рис. 1.16). Даний структуроскоп використовує амплітудно-фазовий метод контролю, і призначений для виявлення не тільки структури матеріалу ОК, а і геометричних розмірів ОК. Ось чому він був розглянутий як прилад багатопараметрового вихрострумовеого контролю для визначення геометричних розмірів ОК.

Він використовується, в промислових цілях, для відсортування металопрокату з ферромагнітних та неферромагнітних матеріалів відповідно до

різних електропровідних характеристик. Має високу чутливість та використовує ВСП прохідного типу [7].

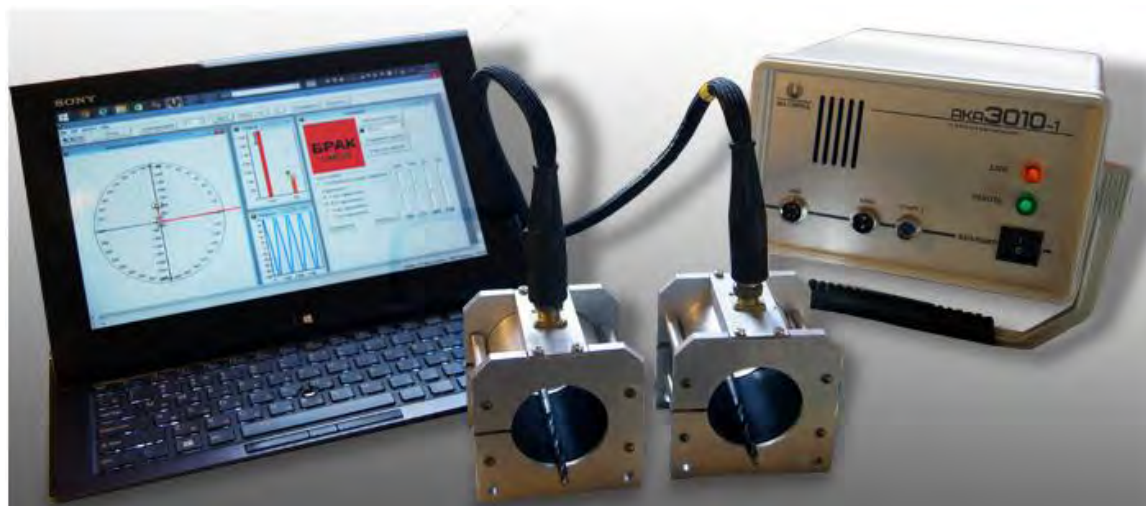


Рис. 1.16 Загальний вид вихрострумового приладу АКА-3010

Технічні характеристики та особливості:

1. Використовує амплітудно-фазовий метод обробки сигналів.
2. Контроль об'єктів діаметром від 1 мм до 300 мм.
3. Робоча частота 0,01 – 1 кГц.
4. Автоматична компенсація сигналу.
5. Висока чутливість.
6. Автоматична балансування сигналу.

Три останні пункти можливі лише за умови використання одночасно двох чи більше частот.

Останній вихрострумовий прилад, який був розглянутий, це вихрострумовий дефектоскоп ВД-132-К-ІУ-ОКО-01 (рис. 1.17), який призначений для знаходження тріщин або несучільностей в феромагнітних матеріалах. Використовується для контролю труб, промислових резервуарів, вузлів вагонів, обшивок і т.і. Використовує, як прохідні трансформаторні ВСП, так і накладні ВСП, в залежності від галузі використання [8].



Рис. 1.17 В Загальний вид вихрострумового приладу

Д-132-К-ПУ-ОКО-01

Технічні характеристики та особливості:

1. Багаточастотний дефектоскоп з 128 активними каналами (розділеними на 4 окремих блоках по 32 каналу кожен).
2. Робоча частота 500 Гц – 2 МГц.
3. Контроль об'єктів діаметром в залежності від обраного режиму від 1 мм до 300 мм з виявленням дефекту з розкриттям 0,02 мм (чи від 50 мм до 500 мм з виявленням дефекту з розкриттям 0,1 мм).
4. Можливість управління управління та регулювання на відстані.
5. Підключення абсолютного (параметрового) ВСП.
6. Підключення абсолютного ВСП трансформаторного типу.

		№ докум.	Підпис			
ПК51.13.0000.000 ПЗ						32

Висновки до розділу 1

Роблячи посилання на вище переглянуту теорію, для досягнення поставленої задачі було прийнято рішення про використання прохідного вихрострумowego перетворювача трансформаторного типу. Також був обраний амплітудний метод обробки сигналів для контролю діаметру та електропровідності ОК, так як він в більшій мірі підходить для цієї мети, ніж фазовий метод обробки сигналів. Беручи на увагу аналогічні прилади можна впевнено сказати, що обраний ВСП і метод обробки сигналів широко використовують для контролю металопрокату товщиною до 300 мм при робочих частотах від 0,1 до 500 кГц. А отже, обраний варіант найбільш вдалий для виконання поставленої задачі.

					ПК51.13.0000.000 ПЗ	
		№ докум.	Підпис			33

2. Розрахунок системи вихрострумівий перетворювач – об'єкт контролю

2.1 Опис системи ВСП – ОК.

Відповідно до завдання ОК є пруток круглого перетину. Для їх контролю використовуються прохідні ВСП, система представлена на рис.2.1.

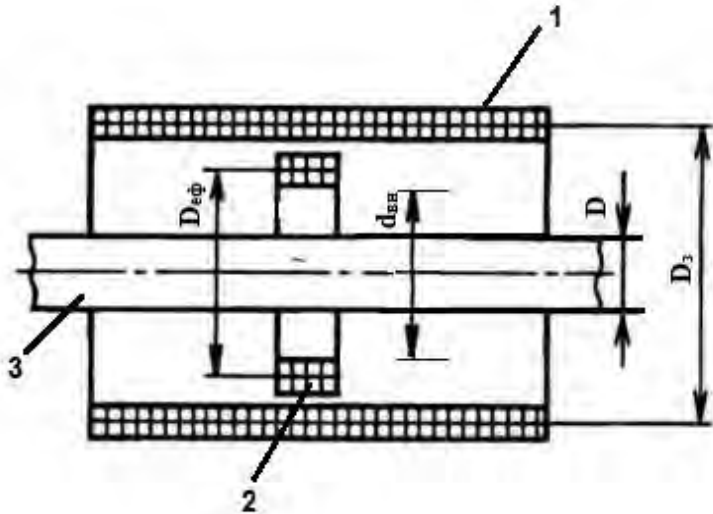


Рис 2.1 Пруток у зовнішньому прохідному ВСП

1,2 – відповідно збуджуюча і вимірювальна котушки;

3 - об'єкт контролю.

Коефіцієнт заповнення η показує, яку частину ефективної площини поперечного перерізу меншої з двох котушок ВСП – збуджувальної 1 чи вимірювальної 2 – займає площина поперечного перерізу ОК 3. У відповідності до цього коефіцієнт заповнення визначається, як відношення квадрату діаметра поперечного перерізу ОК до квадрата ефективного діаметра меншої котушки ВСП:

$$\eta = \frac{D^2}{D_{\text{эф}}^2} \quad (2.1)$$

Розрахунок внесених ОК напруг здійснюють з використанням особливого коефіцієнту – ефективної магнітної проникності.

Відносна магнітна проникність матеріалу ОК:

$$\mu^* = \frac{\mu}{\mu_0} \quad (2.2)$$

де μ – абсолютна магнітна проникність матеріалу;

μ_0 – магнітна проникність вакууму (повітря), яка дорівнює $4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м.

Для не феромагнітних матеріалів $\mu = \mu_0$, і відносна магнітна проникність матеріалу $\mu^* = 1$.

Ефективна магнітна проникність $\mu_{\text{еф}}$, яка має комплексний характер, враховує зміну напруженості магнітного поля по поперечному перерізу ОК та залежить від частоти струму збудження ВСП γ , магнітної проникності μ і питомої електропровідності σ матеріалу ОК, а також від форми та розмірів його поперечного перерізу. Остання залежність визначає необхідність окремого розгляду методики кількісної оцінки $\mu_{\text{еф}}$ для різних випадків – прутка циліндричної форми, труби та двохшарового прутка.

Вихідним сигналом ВСП є ЕРС, яка наводиться в котушці 2 (рис.2.1). В загальному виді, за відсутності дефектів прутка, ця ЕРС має дві складові:

$$\dot{E} = E_{\text{он}} + U_{\text{вн}} \quad (2.3)$$

Для ОК у вигляді цільного прутка циліндричної форми ефективна магнітна проникність:

$$\mu_{\text{еф}} = \frac{2 J_1(\dot{K}R)}{\dot{K}R J_0(\dot{K}R)} \quad (2.4)$$

де $J_0(\dot{K}R)$ і $J_1(\dot{K}R)$ - функції Бесселя (модифіковані циліндричні функції) першого роду відповідно нульового та першого порядків.

$\dot{K}R$ - їх комплексний аргумент;

R - радіус поперечного перерізу ОК;

\dot{K} - постійна вихрових струмів;

K - модуль постійної вихрових струмів.

У електромагнітному контролі добуток модуля постійної вихрових струмів на радіус поперечного перерізу ОК є важливою характеристикою, яка використовується для кількісної оцінки $\mu_{\text{еф}}$.

Ця характеристика зветься узагальненим параметром і позначається β :

$$\beta = \frac{D}{2} \sqrt{\omega \sigma \mu_0} \quad (2.5)$$

Задача кількісної оцінки $\mu_{\text{еф}}$ може бути вирішена одним з трьох методів: аналітичним, графічним або табличним.

Графічний спосіб чисельної оцінки $\mu_{\text{еф}}$ полягає у використанні для визначення дійсної та уявної складових ефективної магнітної проникності годографа.

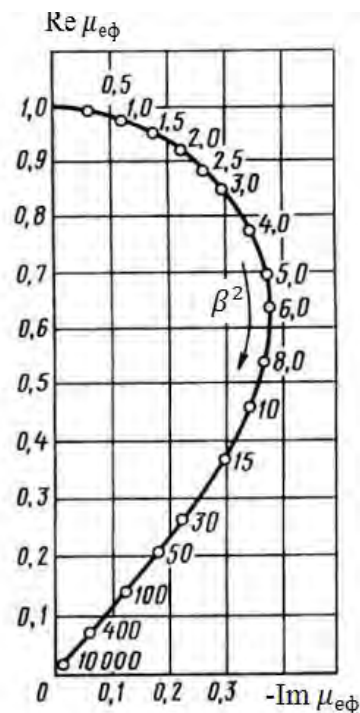


Рис. 2.2 Залежність $\mu_{\text{еф}}$ від узагальненого параметру β

Початкова ЕРС холостого ходу може бути визначена по формулі:

$$E_{\text{он}} = 0,5\pi^2 \gamma \mu_0 W_2 \dot{H}_0 D_{\text{еф}}^2 \quad (2.6)$$

де W_2 - кількість витків вимірювальної котушки ВСП;

γ - частота струму збудження;

H_0 - напруженість магнітного поля в зоні контролю при відсутності ОК;

$D_{\text{еф}}$ - ефективний діаметр вимірювальної котушки.

2.2 Розрахунок вихрострумовеого перетворювача

Відповідно до вихідних даних отриманих зі стенду маємо:

$$d_{06} = 0,22 \text{ мм.}$$

$D_{0-10} = 34 \text{ мм; } 34,1 \text{ мм; } 34,2 \text{ мм; } 34,3 \text{ мм; } 34,4 \text{ мм; } 34,5 \text{ мм; } 34,6 \text{ мм; } 34,7 \text{ мм; } 34,8 \text{ мм; } 34,9 \text{ мм; } 35 \text{ мм.}$

Ефективний діаметр котушки визначається як $D_{\text{еф}} = \sqrt{\frac{D_H^2 + D_H D_B + D_B^2}{3}}$

$$D_{\text{еф}} = \sqrt{\frac{D_H^2 + D_H D_B + D_B^2}{3}} = \sqrt{\frac{1600 + 1564 + 1528,81}{3}} = 39,55 \text{ мм.}$$

D_H – зовнішній діаметр вимірювальної котушки, рівний 40 мм;

D_B – внутрішній діаметр вимірювальної котушки, рівний 39,1 мм.

Коефіцієнт заповнення η розраховується за формулою:

$$\eta = \frac{D^2}{D_{\text{еф}}^2}$$

Для кожного значення діаметру окремо маємо:

$$\eta_0 = \frac{D_0^2}{D_{\text{еф}}^2} = \frac{34^2}{39,55^2} = \frac{1156}{1564,27} = 0,739;$$

$$\eta_1 = \frac{D_1^2}{D_{\text{еф}}^2} = \frac{34,1^2}{39,55^2} = \frac{1162,81}{1564,27} = 0,74335;$$

$$\eta_2 = \frac{D_2^2}{D_{\text{еф}}^2} = \frac{34,2^2}{39,55^2} = \frac{1169,64}{1564,27} = 0,74772;$$

$$\eta_3 = \frac{D_3^2}{D_{\text{еф}}^2} = \frac{34,3^2}{39,55^2} = \frac{1176,49}{1564,27} = 0,7521;$$

$$\eta_4 = \frac{D_4^2}{D_{\text{еф}}^2} = \frac{34,4^2}{39,55^2} = \frac{1183,36}{1564,27} = 0,75649;$$

$$\eta_5 = \frac{D_5^2}{D_{\text{еф}}^2} = \frac{34,5^2}{39,55^2} = \frac{1190,25}{1564,27} = 0,76089;$$

$$\eta_6 = \frac{D_6^2}{D_{\text{еф}}^2} = \frac{34,6^2}{39,55^2} = \frac{1197,16}{1564,27} = 0,76531;$$

$$\eta_7 = \frac{D_7^2}{D_{\text{еф}}^2} = \frac{34,7^2}{39,55^2} = \frac{1204,09}{1564,27} = 0,76974;$$

$$\eta_8 = \frac{D_8^2}{D_{\text{еф}}^2} = \frac{34,8^2}{39,55^2} = \frac{1211,04}{1564,27} = 0,77419;$$

$$\eta_9 = \frac{D_9^2}{D_{\text{еф}}^2} = \frac{34,9^2}{39,55^2} = \frac{1218,01}{1564,27} = 0,77864;$$

$$\eta_{10} = \frac{D_{10}^2}{D_{\text{еф}}^2} = \frac{35^2}{39,55^2} = \frac{1225}{1564,27} = 0,78311;$$

Для подальшого розрахунку кількісної оцінки ефективної магнітної проникності потрібна така характеристика, як узагальнений параметр β :

$$\beta = \frac{D}{2} \sqrt{\omega \gamma \mu_0}$$

де $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ Гн/м}$.

В дослідженнях використовуються 2 види зразків ОК з різних матеріалів: бронза ($\gamma_1 = 2,75 \times 10^7 \text{ См/м}$) та дюралюміній ($\gamma_2 = 4,87 \times 10^7 \text{ См/м}$).

На рис. 2.3 (а, б) видно, що зі зростанням β чутливість S_{R^*} збільшується, прагнучи до значення $S_{R^*} = 2$; S_{γ^*} спочатку збільшується від нуля до $S_{\gamma^*} = 0,35$ при $\beta = 2,5$ ($\beta^2 = 6,25$), а потім зменшується прагнучи до 0 при $\beta \rightarrow \infty$.

В такому випадку, найкраща умова для контролю радіусу (діаметру) циліндру при великому значенні β , тому обираємо значення $\beta = 20$ (таке значення буде використовуватись при контролі на великій частоті); а для контролю питомої електропровідності σ – значенню $\beta = 2,5$.

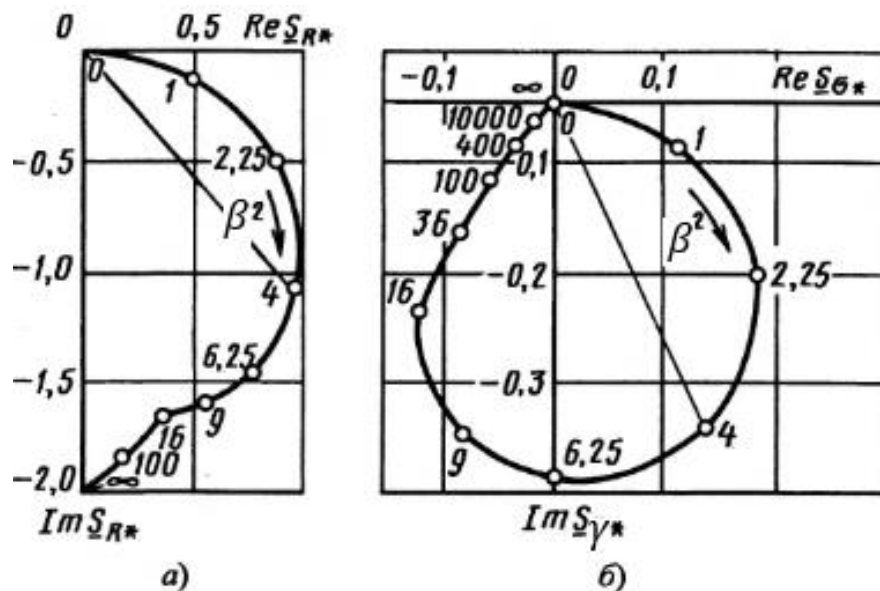


Рис. 2.3 Годографи відносної чутливості зовнішнього прохідного ВСП до змін параметрів круглого циліндру: а – радіуса, б - електропровідності

2.2.1 Розрахунок вихрострумовео перетворювача на високій частоті для бронзи

Із попередніх міркувань обираємо значення $\beta_1 = 20$, а матеріал обираємо бронзу ($\gamma_1 = 2,75 \cdot 10^7 \text{ См/м}$ або $\gamma_1 = 27,5 \frac{\text{М}}{\text{Ом*мм}^2}$). Для подальших розрахунків визначаємо ω за формулою:

$$\omega_1 = \frac{\beta_1^2}{R_{\text{сеп}}^2 \gamma \mu_0} \quad (2.7)$$

де $R_{\text{сеп}}$ – середній радіус.

Для бронзи маємо наступні діаметри: 34,3 мм; 34,4 мм; 34,7 мм; 34,8 мм; 34,9 мм.

Отже середній радіус дорівнює:

$$R_{\text{сеп}} = \frac{D_{\text{сеп}}}{2} = \frac{D_3 + D_4 + D_7 + D_8 + D_9}{5 \cdot 2} = \frac{34,3 + 34,4 + 34,7 + 34,8 + 34,9}{10} = 17,31 \text{ мм.}$$

$$\omega_1 = \frac{\beta_1^2}{R_{\text{сеп}}^2 \gamma \mu_0} = \frac{400}{299,6361 \cdot 27,5 \cdot 4 \cdot 3,1415 \cdot 10^{-7}} = \frac{400}{10,35468 \cdot 10^{-3}} = 38,63 \text{ кГц.}$$

β також розраховується для кожного значення діаметру окремо, як і всі подальші величини.

$$\beta_{1_{11}} = \frac{34,3}{2} \sqrt{38,63 * 10^3 * 27,5 * 4 * 3,1415 * 10^{-7}} = 22,89$$

$$\beta_{1_{12}} = \frac{34,4}{2} \sqrt{38,63 * 10^3 * 27,5 * 4 * 3,1415 * 10^{-7}} = 22,96$$

$$\beta_{1_{13}} = \frac{34,7}{2} \sqrt{38,63 * 10^3 * 27,5 * 4 * 3,1415 * 10^{-7}} = 23,16$$

$$\beta_{1_{14}} = \frac{34,8}{2} \sqrt{38,63 * 10^3 * 27,5 * 4 * 3,1415 * 10^{-7}} = 23,23$$

$$\beta_{1_{15}} = \frac{34,9}{2} \sqrt{38,63 * 10^3 * 27,5 * 4 * 3,1415 * 10^{-7}} = 23,29$$

Ефективну магнітну проникність $\mu_{\text{еф}}$ розраховуємо у програмному середовищі Matlab за допомогою функції Бесселя :

$$y = 2.* \text{besselj}(1, x.* \text{sqrt}(-j))./(x.* \text{sqrt}(-j).* \text{besselj}(0, x.* \text{sqrt}(-j)))$$

Маємо такі значення ефективної магнітної проникності:

β	$\text{Re}(\mu_{\text{еф}})$	$\text{Im}(\mu_{\text{еф}})$
22.89	0.0618	-0.0599
22.96	0.0616	-0.0597
23.16	0.0611	-0.0592
23.23	0.0609	-0.0590
23.29	0.0607	-0.0589

Різниця між вихідною напругою ВСП при наявності ОК і ЕРС холостого ходу, тобто абсолютний приріст напруги в режимі контролю називається внесеною напругою.

Тоді відносна внесена напруга, нормована за початковою ЕРС холостого ходу буде визначатись як:

$$U_{\text{вн}}^* = j\eta(\mu^* [\text{Re}(\mu_{\text{еф}}) + \text{Im}(\mu_{\text{еф}})] - 1) \quad (2.8)$$

$$\dot{U}_{\text{BH1}}^* = j\eta_3 (\mu^* [Re(\dot{\mu}_{\text{e}\phi 1}) + Im(\dot{\mu}_{\text{e}\phi 1})] - 1) = j\eta_3 Re(\dot{\mu}_{\text{e}\phi 1}) - j\eta_3 - \eta_3 Im(\dot{\mu}_{\text{e}\phi 1}) = -0,7521 * (-0,0599) + j0,7521 * (0,0618 - 1) = 0,04505 - j0,70562 \text{ B.}$$

$$\dot{U}_{\text{BH2}}^* = j\eta_4 Re(\dot{\mu}_{\text{e}\phi 2}) - j\eta_4 - \eta_4 Im(\dot{\mu}_{\text{e}\phi 2}) = -0,7565 * (-0,0597) + j0,7565 * (0,0616 - 1) = 0,04516 - j0,71 \text{ B.}$$

$$\dot{U}_{\text{BH3}}^* = j\eta_7 Re(\dot{\mu}_{\text{e}\phi 3}) - j\eta_7 - \eta_7 Im(\dot{\mu}_{\text{e}\phi 3}) = -0,76974 * (-0,0592) + j0,76974 * (0,0611 - 1) = 0,04557 - j0,7227 \text{ B.}$$

$$\dot{U}_{\text{BH4}}^* = j\eta_8 Re(\dot{\mu}_{\text{e}\phi 4}) - j\eta_8 - \eta_8 Im(\dot{\mu}_{\text{e}\phi 4}) = -0,77419 * (-0,0590) + j0,77419 * (0,0609 - 1) = 0,04568 - j0,727 \text{ B.}$$

$$\dot{U}_{\text{BH5}}^* = j\eta_9 Re(\dot{\mu}_{\text{e}\phi 5}) - j\eta_9 - \eta_9 Im(\dot{\mu}_{\text{e}\phi 5}) = -0,77864 * (-0,0589) + j0,77864 * (0,0607 - 1) = 0,04586 - j0,73137 \text{ B.}$$

Початкова ЕРС холостого ходу:

$$\dot{E}_{\text{OH}} = 0,5\pi^2 \gamma \mu_0 W_2 \dot{H}_0 D_{\text{e}\phi}^2$$

\dot{H}_0 – напруженість магнітного поля в зоні контролю за відсутності ОК.

$$\dot{H}_0 = \frac{W_1 I}{l} = \frac{176 * 40 * 10^{-3}}{70,5 * 10^{-3}} = 99,86 \frac{\text{A}}{\text{м}}$$

I – струм збудження, що дорівнює 40 мА.

l – довжина обмотки, яка становить 70,5 мм.

$$\dot{E}_{\text{OH}} = \frac{1}{2} * 9,8696 * 38,63 * 10^3 * 12,56 * 10^{-7} * 873 * 99,86 * 1564,27 * 10^{-6} = 32,6 \text{ B.}$$

Розрахунок абсолютної внесеної напруги:

$$\dot{U}_{\text{BH1}} = \dot{E}_{\text{OH}} * \dot{U}_{\text{BH1}}^* = 32,6 (0,04505 - j0,70562) = 1,468 - j23 \text{ B.}$$

$$\dot{U}_{\text{BH2}} = \dot{E}_{\text{OH}} * \dot{U}_{\text{BH2}}^* = 32,6 (0,04516 - j0,71) = 1,472 - j2,3146 \text{ B.}$$

$$\dot{U}_{\text{BH3}} = \dot{E}_{\text{OH}} * \dot{U}_{\text{BH3}}^* = 32,6 (0,04557 - j0,7227) = 1,485 - j23,56 \text{ B.}$$

$$U_{\text{ВН4}} = E_{\text{ОН}} * \dot{U}_{\text{ВН4}}^* = 32,6 (0,04568 - j0,727) = 1,489 - j23,7 \text{ В.}$$

$$U_{\text{ВН5}} = E_{\text{ОН}} * \dot{U}_{\text{ВН5}}^* = 32,6 (0,04586 - j0,73137) = 1,495 - j23,843 \text{ В.}$$

Розрахунок модуля вихідної напруги ВСП в режимі контролю шляхом геометричного сумування складових $\dot{U}_{\text{ВН}}$:

$$|\dot{U}_{\text{ВН}} D| = \sqrt{\text{Re}^2 \dot{U}_{\text{ВН}} + \text{Im}^2 \dot{U}_{\text{ВН}}}$$

$$|\dot{U}_{\text{ВН1}} D| = \sqrt{\text{Re}^2 \dot{U}_{\text{ВН1}} + \text{Im}^2 \dot{U}_{\text{ВН1}}} = \sqrt{1,468^2 + 23^2} = 23,04 \text{ В.}$$

$$|\dot{U}_{\text{ВН2}} D| = \sqrt{\text{Re}^2 \dot{U}_{\text{ВН2}} + \text{Im}^2 \dot{U}_{\text{ВН2}}} = \sqrt{1,472^2 + 23,146^2} = 23,19 \text{ В.}$$

$$|\dot{U}_{\text{ВН3}} D| = \sqrt{\text{Re}^2 \dot{U}_{\text{ВН3}} + \text{Im}^2 \dot{U}_{\text{ВН3}}} = \sqrt{1,485^2 + 23,56^2} = 23,6 \text{ В.}$$

$$|\dot{U}_{\text{ВН4}} D| = \sqrt{\text{Re}^2 \dot{U}_{\text{ВН4}} + \text{Im}^2 \dot{U}_{\text{ВН4}}} = \sqrt{1,489^2 + 23,7^2} = 23,74 \text{ В.}$$

$$|\dot{U}_{\text{ВН5}} D| = \sqrt{\text{Re}^2 \dot{U}_{\text{ВН5}} + \text{Im}^2 \dot{U}_{\text{ВН5}}} = \sqrt{1,495^2 + 23,843^2} = 23,89 \text{ В.}$$

2.2.2 Розрахунок вихрострумів перетворювача на високій частоті для дюралюмінію

Як в попередньому випадку обираємо $\beta_1 = 20$, а матеріал обираємо бронзу ($\gamma_2 = 4,87 * 10^7 \text{ См/м}$ або $\gamma_2 = 48,7 \frac{\text{М}}{\text{Ом*мм}^2}$). Для подальших розрахунків визначаємо ω за формулою:

$$\omega_2 = \frac{\beta_1^2}{R_{\text{сер}}^2 \gamma \mu_0}$$

Для дюралюмінію маємо наступні діаметри: 34,2 мм; 34,3 мм; 34,5 мм; 34,6 мм; 34,7 мм; 34,9 мм;

Визначаємо $R_{\text{сер}}$ як:

$$R_{\text{сер}} = \frac{D_{\text{сер}}}{2} = \frac{D_2 + D_3 + D_5 + D_6 + D_7 + D_9}{6 * 2} = \frac{34,2 + 34,3 + 34,5 + 34,6 + 34,7 + 34,9}{12} = 17,26 \text{ мм.}$$

$$\omega_2 = \frac{\beta_1^2}{R_{\text{сер}}^2 \gamma \mu_0} = \frac{400}{297,91 * 48,7 * 4 * 3,14 * 10^{-7}} = \frac{400}{18,23156 * 10^{-3}} = 21,94 \text{ кГц.}$$

Розраховуємо β для кожного діаметру:

$$\beta_{1_{21}} = \frac{34,2}{2} \sqrt{21,94 * 10^3 * 48,7 * 4 * 3,1415 * 10^{-7}} = 19,8145$$

$$\beta_{1_{22}} = \frac{34,3}{2} \sqrt{21,94 * 10^3 * 48,7 * 4 * 3,1415 * 10^{-7}} = 19,8725$$

$$\beta_{1_{23}} = \frac{34,5}{2} \sqrt{21,94 * 10^3 * 48,7 * 4 * 3,1415 * 10^{-7}} = 19,9883$$

$$\beta_{1_{24}} = \frac{34,6}{2} \sqrt{21,94 * 10^3 * 48,7 * 4 * 3,1415 * 10^{-7}} = 20,0462$$

$$\beta_{1_{25}} = \frac{34,7}{2} \sqrt{21,94 * 10^3 * 48,7 * 4 * 3,1415 * 10^{-7}} = 20,1042$$

$$\beta_{1_{26}} = \frac{34,9}{2} \sqrt{21,94 * 10^3 * 48,7 * 4 * 3,1415 * 10^{-7}} = 20,22$$

Для розрахунку ефективної магнітної проникності знову звернемося для середовища Matlab і функції Бесселя. Маємо наступні дані:

β	$Re(\mu_{e\phi})$	$Im(\mu_{e\phi})$
19,8145	0,0714	-0,0688
19,8725	0,0712	-0,0686
19,9883	0,0708	-0,0682
20,0462	0,0706	-0,0680
20,1042	0,0704	-0,0678
20,2200	0,0700	-0,0675

Розраховуємо відносну внесену напругу для кожного випадку:

$$\dot{U}_{BH1}^* = j\eta_2 Re(\mu_{e\phi1}) - j\eta_2 - \eta_2 Im(\mu_{e\phi1}) = -0,74772 * (-0,0688) + j0,74772(0,0714 - 1) = 0,0514 - j0,69433 B.$$

$$\dot{U}_{BH2}^* = j\eta_3 Re(\mu_{e\phi2}) - j\eta_3 - \eta_3 Im(\mu_{e\phi2}) = -0,7521 * (-0,0686) + j0,7521(0,0712 - 1) = 0,0519 - j0,69855 B.$$

$$\dot{U}_{\text{BH3}}^* = j\eta_5 \text{Re}(\dot{\mu}_{\text{eф3}}) - j\eta_5 - \eta_5 \text{Im}(\dot{\mu}_{\text{eф3}}) = -0,76089 * (-0,0682) + j0,76089(0,0708 - 1) = 0,0519 - j0,70701 \text{ В.}$$

$$\dot{U}_{\text{BH4}}^* = j\eta_6 \text{Re}(\dot{\mu}_{\text{eф4}}) - j\eta_6 - \eta_6 \text{Im}(\dot{\mu}_{\text{eф4}}) = -0,76531 * (-0,068) + j0,76531(0,0706 - 1) = 0,052 - j0,71128 \text{ В.}$$

$$\dot{U}_{\text{BH5}}^* = j\eta_7 \text{Re}(\dot{\mu}_{\text{eф5}}) - j\eta_7 - \eta_7 \text{Im}(\dot{\mu}_{\text{eф5}}) = -0,76974 * (-0,0678) + j0,76974(0,0704 - 1) = 0,05219 - j0,71555 \text{ В.}$$

$$\dot{U}_{\text{BH6}}^* = j\eta_9 \text{Re}(\dot{\mu}_{\text{eф6}}) - j\eta_9 - \eta_9 \text{Im}(\dot{\mu}_{\text{eф6}}) = -0,77864 * (-0,0675) + j0,77864(0,07 - 1) = 0,05255 - j0,72413 \text{ В.}$$

Початкова ЕРС холостого ходу:

$$E_{\text{OH}}^{\dot{}} = \frac{1}{2} * 9,8696 * 21,94 * 10^3 * 12,56 * 10^{-7} * 873 * 99,86 * 1564,27 * 10^{-6} = 18,54 \text{ В.}$$

Розрахунок абсолютної внесеної напруги:

$$U_{\text{BH1}}^{\dot{}} = E_{\text{OH}}^{\dot{}} * \dot{U}_{\text{BH1}}^* = 18,54 (0,0514 - j0,69433) = 0,953 - j12,87 \text{ В.}$$

$$U_{\text{BH2}}^{\dot{}} = E_{\text{OH}}^{\dot{}} * \dot{U}_{\text{BH2}}^* = 18,54 (0,0519 - j0,69855) = 0,962 - j12,95 \text{ В.}$$

$$U_{\text{BH3}}^{\dot{}} = E_{\text{OH}}^{\dot{}} * \dot{U}_{\text{BH3}}^* = 18,54 (0,0519 - j0,70701) = 0,962 - j13,11 \text{ В.}$$

$$U_{\text{BH4}}^{\dot{}} = E_{\text{OH}}^{\dot{}} * \dot{U}_{\text{BH4}}^* = 18,54 (0,052 - j0,71128) = 0,964 - j13,19 \text{ В.}$$

$$U_{\text{BH5}}^{\dot{}} = E_{\text{OH}}^{\dot{}} * \dot{U}_{\text{BH5}}^* = 18,54 (0,05219 - j0,71555) = 0,968 - j13,27 \text{ В.}$$

$$U_{\text{BH6}}^{\dot{}} = E_{\text{OH}}^{\dot{}} * \dot{U}_{\text{BH6}}^* = 18,54 (0,05255 - j0,72413) = 0,974 - j13,43 \text{ В.}$$

Розрахунок модуля вихідної напруги ВСП в режимі контролю шляхом геометричного сумування складових $U_{\text{BH}}^{\dot{}}$:

$$|U_{\text{BH1}}^{\dot{}} D| = \sqrt{\text{Re}^2 U_{\text{BH1}}^{\dot{}} + \text{Im}^2 U_{\text{BH1}}^{\dot{}}} = \sqrt{0,953^2 + 12,87^2} = 12,9 \text{ В.}$$

$$|U_{\text{BH2}}^{\dot{}} D| = \sqrt{\text{Re}^2 U_{\text{BH2}}^{\dot{}} + \text{Im}^2 U_{\text{BH2}}^{\dot{}}} = \sqrt{0,962^2 + 12,95^2} = 12,98 \text{ В.}$$

$$|U_{\text{BH3}}^{\dot{}} D| = \sqrt{\text{Re}^2 U_{\text{BH3}}^{\dot{}} + \text{Im}^2 U_{\text{BH3}}^{\dot{}}} = \sqrt{0,962^2 + 13,11^2} = 13,14 \text{ В.}$$

$$|U_{BH4} \dot{D}| = \sqrt{Re^2 U_{BH4}^2 + Im^2 U_{BH4}^2} = \sqrt{0,964^2 + 13,19^2} = 13,22 \text{ В.}$$

$$|U_{BH5} \dot{D}| = \sqrt{Re^2 U_{BH5}^2 + Im^2 U_{BH5}^2} = \sqrt{0,968^2 + 13,27^2} = 13,3 \text{ В.}$$

$$|U_{BH6} \dot{D}| = \sqrt{Re^2 U_{BH6}^2 + Im^2 U_{BH6}^2} = \sqrt{0,974^2 + 13,43^2} = 13,46 \text{ В.}$$

2.2.3 Аналіз отриманих результатів та обґрунтування методу обробки

Градувальна характеристика відношення значень внесеної напруги до діаметру.

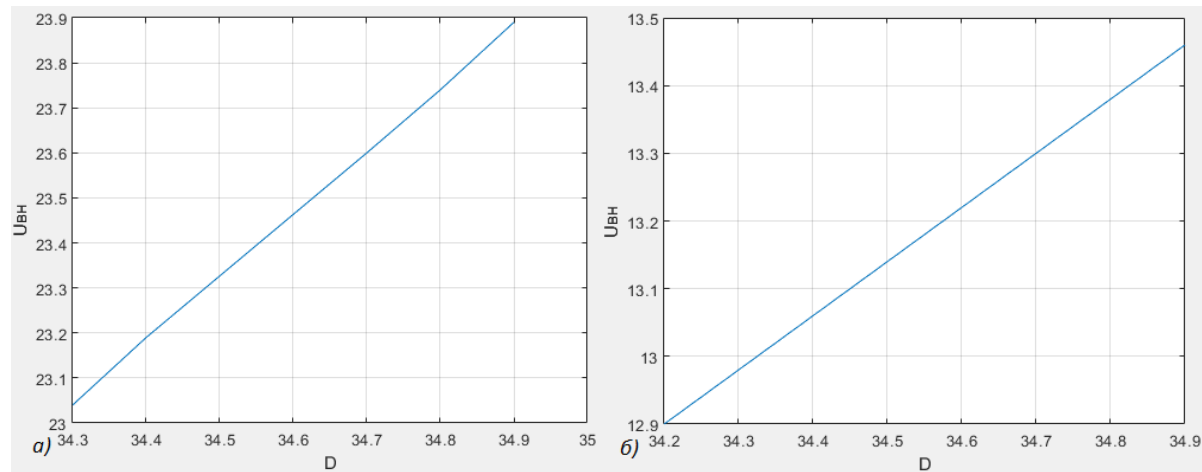


Рис. 2.4 Залежність внесеної напруги від діаметру для високої частоти: а – для бронзи, б – для дюралюмінію

Амплітудний метод був обраний за такими причинами:

1. Зміна γ , як параметра, що заважає, при великих значеннях β та \dot{U}_{BH}^* , що впливає з аналізу за годографом внесених напруг, не впливає.
2. Амплітудний метод призводить до простих і економічних розрахунків та апаратних рішень.

2.2.4 Розрахунок чутливості приладу до зміни діаметру

Чутливість засобу вимірювання являє собою здатність реагувати на зміни вхідного сигналу і оцінюється відношенням зміни вихідного сигналу до зміни вхідного сигналу. Характеризує здатність засобу вимірювання реагувати на зміну вхідного сигналу.

Розрізняють абсолютну і відносну чутливість. У нашому випадку відносна комплексна чутливість визначається за формулою:

$$S_D^* = \beta^2 \mu_{\text{еф}}^2(\beta)$$

Далі наведена програма для розрахунку S_D^* середовищі Matlab (див. Розділ 3.4).

Графік був побудований на основі отриманих результатів у програмному середовищі Matlab. Коефіцієнт β був взятий 0,1 до 40, з кроком 0,1, для більш точної побудови і відображення чутливості приладу.

Нижче представлений графік за отриманими результатами:

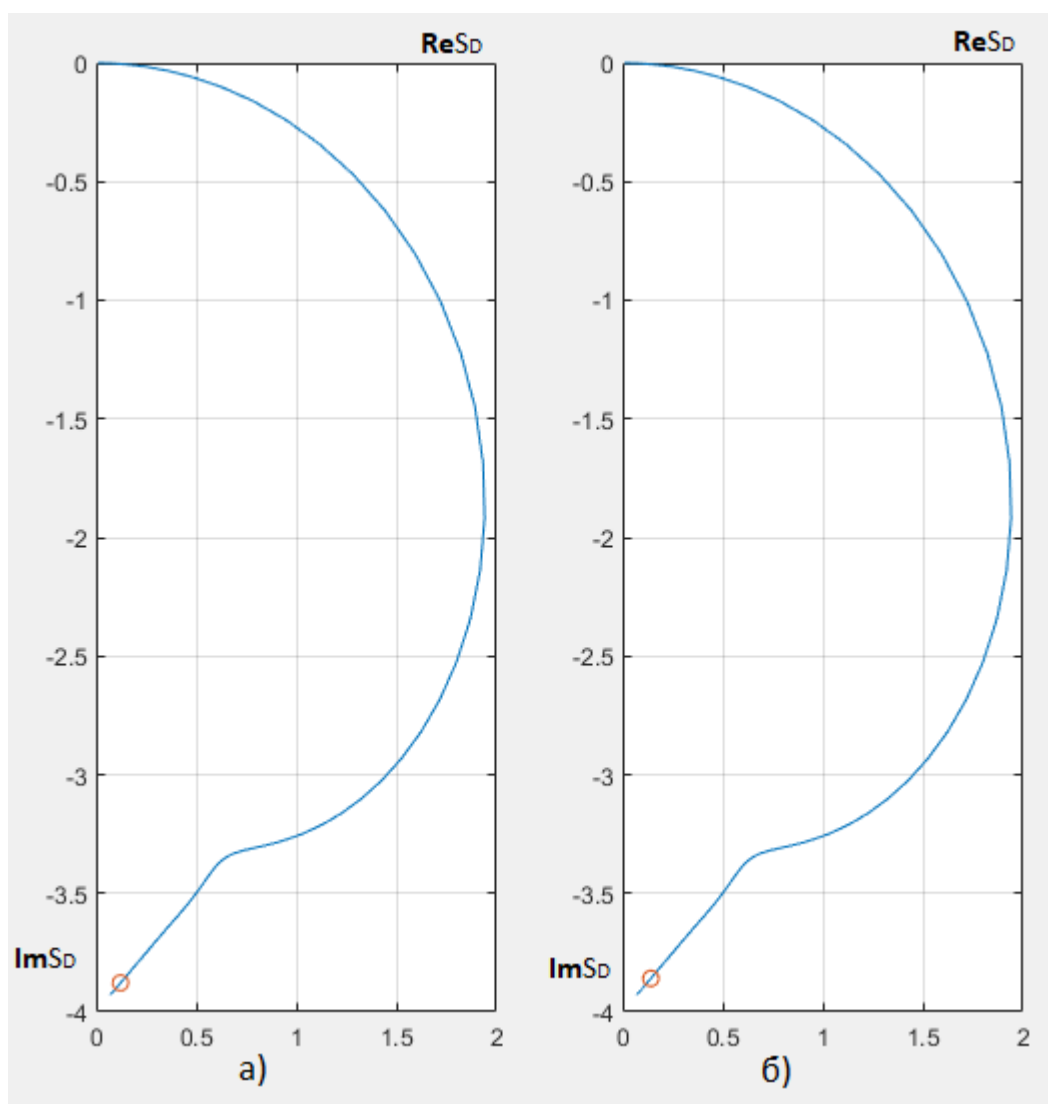


Рис. 2.5 Графік відносної чутливості приладу: а – для бронзи, б – для дюралюмінію

2.2.5 Розрахунок вихрострумового перетворювача на низькій частоті для бронзи

Для контролю електропровідності найефективніше обирати $\beta_3 = 2,5$ ($\beta_3^2 = 6,25$). Для бронзи $\gamma_1 = 27,5$ ($\frac{M}{O_M * MM^2}$). Як і в попередніх випадках, розраховуємо ω .

$$\omega_3 = \frac{\beta_3^2}{R_{\text{ср}}^2 \gamma \mu_0} = \frac{6,25}{299,6361 * 27,5 * 4 * 3,1415 * 10^{-7}} = \frac{6,25}{10,35468 * 10^{-3}} = 603,59 \text{ Гц}$$

Розраховуємо β для кожної величини діаметру:

$$\beta_{1_{31}} = \frac{34,3}{2} \sqrt{603,59 * 27,5 * 4 * 3,1415 * 10^{-7}} = 2,47$$

$$\beta_{1_{32}} = \frac{34,4}{2} \sqrt{603,59 * 10^3 * 27,5 * 4 * 3,1415 * 10^{-7}} = 2,48$$

$$\beta_{1_{33}} = \frac{34,7}{2} \sqrt{603,59 * 10^3 * 27,5 * 4 * 3,1415 * 10^{-7}} = 2,5$$

$$\beta_{1_{34}} = \frac{34,8}{2} \sqrt{603,59 * 10^3 * 27,5 * 4 * 3,1415 * 10^{-7}} = 2,51$$

$$\beta_{1_{35}} = \frac{34,9}{2} \sqrt{603,59 * 10^3 * 27,5 * 4 * 3,1415 * 10^{-7}} = 2,52$$

Ефективну магнітну проникність $\mu_{\text{еф}}$ звернемося до Matlab.

Маємо такі значення ефективної магнітної проникності:

β	$\text{Re}(\mu_{\text{еф}})$	$\text{Im}(\mu_{\text{еф}})$
2,47	0,6302	-0,3772
2,48	0,6273	-0,3773
2,5	0,6216	-0,3774
2,51	0,6188	-0,3774
2,52	0,6160	-0,3774

Відносна внесена напруга, нормована за початковою ЕРС холостого ходу розраховується:

$$\dot{U}_{\text{ВН1}}^* = j\eta_3 \text{Re}(\dot{\mu}_{\text{еф1}}) - j\eta_3 - \eta_3 \text{Im}(\dot{\mu}_{\text{еф1}}) = -0,7521 * (-0,3772) + j0,7521 * (0,6302 - 1) = 0,2836 - j0,2781 \text{ В.}$$

$$\dot{U}_{\text{ВН2}}^* = j\eta_4 \text{Re}(\dot{\mu}_{\text{еф2}}) - j\eta_4 - \eta_4 \text{Im}(\dot{\mu}_{\text{еф2}}) = -0,7565 * (-0,3773) + j0,7565 * (0,6273 - 1) = 0,285 - j0,2819 \text{ В.}$$

$$\dot{U}_{\text{ВН3}}^* = j\eta_7 \text{Re}(\dot{\mu}_{\text{еф3}}) - j\eta_7 - \eta_7 \text{Im}(\dot{\mu}_{\text{еф3}}) = -0,76974 * (-0,3774) + j0,76974 * (0,6216 - 1) = 0,2904 - j0,2913 \text{ В.}$$

$$\dot{U}_{\text{ВН4}}^* = j\eta_8 \text{Re}(\dot{\mu}_{\text{еф4}}) - j\eta_8 - \eta_8 \text{Im}(\dot{\mu}_{\text{еф4}}) = -0,77419 * (-0,3774) + j0,77419 * (0,6188 - 1) = 0,2922 - j0,3005 \text{ В.}$$

$$\dot{U}_{\text{ВН5}}^* = j\eta_9 \text{Re}(\dot{\mu}_{\text{еф5}}) - j\eta_9 - \eta_9 \text{Im}(\dot{\mu}_{\text{еф5}}) = -0,77864 * (-0,3774) + j0,77864 * (0,6160 - 1) = 0,2938 - j0,299 \text{ В.}$$

Початкова ЕРС холостого ходу:

$$E_{\text{ОН}}^{\dot{}} = \frac{1}{2} * 9,8696 * 603,59 * 12,56 * 10^{-7} * 873 * 99,86 * 1564,27 * 10^{-6} = 0,51 \text{ В.}$$

Розрахунок абсолютної внесеної напруги:

$$U_{\text{ВН1}}^{\dot{}} = E_{\text{ОН}}^{\dot{}} * \dot{U}_{\text{ВН1}}^* = 0,51(0,2836 - j0,2781) = 0,1446 - j0,1418 \text{ В.}$$

$$U_{\text{ВН2}}^{\dot{}} = E_{\text{ОН}}^{\dot{}} * \dot{U}_{\text{ВН2}}^* = 0,51(0,285 - j0,2819) = 0,1454 - j0,1438 \text{ В.}$$

$$U_{\text{ВН3}}^{\dot{}} = E_{\text{ОН}}^{\dot{}} * \dot{U}_{\text{ВН3}}^* = 0,51(0,2904 - j0,2913) = 0,1481 - j0,1486 \text{ В.}$$

$$U_{\text{ВН4}}^{\dot{}} = E_{\text{ОН}}^{\dot{}} * \dot{U}_{\text{ВН4}}^* = 0,51(0,2922 - j0,3005) = 0,149 - j0,1533 \text{ В.}$$

$$U_{\text{ВН5}}^{\dot{}} = E_{\text{ОН}}^{\dot{}} * \dot{U}_{\text{ВН5}}^* = 0,51(0,2938 - j0,299) = 0,1498 - j0,1525 \text{ В.}$$

Розрахунок модуля вихідної напруги ВСП $U_{\text{ВН}}^{\dot{}}$:

$$|U_{\text{ВН1}}^{\dot{}} D| = \sqrt{\text{Re}^2 U_{\text{ВН1}}^{\dot{}} + \text{Im}^2 U_{\text{ВН1}}^{\dot{}}} = \sqrt{0,1446^2 + 0,1418^2} = 0,2025 \text{ В.}$$

$$|U_{\text{ВН2}}^{\dot{}} D| = \sqrt{\text{Re}^2 U_{\text{ВН2}}^{\dot{}} + \text{Im}^2 U_{\text{ВН2}}^{\dot{}}} = \sqrt{0,1454^2 + 0,1438^2} = 0,2045 \text{ В.}$$

$$|U_{\text{ВН3}} \dot{D}| = \sqrt{Re^2 U_{\text{ВН3}} + Im^2 U_{\text{ВН3}}} = \sqrt{0,1481^2 + 0,1486^2} = 0,2098 \text{ В.}$$

$$|U_{\text{ВН4}} \dot{D}| = \sqrt{Re^2 U_{\text{ВН4}} + Im^2 U_{\text{ВН4}}} = \sqrt{0,149^2 + 0,1533^2} = 0,2138 \text{ В.}$$

$$|U_{\text{ВН3}} \dot{D}| = \sqrt{Re^2 U_{\text{ВН3}} + Im^2 U_{\text{ВН3}}} = \sqrt{0,1498^2 + 0,1525^2} = 0,2138 \text{ В.}$$

Для контролю електропровідності скористаємось наступною формулою:

$$\gamma_1 = \frac{\beta 1^2}{R_1^2 \omega_1 \mu_0}$$

Розрахунок відбувається для кожного діаметру:

$$\gamma_{11} = \frac{\beta 1^2}{R_1^2 \omega_1 \mu_0} = \frac{6,25}{17,15^2 * 603,59 * 4 * 3,14 * 10^{-7}} = 28,015 \left(\frac{\text{М}}{\text{ОМ} * \text{ММ}^2} \right).$$

$$\gamma_{12} = \frac{\beta 1^2}{R_2^2 \omega_1 \mu_0} = \frac{6,25}{17,2^2 * 603,59 * 4 * 3,14 * 10^{-7}} = 27,852 \left(\frac{\text{М}}{\text{ОМ} * \text{ММ}^2} \right).$$

$$\gamma_{13} = \frac{\beta 1^2}{R_3^2 \omega_1 \mu_0} = \frac{6,25}{17,35^2 * 603,59 * 4 * 3,14 * 10^{-7}} = 27,373 \left(\frac{\text{М}}{\text{ОМ} * \text{ММ}^2} \right).$$

$$\gamma_{14} = \frac{\beta 1^2}{R_4^2 \omega_1 \mu_0} = \frac{6,25}{17,4^2 * 603,59 * 4 * 3,14 * 10^{-7}} = 27,216 \left(\frac{\text{М}}{\text{ОМ} * \text{ММ}^2} \right).$$

$$\gamma_{15} = \frac{\beta 1^2}{R_5^2 \omega_1 \mu_0} = \frac{6,25}{17,45^2 * 603,59 * 4 * 3,14 * 10^{-7}} = 27,06 \left(\frac{\text{М}}{\text{ОМ} * \text{ММ}^2} \right).$$

2.2.6 Розрахунок вихрострумowego перетворювача на низькій частоті для дюралюмінію

Узагальнений параметр залишаємо той самий $\beta 4 = 2,5$ ($\beta 3^2 = 6,25$).

Електропровідність дюралюмінію $\gamma 2 = 48,7$ ($\frac{\text{М}}{\text{ОМ} * \text{ММ}^2}$). Розраховуємо ω .

$$\omega 2 = \frac{\beta 1^2}{R_{\text{сеп}}^2 \gamma \mu_0} = \frac{6,25}{297,91 * 48,7 * 4 * 3,14 * 10^{-7}} = \frac{6,25}{18,23156 * 10^{-3}} = 342,81 \text{ Гц.}$$

Розраховуємо β для кожного діаметру:

$$\beta 1_{41} = \frac{34,2}{2} \sqrt{342,81 * 48,7 * 4 * 3,1415 * 10^{-7}} = 2,476$$

$$\beta 1_{42} = \frac{34,3}{2} \sqrt{342,81 * 48,7 * 4 * 3,1415 * 10^{-7}} = 2,484$$

$$\beta 1_{43} = \frac{34,5}{2} \sqrt{2342,81 * 48,7 * 4 * 3,1415 * 10^{-7}} = 2,498$$

$$\beta_{1_{44}} = \frac{34,6}{2} \sqrt{342,81 * 48,7 * 4 * 3,1415 * 10^{-7}} = 2,5$$

$$\beta_{1_{45}} = \frac{34,7}{2} \sqrt{342,81 * 48,7 * 4 * 3,1415 * 10^{-7}} = 2,51$$

$$\beta_{1_{46}} = \frac{34,9}{2} \sqrt{342,81 * 48,7 * 4 * 3,1415 * 10^{-7}} = 2,527$$

Для вибору ефективної магнітної проникності знову звернемося до Matlab:

β	$Re(\mu_{e\phi})$	$Im(\mu_{e\phi})$
2,476	0,6285	-0,3773
2,484	0,6262	-0,3774
2,498	0,6222	-0,3774
2,5	0,6216	-0,3774
2,51	0,6188	-0,3774
2,527	0,6140	-0,3774

Розраховуємо внесу напругу:

$$\dot{U}_{BH1}^* = j\eta_2 Re(\mu_{e\phi1}) - j\eta_2 - \eta_2 Im(\mu_{e\phi1}) = -0,74772 * (-0,3773) + j0,74772(0,6285 - 1) = 0,2819 - j0,2778 \text{ В.}$$

$$\dot{U}_{BH2}^* = j\eta_3 Re(\mu_{e\phi2}) - j\eta_3 - \eta_3 Im(\mu_{e\phi2}) = -0,7521 * (-0,3774) + j0,7521(0,6262 - 1) = 0,2838 - j0,2811 \text{ В.}$$

$$\dot{U}_{BH3}^* = j\eta_5 Re(\mu_{e\phi3}) - j\eta_5 - \eta_5 Im(\mu_{e\phi3}) = -0,76089 * (-0,3774) + j0,76089(0,6222 - 1) = 0,2872 - j0,2875 \text{ В.}$$

$$\dot{U}_{BH4}^* = j\eta_6 Re(\mu_{e\phi4}) - j\eta_6 - \eta_6 Im(\mu_{e\phi4}) = -0,76531 * (-0,3774) + j0,76531(0,6216 - 1) = 0,2888 - j0,2896 \text{ В.}$$

$$\dot{U}_{BH5}^* = j\eta_7 Re(\mu_{e\phi5}) - j\eta_7 - \eta_7 Im(\mu_{e\phi5}) = -0,76974 * (-0,3774) + j0,76974(0,6188 - 1) = 0,2905 - j0,2934 \text{ В.}$$

$$\dot{U}_{BH6}^* = j\eta_9 Re(\dot{\mu}_{ef6}) - j\eta_9 - \eta_9 Im(\dot{\mu}_{ef6}) = -0,77864 * (-0,3774) + j0,77864(0,6140 - 1) = 0,2939 - j0,3005 B.$$

Початкова ЕРС холостого ходу:

$$E_{OH}^{\cdot} = \frac{1}{2} * 9,8696 * 342,81 * 12,56 * 10^{-7} * 873 * 99,86 * 1564,27 * 10^{-6} = 0,29 B.$$

Розрахунок абсолютної внесеної напруги:

$$U_{BH1}^{\cdot} = E_{OH}^{\cdot} * \dot{U}_{BH1}^* = 0,29(0,2819 - j0,2778) = 0,0817 - j0,0805 B.$$

$$U_{BH2}^{\cdot} = E_{OH}^{\cdot} * \dot{U}_{BH2}^* = 0,29(0,2838 - j0,2811) = 0,0823 - j0,082 B.$$

$$U_{BH3}^{\cdot} = E_{OH}^{\cdot} * \dot{U}_{BH3}^* = 0,29(0,2872 - j0,2875) = 0,0833 - j0,0834 B.$$

$$U_{BH4}^{\cdot} = E_{OH}^{\cdot} * \dot{U}_{BH4}^* = 0,29(0,2888 - j0,2896) = 0,0837 - j0,0839 B.$$

$$U_{BH5}^{\cdot} = E_{OH}^{\cdot} * \dot{U}_{BH5}^* = 0,29(0,2905 - j0,2934) = 0,0842 - j0,085 B.$$

$$U_{BH6}^{\cdot} = E_{OH}^{\cdot} * \dot{U}_{BH6}^* = 0,29(0,2939 - j0,3005) = 0,0852 - j0,0871 B.$$

Розрахунок модуля вихідної напруги ВСП в режимі контролю:

$$|U_{BH1}^{\cdot} D| = \sqrt{Re^2 U_{BH1}^{\cdot} + Im^2 U_{BH1}^{\cdot}} = \sqrt{0,0817^2 + 0,0805^2} = 0,1147 B.$$

$$|U_{BH2}^{\cdot} D| = \sqrt{Re^2 U_{BH2}^{\cdot} + Im^2 U_{BH2}^{\cdot}} = \sqrt{0,0823^2 + 0,082^2} = 0,1162 B.$$

$$|U_{BH3}^{\cdot} D| = \sqrt{Re^2 U_{BH3}^{\cdot} + Im^2 U_{BH3}^{\cdot}} = \sqrt{0,0833^2 + 0,0834^2} = 0,1179 B.$$

$$|U_{BH4}^{\cdot} D| = \sqrt{Re^2 U_{BH4}^{\cdot} + Im^2 U_{BH4}^{\cdot}} = \sqrt{0,0837^2 + 0,0839^2} = 0,1185 B.$$

$$|U_{BH5}^{\cdot} D| = \sqrt{Re^2 U_{BH5}^{\cdot} + Im^2 U_{BH5}^{\cdot}} = \sqrt{0,0842^2 + 0,085^2} = 0,1196 B.$$

$$|U_{BH6}^{\cdot} D| = \sqrt{Re^2 U_{BH6}^{\cdot} + Im^2 U_{BH6}^{\cdot}} = \sqrt{0,0852^2 + 0,0871^2} = 0,1218 B.$$

Для контролю електропровідності скористаємось наступною формулою:

$$\gamma_2 = \frac{\beta 1^2}{R_1^2 \omega_2 \mu_0}$$

Розраховуємо для кожного діаметру:

					ПК51.13.0000.000 ПЗ	
		№ докум.	Підпис			51

$$\gamma_{21} = \frac{\beta 1^2}{R_1^2 \omega_2 \mu_0} = \frac{6,25}{17,12 \cdot 342,81 \cdot 4 \cdot 3,14 \cdot 10^{-7}} = 49,61 \left(\frac{\text{М}}{\text{ОМ} \cdot \text{мм}^2} \right).$$

$$\gamma_{22} = \frac{\beta 1^2}{R_2^2 \omega_2 \mu_0} = \frac{6,25}{17,15^2 \cdot 342,81 \cdot 4 \cdot 3,14 \cdot 10^{-7}} = 49,33 \left(\frac{\text{М}}{\text{ОМ} \cdot \text{мм}^2} \right).$$

$$\gamma_{23} = \frac{\beta 1^2}{R_3^2 \omega_2 \mu_0} = \frac{6,25}{17,25^2 \cdot 342,81 \cdot 4 \cdot 3,14 \cdot 10^{-7}} = 48,757 \left(\frac{\text{М}}{\text{ОМ} \cdot \text{мм}^2} \right).$$

$$\gamma_{24} = \frac{\beta 1^2}{R_4^2 \omega_2 \mu_0} = \frac{6,25}{17,3^2 \cdot 342,81 \cdot 4 \cdot 3,14 \cdot 10^{-7}} = 48,47 \left(\frac{\text{М}}{\text{ОМ} \cdot \text{мм}^2} \right).$$

$$\gamma_{25} = \frac{\beta 1^2}{R_5^2 \omega_2 \mu_0} = \frac{6,25}{17,35^2 \cdot 342,81 \cdot 4 \cdot 3,14 \cdot 10^{-7}} = 48,19 \left(\frac{\text{М}}{\text{ОМ} \cdot \text{мм}^2} \right).$$

$$\gamma_{26} = \frac{\beta 1^2}{R_6^2 \omega_2 \mu_0} = \frac{6,25}{17,45^2 \cdot 342,81 \cdot 4 \cdot 3,14 \cdot 10^{-7}} = 47,64 \left(\frac{\text{М}}{\text{ОМ} \cdot \text{мм}^2} \right).$$

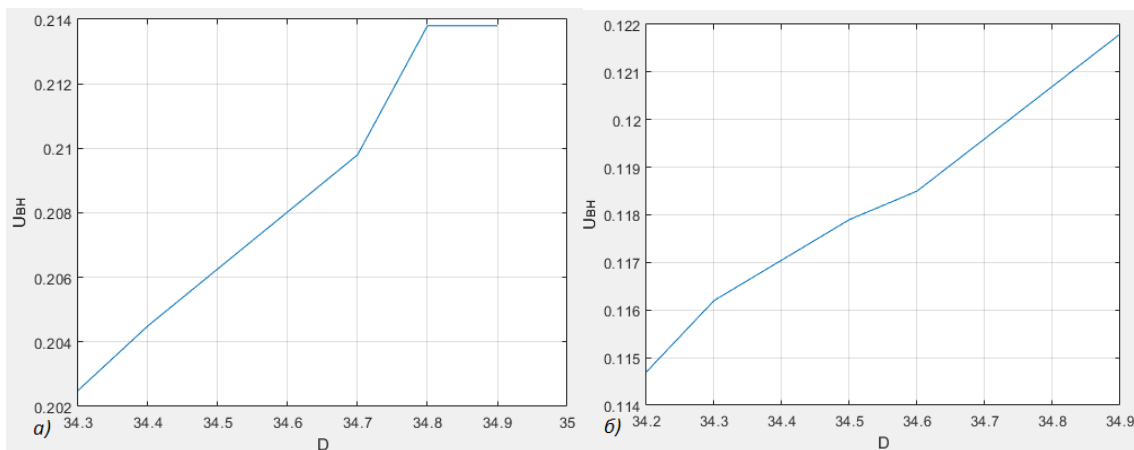


Рис. 2.6 Залежність внесеної напруги від діаметру для низької частоти: а – для бронзи, б – для дюралюмінію

Градувальна характеристика відношення значень внесеної напруги до діаметру.

Висновки до розділу 2

Провівши теоретичні розрахунки, була отримана залежність та побудовані графіки залежності внесеної напруги до діаметру ОК. А також була досліджена чутливість к зміні діаметру ОК. По представленим графікам можна впевнено сказати, що маємо велику чутливість приладу до зміни діаметру, а отже це підтверджує, що обраний метод обробки сигналу був вірний.

3. Управління генератором. Розробка алгоритму і програмного забезпечення

3.1 Технічні характеристики

При проектуванні треба було розробити вихрострумівий перетворювач для амплітудного методу виділення інформації про діаметр ОК. З цією метою розглянуто еквівалентну схему системи ВСП-ОК. Електрофізичні параметри ОК - питома електропровідність для бронзи

$\gamma = 27,5 \left(\frac{\text{М}}{\text{ОМ} \cdot \text{мм}^2}\right)$ та дюралюмінію $\gamma_1 = 48,7 \left(\frac{\text{М}}{\text{ОМ} \cdot \text{мм}^2}\right)$ при температурі 20°C , магнітна проникність $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ Гн/м}$. Його геометричні розміри складають 34 – 35 мм, з кроком 0,1 мм. Також задані деякі параметри ВСП - зовнішній діаметр вимірювальної котушки, рівний 40 мм, внутрішній діаметр вимірювальної котушки, рівний 39,1 мм, та робочі частоти: $\omega = 38,63 \text{ кГц}$, $\omega = 21,94 \text{ кГц}$, $\omega = 603,59 \text{ Гц}$, $\omega = 342,81 \text{ Гц}$. Якщо знехтувати розподіленими між витками котушки ємностями, еквівалентну схему параметричного ВСП можна представити рис. 3.1. Схема складається з первинної збуджуючої котушки з активним опором R_1 та індуктивністю L_1 , і вторинної котушки (електричної моделі ОК) з активним опором R_2 та індуктивністю L_2 .

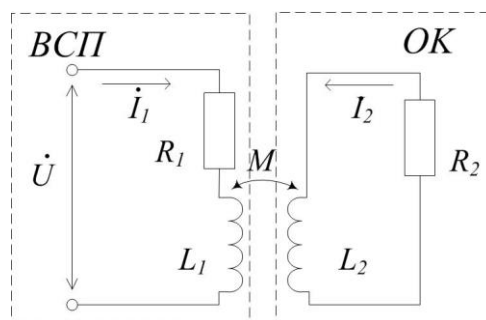


Рис. 3.1 Еквівалентна схема системи параметричний ВСП – ОК

При наявності ОК поблизу котушки, в результаті дії вихрострумів, в ОК змінюється активний та індуктивний опір, а разом з цим комплексний опір котушки.

Взаємозв’язок ОК і котушки можна представити у вигляді схеми повітряного трансформатора, а параметри контуру вторинної обмотки визначаються еквівалентним контуром вихрострумів в ОК.

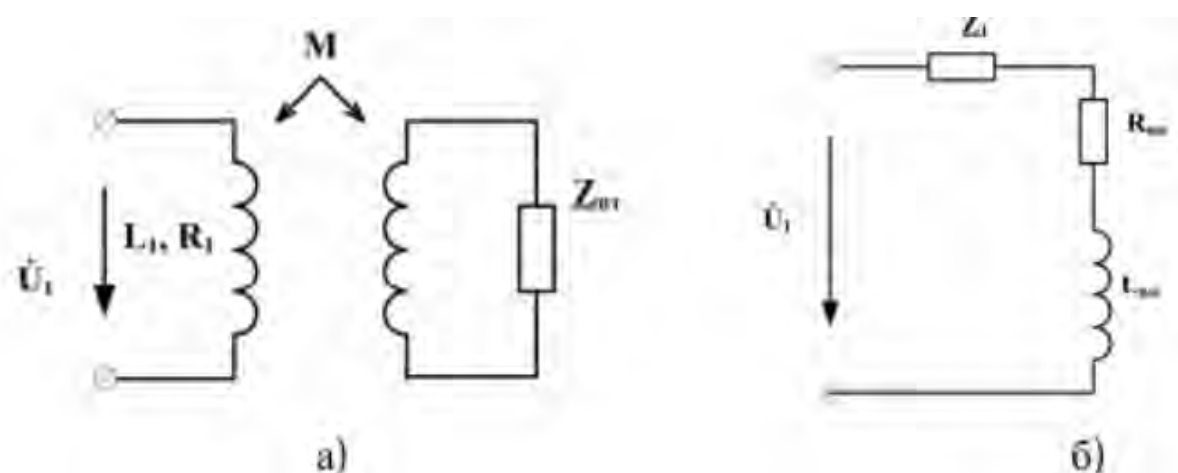


Рис. 3.2 Схема повітряного трансформатора (а) та схема його заміщення

3.2 Розробка структурної схеми вихрострумівого дефектоскопу. Опис роботи

Сутність методу двопараметрового контролю полягає в тому, щоб усунути вплив неінформативних параметрів ОК та системи ВСП-ОК на результати оцінювання контролюваного параметру. Щоб це досягти, треба підбирати оптимальні значення β для контролю тих, чи інших параметрів. Для того, щоб мати змогу контролювати, не один, а декілька параметрів, ми використовуємо генератор, що має змогу працювати на двох частотах.

Двочастотний генератор подає сигнал на збуджуючу котушку ВСП, після чого цифровий осцилограф приймає сигнал з вимірювальної котушки ВСП і передає його на комп'ютер для подальшої обробки отриманої інформації.

Переваги такого методу за яким працює прилад в можливості повністю автоматичного контролю, а також віддаленого управління процесом, що забезпечує зручність для оператора.

Структурна схема приладу представлена на рис. 3.3.

					<i>ПК51.13.0000.000 ПЗ</i>	
		<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>			54

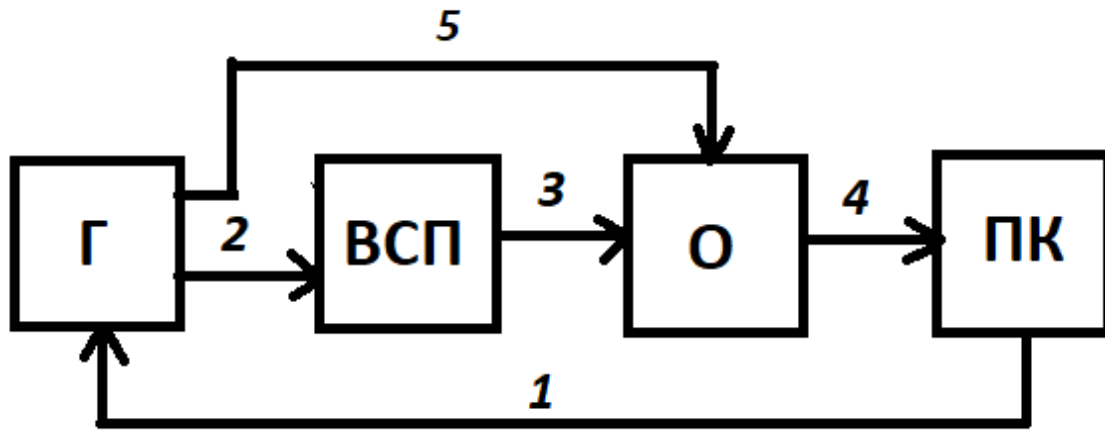


Рис 3.3 Структурна схема вихрострумового двочастотного дефектоскопу

Г –генератор двочастотний;

ВСП – вихрострумовий перетворювач;

О – осцилограф цифровий;

ПК – персональний комп’ютер.

На комп’ютері встановлюється значення параметру $\beta = 2,5$, та розраховується перша робоча частота (низьку). Далі йде управління с ПК на генератор (канал 1), і генератор створює сигнал першої робочої частоти. Далі (по каналу 2) передається сигнал від генератора на ВСП, а також паралельно передається сигнал від генератора до осцилографа (через канал 5), де він змінюється, в залежності від фізичних та геометричних параметрів об’єкту контролю, та передається на цифровий осцилограф (по каналу 3). Осцилограф реєструє прийнятий сигнал (через канали 3 та 5), завдяки цьому відбувається компенсація напруги холостого ходу, та (через канал 4) передає

його на ПК. ПК обробляє прийнятий сигнал та відбувається оцінка електропровідності на цій частоті. Після чого виставляє друге значення параметру β , та розраховує другу робочу частоту (високу). Після чого передає сигнал на генератор виставляючи другу робочу частоту. Генератор починає створювати сигнал другої робочої частоти, і передає його на ВСП (по каналу 2), а також на осцилограф (через канал 5). Потім осцилограф реєструє другий сигнал, що передає ВСП (по 3-му каналу), знову відбувається компенсація напруги холостого ходу, і

передає дані на ПК (по 4 каналу). ПК обробляє прийняті дані, та визначає діаметр ОК.

3.3 Розробка електричної схеми

Для побудови структурної принципової схеми було використано такі прилади: двоканальний генератор MHS-5200A-25M та цифровий осцилограф Siglent SDS1072CML.

3.3.1 MHS-5200A-25M

MHS-5200A-25M - двоканальний генератор сигналів довільної форми (яку можна намалювати мишкою, та записати в пам'ять пристрою). За незначну суму він радує своїми технічними можливостями. Він видає сигнал з частотою до 25 МГц з дискретністю в 0,01 Гц. Можна регулювати розмах вихідного сигналу від 0 до 20 В.

Також генератором можна управляти не тільки з лицьової панелі, але і з комп'ютера (за допомогою інтерфейсу USB). Має вимірювальний вхід, яким може вимірювати частоту, період, тривалості імпульсів, вважати їх кількість. Може видавати сигнали на два виходи одночасно, причому будь-якої форми, можна і «фазу рухати» в будь-яку сторону.

3.3.2 Siglent SDS1072CML

Осцилограф Siglent SDS1072CML має два повнофункціональних каналу. Частота дискретизації 1 ГГц. Глибина пам'яті 2Мб, дозволяє досягти високої точності обчислень для побудови відображуваного сигналу. Має різні види синхронізації, маркерні вимірювання, кілька десятків режимів автоматичних вимірювань, стандартні інтерфейси підключення до USB пристроїв (PC, накопичувач, принтер), може працювати в режимі дистанційного управління і як пристрій контролю - функція «придатний - не придатний». Ідеально підходить для промислового контролю, вимірювань, досліджень, створення та тестування електронних схем.

3.4 Програмний код і алгоритм

Для реалізації розрахунків в програмному середовищі Matlab, для програмного точного розрахунку ефективної магнітної проникності з використання функції Бесселя був використаний наступний код програми:

```
%x=[19.8145 19.8725 19.9883 20.0462 20.1042 20.22];  
%x=[22.89 22.96 23.16 23.23 23.29];  
%x=[2.47 2.48 2.5 2.51 2.52];  
x=[2.476 2.484 2.498 2.5 2.51 2.527];  
Re=real(meff1(x));  
Im=imag(meff1(x));  
plot (Im, Re);  
xlabel('Im MUEff');  
ylabel('Re MUEff');  
grid on;  
A=[x' Re' Im']
```

Для подальшого розрахунку відносної чутливості приладу як для бронзи, так і для дюралюмінію, та для побудови графіків відносної чутливості, була використана наступна програма розроблена також в середовищі Matlab:

```
b1=0.1:0.1:40;  
n=1;  
y=2.*besseli(1,b1.*sqrt(j))./(b1.*sqrt(j).*besseli(0,b1.*sqrt(j)));  
S=n.*b1.^2.*y.^2;  
subplot(2,2,[1,3])  
plot(real(S),imag(S));  
hold on  
b2=23.16;  
y2=2.*besseli(1,b2.*sqrt(j))./(b2.*sqrt(j).*besseli(0,b2.*sqrt(j)));  
S2=n.*b2.^2.*y2.^2;  
plot(real(S2),imag(S2),'o')
```

grid on;

ПК51.13.0000.000 ПЗ

№ докум.

Підпис

```

subplot(2,2,[2,4])
plot(real(S),imag(S));
hold on
b3=20.0462;
y3=2.*besseli(1,b3.*sqrt(j))./(b3.*sqrt(j).*besseli(0,b3.*sqrt(j)));
S3=n.*b3.^2.*y3.^2;
plot(real(S3),imag(S3),'o')
grid on;

```

Для побудови графіків залежності внесеної напруги від діаметру для бронзи і дюралюмінію, як на низькій, так і на високій частоті, була розроблена третя програма в середовищі Matlab:

```

D1=[34.3 34.4 34.7 34.8 34.9];
D2=[34.2 34.3 34.5 34.6 34.7 34.9];
U1=[23.04 23.19 23.6 23.74 23.89];
U2=[12.9 12.98 13.14 13.22 13.3 13.46];
U3=[0.2025 0.2045 0.2098 0.2138 0.2138];
U4=[0.1147 0.1162 0.1179 0.1185 0.1196 0.1218];

x1=1.6:0.05:1.71;
plot(D2,U4)
grid
xlabel('D');
ylabel('Uвн');

```

Висновки до розділу 3

В третьому розділі для реалізації поставлених задач, були розроблені програми, кожна для реалізації певних завдань. Також була представлена структурна схема приладу, та викладений опис роботи і принцип дії приладу, разом з теоретичними відомостями про ВСП.

Висновки до роботи

В даній роботі підібравши і ознайомившись з теоретичними відомостями про те, що являє собою двопараметровий контроль, види ВСП, методи обробки сигналів, були обрані вид ВСП, а саме прохідний ВСП трансформаторного типу, і амплітудний метод обробки сигналу, які краще за все підходять для реалізації поставленої задачі. Провівши огляд аналогічних пристроїв, були обрані початкові дані пристрою для контролю ОК. Також були проведені розрахунки: ефективної магнітної проникності, внесеної напруги, та інші. Виявлені та розраховані залежності внесеної напруги відносно зміни діаметрів для образців ОК (бронзових та дюралюмінієвих), як на високих, так і низьких частотах. Розрахована і представлена у виді графіку чутливість приладу. Були розроблені коди програм для реалізації поставлених задач контролю, а також розроблен сам прилад. Також наведена його структурна схема.

					ПК51.13.0000.000 ПЗ	
		№ докум.	Підпис			59

Використана література

1. SciVerse ScienceDirect: Advances in NDT and materials characterization by eddy currents.; Procedia CIRP 7, 2013, 359-364с
2. Дефектоскопія: веб-сайт. URL:
<https://www.booksite.ru/fulltext/1/001/008/024/762.htm>
3. Лисенко Ю. Ю., Дугін О. Л., Куц Ю. В., Протасов А. Г. Застосування накладних перетворювачів в імпульсному вихрострумовому контролі / за ред НТУУ Київський політехнічний інститут імені І. Сікорського, Київ, 2016. С 58-62.
4. Ключев В. В. Неразрушающий контроль: справочник: В 7 т. / Под общ. Ред. Ключева В. В. Т.2: В 2 кн. – М.: Машиностроение, 2003. 688 с.
5. Троицкий В. А. Вихретоковый контроль. Учебник пособие. «Феникс», 2011. 148 с.
6. ToolBox инструмент и оборудывание: веб-сайт. URL:
https://toolb.ru/goods/VD-91NM-Vihretokovyj-defektoskop#show_tab_1
7. АКА контроль: веб-сайт. URL: <http://www.aka-control.ru/index.php?Page=Products&Device=VS-2010>
8. АНК неразрушающий контроль: веб-сайт. URL: <http://ank-ndt.ru/produkcziya/vixretokovyij-kontrol/vixretokovyie-defektoskopyi/vd-132-oko-01.html>
9. Методичні вказівки до курсового проектування з дисципліни «Магнітні та вихрострумний контроль» для студентів спеціальності «Прилади неруйнівного контролю для технічної та медичної діагностики». Частина 2./Укл. Г.О.Алексеев, Ю.В.Куц, А.Г.Протасов – К.:КПІ,1997,63с.