

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»
приладобудівний факультет
кафедра приладів і систем неруйнівного контролю**

«На правах рукопису»
УДК 621.391

До захисту допущено:

Завідувач кафедри

_____ Анатолій ПРОТАСОВ

« » _____ 20__ р.

Магістерська дисертація

на здобуття ступеня магістра

**за освітньо-професійною програмою «Комп'ютерно-інтегровані
технології та системи неруйнівного контролю і діагностики»
зі спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані
технології»**

**на тему: «Комп'ютеризована система багатопараметрового
вихрострумового контролю виробів машинобудування»**

Виконала:
студентка VI курсу, групи ПК-91мп
Романюк Тетяна Анатоліївна

Науковий керівник:
д.т.н., професор
Куц Юрій Васильович

Консультант з «Розробка стартап-проекту»:
д.с.н., доц.
Бояринова Катерина Олександрівна

Рецензент:
д.т.н., доц.
Єременко Володимир Станіславович

Засвідчую, що у цій магістерській
дисертації немає запозичень з праць
інших авторів без відповідних
посилань.

Студентка _____

Київ – 2020 року

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»
приладобудівний факультет
кафедра приладів і систем неруйнівного контролю**

«На правах рукопису»
УДК 621.391

До захисту допущено:
Завідувач кафедри
_____ Анатолій ПРОТАСОВ
«__» _____ 20__ р.

Магістерська дисертація

на здобуття ступеня магістра

**за освітньо-професійною програмою «Комп'ютерно-інтегровані
технології та системи неруйнівного контролю і діагностики»
зі спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані
технології»**

**на тему: «Комп'ютеризована система багатопараметрового
вихрострумовеого контролю виробів машинобудування»**

Виконала:

студентка VI курсу, групи ПК-91мп
Романюк Тетяна Анатоліївна _____

Науковий керівник:

д.т.н., професор
Куц Юрій Васильович _____

Консультант з «Розробка стартап-проекту:

д.е.н., доц.
Бояринова Катерина Олександрівна _____

Рецензент:

д.т.н., доц.
Єременко Володимир Станіславович _____

Засвідчую, що у цій магістерській
дисертації немає запозичень з праць
інших авторів без відповідних
посилань.
Студентка _____

Київ – 2020 року

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
приладобудівний факультет
кафедра приладів і систем неруйнівного контролю

Рівень вищої освіти – другий (магістерський)

Спеціальність – 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

Освітньо-професійна програма «Комп'ютерно-інтегровані технології та системи неруйнівного контролю і діагностики»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Анатолій ПРОТАСОВ

«___» _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ
на магістерську дисертацію студенту
Романюк Тетяна Анатоліївна

1. Тема дисертації «Комп'ютеризована система багатопараметрового вихрострумовеого контролю виробів машинобудування», науковий керівник дисертації Куц Юрій Васильович, д.т.н., професор, затверджені наказом по університету від «05» листопада 2020р. № 3228-с
2. Термін подання студентом дисертації 11.12.2020 р
3. Об'єкт дослідження: система багатопараметрового вихрострумовеого контролю виробів машинобудування
4. Вихідні дані циліндричні зразки з бронзи та алюмінію, діаметри яких становлять 34...36 мм, з кроком 0,1 мм
5. Перелік завдань, які потрібно розробити: проведення аналізу багатопараметрового неруйнівного контролю; розробка структурної схеми багатопараметрового вихрострумовеого контролю; розробка електричної схеми; проведення розрахунків ВСП; розробка стартап проекту на впровадження виконаної роботи.
6. Орієнтовний перелік графічного (ілюстративного) матеріалу структурна схема, електрична схема, складальний кресленик ВСП.
7. Орієнтовний перелік публікацій 2 статті.

8. Консультанти розділів дисертації:

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Розробка стартап-проектів	Бояринова К.О., д.е.н., доцент; доцент кафедри менеджменту факультету менеджменту та маркетингу КПІ ім. Ігоря Сікорського		

9. Дата видачі завдання 1 вересня 2020

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Актуальність, область застосування, постановка задачі	3	
2	Огляд літературних джерел, аналіз існуючих методів та систем.	3	
3	Розрахунок первинного перетворювача	2	
4	Розроблення структурної схеми та електричної	2	
5	Виконання розділу «Розробка стартап-проекту»	1	
6	Оформлення пояснювальної записки, презентації та плакатів	1	

Студент

Тетяна РОМАНЮК

Науковий керівник

Юрій КУЦ

РЕФЕРАТ

Дана магістерська дисертація складається з вступу, 4 розділів, висновків, списку використаної літератури та додатків. Повний обсяг роботи склав 97 сторінок, містить 24 ілюстрації та 24 таблиці. Опрацьовано 19 джерел літератури.

Як результат роботи над магістерською дисертацією було запропоновано використання амплітудно-фазового методу двопараметрового вихрострумowego контролю, в якому амплітудний метод застосовано на верхній частоті для визначення діаметру прутка, а фазовий метод на низькій частоті для визначення питомої електропровідності матеріалу.

Також було розроблено структурну та електрично-принципову схеми вихрострумowego дефектоскопу, що реалізує запропонований метод двопараметрового контролю. Сформовано рекомендації щодо впровадження розробленого проекту у виробництво.

Ключові слова: вихрострумовой контроль, багатопараметровий вихрострумовой контроль, неруйнівний контроль, фазова дискримінація, амплітудний метод, фазовий метод, годографи. Вихроперетворювач.

ABSTRACT

This master's dissertation consists of an introduction, 4 chapters, conclusions, list of references and appendices. The total volume of the work was 97 pages, contains 24 illustrations and 24 tables. 19 sources of literature were processed.

As a result of the master's dissertation it was proposed to use the amplitude-phase method of two-parameter eddy current control, in which the amplitude method is used at high frequency to determine the diameter of the rod, and the phase method at low frequency to determine the specific conductivity of the material.

Also, a structural and electrical-schematic diagram of the eddy current flaw detector was developed, which implements the proposed method of two-parameter control. Recommendations for the implementation of the developed project in production are formed.

Keywords: eddy current control, multiparameter eddy current control, non-destructive testing, phase discrimination, amplitude method, phase method, hodographs, vortex converter

ЗМІСТ

ВСТУП	11
РОЗДІЛ 1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД	13
1.1. Актуальність процесу автоматизації НК матеріалів та виробів	13
1.2. Основні принципи методу багатопараметрових вихрострумових випробувань	16
1.2.1. Поширення на більше число параметрів.....	17
1.2.2. Годографи на комплексній площині.....	18
1.2.3. Вплив змін параметра	18
1.2.4. Фазова дискримінація в двохпараметровому випадку	20
1.2.5. Можливість дослідження простору більшої розмірності.....	21
1.2.6. Тривимірний випадок.....	23
1.2.7. Тримірна фазова дискримінація.....	24
1.3. Розділення параметрів.....	29
1.3.1. Лінійне наближення	31
1.3.2. Про кривизну реальних годографів	36
1.4. Контрольно-вимірвальна апаратура	36
1.4.1. Матрична схема перетворювача.	39
1.4.2. Схема перетворення, заснована на алгебраїчному рішенні.	40
Висновки до розділу	42
РОЗДІЛ 2. РОЗРАХУНОК СИСТЕМИ ОБ'ЄКТА КОНТРОЛЮ – ПЕРЕТВОРЮВАЧА	44
2.1. Розрахунок вихроперетворювача на високій частоті для бронзи	46

2.2. Розрахунок вихрострумowego перетворювача на високій частоті для алюмінію	49
2.3. Розрахунок вихрострумowego перетворювача на низькій частоті для бронзи	52
2.4. Розрахунок вихрострумowego перетворювача на низькій частоті для алюмінію	54
Висновки до розділу	57
РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА ТА МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ	58
3.1. Розроблення структурної схеми двопараметрової вихрострумовой системи	58
3.2. Розробка електричної принципової схеми	62
3.2.1. GD5F1GQ4UFYIG	62
3.2.2. ASM117-5.0	64
3.2.3. 78L05ABZ	64
3.2.4. ESP32-D0WD-V3	64
3.2.5. AD8066	65
3.2.6. INA156	66
Висновки до розділу	67
РОЗДІЛ 4. РОЗРОБКА СТАРТАП ПРОЕКТУ «ДЕФЕКТОСКОП БАГАТОПАРАМЕТРОВОГО ВИХРОСТРУМОВОГО КОНТРОЛЮ СТАНУ ВИРОБІВ МАШИНОБУВАННЯ»	68
4.1. Опис ідеї проекту (товару, послуги, технології)	75
4.2. Технологічний аудит ідеї проекту	77
4.3. Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту	78
4.4. Фактори конкурентоспроможності	84
4.5. Аналіз сильних та слабких сторін стартап-проекту	84

4.6. SWOT-аналіз стартап-проекту.....	85
4.7. Альтернативи ринкової поведінки	86
4.8. Розроблення ринкової стратегії проекту	87
4.8. Розроблення маркетингової програми стартап-проекту	90
Висновки до розділу	94
ВИСНОВКИ.....	95
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	96

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

ВСК – вихрострумний контроль,

ВСП – вихрострумний перетворювач,

ОК – об'єкт контролю,

НК – неруйнівний контроль,

ВСМ – вихрострумний метод контролю,

ПК – персональний комп'ютер,

ПЗ – програмне забезпечення,

ПЕП – питома електрична провідність.

ВСТУП

Методи неруйнівного контролю (НК) використовуються в металургійній промисловості та різних галузях науки для оцінки властивостей найрізноманітніших матеріалів, не змінюючи характеристик і параметрів ні самих матеріалів, ні виробів з них. Деякі з найпоширеніших неруйнівних методів – це електромагнітні, ультразвукові та проникаючих речовин. Одним із затребуваних методів, що застосовується для перевірки електропровідних матеріалів – таких металів як мідь, алюміній або сталь, є вихрострумний метод неруйнівних випробувань [1].

Деякі вчені досліджували можливості неруйнівного контролю на основі комбінації різних електромагнітних та звукових хвиль за допомогою електромагнітних акустичних перетворювачів.

Загалом вихрострумні методи НК дають змогу виявити наявність дуже дрібних тріщин, контролюючи зміни потоку вихрових струмів [2]. Такі методи дозволяють виявляти тріщини у всіх електропровідних матеріалах, як феромагнітних, так і неферомагнітних, тоді як застосування методів магнітного НК обмежене феромагнітними металами. Ще однією перевагою методу вихрових струмів перед іншими методами є те, що випробування можуть бути здійснені без будь-якого безпосереднього механічного контакту між датчиком та контрольованим предметом. Крім того, за допомогою вихрострумних методів можна реалізувати широкий спектр інспекцій та вимірювань, які виходять за рамки можливостей інших методів. Електропровідність пов'язана зі складом, структурою, термічною та механічною обробкою досліджуваного матеріалу. Отже, метод вихроструму також може бути використаний для розрізнення чистих металів і їх композицій у сплавах та для визначення твердості зразків після термічної обробки [3].

З 1950-х роках роль вихрострумових випробувань дедалей більше розвивалася в області випробувань матеріалів, особливо в авіаційній галузі [4] та ядерній промисловості [5]. Широкі дослідження та розробки високочутливих вихрострумових датчиків та приладів протягом останніх шестдесяти років свідчать про те, що такі випробування в даний час є широко використовуваною технікою контролю.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД

Досягнення вищого рівня в промислового розвитку країни є одним із пріоритетних завдань сьогодення. Відомо, власне що піднесений ступінь промислового розвитку гарантується як розмірами виготовлення, наприклад і широким асортиментом продукції, а ще показниками їх якостей. У ряді питань, що стосуються підвищення якості та конкурентоспроможності продукції, вагоме місце належить застосуванню об'єктивних фізичних методів неруйнівного контролю (НК) на різних етапах виготовлення. [1].

1.1. Актуальність процесу автоматизації НК матеріалів та виробів

Їх використання стає ще більш актуальним з точки зору інноваційного розвитку різних галузей промисловості, заснованого на використанні новітніх досягнень фундаментальних та прикладних наук, широкому впровадженні нових конструкційних матеріалів, комплектуючих і передових технологічних процесів. Значні обсяги операцій з НК в багатьох галузях неможливо забезпечити без часткової або повної автоматизації операцій управління. Одним з найбільш перспективних способів підвищення продуктивності і надійності технологічного процесу НК структур з феромагнітних і неферомагнітних металів зі складною геометрією є впровадження роботизованих вихорострумів систем автоматичного управління, що вирішують завдання зниження впливу людини на технологічний процес. і контролювати результати.

Відомо, що неруйнівний вихорострумів контроль має такі переваги, як: відсутність фізичного контакту датчика з продуктом, багатопараметричність, відсутність впливу параметрів навколишнього середовища на результати контролю, відсутність необхідності в контактній середовищі (наприклад, воді) і високої продуктивності.

Неруйнівний контроль виробів складної геометрії характеризується високою складністю як траєкторії сканування, так і процедури розшифровки показань вихрострумowego датчика. Наприклад, при виконанні низькочастотного вихрострумowego контролю дефектів оператор повинен ідентифікувати виявлені дефекти, розділивши їх на кілька класів: 8 зокрема, по глибині їх появи на зовнішньої і внутрішньої щодо поверхні виробу на звідки вони походять; оцініть глибину дефекту в процентах від товщини виробу. У цьому випадку оператор повинен ігнорувати перешкоди, пов'язані зі структурною неоднорідністю матеріалу виробу, сигнали від яких часто дуже схожі на сигнали від дефектів.

У оператора є тільки графічне зображення годографа в комплексній площині і сигнал на тимчасовій розгортці. Можна відзначити, що якість сигналу залежить від того, наскільки точно оператор виконує сканування за допомогою вихретокового датчика. Зрозуміло, що надійність вихретокового контролю багато в чому залежить від технічної підготовки, досвіду та емоційного стану оператора-дефектоскописта. Наявність складної геометрії виробу також уповільнює процес ручного управління. Наприклад, при скануванні зони зварного шва використовуються три основні зони сканування контрольованої зони, які повинні безпосередньо покривати зону проплавлення і дві сусідні зони швів. Залежно від висоти підсилює валика застосовується зигзагоподібний або поздовжній метод сканування. При зигзагоподібній методі операцію балансування вихретокового датчика потрібно виконувати один раз, а при поздовжньому - кожен раз. Помилка при скануванні знизить вірогідність результатів контролю. Використання антропоморфного робота-маніпулятора, який може без помилок і з високою точністю відтворювати сканування рухів дефектоскопа, дозволяє точно реалізувати необхідну траєкторію з максимальною швидкістю вихрострумowego датчика, а

використання сучасних комп'ютерів допускає безпомилкову синхронізацію.

У свою чергу, реалізація алгоритмів обробки даних з використанням елементів штучного інтелекту дозволяє формалізувати процедуру декодування годографів і сигналів з тимчасової розгорткою, отриманих з вихорострумів датчиків. Таким чином, для підвищення продуктивності та достовірності результатів контролю виробів складної геометрії необхідно забезпечити впровадження сучасних роботизованих систем автоматичного неруйнівного вихорострумівого контролю.

У зв'язку з постійною і зростаючою потребою в більш досконалих засобах НК, розширення їх сфери застосування! Застосування в цій області не зупиняє процес розробки нових і поліпшення існуючих пристроїв і систем НК. Сьогодні ринок засобів НК насичений приладами різного призначення, що володіють високими технічними характеристиками. Незважаючи на впровадження сучасних схемотехнічних рішень, досягнень комп'ютерної техніки та інформаційно-вимірювальних технологій, значна частина таких ЗАСОБІВ орієнтована на «ручний» метод сканування поверхні об'єктів контролю (ОК). Наявність людського фактора призводить до підвищення суб'єктивності контролю, знижуючи ймовірність прийняття правильних діагностичних рішень. Тому на практиці, навіть при найкращих методах контролю, ручний метод НЕ гарантує досягнення високої ймовірності контролю. Наявність в технологічному ланцюжку управління людини-оператора значно збільшує ймовірність отримання помилкових рішень, які важко піддаються кількісній оцінці і що не дозволяє в повній мірі реалізувати високий потенціал засобів НК. Негативний вплив людського фактора особливо помітно в умовах масового виробництва.

1.2. Основні принципи методу багатопараметрових вихрострумів випробувань

Розвиток технології металів, зростання вимог до надійності матеріалів деталей ставлять нові задачі перед неруйнівними випробуваннями. Для їх вирішення необхідні нові методи випробувань, які дозволяють отримати більш повну інформацію про об'єкт контролю. До таких методів відноситься метод багатопараметрових (багаточастотних) вихрострумів випробувань.

Метод багатопараметрових вихрострумів випробувань [6] з'явився в результаті розробки широкосмугових електромагнітних методів [7-9]. Було показано, що застосування цього метода дає змогу отримати такі характеристики випробувань, які недоступні при застосуванні інших методів [9, 10].

Відомо три підходи до багатопараметрових випробувань:

- 1) узагальнення одночастотного метода, заснованого на фазовій дискримінації;
- 2) алгебраїчний підхід, заснований на розв'язанні систем рівнянь;
- 3) геометричне представлення, яке ґрунтується на використанні векторного простору.

Принцип багатопараметрового контролю полягає в наступному. Котушку перетворювача збуджують багаточастотні або імпульсні струми. Вихідний сигнал перетворювача, модульований параметрами випробуваного зразка, посилюється, фільтрується і демодулюється. Демодульовані складові сигнали потім з'єднуються у вибраних лінійних комбінаціях, забезпечуючи зчитування окремих контролюючих параметрів. Цей метод дає можливість вирішувати проблему розшифрування вихрострумів сигналів, яка виникає внаслідок особливостей вихрострумів контролю.

Особливості багатопараметрового вихрострумів контролю

Неруйнівний контроль методом вихрових струмів застосовується в металообробній промисловості для різних вимірювань, сортування і виявлення дефектів. Він ґрунтується на принципах електромагнітної індукції, і йому притаманні викладені нижче особливості.

Для того щоб краще зрозуміти основні принципи багатопараметрового контролю, використовують три трактування. Перше включає узагальнення метода фазової дискримінації, застосовуваного при одночастотних випробовуваннях матеріалів та виробів методом вихрових струмів. Інтерес до такої трактовки пояснюється тим, що метод фазової дискримінації знаходить широке застосування. Друга заснована на елементарній алгебрі і на перший погляд здається менш абстрактною і простішою, ніж решта. Третя використовує матриці і поняття векторного простору. Більш узагальнена і абстрактна векторна трактовка дає компактну систему запису і кращі результати, але вона важче сприймається. Як і слід було очікувати, всі трактування мають загальну основу – розділення змінних в багатовимірній системі.

Проведений аналіз заснований на припущенні малих сигналів, однак в принципі він приданий і для великих сигналів. Режим великих сигналів несе додаткові труднощі і обговорюється пізніше.

Узагальнення метода фазової дискримінації

Метод багатопараметрового контролю можна представити як узагальнення метода фазової дискримінації, застосованого одночасно на двох і більше частотах. Розглянемо спочатку суть фазової дискримінації на прикладі одночастотного методу і покажемо, як дві змінних або два параметра ОК можуть бути роздільні на одній частоті.

1.2.1. Поширення на більше число параметрів.

Після додавання другої частоти в силу трьохмірного сигналу метод може бути поширеним на три параметра. Розширення до чотирьох і

більше параметрів важко відновити графічно, але воно може легко сприйматись як логічний результат збільшення числа змінних і розмірності.

Годографи електричного імпедансу або вихідної напруги вихрострумівих перетворювачів для різних умов досліду на частоті ω показані на комплексній площині, зображеній на рис. 1.1.

Годографи і вектори на комплексній площині імпеданса або напруги, показуючі вплив видалення перетворювача і під поверхневих дефектів; перетворювач накладного типу.

1.2.2. Годографи на комплексній площині

Годографи на комплексній площині дають наочне уявлення про початкові фази і амплітуди синусоїдних сигналів змінного струму. Кожен годограф зазвичай будують для певної частоти. Довжина відрізка прямої лінії, з'єднуюча будь-яку точку годограф з початком координат, пропорційна амплітуді синусоїдальній величині. Напрям цього відрізка відносно осі абсцис дає фазовий кут.

1.2.3. Вплив змін параметра

Розглянемо рис.1.1, беручи до уваги, що лінії на ній показують лише характер впливу деяких величин. Вектор OA представляє вихідний сигнал датчика в ненавантаженому режимі (контрольований зразок розташований на значній відстані від котушки). Розглянемо котушку вихрострумівих перетворювача накладного типу, ось якої розташована перпендикулярною до поверхні зразка. В процесі наближення перетворювача до поверхні зразку кінець вектора перетворювача вихідного сигналу зміщується по траєкторії, наприклад ABC , ADE або AFG , в залежності від електропровідності використаного зразка. Лінії, що проходять через ці точки, часто називають «лініями відводу». Крива

АСЕГ являється годографом провідності зразка при умові, що даний датчик примикає до неферромагнітного зразка. Розглянемо окіл точки Е. Вектор ОЕ представляє собою вихідний сигнал датчика, коли він торкається зразка, який немає дефектів в межах зони чутливості котушки. Тепер розглянемо вплив на сигнал датчика змін трьох наступних параметрів досліду: p_1 – відвід датчика на незначну відстань від поверхні; p_2 – наявність дефекта, що знаходиться в металі поблизу поверхні; p_3 – дефект, що знаходиться на великій глибині від поверхні.

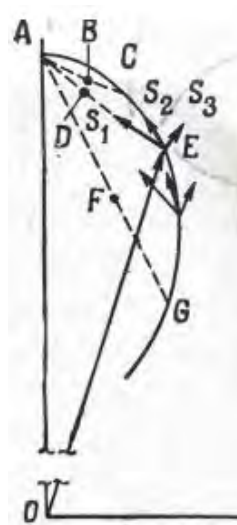


Рис. 1.1. Годографи сигналів і вектори впливу різних факторів для перетворювач накладного типу.

Відведення датчика від поверхні дає вектор-сигнал S_1 , направлений по кривій ADE. Підповерхневі дефекти заважають проходженню вихрових струмів в зразку. В результаті поверхневого ефекта ці струми проходять з великим запізненням по фазі на великій глибині під поверхнею. Таким чином, не глибокі дефекти дають сигнал S_2 , а дефекти, котрі лежать на більшій глибині, сигнал S_3 . Відмітимо, що вектор S_2 , запізнюється відносно S_1 , а вектор S_3 запізнюється відносно вектора S_2 . Це положення характерне для робочої частоти ω_1 . Далі розглянемо зміни відносних фазових кутів цих векторних сигналів на другій, більш високій

робочій частоті. Покажемо, що основним ефектом збільшення частоти являється збільшення відставання по фазі сигналів від дефектів. Це відбувається в результаті збільшення кута запізнення на певній глибині зі збільшенням частоти. Проте, перед тим як розглядити ефекти збільшення частоти, необхідно відкинути неінформативні ділянки рис. 1.1. і розглянути метод фазової дискримінації, часто використовуваний при одночастотному випадку. Вектор OE можна скомпенсувати складенням з вектором $-EO$, в результаті чого початок координат переміститься з точки E в точку O (рис. 1.2). В даному випадку початкова точка позначається OE і відповідає точці E на рис. 1.2.

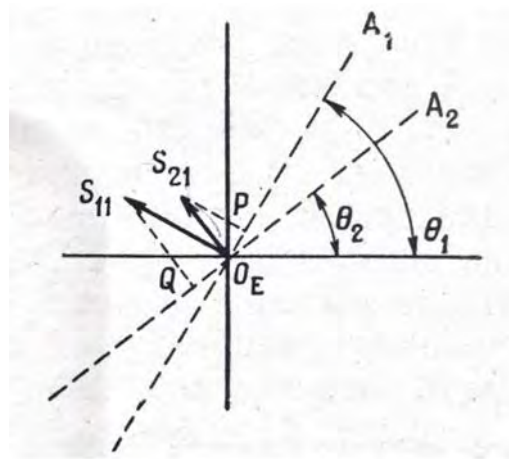


Рис. 1.2. Сигнали вихростумового контролю для одночастотного двопараметрового методу фазової дискримінації.

1.2.4. Фазова дискримінація в двохпараметровому випадку

Для розгляду методу фазової дискримінації ми беремо лише два сигнали S_{11} і S_{21} , так як при використанні цього методу можуть бути розділені тільки два параметра. Амплітудно-фазовий детектор, використовується при одночастотному методі, дає в якості вихідної величини проекції сигнала на опорний вектор. Наприклад допустимо, що θ_1 на рис. 1.2 являється фазовим кутом опорним вектором і що він може бути відрегульованим таким чином, що опорний вектор буде

перпендикулярний вектору «сигнал відводу» S_{11} . Ось A_1 називається віссю фазового детектора 1.

Вихідний сигнал фазового детектора 1 пропорційна проекції S_{11} на вісь A_1 . Якщо вісь A_1 встановлена перпендикулярно вектору «сигнал відводу» S_{11} , то його проекція на A_1 буде рівною нулю. Таким чином, подавляється «сигнал відводу» а вектор S_{21} на виході фазового детектора 1 буде представлений проекцією ОЕР на вісь A_1 . Наведений вище опис дає уявлення про фазову дискримінацію, застосовану для подавлення сигналу (S_{11}) з певним фазовим кутом, і дозволяє отримати значну складову сигналу (S_{21}), маючи другий фазовий кут. Ця складова пропорційна амплітуді сигналу і косинусу фазового кута між сигналом і опорним вектором.

Подібним же чином можна подавити сигнал S_{21} , а складова сигналу S_{11} буде рахуватись за допомогою другого фазового детектора з фазовим кутом Θ_2 між опорним вектором і віссю фазового детектора A_2 . В данному випадку складова сигналу S_{11} пропорційна ОEQ.

Таким чином, при роботі на одній частоті зчитується один сигнал за допомогою одного фазового детектора і другий сигнал за допомогою другого фазового детектора. Це можливо навіть в тому випадку, якщо два сигнали виникають одночасно.

1.2.5. Можливість дослідження простору більшої розмірності

В основі багатопараметрового контролю лежить розповсюдження раніше описаного способу фазової дискримінації на багатомірний простір. Це здійснюється збільшенням числа частот випробовування таким чином, що збільшується розмірність, необхідна для опису сигналу, дозволяючи розділяти більшу кількість параметрів. Наприклад, чотирьохпараметрове розділення потребує застосування двох частот. Однак, для спрощення розглянемо розділення трьох параметрів,

використовуючи дві частоти випробовування. За допомогою трьох складових сигналів і трьох параметрів можна побудувати графік звичайним способом в трьох мірному просторі.

На рисунку 1.3 показана додаткова інформація про сигнал, необхідний для подальшого аналізу. Рис. 1.3, а відтворює частину годографа рис. 1.1 для частоти ω_1 і дає можливість порівняти його з новим годографом, на рис. 1.5, б при більш високій частоті ω_2 .

На рис. 1.3, б вектори S_{22} і S_{32} сигналів від дефектів повернуті по часовій стрілці (запізнююча фаза) для того, щоб показувати вплив зменшення глибини проникнення вихрових струмів на більш високій частоті.

Дані про сигнал з рис.1.3 були перенесені на рис. 1.4. При цьому годографи повернуті проти часової стрілки так, щоб вектори S_{11} і S_{12} розмістились по осях абцис.

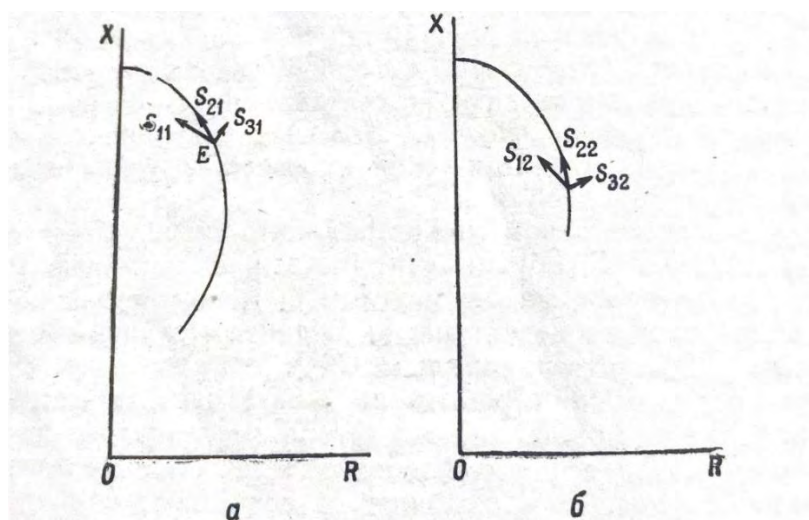


Рис. 1.3 Годографи і вектори, що показують вплив вплив перетворювача і підповерхневих дефектів для двох робочих частот.

Для того щоб провести порівняння і аналіз, були визначені точні масштабні величини цих векторів (сигналів). Ці масштабні величини приблизно відповідають деяким експериментальним величинам.

Відмітимо, що проєкції різних сигналів на осі C_1 і C_2 могли бути отримані за допомогою двох фазових детекторів, працюючих на частоті ω_1 , що мають перпендикулярні опорні вектори, і відрегульовані до потребуючих еталонних фазових кутів. Таким самим чином можуть бути отримані проєкції сигналів на осі C_3 і C_4 від фазових детекторів, працюючих на частоті ω_2 .

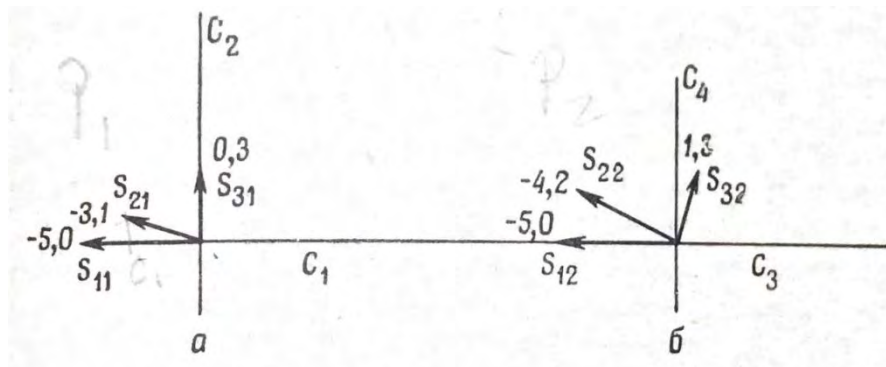


Рис. 1.4 – Сигнали вихрострумовео контролю: двохчастотна система.

1.2.6. Тривимірний випадок

Складові сигналу вздовж всієї осі C_1 , C_2 , і C_3 на рис.1.4 використовуються для побудови рис. 1.5, який відтворює сигнали в трьох вимірах.

Складові сигналів вздовж осі C_4 на рис. 1.4 не використовуються при даній трьохвимірній побудові, хоча в них зазвичай виникає необхідність для розділення чотирьох параметрів. Алгебраїчний знак проєкцій на осі C_1 і C_3 (рис.1.4) має значення, зворотнє прийнятому в побудові на рис.1.5. Це робить побудову більш наглядною. Ось A_{21} побудована перпендикулярно площині, включеній S_1 і S_2 . Осі A_{32} і A_{31} перпендикулярні площинам, включені відповідно сигнали S_3, S_2 і S_3, S_1 .

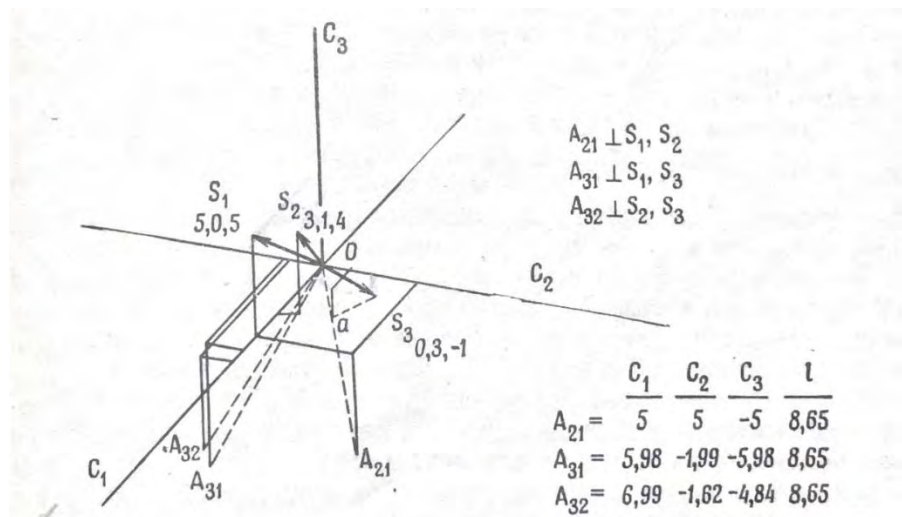


Рис. 1.5. Вектори сигналів в трьохвимірному просторі; використані вихідні вектори рис. 1.4.

1.2.7. Тримірна фазова дискримінація

Тепер можливо узагальнити принцип фазової дискримінації на трьохвимірний випадок. Допустимо, що необхідно мати вихідний сигнал, пропорційний тільки вектору S_3 незалежно від векторів S_1 і S_2 . Вектор S_3 має складову Oa вздовж осі A_{21} . Вектори S_1 і S_2 не мають складових в цьому напрямку, тому що ось A_{21} була побудована перпендикулярно S_1 і S_2 . Таким чином, при зчитування вздовж осі A_{21} можна отримати вихідний сигнал, пропорційний тільки вектору S_3 .

Подібним же чином можна визначити, що вектори S_1 і S_2 мають незалежні складові вздовж осі A_{32} і A_{31} . Відповідно, вихідні сигнали, пропорційні S_1 , S_2 і S_3 , можуть бути отримані при зчитуванні проєкцій на відповідно вибрані осі A_{32} , A_{31} і A_{21} . По аналогії можна розповсюдити цей принцип на випадки більшого числа вимірів.

Маючи інструментальні методи зчитування проєкцій сигналів на вибрані осі тут не розглядались. Проте ці методи стануть більш зрозумілими після вивчення алгебраїчного і векторно-просторового уявлення.

Алгебраїчне представлення

Принципи, що лежать в основі багатопараметрового контролю, можна пояснити за допомогою систем алгебраїчних рівнянь. Проекції сигналів на осі C_1, C_2, C_3 і C_4 (рис. 1.4) являється вихідними сигналами амплітудно-фазових детекторів вихрострумового приладу. Це дозволяє записати вихідні алгебраїчні рівняння для сигналів. Так як аналіз ведеться в лінійному приближенні (невеликі сигнали), вихідний сигнал фазового детектора для кожної осі (чи каналу) буде рівний сумі проекцій всіх векторів на цю ось. Ведемо значення a_{ij} для відношення проекції сигналу на ось з номером i до величини, що визиває цей сигнал параметра p_j . Тоді, наприклад проекція сигналу S_{21} на вісь C_1 , якщо не приймати до уваги інші сигнали, запишеться у вигляді

$$a_{12}p_2 = c_1, \quad (1.1)$$

де $a_{12} = -3$.

З урахуванням інших сигналів можна записати систему спільних рівнянь. Вихідні сигнали фазових детекторів з осями проекцій C_1, C_2, C_3 і C_4 виражаються сумою проекцій векторів сигналів на відповідні осі, тобто

$$\left. \begin{aligned} a_{11}p_1 + a_{12}p_2 + a_{13}p_3 &= c_1 \\ a_{21}p_1 + a_{22}p_2 + a_{23}p_3 &= c_2 \\ a_{31}p_1 + a_{32}p_2 + a_{33}p_3 &= c_3 \end{aligned} \right\} \quad (1.2)$$

Величини коефіцієнтів a_{ij} для трьохпараметрового прикладу, приведенного на рис.1.2, можуть бути взяті з таблиці 1.1.

Таблиця 1.1. Величини коефіцієнтів a_{ij} для трьохпараметрового прикладу

	p_1	p_2	p_3
	$a_{11} = -5$	$a_{12} = -3$	$a_{13} = 0$
	$a_{21} = 0$	$a_{22} = 1$	$a_{23} = 3$
	$a_{31} = -5$	$a_{32} = -4$	$a_{33} = 1$

Система рівнянь (1.2) має три невідомих величини p_1 , p_2 і p_3 . При конкретному випробовуванні можна визначити коефіцієнти a_{ij} і величини c_1, c_2, c_3 . Насправді величини c_i представляють різні вихідні сигнали фазових детекторів. Коефіцієнти a_{ij} можуть бути визначені виміром впливу на величини c_i окремо кожного параметра. Невідомі параметри можуть бути розділені, якщо приміняти метод Гауса для виключення змінних в системі сумісних рівнянь. Це зображено на лінійній діаграмі рис. 1.5. Вихідні сигнали c_1, c_2 і c_3 фазового детектора являються тут вхідними; Y_1 представляє собою точки сумування, де сигнали, що подаються на вхідні лінії сумуються в лінійних комбінаціях, що потрібні для виділення параметрів.

Наприклад, в точці Y_1 сигнали c_1 і c_2 сумуються так, щоб виключити вплив параметра p_3 . Подібним же чином в точці Y_2 комбінацією c_1 і c_3 виключає p_3 . Наступні дві точки сумування Y_3 і Y_4 використовують для виключення p_2 . В процесі виключення (розділення) параметрів коефіцієнти, що стоять перед ними, змінюються. Параметри p_1 і p_2 розділяються в точках Y_5 і Y_6 , а p_3 виділяється в точці Y_7 . Кінцеві вихідні сигнали $d_{11}p_1$, $d_{22}p_2$ і $d_{33}p_3$ пропорційні параметрам p_1 , p_2 і p_3 відповідно. В залежності від конкретного виду функцій c_1, c_2 і c_3 може бути вибрана інша схема вирішення.

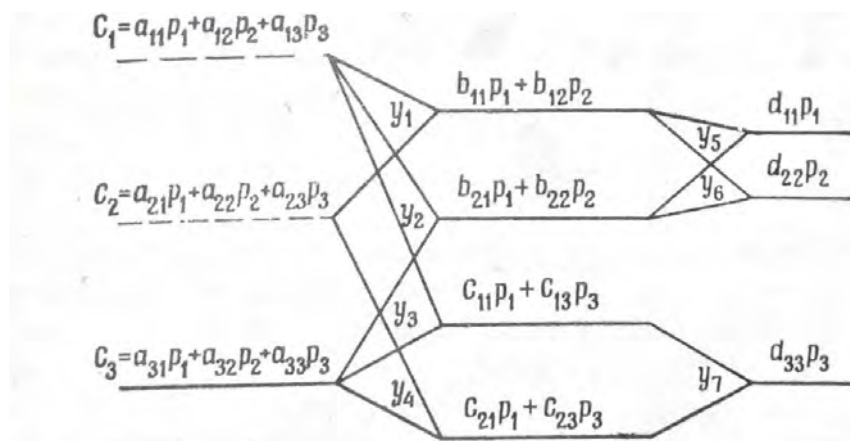


Рис. 1.6. Розділення параметрів; алгебраїчне представлення.

На рис.1.7 зображена схема розділення параметрів для прикладу, що даний на рис. 1.4, з використанням алгебраїчного представлення. В цьому випадку множники дані в дужках на відповідних лініях перед точками сумування.

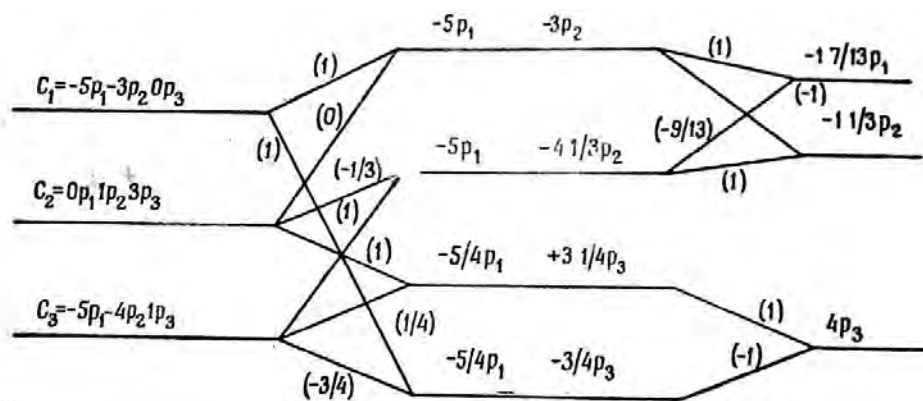


Рис. 1.7. Лінійна діаграма, що зображає розділ параметрів.

В повному рішенні системи рівнянь (2) немає необхідності, так як ми хочемо мати можливість роздільного зчитування впливу параметрів, тобто нас цікавить саме розділення або виділення параметрів.

Представлення в векторному просторі

Для багатопараметрового контролю можна застосувати узагальнене геометричне уявлення з використанням векторного простору. На рис. 1.20 це представлено в спрощеній формі. Генератор А збуджує систему котушок В за допомогою багаточастного або імпульсного струму. Сигнал модулюється параметрами досліджуваного зразку, що має узагальнений параметр Р з складовими p_1, p_2, \dots, p_n . Узагальнений сигнал С на виході приймача D зв'язаний зі вхідним параметром Р рівнянням

$$[C] = [A][P] \quad (1.3)$$

де $[A]$ являється матрицею модуляції, що відображає умови досліджувань, параметри досліджуваного зразка; характеристики перетворювача і приймача. Рівняння (1.3) являється матричною формою запису системи рівнянь (1.2), яка описує алгебраїчне представлення.

Сигнал C має складові c_1, c_2, \dots, c_n , що являються коефіцієнтами узагальненого розкладу в ряд Фур'є. Після цього сигнал перетворюється блоком перетворювача E в функцію Q , пропорційну початковому вхідному параметру P . Вихідний сигнал Q має компоненти q_1, q_2, \dots, q_n , що пропорційні відповідним складовим вхідного параметру p_1, p_2, \dots, p_n . Рівняння (1.4) описує перетворювач сигналу C в контролюючий узагальнений параметр P .

$$[P] = [A]^{-1}[C] \quad (1.4)$$

Тут $[A]^{-1}$ – обернена приємна модуляційна матриця.

Суворо кажучи, кінцевий вихідний сигнал не рівний, а пропорційно початковим параметрам. Позначаючи простір вихідного сигналу як простір параметру Q , рівняння (1.4) можна перетворити наступним чином:

$$[Q] \approx [P] = [A]^{-1}[C] \quad (1.5)$$

Коефіцієнт пропорційності може бути різним для кожної складової P .

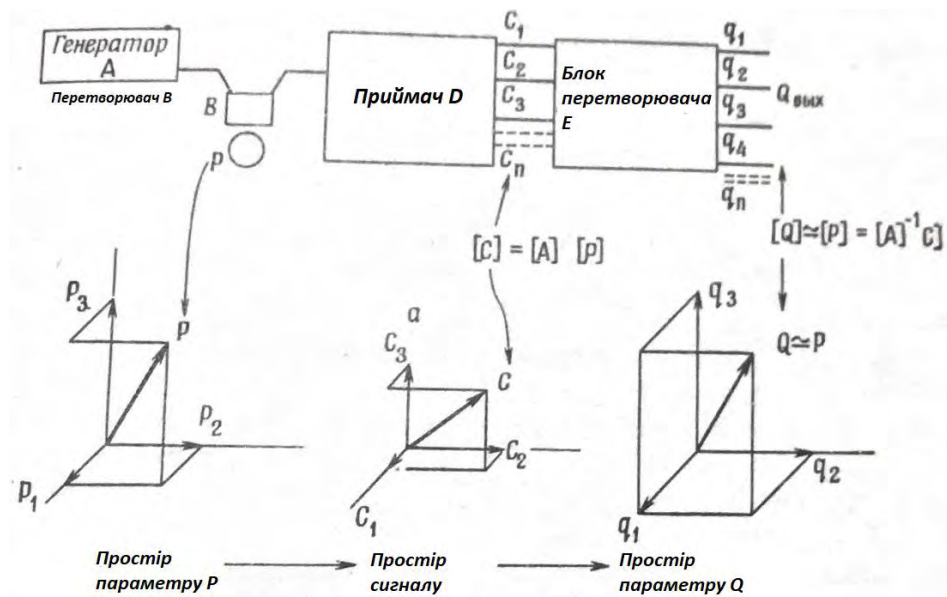


Рис. 1.8. Простір параметрів; перетворення простору сигналів.

1.3. Розділення параметрів

Розділення параметрів ОК зв'язані з калібруванням обладнання, яке дає можливість встановити відповідність між сигналом певного каналу і контрольованим параметром ОК. Під параметром розуміється певна змінювана величина, що фіксується під час контролю. До параметрів ОК, які представляють найбільший інтерес, відносяться електропровідність, інші електромагнітні властивості, наявність дефектів, розташування дефектів і їх розміри. Ці та інші параметри утворюють простір параметрів ОК. Теоретично незалежними є ті параметри, які взаємно ортогональні в утвореному просторі параметрів.

Розділення в порівнянні з рішенням

Як було встановлено вище, повного рішення основних рівнянь (1.2) і (1.3) не потребується. Це пояснюється тим, що суттю багатопараметрового контролю являється розділ параметрів. Якщо вихідні сигнали оброблені так, що різні параметри можуть зчитуватись кожен на окремому виході, то регулювання вихідних сигналів може проводитись окремо. Бажана чутливість кожного вихідного каналу може бути установлена в процесі калібрування.

Різновид між рішенням і розділенням можна показати на прикладі розділу рівняння (1.3), що досягається без повного його рішення.

Для того щоб знайти повне рішення, необхідно помножити рівняння (1.3) на величину A^{-1} , зворотній A ,

$$P] = [A]^{-1}C] = [A]^{-1}[A] P] = P]. \quad (1.6)$$

Для розділення нам потрібно лише система компонент q_1, q_2, \dots, q_n , розташованих так само, як і складові узагальненого параметру P , але з довільними амплітудами. Ця довільність амплітуд може бути відображена множенням P на діагональну матрицю $[D_a]$, маючу довільні величини на діагоналі

$$[D_a]P] = [D_a][A]^{-1}C]. \quad (1.7)$$

Використовуючи тотожність

$$A^{-1} = \left[\frac{A_{ij}}{\det[a_{ij}]} \right] \quad (1.8)$$

де A_{ij} – алгебраїчне доповнення елемента a_{ij} в визначнику $\det[a_{ij}]$, рівняння (1.6) можна представити в наступному вигляді.

$$\det[a_{ij}][D_a]P = [D_a][A_{ij}]C. \quad (1.9)$$

Так як $\det[a_{ij}]$ (визначник A) являється скалярною величиною і D_a має довільні складові, $\det[a_{ij}]$ може бути врахованим в D_a . Однак рівняння (1.9) показує, що вплив A становиться сингулярним, коли $\det[a_{ij}]$ приближається до нуля. Це рівняння показує також, що можливість розділення досягається дійством алгебраїчного доповнення. Наявність довільного або калібровочного множника D_a в рівнянні (1.9) підтверджує думку про менш жорсткі умови при розподілу в порівнянні з рішенням.

Рівняння (1.9) являється основним при конструкції і розробки схем перетворювача для розділу параметрів.

Необхідне число робочих частот

Як правило, в результаті змін контролюючих параметрів кінець вектора сигналу переміщується по кривій лінії або по криволінійній поверхні в двохмірному або багатомірному просторі відповідно. Ця кривизна або нелінійність визначається особливостями просторового розподілу електромагнітних полів і струмів. Для спрощення аналіз проводиться в лінійному приближенні. Це дає можливість застосувати добре розроблені методи лінійної алгебри.

В більшості випадків прагнуть виявити малі дефекти, що визивають невеликі зміни сигналу, тому застосування лінійного приближення представляє практичний інтерес. Число потрібних робочих частот для розділення заданого числа параметрів в першу чергу також буде

розглядатись в лінійному приближенні, потім деяка увага буде виділена впливу нелінійності.

1.3.1. Лінійне наближення

Аналіз ідеалізованого методу контролю вихровими струмами показує, що число параметрів, котрі можуть бути розділені, в два рази більше використаних робочих частот. Ідеалізація метода випробувань вихровими струмами представлена на рис. 1.21 безкінечної довгої лінії з втратами.

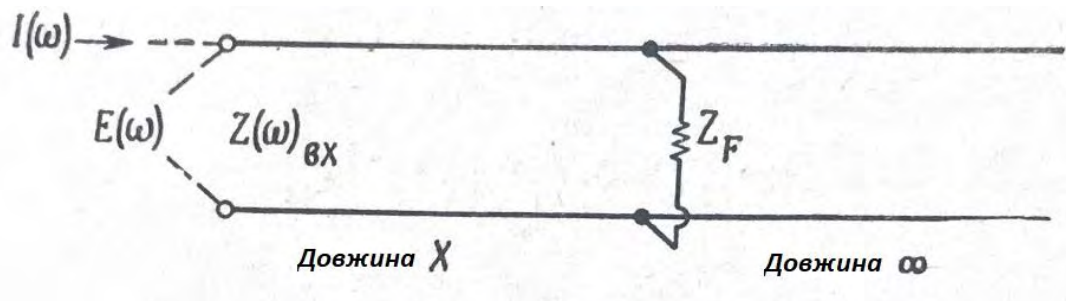


Рис. 1.9. Моделювання методу контролю вихровими струмами електричної довгої лінії.

Нагрузка Z_f імітує дефект на відстані (глибині) x від початку лінії. Дія ланцюгів зв'язку між генератором і лінією (випробуваним зразком) не показано, оскільки це не має відношення до даного питання.

Передбачається, що до входу лінії підведені фіксовані зміни струми I_n різних частот. Пристрій зчитує сигнал

$$E(\omega) = I_n(\omega)Z_n(\omega). \quad (1.10)$$

Таким чином, спостерігаючий сигнал пропорційний вхідному імпедансу лінії $Z(\omega)$. По даним [11], вхідний імпеданс $Z_{вх}$ лінії, маючий характерний опір Z_0 , постійне поширення γ і довжину x . запишеться у вигляді

$$Z_{\text{вх}} = Z_0 \left[\frac{1 + \frac{(Z_R - Z_0)}{Z_R + Z_0} \exp(-2\gamma x)}{1 - \frac{(Z_R - Z_0)}{Z_R + Z_0} \exp(-2\gamma x)} \right] \quad (1.11)$$

Так як ми модулюємо довжиною лінії метал випробуваного зразку, відповідно, ми можемо допустити, що

$$x\gamma = x(ZY)^{1/2} = x(j\omega\mu\sigma)^{1/2} = \frac{x(1+j)}{\delta} \quad (1.12)$$

де Z – послідовний питомий комплексний опір лінії; Y – паралельна питома комплексна провідність лінії; μ – магнітна проникність вакуума; σ – провідність металу; δ – глибина проникнення площини хвилі, рівна $1/(\pi f \mu \sigma)^{1/2}$.

Рівняння (1.11) можна записати у вигляді:

$$Z_{\text{вх}} = Z_0 \left[\frac{1+y}{1-y} \right] \quad (1.13)$$

де

$$y = \frac{Z_R - Z_0}{Z_R + Z_0} \exp(-2\gamma x) \quad (1.14)$$

Для невеликих величин $y (y < 1)$ рівняння (1.13) запишеться наступним чином:

$$Z_{\text{вх}} = Z_0 [1 + 2(y + y^2 + y^3 + \dots)] \quad (1.15)$$

Члени вищого порядку можуть бути опущені з похибкою менш ніж 2% для величини $y < 0,1$. Відповідно

$$Z_{\text{вх}} \approx Z_0 (1 + 2y) = Z_0 + 2Z_0 y \quad (1.16)$$

Що дає для «сигналу» $Z_{\text{вх}} - Z_0$

$$Z_{\text{вх}} - Z_0 \approx 2Z_0 y. \quad (1.17)$$

З рис. 1.9 слідує, що нагрзука Z_F , що імітує дефект на глибині x , паралельно з'єднана з вхідним імпедансом Z_0 ділянки лінії, тягнеться вправо від Z_F , і маючи безкінечну довжину. Відповідно, величина Z_R в рівнянні (1.11) буде рівна

$$Z_R = \frac{Z_F Z_0}{Z_F + Z_0} \quad (1.18)$$

Прості перетворення дають

$$\frac{Z_R - Z_0}{Z_R + Z_0} = \frac{\frac{Z_F Z_0}{Z_F + Z_0} - Z_0}{\frac{Z_F Z_0}{Z_F + Z_0} + Z_0} = \frac{Z_0}{2Z_F + Z_0} \quad (1.19)$$

Підстановки рівнянь (1.19) в (1.14) і отриманого результату в рівнянні (1.17) дають

$$Z_{\text{вх}} - Z_0 \approx -\frac{2Z_0^2}{Z_0 + 2Z_F} \exp(-2\gamma x). \quad (1.20)$$

Окрім того, підстановка рівняння (1.12) в рівняння (1.20) дає

$$Z_{\text{вх}} - Z_0 \approx -\frac{2Z_0^2}{Z_0 + 2Z_F} \exp[-(2x/\delta)] \exp[-j(2x/\delta)]. \quad (1.21)$$

Це рівняння трохи спрощується для малого дефекту ($Z_F \gg Z_0$):

$$Z_{\text{вх}} - Z_0 \approx \frac{1}{Z_F} Z_0^2 \exp[-(2x/\delta)] \exp[-j(2x/\delta)]. \quad (1.22)$$

Рівняння (1.22) можна перетворити в рівняння напруги сигналу шляхом множення його на фіксуєчий струм $I_n(\omega)$, як в рівнянні (1.10).

$I(\omega)$ і Z_0^2/Z_F враховуються новим коефіцієнтом, $P_n \exp(j\omega_k t)$, де нижні індекси n і k означають конкретний дефект і певну робочу частоту дослідження.

Отримане рівняння запишеться наступним чином:

$$E_{nk} = P_n \exp(j\omega_k t) \exp[-(2x_n/\delta_k)] \exp[-j(2x_n/\delta_k)]. \quad (1.23)$$

Де E_{nk} – сигнал, визваний дефектом n , на частоті ω_k ; ω_k – робоча частота, рад/сек; x_n – глибина залягання дефекту від поверхні, дотичній до датчика; δ_k – глибина проникнення вихрових струмів в метал на частоті ω_k ; P_n – коефіцієнт, пропорційний величині дефекту.

Спрощені припущення. Слідє підкреслити, що рівняння (1.23) приближене. При складанні цього рівняння враховано тільки перше відображення від дефекту в припущення, що хвиля плоска. Окрім того, що величина коефіцієнта P_n залежить від частоти контролю. Ці допущення обгрунтованні при розгляді сигналів від малих дефектів.

Розкладення в ряди Фур'є. При багатопараметровому контролі сигнали E_{nk} можна представити членами рядів Фур'є $a_{nk} \sin \omega_k t$ і $b_{nk} \cos \omega_k t$. Вихідні сигнали фазових детекторів пропорційні коефіцієнтам a_{nk} і b_{nk} . Відповідно, для кожної частоти використовується два коефіцієнта, котрі можна отримати з рівняння (1.23):

$$P_n \exp[-(2x_n/\delta_k)] \sin 2x_n/\delta_k. \quad (1.24)$$

$$P_n \exp[-(2x_n/\delta_k)] \cos 2x_n/\delta_k. \quad (1.25)$$

Для спрощення початкові кути фазового зсуву на різних частотах не приймаються до уваги, що не впливає на узагальнення результатів.

В узагальненому випадку на кожен з сигналів впливає багато дефектів або інших параметрів досліджень, однак на кожній частоті дослідження можна мати тільки два коефіцієнта Фур'є. Отриману сумісність рівнянь зручно обробити за допомогою матричної алгебри. Вихідні сигнали фазових детекторів можуть бути представлені матричним рівнянням.

$$[a_{mn}]p_n = y_n. \quad (1.26)$$

Де $[a_{mn}]$ – квадратна матриця, елементи якої являються вихідними сигналами різних фазових детекторів на одиниці параметру на кожній частоті. Новий нижній індекс m потрібен для значення вихідних сигналів фазового детектора, так як існує два цих сигнали для кожної частоти або нижнього індексу k ; p_n – матриця-стовпець, елементи який пропорційні параметрам p_1, p_2, \dots, p_n ; y_n – матриця-стовпець, елементи якої пропорційні вихідним сигналам фазових детекторів.

Для того щоб встановити, яка кількість незалежних змінних величин може бути безперечно для даного числа робочих частот, треба детально розглянути матрицю $[a_{mn}]$ (рис.1.10).

Для визначеного числа параметрів, котрі можуть бути розділені для кожної робочої частоти, необхідно знайти число незалежних рівнянь, представлених матрицею $[a_{mn}]$, як функцію частоти. Необхідно також

визначити умову, при якій система рівнянь, представлена матрицею $[a_{mn}]$, має рішення.

Матриця $[a_{mn}]$ – квадратна; відповідно, для n стовпців вона буде мати ту саму кількість рядків. Так як мається два різних рядка матриці, отримані від кожної пари фазових детекторів, що працюють на кожній робочій частоті, число змінних величин n , представлених квадратною матрицею, буде в два рази більше числа робочих частот. Розглянемо випадок, коли $n=2$. Для цього двухпараметрового випадку вибір довільних глибин x_1 і x_2 дефекта дає в результаті матриці $[a_{mn}]$, маюча чотири елемента. Було визначено, що ця матриця несингулярна. Таким чином, рівняння, які вона представляє, можуть бути вирішені для двох змінних величин. Наприклад, якщо допустити, що $x_1/\delta_1 = 0,5$ і $x_2/\delta_1 = 0,7$ матриця $[a_{mn}]$ запишеться у вигляді

$$[a_{mn}] = \begin{bmatrix} 0,31 & 0,24 \\ 0,20 & 0,04 \end{bmatrix} \quad (1.27)$$

з визначником $\det[a_{mn}]$, рівним $-0,0356$. Таким чином, система рівнянь

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,31 & 0,24 \\ 0,20 & 0,04 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \end{bmatrix} \quad (1.28)$$

має рішення.

Якщо на кожній частоті використовується тільки один фазовий детектор замість двох, то кількість рядків в матриці $[a_{mn}]$ буде зменшено наполовину. Число параметрів, які можуть бути розділені в такому випадку, буде вірно числу використаних робочих частот.

		$n=1$	$n=2$	$n=3$	$n=4$	n_n
$k=1$	$m=1$	$\exp[-2(x_1/\delta_1)] \sin \frac{2x_1}{\delta_1}$	$\exp[-2(x_2/\delta_1)] \sin \frac{2x_2}{\delta_1}$	$\exp[-2(x_3/\delta_1)] \sin \frac{2x_3}{\delta_1}$	$\exp[-2(x_4/\delta_1)] \sin \frac{2x_4}{\delta_1}$	\dots
	$m=2$	$\exp[-2(x_1/\delta_1)] \times \sin\left(\frac{2x_1}{\delta_1} + \frac{\pi}{2}\right)$	$\exp[-2(x_2/\delta_1)] \times \sin\left(\frac{2x_2}{\delta_1} + \frac{\pi}{2}\right)$	$\exp[-2(x_3/\delta_1)] \times \sin\left(\frac{2x_3}{\delta_1} + \frac{\pi}{2}\right)$	$\exp[-2(x_4/\delta_1)] \times \sin\left(\frac{2x_4}{\delta_1} + \frac{\pi}{2}\right)$	\dots
$k=2$	$m=3$	$\exp[-2(x_1/\delta_2)] \sin \frac{2x_1}{\delta_2}$	$\exp[-2(x_2/\delta_2)] \sin \frac{2x_2}{\delta_2}$	$\exp[-2(x_3/\delta_2)] \sin \frac{2x_3}{\delta_2}$	$\exp[-2(x_4/\delta_2)] \sin \frac{2x_4}{\delta_2}$	\dots
	$m=4$	$\exp[-2(x_1/\delta_2)] \times \sin\left(\frac{2x_1}{\delta_2} + \frac{\pi}{2}\right)$	$\exp[-2(x_2/\delta_2)] \times \sin\left(\frac{2x_2}{\delta_2} + \frac{\pi}{2}\right)$	$\exp[-2(x_3/\delta_2)] \times \sin\left(\frac{2x_3}{\delta_2} + \frac{\pi}{2}\right)$	$\exp[-2(x_4/\delta_2)] \times \sin\left(\frac{2x_4}{\delta_2} + \frac{\pi}{2}\right)$	\dots
$k=m$		\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	
		\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	

$$a_{mn} = \exp[-2(x_n/\delta_{[(m/2)+1/4(1-(-1)^m])})] \sin\left[\frac{2x_n}{\delta_{[(m/2)+1/4(1-(-1)^m])}} + \frac{\pi}{4}(1+(-1)^m)\right],$$

Рис. 1.10. Елементи матриці $[a_{mn}]$ (ідеалізований випадок).

Поверхневі дефекти представлені в вигляді неоднорідних в електричній довгій лінії

1.3.2. Про кривизну реальних годографів

В дійсності годографи внесених напруг і опорів криволінійні. Навіть в випадку малих збільшень контролюючих параметри, годограф має цілком певну, хоч і незначну кривизну. Тому неможливо чітко розмежити лінійні і нелінійні випадки. Ефекти, зв'язані з кривизною годографів, особливо помітні при багатопараметровому контролю, так як перехресні похибки в каналах ускладнюють розділення параметрів. Зі збільшенням нелінійності годографів при заданому числі робочих частот зменшується кількість параметрів, які можуть бути розділені.

1.4. Контрольно-вимірювальна апаратура

Апаратура для багатопараметрового контролю відрізняється від звичайних приладів, що використовуються при контролі вихровим струмом. Ці відмінності зв'язані з необхідністю одночасної роботи на деяких частотах, демодуляції більшості отриманих сигналів. Основні функції, що повинні виконуватись апаратурою багатопараметрового

контролю вихровими струмами зображені на рис.1.11. До них відносяться:

Збудження системи досліджуваних котушок «багатовимірним» багаточастотним чи імпульсним струмом;

Компенсація за допомогою компенсаційних схем чи мостів змінного струму вихідної напруги датчиків з бажаним ступенем точності;

Підсилення, фільтрація (за необхідності) і демодуляція сигналів. Демодуляція здійснюється синхронними детекторами, в результаті чого виходить напруга, пропорційна складовим C_k вектора сигналу. В загальному випадку C_k пропорційні коефіцієнтам членів розкладу сигналу в узагальнений ряд Фур'є на вибраній базі функцій. Коли аналіз здійснюється в частотній області і перетворювач збуджується багаточастотними струмами, базу складає група синусоїдальних функцій;

Виділення окремих контрольованих параметрів шляхом перетворення вектора сигналу в складові вектора параметра. Це здійснюється за рахунок створення відповідних лінійних комбінацій складових C_k вектора сигналу.

Збудження вихрових струмів

При випробовуванні виробів з кольорових металів справедливий принцип суперпозиції. Тому можна одночасно жити перетворювач струмом різних частот і ефекти перехресної модуляції будуть відсутні. Це пояснюється тим, що кольорові метали є неферомагнітними, тому для вихрових струмів вони уявляють лінійне середовище. Схемне рішення приймальної частини і демодуляційних ланцюгів в більшості залежать від вибору форми струму збудження. Можна використовувати синхронні і несинхронні складові струму. Синхронні складові можуть створюватись схемами генерації періодичності повторюваних імпульсів або підсумовуванням ряду окремих несучих, які генеруються синхронно. Можна використовувати збудження одиночним імпульсом, оскільки в

основному вся необхідна інформація міститься у відгуку на імпульсі збудження.

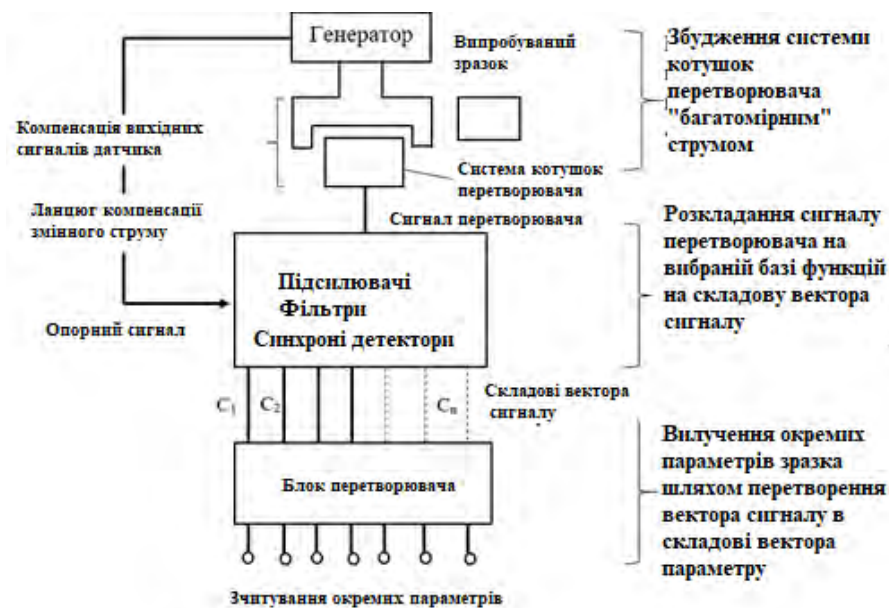


Рис.1.11. Структурна схема багатопараметрового вихрострумовеого приладу

Блок розділення чи перетворювання

Потрібний алгоритм перетворення встановлюється за допомогою лінійних комбінацій вихідних сигналів C_k детектора. Незалежно від того, використовується алгебраїчне представлення чи поняття простору сигналу, основний процес буде одним і тим же. Однак існують різновиди в схемних рішеннях і методах налаштування апаратури. Оскільки потрібні комбінації повинні бути лінійними, схеми перетворення повинні забезпечувати зміну знаку, регулювання амплітуди і сумування сигналів.

Ділянку схеми, що названа блоком перетворювача, називають ще схемою розділення, аналізуючою чи обчислюючою схемою.

В практичних схемах широко використовують операційні підсилювачі для забезпечення функцій відключення, зміни знаку і

підсумовування. Потенціометри у вхідних ланцюгах підсумовуючих підсилювачів забезпечують можливість регулювання амплітуди сигналів.

1.4.1. Матрична схема перетворювача.

На рис. 1.12 відтворена схема, заснована на рішенні матриці (рівняння 1.4, 1.10). Ця схема забезпечує розподіл до чотирьох параметрів. На її вхід поступають напруги з чотирьох фазових детекторів, а з чотирьох виходів знімають задані лінійні комбінації вхідних величин. Для правильної роботи пристроїв велике значення має належна установка потенціометрів U . В вихідних каналах передбачено регулювання підсилення.

Значення елементів зворотної матриці визначають налаштування коефіцієнтних потенціометрів U . При цьому зазвичай виявляється, що в результаті неминучих погрешностей і деякої нелінійності сигналів не досягається оптимального розподілу параметрів. Для того щоб отримати кращий розподіл, використовується експериментальна підстроювання потенціометрів, на яку потрібно багато часу.

Другий основний метод налаштувань загальної схеми перетворювання виключає вичислення елементів зворотної матриці модуляції і дає можливість розділити параметри безпосереднього регулювання потенціометрів U . Наприклад, в чотирьох параметровій системі один з чотирьох потенціометрів U однієї групи може бути встановлений в довільному положенні.

Одночасне налаштування трьох інших потенціометрів із цієї групи дозволяє усунути вплив трьох параметрів на вихідний сигнал каналу, питомий цими потенціометрами і відповідним сумуючим підсилювачем. Таким чином, сигнал на виході цього каналу залежить від одного контролюючого параметру. Повтор процесу налаштування для наступної групи з чотирьох потенціометрів дає виділення другого параметру. Цей

процес потім повторюється для двох груп, що залишились. Відшукування необхідного положення потенціометрів як в процесі підстроювання, так як в процесі розділу можна значно полегшити за рахунок зручного розміщення ручок потенціометрів. Хоча це налаштування здійснити не так просто, тим не менш вона достатньо гнучка і дозволяє частково компенсувати нелінійні ефекти, зв'язані з наявністю великих сигналів.

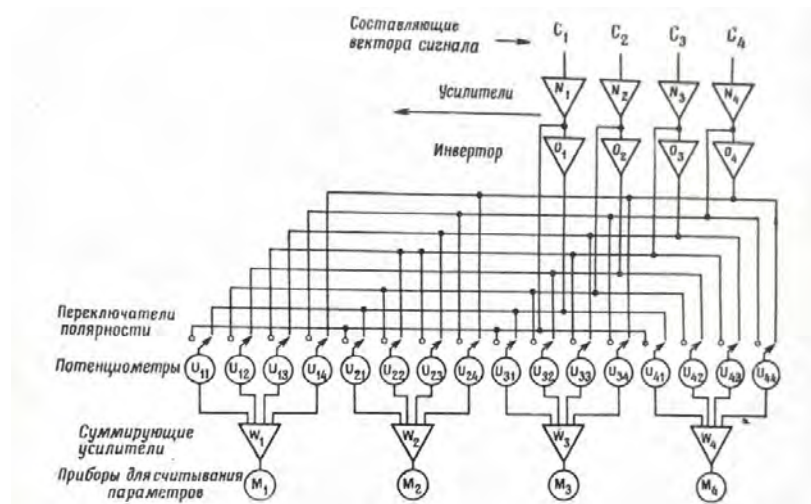


Рис. 1.12. Функціональна схема блока перетворювача.

1.4.2. Схема перетворення, заснована на алгебраїчному рішенні.

На рис. 1.13 представлена друга схема перетворення. В цій схемі, заснованій на алгебраїчному рішенні, застосовується принцип послідовного виділення параметрів (змінних). В ній використовуються принципи, раніше розглянуті і зображені на рис. 1.8 і 1.9. Схема зображена на рис. 1.13, влаштована таким чином, що з її допомогою зчитуються два параметра і подавляються чи зводяться до мінімуму впливу двох інших параметрів. Можливо також зчитування чотирьох параметрів при відповідному ускладненні схеми.

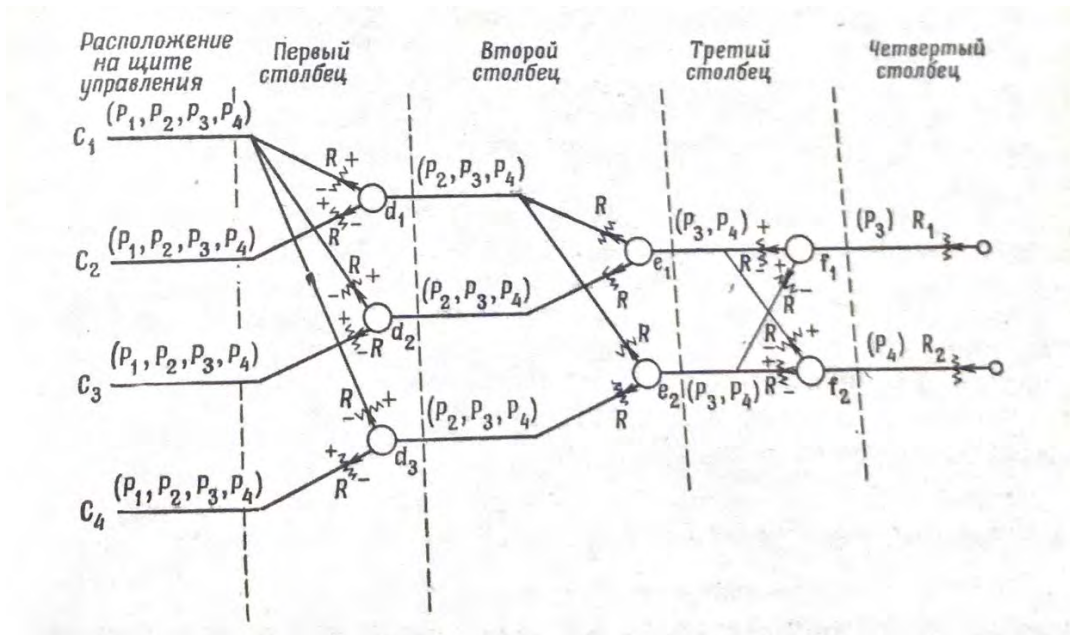


Рис.1.13. Схема перетворення для послідовного виключення параметрів.

Виходи C_1 , C_2 , C_3 і C_4 фазових детекторів являється входом схеми перетворювача або аналізатора, хоча виходи детекторів не завжди зв'язані з відповідно поміченими входними зажимами схеми аналізатора. Сумуючі схеми на рис.1.13 розміщені трьома стовпчиками відповідно положенням ручок сумуючих потенціометрів на щитку керування. На кожен сумуючий потенціометр R подається напруга з двох операційних підсилювачів (не показаних на рис. 1.13) таким чином, що в процесі сумування можна використати і позитивні і негативні сигнали. Як показано на схемі, кожен з сигналів C_1 , C_2 , C_3 і C_4 вмістить інформацію про всі чотири параметра P_1 , P_2 , P_3 і P_4 , що належать розподілу. Так як пристрій зчитує два параметра, наприклад P_3 і P_4 , вплив параметрів P_1 і P_2 усуваються чи зводяться до мінімуму. Вплив P_1 зводиться до мінімуму послідовним регулюванням потенціометрів в першому стовпці; таким чином, сигнали d_1 , d_2 , d_3 практично не змінюються при зміні P_1 . Вплив другого параметру P_2 потім зводиться до мінімуму регулюванням потенціометрів в другому стовпці; таким чином, при зміні параметра P_2 сигнали e_1 і e_2 майже не змінюється. Два останніх параметра P_3 і P_4 розділяються регулюванням потенціометрів в третьому стовпці, де

послідовно усувається чи зводяться до мінімуму вплив P_4 на сигнал f_1 і вплив P_3 на сигнал f_2 . Два потенціометра в четвертому стовпці регулюють підсилення в двох вихідних каналах f_1 і f_2 .

Переваги цієї схеми складають в тому, що вплив кожного параметра усувається послідовно, а не майже одночасно, як в матричній схемі перетворювача. Метод послідовного усунення потребує менше часу і зручний в застосуванні. Це має особливе значення в тому випадку, коли параметри досліджувальних зразків не можуть бути швидко представлені в послідовності, необхідній для налаштувань матричної схеми перетворення.

Висновки до розділу

В даному розділі було проаналізовано актуальність теми на сьогоднішній день. Було проведено аналіз основних принципів багатопараметрового вихрострумowego методу. Особливу увагу було приділено розгляду методу фазової дискримінації в двопараметровому випадку. Використання фазових характеристик сигналів дає змогу значно збільшити функціональні можливості вихрострумowego контролю.

РОЗДІЛ 2. РОЗРАХУНОК СИСТЕМИ ОБ'ЄКТА КОНТРОЛЮ – ПЕРЕТВОРЮВАЧА

Система «ВСП прохідного типу – ОК» представлена на рис. 2.1.

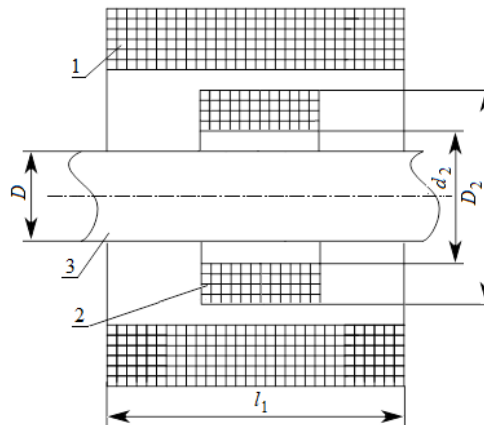


Рис. 2.1. Система «ВСП прохідного типу – ОК»

Зведення основних розрахункових формул

Ефективний діаметр найближчої до ОК котушки

$$D_{\text{еф}} = \frac{1}{D_2 - d_2} \int_{d_2}^{D_2} x^2 dx = \sqrt{\frac{1}{3} \cdot \frac{D_2^3 - d_2^3}{D_2 - d_2}} = \sqrt{\frac{D_2^2 + D_2 d_2 + d_2^2}{3}} \quad (2.1)$$

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

2. Коефіцієнт заповнення

$$\eta = D^2 / D_{\text{еф}}^2 \quad (2.2)$$

$$\eta_1 = \frac{34^2}{39,55^2} = \frac{1156}{1564,2} = 0,739036$$

$$\eta_2 = \frac{34,2^2}{39,55^2} = \frac{1169,64}{1564,2} = 0,747756$$

$$\eta_3 = \frac{34,4^2}{39,55^2} = \frac{1183,36}{1564,2} = 0,756527$$

$$\eta_4 = \frac{34,6^2}{39,55^2} = \frac{1197,16}{1564,2} = 0,76535$$

$$\eta_5 = \frac{34,8^2}{39,55^2} = \frac{1211,04}{1564,2} = 0,774223$$

$$\eta_6 = \frac{35^2}{39,55^2} = \frac{1225}{1564,2} = 0,783148$$

$$\eta_7 = \frac{35,2^2}{39,55^2} = \frac{1239,04}{1564,2} = 0,792124$$

$$\eta_8 = \frac{35,4^2}{39,55^2} = \frac{1253,16}{1564,2} = 0,801151$$

$$\eta_9 = \frac{35,6^2}{39,55^2} = \frac{1267,36}{1564,2} = 0,810229$$

$$\eta_{10} = \frac{35,8^2}{39,55^2} = \frac{1281,64}{1564,2} = 0,819358$$

$$\eta_{11} = \frac{36^2}{39,55^2} = \frac{1296}{1564,2} = 0,828539$$

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

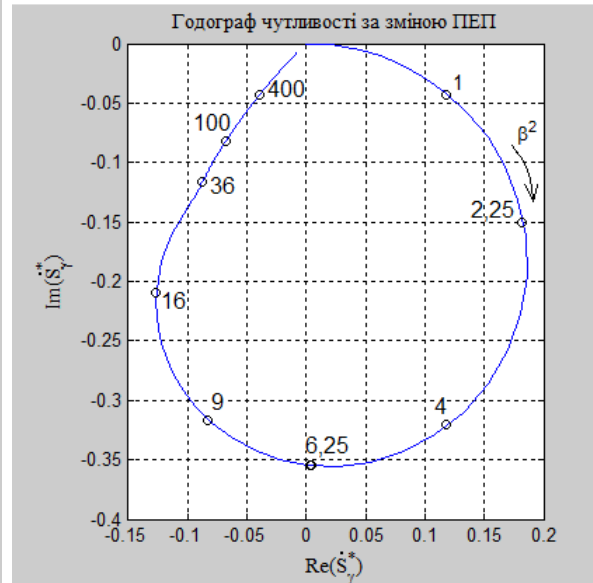
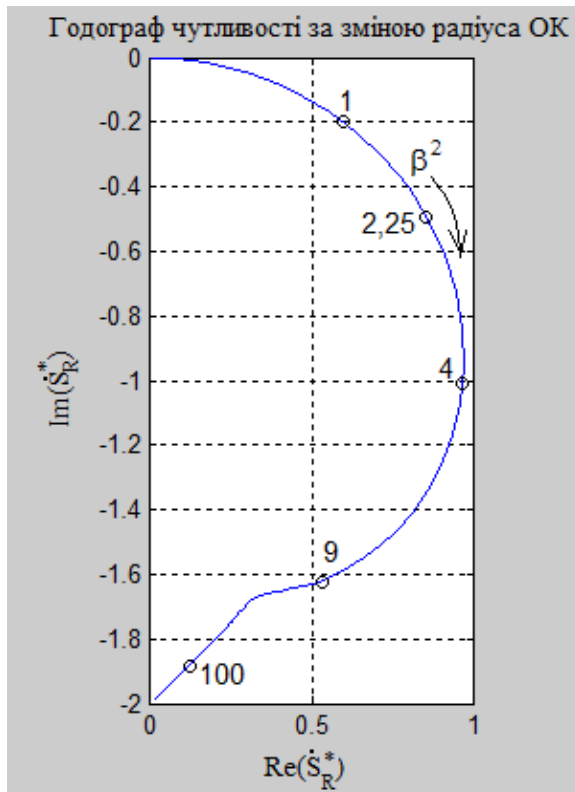
$$\beta = \frac{D}{2} \sqrt{\omega \gamma \mu_0} \quad (2.3)$$

де $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ Гн/м

В дослідженнях використовуються зразки ОК двох матеріалів: бронза ($\gamma_1 = 2,75 \times 10^7$ См/м) та алюміній ($\gamma_2 = 3,8 \times 10^7$ См/м).

На рис. 2.2 (а, б) помітно, що коли зростає β чутливість S_{R^*} підвищується, прямуючи до значення $S_{R^*} = 2$; S_{γ^*} спочатку підвищується від нуля до $S_{\gamma^*} = 0,35$ при $\beta = 2,5$ ($\beta^2 = 6,25$), а потім зменшується прямуючи до 0 при $\beta \rightarrow \infty$.

В такому випадку, оптимальною умовою для контролю радіуса або діаметра циліндра при великому значенню β , тому візьмемо значення $\beta = 20$ (його будемо використовувати при контролі на високій частоті); а для контролю питомої електропровідності σ – значенню $\beta = 2,5$.



Ніс.2.2(а). Годограф відносної комплексної чутливості до радіуса
 Ніс.2.2(б). Годограф відносної комплексної чутливості за змінною ПЕП

Годограф чутливості використовується для вибору робочої частоти з умовою забезпечення максимальної чутливості до контрольованого параметра.

2.1. Розрахунок вихроперетворювача на високій частоті для бронзи

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

$$\omega_1 = \frac{\beta_1}{R_{\text{сер}} \gamma \mu_0} \quad (2.4)$$

де $R_{\text{сер}}$ – середній радіус

Для бронзи беремо до розрахунків наступні діаметри: 34,4 мм; 34,6 мм; 35,2 мм; 35,4 мм; 35,6 мм.

Отже середній радіус дорівнює:

$$R1_{\text{сер}} = \frac{D_{\text{сер}}}{2} = \frac{D3 + D4 + D7 + D8 + D9}{5 \times 2} = \frac{34,4 + 34,6 + 35,2 + 35,4 + 35,6}{10} = 17,52$$

мм

$$\omega 1 = \frac{\beta_{12}}{R12_{\text{сер}} \mu_0} = \frac{400}{306,9504 \times 27,5 \times 4 \times 3,1415 \times 10^{-7}} = \frac{400}{10,60713 \times 10^{-3}} = 37,71$$

кГц

β також розраховується для кожного значення діаметру окремо, як і наступні величини

$$\beta_{111} = \frac{34,4}{2} \sqrt{37,71 \times 10^3 \times 27,5 \times 4 \times 3,1415 \times 10^{-7}} = 19,63$$

$$\beta_{112} = \frac{34,6}{2} \sqrt{37,71 \times 10^3 \times 27,5 \times 4 \times 3,1415 \times 10^{-7}} = 19,75$$

$$\beta_{113} = \frac{35,2}{2} \sqrt{37,71 \times 10^3 \times 27,5 \times 4 \times 3,1415 \times 10^{-7}} = 20,09$$

$$\beta_{114} = \frac{35,4}{2} \sqrt{37,71 \times 10^3 \times 27,5 \times 4 \times 3,1415 \times 10^{-7}} = 20,20$$

$$\beta_{115} = \frac{35,6}{2} \sqrt{37,71 \times 10^3 \times 27,5 \times 4 \times 3,1415 \times 10^{-7}} = 20,32$$

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

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

Маємо такі значення ефективної магнітної проникності (взяті з Додатку А):

β	$\text{Re}(\mu'_{\text{еф}})$	$\text{Im}(\mu'_{\text{еф}})$
19,63	0,0771	- 0,0742
19,75	0,0776	- 0,0746
20,09	0,0471	- 0,0459
20,20	0,0476	- 0,0462
20,32	0,0479	- 0,0465

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

$$\dot{U}_{\text{вн}}^* = j\eta(\mu \cdot \mu'_{\text{еф}}(\beta) - 1) \quad (2.5)$$

$$\dot{U}_{\text{вн}11}^* = j \cdot 0,756527(1,2 \cdot (0,0771 - j0,0742) - 1) = 0,067 - 0,687j \text{ В}$$

$$\begin{aligned}\dot{U}_{\text{BH12}}^* &= j \cdot 0,76535(1,2 \cdot (0,0776 - j0,0746) - 1) = 0,069 - 0,694j \text{ В} \\ \dot{U}_{\text{BH13}}^* &= j \cdot 0,792124(1,2 \cdot (0,0471 - j0,0459) - 1) = 0,044 - 0,747j \text{ В} \\ \dot{U}_{\text{BH14}}^* &= j \cdot 0,801151(1,2 \cdot (0,0476 - j0,0462) - 1) = 0,044 - 0,755j \text{ В} \\ \dot{U}_{\text{BH15}}^* &= j \cdot 0,810229(1,2 \cdot (0,0479 - j0,0465) - 1) = 0,045 - 0,764j \text{ В}\end{aligned}$$

Початкова ЕРС холостого ходу:

$$E_{\text{он}} = 0,5\pi^2 \gamma \mu_0 W_0 H_0 D_{\text{еф}}^2 \quad (2.6)$$

H_0 - напруженість магнітного поля в контрольній зоні за відсутності ОК.

$$H_0 = \frac{W_1 I}{l} = \frac{140 * 40 * 10^{-3}}{70,5 * 10^{-3}} = 99,86 \text{ А/м}$$

I - струм збудження, рівний 40 мА.

l - довжина обмотки 70,5 мм.

$$E_{\text{он}} = 0,5 * 9,8696 * 27,5 * 10^7 * 12,56 * 10^{-7} * 873 * 99,86 * 1564,2025 * 10^{-6} = 23,243 \text{ В.}$$

$$\begin{aligned}U_{\text{оп}} &= \frac{\pi^2}{2} f \mu_0 W_1 W_2 I \frac{D_{\text{еф}}^2}{l} \\ U_{\text{оп}} &= 3,409 \text{ В}\end{aligned} \quad (2.7)$$

Розрахунок абсолютної внесеної напруги:

$$\begin{aligned}\dot{U}_{\text{BH}} &= \dot{U}_{\text{оп}} \cdot \dot{U}_{\text{BH}}^* \\ \dot{U}_{\text{BH11}} &= 3,409 \cdot (0,067 - 0,687j) = 0,228 - 2,342j \text{ В} \\ \dot{U}_{\text{BH12}} &= 3,409 \cdot (0,069 - 0,694j) = 0,235 - 2,366j \text{ В} \\ \dot{U}_{\text{BH13}} &= 3,409 \cdot (0,044 - 0,747j) = 0,15 - 2,547j \text{ В} \\ \dot{U}_{\text{BH14}} &= 3,409 \cdot (0,044 - 0,755j) = 0,15 - 2,574j \text{ В} \\ \dot{U}_{\text{BH15}} &= 3,409 \cdot (0,045 - 0,764j) = 0,153 - 2,604j \text{ В}\end{aligned} \quad (2.8)$$

Розрахунок вихідної напруги за формулою:

$$\begin{aligned}\dot{U} &= \dot{U}_{\text{BH}} + j\dot{U}_{\text{оп}} \\ \dot{U}_{11} &= 0,228 - 2,342j + j3,409 = 0,228 + 1,067j \text{ В} \\ \dot{U}_{12} &= 0,235 - 2,366j + j3,409 = 0,235 + 1,043j \text{ В} \\ \dot{U}_{13} &= 0,15 - 2,547j + j3,409 = 0,15 + 0,862j \text{ В}\end{aligned} \quad (2.9)$$

$$\dot{U}_{14} = 0.15 - 2.547j + j3.409 = 0.15 + 0.862j \text{ В}$$

$$\dot{U}_{15} = 0.153 - 2.604j + j3.409 = 0.153 + 0.805j \text{ В}$$

Розрахунок модуля внесеної напруги ВСП в режимі контролю шляхом сумування складових $|\dot{U}_{\text{ВН}}|$

$$|\dot{U}_{\text{ВН}11}| = 2.353 \text{ В}$$

$$|\dot{U}_{\text{ВН}12}| = 2.378 \text{ В}$$

$$|\dot{U}_{\text{ВН}13}| = 2.551 \text{ В}$$

$$|\dot{U}_{\text{ВН}14}| = 2.578 \text{ В}$$

$$|\dot{U}_{\text{ВН}15}| = 2.608 \text{ В}$$

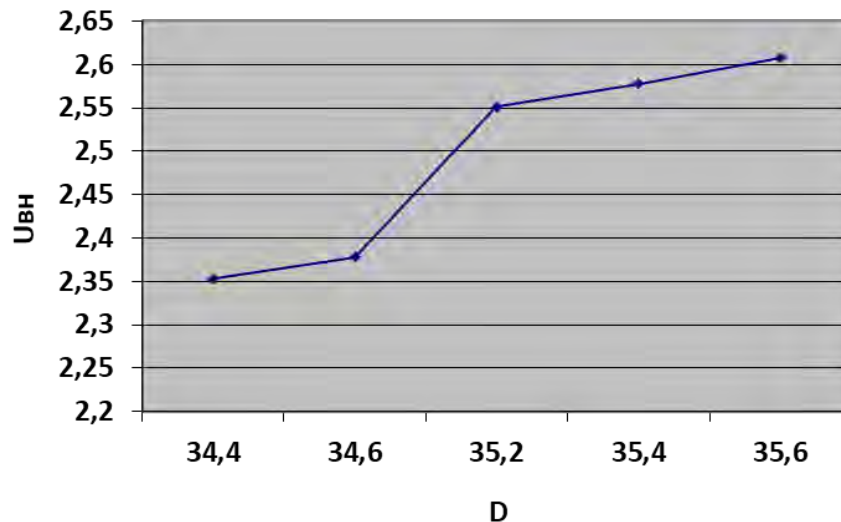


Рис. 2.3. Залежність напруги внесеної від діаметру для бронзи на високій частоті

2.2. Розрахунок вихрострумowego перетворювача на високій частоті для алюмінію

Як в попередньому випадку обираємо $\beta 1 = 20$, а матеріал обираємо алюміній ($\gamma 2 = 3,8 \times 10^7 \text{ См/м}$ або $\gamma 2 = 3,8 \frac{\text{М}}{\text{Ом} \times \text{мм}^2}$). Для подальших розрахунків визначаємо ω за формулою:

$$\omega_2 = \frac{\beta_2}{R_{\text{сер}} \gamma \mu_0}$$

Для алюмінію маємо наступні діаметри: 34, мм; 34,2 мм; 34,8 мм; 35 мм; 35,8 мм; 36 мм.

Визначаємо $R_{2\text{сер}}$ як:

$$R_{2\text{сер}} = \frac{D_{\text{сер}}}{2} = \frac{D_1 + D_2 + D_5 + D_6 + D_{10} + D_{11}}{6 \times 2} = \frac{34 + 34,2 + 34,8 + 35 + 35,8 + 36}{12} = 17,48 \text{ мм}$$

$$\omega_2 = \frac{\beta_{12}}{R_{2\text{сер}} \gamma \mu_0} = 27.404 \text{ кГц}$$

$$\beta_{1_{21}} = \frac{34}{2} \sqrt{27.404 \times 103 \times 27,5 \times 4 \times 3,1415 \times 10^{-7}} = 19.447$$

$$\beta_{1_{22}} = \frac{34,2}{2} \sqrt{27.404 \times 103 \times 27,5 \times 4 \times 3,1415 \times 10^{-7}} = 19.561$$

$$\beta_{1_{23}} = \frac{34,8}{2} \sqrt{27.404 \times 103 \times 27,5 \times 4 \times 3,1415 \times 10^{-7}} = 19.905$$

$$\beta_{1_{24}} = \frac{35}{2} \sqrt{27.404 \times 103 \times 27,5 \times 4 \times 3,1415 \times 10^{-7}} = 20.019$$

$$\beta_{1_{25}} = \frac{35,8}{2} \sqrt{27.404 \times 103 \times 27,5 \times 4 \times 3,1415 \times 10^{-7}} = 20.477$$

$$\beta_{1_{26}} = \frac{36}{2} \sqrt{27.404 \times 103 \times 27,5 \times 4 \times 3,1415 \times 10^{-7}} = 20.591$$

β	$\text{Re}(\mu'_{\text{эф}})$	$\text{Im}(\mu'_{\text{эф}})$
19.447	0,0764	- 0,0735
19.561	0,0769	- 0,0739
19.905	0,0782	- 0,0400
20.019	0,0472	- 0,0467
20.477	0,0482	- 0,0468
20.591	0,0485	- 0,0470

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

$$U_{\text{вн}21}^* = j \cdot 0,739036(0.61 \cdot (0,0764 - j0,0735) - 1) = 0.033 - 0.705j \text{ В}$$

$$U_{\text{вн}22}^* = j \cdot 0,747756(0.61 \cdot (0,0769 - j0,0739) - 1) = 0.034 - 0.713j \text{ В}$$

$$U_{\text{вн}23}^* = j \cdot 0,774223(0.61 \cdot (0,0782 - j0,0400) - 1) = 0.019 - 0.737j \text{ В}$$

$$U_{\text{BH24}}^* = j \cdot 0,783148(0,61 \cdot (0,0472 - j0,0467) - 1) = 0,022 - 0,761j \text{ В}$$

$$U_{\text{BH25}}^* = j \cdot 0,819358(0,61 \cdot (0,0482 - j0,0468) - 1) = 0,023 - 0,795j \text{ В}$$

$$U_{\text{BH26}}^* = j \cdot 0,828539(0,61 \cdot (0,0485 - j0,0470) - 1) = 0,024 - 0,804j \text{ В}$$

$$U_{\text{оп}} = \frac{\pi^2}{2} f \mu_0 W_1 W_2 I \frac{D_{\text{еф}}^2}{l}$$

$$U_{\text{оп}} = 3,984 \text{ В}$$

Розрахунок абсолютної внесеної напруги:

$$U_{\text{BH21}}^{\cdot} = 3,984 \cdot (0,033 - 0,705j) = 0,131 - 2,809j \text{ В}$$

$$U_{\text{BH22}}^{\cdot} = 3,984 \cdot (0,034 - 0,713j) = 0,135 - 2,841j \text{ В}$$

$$U_{\text{BH23}}^{\cdot} = 3,984 \cdot (0,019 - 0,737j) = 0,076 - 2,936j \text{ В}$$

$$U_{\text{BH24}}^{\cdot} = 3,984 \cdot (0,022 - 0,761j) = 0,088 - 3,032j \text{ В}$$

$$U_{\text{BH25}}^{\cdot} = 3,984 \cdot (0,023 - 0,795j) = 0,092 - 3,167j \text{ В}$$

$$U_{\text{BH26}}^{\cdot} = 3,984 \cdot (0,024 - 0,804j) = 0,096 - 3,203j \text{ В}$$

Розрахунок вихідної напруги за формулою:

$$\dot{U}_{21} = 0,131 - 2,809j + j3,984 = 0,131 + 1,175j \text{ В}$$

$$\dot{U}_{22} = 0,135 - 2,841j + j3,984 = 0,135 + 1,143j \text{ В}$$

$$\dot{U}_{23} = 0,076 - 2,936j + j3,984 = 0,076 + 1,048j \text{ В}$$

$$\dot{U}_{24} = 0,088 - 3,032j + j3,984 = 0,088 + 0,952j \text{ В}$$

$$\dot{U}_{25} = 0,092 - 3,167j + j3,984 = 0,092 + 0,817j \text{ В}$$

$$\dot{U}_{26} = 0,096 - 3,203j + j3,984 = 0,096 + 0,781j \text{ В}$$

Розрахунок модуля внесеної напруги ВСП в режимі контролю

шляхом сумування складових $|U_{\text{BH}}^{\cdot}|$

$$|U_{\text{BH21}}^{\cdot}| = 2,812 \text{ В}$$

$$|U_{\text{BH22}}^{\cdot}| = 2,844 \text{ В}$$

$$|U_{\text{BH23}}^{\cdot}| = 2,937 \text{ В}$$

$$|U_{\text{BH24}}^{\cdot}| = 3,033 \text{ В}$$

$$|U_{\text{BH25}}^{\cdot}| = 3,168 \text{ В}$$

$$|U_{\text{BH26}}^{\cdot}| = 3,204 \text{ В}$$

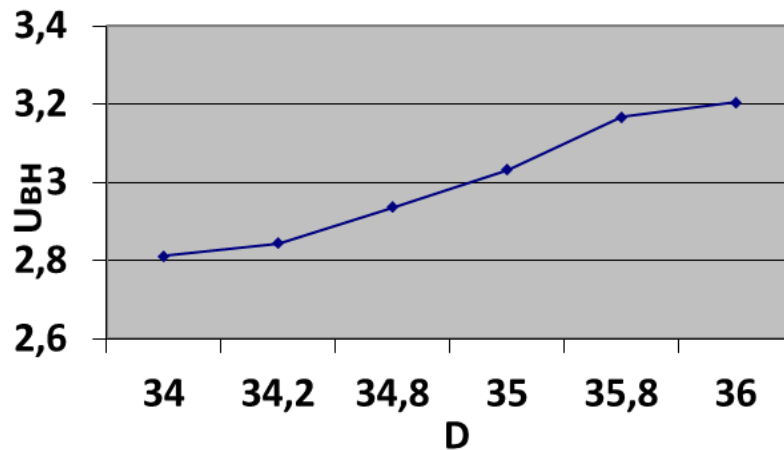


Рис. 2.3. Залежність внесеної напруги від діаметру для алюмінію на високій частоті

2.3. Розрахунок вихрострумів перетворювача на низькій частоті для бронзи

Для контролю електровідності найефективніше обрати $\beta_3 = 2,5$ ($\beta_3^2=6,25$). Для бронзи $\gamma_1 = 2,75 \times 10^7$ См/м або $\gamma_1 = 27,5 \frac{\text{м}}{\text{Ом} \times \text{мм}^2}$, як і використовували раніше. Аналогічно, як в перших випадках розрахуємо ω .

$$\omega_3 = \frac{\beta_3^2}{R_{\text{сер}}^2 \gamma \mu_0} = \frac{6,25}{306,9504 \times 27,5 \times 4 \times 3,1415 \times 10^{-7}} = 589.226 \text{ Гц}$$

$$\beta_{111} = \frac{34,4}{2} \sqrt{0.0589 \times 10^3 \times 27,5 \times 4 \times 3,1415 \times 10^{-7}} = 0.776$$

$$\beta_{112} = \frac{34,6}{2} \sqrt{0.0589 \times 10^3 \times 27,5 \times 4 \times 3,1415 \times 10^{-7}} = 0.78$$

$$\beta_{113} = \frac{35,2}{2} \sqrt{0.0589 \times 10^3 \times 27,5 \times 4 \times 3,1415 \times 10^{-7}} = 0.794$$

$$\beta_{114} = \frac{35,4}{2} \sqrt{0.0589 \times 10^3 \times 27,5 \times 4 \times 3,1415 \times 10^{-7}} = 0.799$$

$$\beta_{115} = \frac{35,6}{2} \sqrt{0.0589 \times 10^3 \times 27,5 \times 4 \times 3,1415 \times 10^{-7}} = 0.803$$

Маємо такі значення ефективної магнітної проникності:

β	$\text{Re}(\mu_{\text{эф}})$	$\text{Im}(\mu_{\text{эф}})$
0.776	0,9938	- 0,0751
0.78	0,9932	- 0,0758
0.794	0,9921	- 0,0771
0.799	0,9919	- 0,0789
0.803	0,9915	- 0,0790

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

$$\dot{U}_{\text{BH11}}^* = j \cdot 0,756527(1.2 \cdot (0,09938 - j0,0751) - 1) = 0.068 - 0.666j \text{ В}$$

$$\dot{U}_{\text{BH12}}^* = j \cdot 0,76535(1.2 \cdot (0,09932 - j0,0758) - 1) = 0.07 - 0.674j \text{ В}$$

$$\dot{U}_{\text{BH13}}^* = j \cdot 0,792124(1.2 \cdot (0,9921 - j0,0771) - 1) = 0.073 - 0.698j \text{ В}$$

$$\dot{U}_{\text{BH14}}^* = j \cdot 0,801151(1.2 \cdot (0,9919 - j0,0789) - 1) = 0.076 - 0.706j \text{ В}$$

$$\dot{U}_{\text{BH15}}^* = j \cdot 0,810229(1.2 \cdot (0,9915 - j0,0790) - 1) = 0.077 - 0.714j \text{ В}$$

Далі розраховуємо напругу холостого ходу:

$$U_{\text{оп}} = 0.235 \text{ В}$$

Розрахунок абсолютної внесеної напруги:

$$U_{\text{BH11}}^{\cdot} = 0.235 \cdot (0.068 - 0.666j) = 0.016 - 0.157j \text{ В}$$

$$U_{\text{BH12}}^{\cdot} = 0.235 \cdot (0.07 - 0.674j) = 0.016 - 0.158j \text{ В}$$

$$U_{\text{BH13}}^{\cdot} = 0.235 \cdot (0.073 - 0.698j) = 0.017 - 0.164j \text{ В}$$

$$U_{\text{BH14}}^{\cdot} = 0.235 \cdot (0.076 - 0.706j) = 0.018 - 0.166j \text{ В}$$

$$U_{\text{BH15}}^{\cdot} = 0.235 \cdot (0.077 - 0.714j) = 0.018 - 0.168j \text{ В}$$

Розрахунок вихідної напруги за формулою:

$$\dot{U}_{11} = 0.016 - 0.157j + j0.235 = 0.016 + 0.078j \text{ В}$$

$$\dot{U}_{12} = 0.016 - 0.158j + j0.235 = 0.016 + 0.077j \text{ В}$$

$$\dot{U}_{13} = 0.017 - 0.164j + j0.235 = 0.017 + 0.071j \text{ В}$$

$$\dot{U}_{14} = 0.018 - 0.166j + j0.235 = 0.018 + 0.069j \text{ В}$$

$$\dot{U}_{15} = 0.018 - 0.168j + j0.235 = 0.018 + 0.067j \text{ В}$$

Розрахунок модуля внесеної напруги ВСП в режимі контролю шляхом сумування складових $|U_{\text{ВН}}^{\cdot}|$

$$|U_{\text{ВН11}}^{\cdot}| = 0.158 \text{ В}$$

$$|U_{\text{ВН12}}^{\cdot}| = 0.159 \text{ В}$$

$$|U_{\text{ВН13}}^{\cdot}| = 0.165 \text{ В}$$

$$|U_{\text{ВН14}}^{\cdot}| = 0.167 \text{ В}$$

$$|U_{\text{ВН15}}^{\cdot}| = 0.169 \text{ В}$$

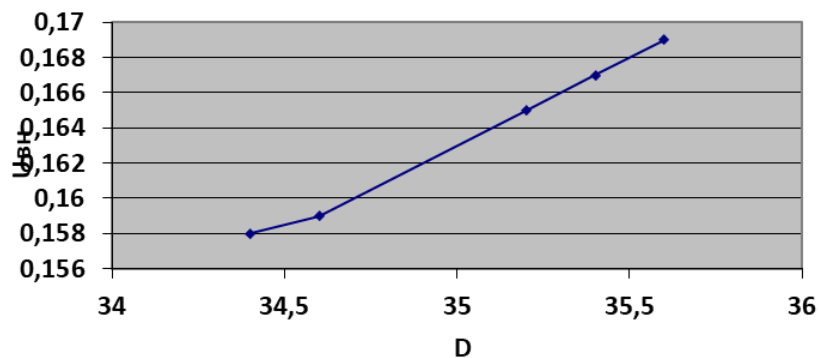


Рис. 2.4. Залежність внесеної напруги від діаметру для низької частоти бронзи

2.4. Розрахунок вихрострумів на низькій частоті для алюмінію

Як в попередньому випадку обираємо $\beta = 2,5$, а матеріал обираємо алюміній ($\gamma_2 = 3,8 \times 10^7 \text{ См/м}$ або $\gamma_2 = 38 \frac{\text{М}}{\text{Ом} \times \text{мм}^2}$). Для подальших розрахунків визначаємо ω за формулою:

$$\omega^2 = \frac{\beta^2}{R_{\text{сер}} \gamma \mu_0}$$

Для алюмінію маємо наступні діаметри: 34, мм; 34,2 мм; 34,8 мм; 35 мм; 35,8 мм; 36 мм.

$$R_{2\text{сер}} = 17,48 \text{ мм}$$

$$\omega^2 = \frac{\beta^4}{R_{2\text{сер}}^2 \gamma \mu_0} = 432.303 \text{ Гц}$$

$$\beta_{121} = \frac{34}{2} \sqrt{432,303 \times 38 \times 4 \times 3,1415 \times 10^{-7}} = 2.442$$

$$\beta_{122} = \frac{34,2}{2} \sqrt{432.303 \times 38 \times 4 \times 3,1415 \times 10^{-7}} = 2.457$$

$$\beta_{123} = \frac{34,8}{2} \sqrt{432.303 \times 38 \times 4 \times 3,1415 \times 10^{-7}} = 2.5$$

$$\beta_{124} = \frac{35}{2} \sqrt{432.303 \times 38 \times 4 \times 3,1415 \times 10^{-7}} = 2.514$$

$$\beta_{125} = \frac{35,8}{2} \sqrt{432.303 \times 38 \times 4 \times 3,1415 \times 10^{-7}} = 2.572$$

$$\beta_{126} = \frac{36}{2} \sqrt{432.303 \times 38 \times 4 \times 3,1415 \times 10^{-7}} = 2.586$$

β	$\text{Re}(\mu_{\text{эф}})$	$\text{Im}(\mu_{\text{эф}})$
2.442	0,6341	- 03755
2.457	0,6280	- 0,3712
2.5	0,6216	- 0,3774
2.514	0,6125	- 0,3771
2.572	0,6086	- 0,3769
2.586	0,5984	- 0,3768

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

$$U_{\text{ВН}21}^* = j \cdot 0,739036(0.61 \cdot (0,6341 - j0,3755) - 1) = 0.169 - 0.453j \text{ В}$$

$$U_{\text{ВН}22}^* = j \cdot 0,747756(0.61 \cdot (0,6280 - j0,3712) - 1) = 0.169 - 0.461j \text{ В}$$

$$U_{\text{ВН}23}^* = j \cdot 0,774223(0.61 \cdot (0,6216 - j0,3774) - 1) = 0.178 - 0.481j \text{ В}$$

$$U_{\text{ВН}24}^* = j \cdot 0,783148(0.61 \cdot (0,6125 - j0,3771) - 1) = 0.18 - 0.491j \text{ В}$$

$$U_{\text{ВН}25}^* = j \cdot 0,819358(0.61 \cdot (0,6086 - j0,3769) - 1) = 0.188 - 0.515j \text{ В}$$

$$U_{\text{ВН}26}^* = j \cdot 0,828539(0.61 \cdot (0,5984 - j0,3768) - 1) = 0.19 - 0.526j \text{ В}$$

$$U_{\text{оп}} = 0.432 \text{ В}$$

Розрахунок абсолютної внесеної напруги:

$$U_{\text{ВН}21} = 0.432 \cdot (0.169 - 0.453j) = 0.073 - 0.196j \text{ В}$$

$$U_{\text{ВН}22} = 0.432 \cdot (0.169 - 0.461j) = 0.073 - 0.199j \text{ В}$$

$$U_{\text{ВН}23} = 0.432 \cdot (0.178 - 0.481j) = 0.077 - 0.208j \text{ В}$$

$$U_{\text{ВН}24} = 0.432 \cdot (0.18 - 0.491j) = 0.078 - 0.212j \text{ В}$$

$$U_{\text{ВН}25} = 0.432 \cdot (0.188 - 0.515j) = 0.081 - 0.222j \text{ В}$$

$$U_{\text{ВН}26} = 0.432 \cdot (0.024 - 0.804j) = 0.01 - 0.347j \text{ В}$$

Розрахунок вихідної напруги за формулою:

$$\dot{U}_{21} = 0.073 - 0.196j + j0.432 = 0.073 + 0.236j \text{ В}$$

$$\dot{U}_{22} = 0.073 - 0.199j + j0.432 = 0.073 + 0.233j \text{ В}$$

$$\dot{U}_{23} = 0.077 - 0.208j + j0.432 = 0.077 + 0.224j \text{ В}$$

$$\dot{U}_{24} = 0.078 - 0.212j + j0.432 = 0.078 + 0.22j \text{ В}$$

$$\dot{U}_{25} = 0.081 - 0.222j + j0.432 = 0.081 + 0.21j \text{ В}$$

$$\dot{U}_{26} = 0.01 - 0.347j + j0.432 = 0.01 + 0.085j \text{ В}$$

Розрахунок модуля внесеної напруги ВСП в режимі контролю шляхом сумування складових $|U_{\text{ВН}}^{\cdot}|$

$$|U_{\text{ВН}21}^{\cdot}| = 0.209 \text{ В}$$

$$|U_{\text{ВН}22}^{\cdot}| = 0.212 \text{ В}$$

$$|U_{\text{ВН}23}^{\cdot}| = 0.222 \text{ В}$$

$$|U_{\text{ВН}24}^{\cdot}| = 0.226 \text{ В}$$

$$|U_{\text{ВН}25}^{\cdot}| = 0.236 \text{ В}$$

$$|U_{\text{ВН}26}^{\cdot}| = 0.347 \text{ В}$$

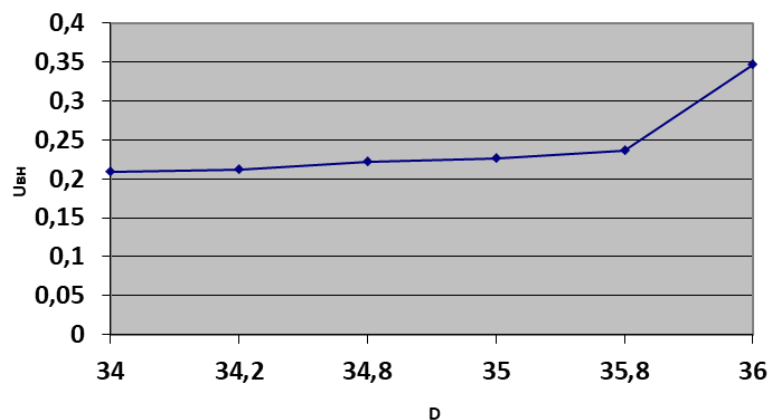


Рис. 2.5. Залежність внесеної напруги від діаметру для низької частоти алюмінію

Висновки до розділу

Чутливість на низькій частоті по амплітуді висока і до електропровідності і до радіуса, а на високій частоті лише до радіусу. Але існує ще одна можливість фаза внесеної напруги від радіусу залежить мало, а від електропровідності значно. Тому запропоновано на високій частоті використовувати амплітудний метод на вимірювання радіусу, а на низькій фазовий метод для вимірювання електропровідності.

РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА ТА МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ

3.1. Розроблення структурної схеми двопараметрової вихрострумкової системи

Структура системи двопараметрового ВСК наведена на рис.3.1.

Однією з основних переваг даного приладу перед подібними йому є застосування мікроконтролера(МК) який виконує функції керування схемою, обробки, збереження та передачі даних. В такій конфігурації мікроконтролер стає основним(центральним) елементом навколо якого будується решта функціональних одиниць.

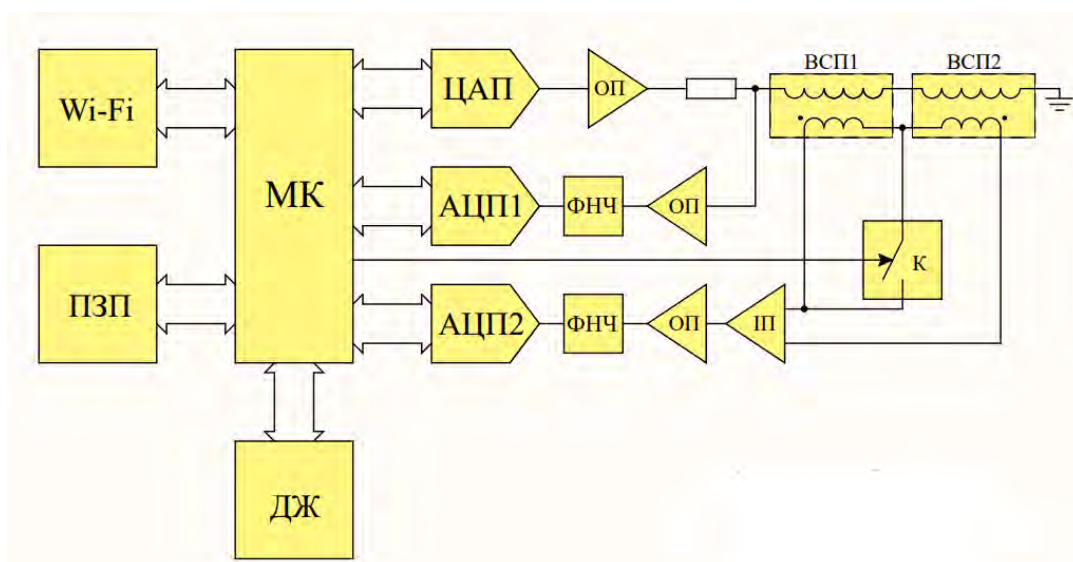


Рис. 3.1. Структурна схема вихрострумового перетворювача

ОП - Операційний підсилювач; Ш - Інструментальний підсилювач; АЦП - Аналого-цифровий перетворювач; ЦАП - Цифро-аналоговий перетворювач; ПЗП - Постійний запам'ятовувальний пристрій ; ВСП - Вихро-струмовий перетворювач; ДЖ - джерело живлення; ФНЧ - Фільтр низьких частот; К – Ключ.

Згідно з виконаними розрахунками системи «ВСП – ОК» процес контролю та вимірювання виконується в 2 етапи:

1) на першому етапі на низькій робочій частоті визначається електропровідність матеріалу ОК за фазовим зсувом внесеного сигналу відносно опорного, для чого використовується фазовий метод вимірювання;

2) на другому етапі на верхній робочій частоті визначається амплітуда відносної внесеної напруги, за якою, за заздалегідь визначеними градувальними характеристиками, оцінюється діаметр ОК.

Вибір низької частоти забезпечує суттєве зменшення фазової чутливості ВСП до варіації діаметра ОК, в той час як робота на високій частоті зменшує амплітудну чутливість ВСП до зміни електропровідності матеріалу ОК. Розглянемо більш детально роботу апаратної частини системи. Її основне завдання полягає у виконанні первинного опрацювання сигналів, їх аналого-цифровому перетворенні та передачі відповідних цифрових сигналів для подальшого опрацювання в персональний компютер ПК.

Згенерований сигнал подається на первинні обмотки вихро-струмових перетворювачів (ВСП1, ВСП2). Їх підключення до ВСП виконується через комутатор Ком та перетворювач напруга-струм ПНС. Перетворювальна частина системи утворена двома ідентичними ВСП – ВСП1 та ВСП2, котушки збудження яких включені узгоджено, а вимірювальні – на зустріч. Один з цих ВСП працює в режимі холостого ходу (тобто без ОК), а другий в режимі вимірювання (тобто з ОК). Таке включення забезпечує компенсацію напруги холостого ходу у вихідному диференціальному сигналі цих ВСП. Таким чином, за відсутності ОК вихідна напруга дорівнює нулю, а у випадку введення у ВСП ОК – внесеної напруги. За необхідності вимірювання напруги холостого ходу вимірювальна котушка ВСП2 закорочується за допомогою ключа К. Диференціальний сигнал з вимірювальних котушок ВСП надходить через інструментальний підсилювач ІП на підсилювач з регульованим коефіцієнтом підсилення. ІП виконує такі функції: узгоджує джерело

сигналу з підсилювачем, перетворює диференціальний сигнал в недиференціальний та виконує попереднє підсилення сигналу. Підсилювач з регульованим коефіцієнтом підсилення узгоджує динамічний діапазон перетворення АЦП з діапазоном зміни амплітуд сигналів.

Із-за обмеженості МК у внутрішній пам'яті в схемі було передбачено встановлення постійного запам'ятовуючого пристрою(ПЗП), що передбачає збереження результатів вимірювання. За необхідності дані можуть бути передані на комп'ютер або в хмарний сервіс завдяки використанню WiFi модулю.

На сьогоднішній день існує безліч мікроконтролерів представлені великою кількістю виробників, які в свою чергу конфігурують їх під різноманітні завдання, що робить можливим знайти той варіант який в повній мірі задовольнить потреби для реалізації даної структурної схеми. Даний підхід побудови відкриває можливості до зменшення габаритів, енергоспоживання та автоматизації процесів калібрування, вимірювання, обробки, збереження та обміну даними з хмарними сервісами.

Останнім але важливим елементом схеми варто згадати джерело живлення(ДЖ) без якого схема не зможе працювати. Джерело забезпечує схему всіма необхідними рівнями живлення та може представляти собою акумуляторну батарею або вихід під настінний адаптер.

Розглянемо окремо роботу системи на низькій та високій частотах.

- Робота на низькій частоті. В цьому режимі виконується аналого-цифрове перетворення двох сигналів – опорного з генератора і вимірювального від ВСП двома АЦП. Перетворення виконується з частотою дискретизації, яка забезпечує отримання 200...500 вибірок на період сигналу. Отримані цифрові коди запам'ятовуються в ПЗП. Передбачається, що АЦП можуть переводитись у т.з. третій стан (відключені вихідні шини даних), що дає змогу розділити в часі процеси

запису даних в ПЗП і допускає паралельне з'єднання одноіменних виходів АЦП.

•Робота на високій частоті. Цей режим роботи призначений для визначення амплітудних характеристик сигналів, тому дані з каналу опорного сигналу ігноруються – в АЦП перетворюється лише сигнал з вихода ВСП. Можливі два режими роботи: перетворення сигналу холостого ходу (ключ К замкнений); перетворення сигналу внесеної напруги (ключ К розімкнений). Передача даних з АЦП в ПЗП та з ПЗП в ПК відбувається аналогічно п.1.

Передані в ПК вибірки сигналів використовуються для вторинного опрацювання даних, яке полягає у визначенні фазових та амплітудних характеристик сигналів. Ці характеристики отримують за допомогою дискретного перетворення Гільберта. Спочатку за обчисленим фазовим зсувом між опорним і вимірювальним сигналами, отриманими згідно п.1, оцінюють матеріал ОК і вибирають відповідну розраховану заздалегідь градуювальну характеристику для діаметра ОК з бронзи чи алюмінію. Потім, використовуючи дані, отримані згідно п.2 визначають амплітуди сигналів внесеної напруги і холостого ходу, обчислюють відносну внесену напругу як їх відношення і, користуючись вибраною градуювальною характеристикою, (див рис.2.3-2.6 з розрахунків), оцінюють діаметр ОК.

Таки чином, ПК в системі виконує такі основні функції:

- комутація сигналів генераторів;
- управління ключем К;
- переключення коефіцієнта підсилення підсилювача напруги;
- управління режимами збору/передачі даних АЦП;
- вторинне опрацювання даних та визначення амплітудних та фазових характеристик інформаційних сигналів;
- збереження градуювальних характеристик для визначення параметрів ОК;

- формування інтерфейсу користувача;
- архівація результатів вимірювань та контролю.

3.2. Розробка електричної принципової схеми

Для побудови структурної принципової схеми було використано такі мікросхеми: GD5F1GQ4UFYIG, ASM117-5.0, 78L05ABZ, ESP32-D0WD-V3, AD8066, INA156.

3.2.1. GD5F1GQ4UFYIG

SPI (послідовний периферійний інтерфейс) NAND Flash забезпечує надзвичайно економічну ефективність при енергонезалежній пам'яті високої щільності для вбудованих систем, засновану на стандартному ядрі флеш-пам'яті NAND (рис.3.2). Це приваблива альтернатива SPI NOR та стандартному паралельному NAND Flash, з розширеними характеристиками:

Ця флеш-пам'ять NAND з низьким рівнем контактів відповідає стандартному послідовному периферійному інтерфейсу і завжди залишається незмінною, виходячи з однієї щільності до іншої. Набори команд нагадують загальні набори команд SPI-NOR, модифіковані для обробки певних функцій NAND та додані нові функції. GigaDevice SPI NAND - це легка для інтеграції флеш-пам'ять NAND із визначеними розробленими функціями для полегшення управління хостом:

- Внутрішній ECC, що обирається користувачем. Код ECC генерується внутрішньо під час роботи сторінки програми. Коли сторінка читається в кеш-реєстрі, код ECC виявляє та виправляє помилки, коли це необхідно. Запасна область на 64 байти доступна, навіть якщо ввімкнено внутрішній ECC. Пристрій виводить виправлені дані та повертає статус помилки ECC.

- Внутрішні дані переміщуються або копіюються назад за допомогою внутрішнього ЕСС. Пристрій можна легко оновити та керувати завданням збору сміття без необхідності переміщення та виведення даних.

- Увімкнення читання за допомогою внутрішнього ЕСС. Пристрій автоматично зчитує першу сторінку першого блоку в кеш-пам'яті після включення живлення, після чого хост може безпосередньо читати дані з кешу для зручного завантаження. Крім того, дані правильно обіцяє внутрішній комітет ЕСС.

Він запрограмований і зчитується в операціях на основі сторінок і стирається в операціях на основі блоків. Дані передаються до масиву флеш-пам'яті NAND або з нього, сторінка за сторінкою, до реєстру даних та реєстру кеш-пам'яті. Регістр кеш-пам'яті є найближчим до схем управління введенням-виведенням і діє як буфер даних для даних вводу-виводу; регістр даних є найближчим до масиву пам'яті і діє як буфер даних для операції з масивом пам'яті NAND. Регістр кеш-пам'яті функціонує як буферна пам'ять, щоб увімкнути операції READ / WRITE для сторінок та випадкових даних та копіювання. Ці пристрої також використовують регістр стану SPI, який повідомляє про стан роботи пристрою.

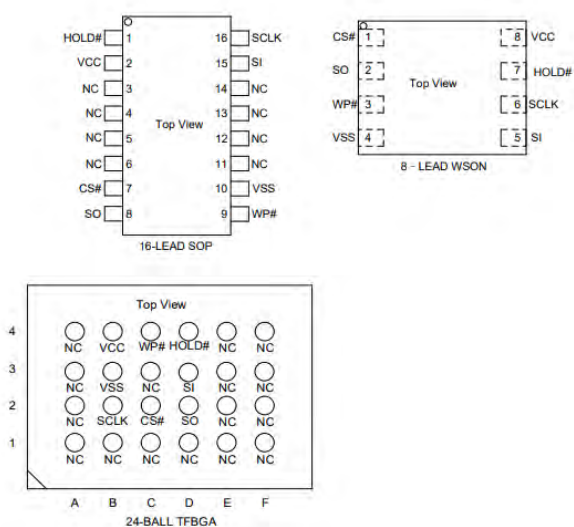


Рис. 3.2. Схема підключення

3.2.2. ASM117-5.0

AMS1117-ADJ та AMS1117-1.2, -1.5, -1.8, -1.9, -2.5-3.3 і-5.0 - це триконтактні регулятори з низьким відключенням з можливістю вихідного струму 0,8 А. Ці пристрої оптимізовані для низької напруги, де перехідна реакція і мінімальна вхідна напруга є критичними.

Тепловий обмежувач на мікросхемі забезпечує захист від будь-якої комбінації перевантажень та температури навколишнього середовища, які могли б створити надмірну температуру стику.

Регулятори серії AMS1117 доступні в стандартній упаковці SOT-89.

3.2.3. 78L05ABZ

Триполюсні позитивні регулятори серії L78L використовують внутрішнє обмеження струму та термічне відключення, що робить їх по суті незнищуваними. Якщо передбачений достатній тепловідвід, вони можуть подавати вихідний струм до 100 мА. Вони призначені як регулятори постійної напруги в широкому діапазоні застосувань, включаючи локальне або вбудоване регулювання для усунення шуму та проблем розподілу, пов'язаних з одноточковим регулюванням. Крім того, їх можна використовувати з елементами силового пропускання для виготовлення високострумівих регуляторів напруги. Серія L78L, яка використовується як заміна комбінованого діода / резистора, пропонує вдосконалення е разом із меншим струмом спокою та меншим рівнем шуму.

3.2.4. ESP32-D0WD-V3

ESP32 - це єдиний комбінований мікросхемний модуль Wi-Fi та Bluetooth на частоті 2,4 ГГц, розроблений за технологією TSMC з наднизькою потужністю 40 нм. Він розроблений для досягнення найкращої потужності та радіочастотних характеристик, демонструючи

надійність, універсальність та надійність у різноманітних додатках та сценаріях живлення.

Серія чіпів ESP32 включає ESP32-D0WD-V3, ESP32 D0WDQ6-V3, ESP32-D0WD, ESP32-D0WDQ6, ESP32-D2WD, ESP32-S0WD та ESP32-U4WDH, серед яких ESP32-D0WD-V3 -V3 та ESP32-U4WDH засновані на пластині ECO V3.

3.2.5. AD8066

Усилителі FastFET™ AD8065 / AD8066 - це просто в застосуванні операційних підсилювачів (ОУ) із зворотним зв'язком по напрузі та вхідним каскадом на польових транзисторах, що мають високі показники. AD8065 містить один канал посилення, а AD8066 - два канали. Компоненти виробляються за патентованою компанією Analog Devices технології XFCSB і забезпечують виключно низький рівень шуму (7,0 нВ / $\sqrt{\text{Гц}}$ та 0,6 фА / $\sqrt{\text{Гц}}$), а також дуже високий вхідний імпеданс.

Благодаря широкому діапазону напруги живлення (від 5 В до 24 В), підтримка роботи з однополярним харчуванням і шириною полос, рівною 145 МГц, AD8065 / AD8066 може застосовуватися в найрізноманітніших завданнях. Додаткова універсальність також досягається за рахунок діаграми залізничних та залізничних вихідних напружень (розряд напружень до напружень живлення).

Незважаючи на низьку вартість, дані підсилювачі забезпечують перехідну сукупність показників. Малі значення погрешностей диференціального коефіцієнта посилення та диференціальної фази (0,02% та 0,02°, відповідно), а також нерівність коефіцієнта посилення в межах 0,1 дБ у положі до 7 МГц роблять ці підсилювачі ідеальним вибором для відеосистеми. Крім того, вони володіють високою швидкістю наростання (180 В / мкс), перехідними показниками шуканих (SFDR = -88 дБн при 1 МГц), крайнім високим ослабленням синфазного сигналу (-100 дБ) і малим вхідним напруженням зміщення (1,5 мВ, макс. , після прогрєва).

AD8065 / AD8066 потребують всього 6,4 мА / канал (тип.) і здатні видавати в навантаженні до 30 мА.

AD8065 / AD8066 - це високопродуктивні підсилювачі з вхідним каскадом на польових транзисторах, що випускаються в мініатюрних корпусах SOIC-8, MSOP-8 та SOT-23-5. Вони працюють у промисловому температурному діапазоні від -40°C до $+85^{\circ}\text{C}$.

AD8065WARTZ-REEL7 повністю сертифікований для застосування в автомобільній промисловості. Компонент працює в розширеному температурному діапазоні від -40°C до $+105^{\circ}\text{C}$ при всіх діаграмах напруженого живлення до $\pm 5\text{V}$.

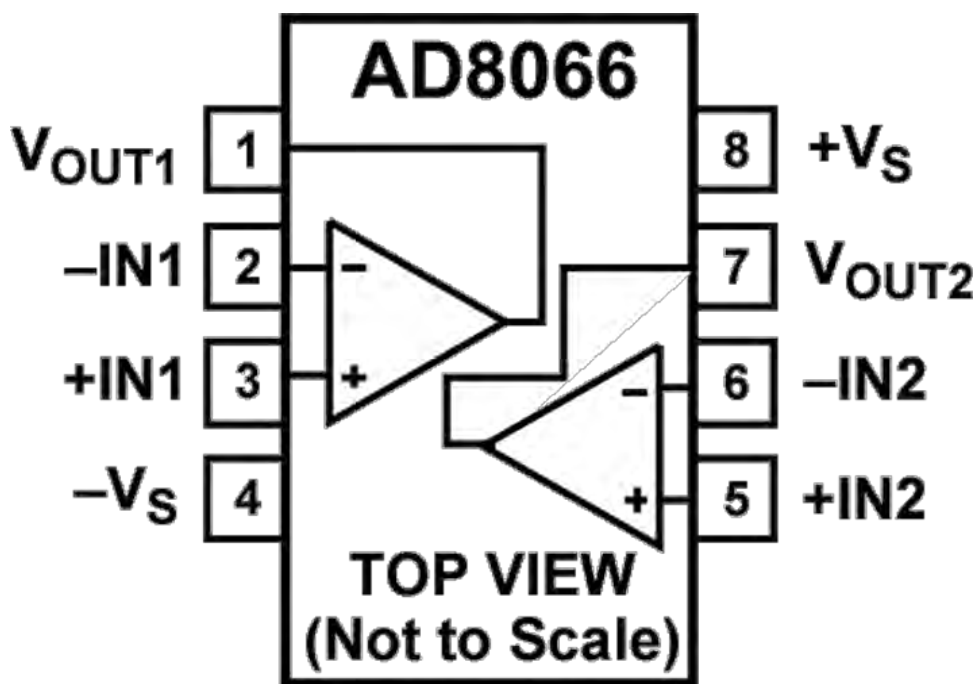


Рис. 3.3. Схема підключення

3.2.6. INA156

INA156 - це недорогий підсилювач вимірювальних приладів CMOS з поворотом на виході з рейки на рейку, оптимізований для роботи з низькою напругою, з одним живленням.

Широка смуга пропускання (550 кГц у $G = 10$) і висока швидкість наростання (6,5 В / мкс) роблять INA156 придатним для керування дискретизацією цифрових перетворювачів, а також для загального призначення та аудіозаписів. Швидкий час встановлення дозволяє використовувати датчики та перетворювачі з більшою швидкістю, а також системи швидкого сканування даних.

Коефіцієнт посилення може бути встановлений на 10 В / В або 50 В / В за допомогою обв'язки штифтами.

Виграш між цими двома значеннями можна отримати, додавши один резистор. INA156 повністю вказаний в діапазоні від + 2,7 В до + 5,5 В. INA156 доступний у комплекті для поверхневого монтажу MSOP-8, призначеному для роботи в діапазоні температур від -55°C до 125°C .

Висновки до розділу

В даному розділі вибрана і обґрунтована структурна схема двопараметрового вихрострумовеого контролю, а також підібрані мікросхеми для побудови електрично-принципової схеми.

РОЗДІЛ 4. РОЗРОБКА СТАРТАП ПРОЕКТУ «ДЕФЕКТОСКОП БАГАТОПАРАМЕТРОВОГО ВИХРОСТРУМОВОГО КОНТРОЛЮ СТАНУ ВИРОБІВ МАШИНОБУВАННЯ»

Кожне підприємство у процесі виготовлення, реалізації та обслуговування своєї продукції зустрічається із незапланованими витратами, що формуються в результаті виникнення непередбачуваних обставин. Умовно назвемо їх непередбачуваними фінансовими ризиками.

Кожна галузь виробничої діяльності людини має свою специфіку. Тому такі непередбачувані ризики та їх наслідки і для підприємства, і для споживачів його продукції, можуть мати дещо відмінний характер та масштаби.

Машинобудування — надзвичайно широка галузь виробничої діяльності і охоплює діапазон від виготовлення металевих виробів повсякденного вжитку, таких як столові прибори, фурнітура, дріт, кріплення тощо; до найрізноманітніших транспортних засобів та великогабаритного обладнання. Її продукція використовується у важкій промисловості, на будівництві, у науці тощо. При цьому діяльність підприємств машинобудівної галузі охоплює повний цикл життя виробу: проектування, виробництво, обслуговування, утилізація.

Основною сировиною машинобудування є різноманітні метали та їх сплави. Це як чорні, так і кольорові метали. А сфера їх використання у виробництві надзвичайно широка: від припою до основного матеріалу. Фізичні характеристики металів чутливі до зовнішніх факторів, особливо високих чи низьких температур і вологості, до того ж можуть варіюватися в результаті наявності сторонніх домішок, прорахунків, допущених при виготовленні самого металу, недотримання технології його виробництва тощо. Все це здатне суттєво знизити надійність металевих виробів, впливаючи як на якість продукції підприємства, так і на надійність обладнання, що ним використовується.

Ознаками сучасного машинобудування є технологічність та масштабність. А тому здійснення надійного контролю за якістю сировини і готової продукції, так само як і за справністю обладнання, є надзвичайно важливим. Ціна помилки тут може бути надзвичайно високою як в фінансовому, так і в репутаційному плані. І навіть становити загрозу для життя та здоров'я людей: споживачів, працівників, а у деяких випадках і оточуючого населення.

Непередбачувані фінансові ризики на підприємствах машинобудівної галузі в аспектах, пов'язаних із матеріальними об'єктами, можна умовно розділити на два типи:

- ризики, пов'язані із неочікуваними несправностями обладнання;
- ризики, пов'язані із гарантійним ремонтом або заміною продукції.

Неочікувані несправності можуть призвести до простою окремих агрегатів, виробничої лінії чи підприємства в цілому. Звісно, несправності обладнання не можуть бути запланованими. Але коректна інформація щодо зносу деталей, цілісності структури матеріалу тощо дозволить розрахувати реальний ресурс безпечної експлуатації пристроїв. А також завчасно придбати запчастини або нове обладнання, що дозволить уникнути простою і грошових втрат в результаті втрати часу.

Виконання гарантійних зобов'язань також є причиною додаткових затрат. Ремонт одного бракованого виробу або його заміну можна компенсувати за рахунок фінансових інструментів. Але проблемним може виявитися весь модельний ряд або й уся продукція, виготовлена у певний період часу (наприклад, з використанням однієї партії сировини). Що, в свою чергу, за умови невеликих масштабів виробництва або великих масштабів проблеми, може стати причиною втрати значної частини прибутку.

Так, наприклад, у 2018 році компанія BMW була змушена відкликати близько 1,6 млн автомобілів з усього світу, виготовлених протягом семи останніх років, через виявлення несправності у системі відведення

відпрацьованих газів. Ця несправність потенційно могла викликати займання автомобіля. А для автовиробника означала мільйонні витрати у грошовому еквіваленті та репутаційні втрати, що, разом з іншими факторами ринку, призвели до зменшення прибутків компанії на 16,9% порівняно із минулим роком.

Загалом за останні кілька років через різні несправності BMW періодично відкликали різні лінійки автомобілів з різних частин світу. А прибуток компанії неухильно зменшувався аж до світової кризи автомобільної промисловості, викликаній коронавірусом. Звичайно, зняття продукції з продажу та безкоштовна заміна несправних вузлів тих авто, які вже знаходилися у власності покупців, не є єдиною причиною фінансових втрат компанії, але, безперечно, це відіграло не останню роль.

Причиною подібних несправностей можуть стати не лише брак, допущений при виробництві самого виробу, прорахунки на етапі проектування або помилки у програмному забезпеченні, що періодично трапляється у наш час. Але і дефекти сировини, що використовувалися у виробництві.

Дефекти металу можуть виникнути в результаті наявності у сплаві сторонніх домішок або при недотриманні технічних вимог під час виготовлення сплаву. Це призводить до того, що властивості кінцевого матеріалу, який і поступає на виробництво, можуть відрізнятись від заявлених. Подібна ситуація особливо вірогідна, коли мова йде про співпрацю з неперевіреним постачальником. Але може виникнути і випадково під час роботи із добре відомим виробником.

Іншою загрозою є мікротріщини. Вони непомітні людському оку, можуть з'явитися як під час виробництва сировини, так і при її обробці. Мікротріщини здатні суттєво зменшити міцність виробу аж до його руйнування при найменшому навантаженні. І, навіть у кращому випадку, призводять до скорочення строку експлуатації виробу порівняно із передбаченим.

Якщо говорити не про продукцію підприємства, а про обладнання, що ним використовується, небезпеку становлять ще і втома металу, його корозія та знос.

Втома, або напруга, металу — це поступове накопичення пошкоджень у структурі металевої деталі в результаті дії змінного, часто циклічного, навантаження. Це ослабляє метал, змінює його властивості і в решті решт призводить до руйнування. У світі ще не винайдено сплаву, стійкого до втоми. Кожен із існуючих металів у тій чи іншій мірі схильний до неї.

Вчасно розпізнати втому металу наразі не просто і потребує професійних навичок. Хоча досягнення в металургії звели небезпеку від втоми металу до мінімуму, вона і досі є повсякденною неприємністю, яка дорого коштує та несе потенціал руйнівних наслідків.

Корозія металу — його руйнування в результаті впливу факторів зовнішнього середовища. Як правило, її можна побачити неозброєним оком. Але ступінь руйнування металевої конструкції в результаті корозії визначити не так просто. А отже — і прогнозувати строк її служби.

Знос — це деформування і ослаблення деталей, що виникає у місці їх контакту, особливо у місці рухомого з'єднання, і є результатом дії сили тертя. На ступінь та швидкість зносу також впливають фактори зовнішнього середовища. Так, наприклад, механізм, що функціонує там, де багато піску, зношується набагато швидше, ніж аналогічний, що функціонує там, де вірогідність потрапляння абразиву у систему зведена до мінімуму.

Так само як мікротріщини та втому металу, знос не завжди можна помітити та розпізнати вчасно. Особлива небезпека такого типу руйнування полягає у тому, що передбачити його теоретично або завдяки тестуванню зразків у лабораторних умовах можна лише приблизно. Єдиний надійний спосіб визначити швидкість зносу металу — перевірка в умовах експлуатації. Що є не дешевим методом пошуку коректив, які

необхідно внести у проект виробу. А у деяких випадках — і не можливим (коли виріб має функціонувати далеко від місця виробництва, у принципово інших умовах).

Несправності обладнання підприємства, що виникають в результаті цих факторів, можуть призвести не лише до простою і фінансових втрат, пов'язаних з ним та необхідним ремонтом, а, у крайніх випадках, навіть до катастрофічних наслідків.

Так, наприклад, у 2009 році сталася одна з найбільших аварій в історії гідроенергетики — аварія на Саяно-Шушенской ГЕС (Російська Федерація), що стала причиною техногенної катастрофи у регіоні. Причина аварії — руйнування шпильок кріплення кришки турбіни в результаті втоми металу. Наслідок — 75 загиблих, руйнування приміщення та обладнання самої станції, знеструмлення регіону, економічні коливання, тимчасова міграція населення з поселень, що розташовані нижче за течією, соціальна нестабільність та забруднення акваторії Єнісею турбінним маслом, яке спричинило загибель флори та фауни.

Аварії меншого масштабу, переважно на транспортних засобах — авіакатастрофи, катастрофи на залізницях тощо — через втому металу відбуваються доволі періодично.

Отже, якісний контроль цілісності металу та його відповідності заявленим характеристикам на підприємствах машинобудування та тих, що використовує їх продукцію, надзвичайно важливий. Така діагностика дозволить не лише завчасно виявити місця майбутніх несправностей, а і прогнозувати реальний строк безпечної експлуатації обладнання, що вже знаходиться у використанні.

На сьогоднішній день існують різні методи діагностики, наприклад: візуальний та слуховий огляд, ультразвукове та радіологічне обстеження, використання фарбників чи магнітних порошоків. Проте кожен із них має свої недоліки. Деякі не надто надійні і потребують високопрофесійних

навичок. Іншим необхідне спеціальне високотехнологічне обладнання та лабораторні умови, їх не можна провести «в полі», не виводячи об'єкт обстеження з експлуатації. Треті дають результат тільки за умови використання на металах, що мають магнітні властивості.

Деякі дефекти та пошкодження можуть виникати під час зборки цілого виробу або його окремих вузлів. З урахуванням специфіки машинобудівної галузі, продукція підприємств підлягає багатоетапному контролю на кожному з етапів виробництва: від креслення до готового виробу. І якщо для креслень та розрахунків існує спеціальне програмне забезпечення, яке вже багато років широко використовується на практиці. То на етапах, пов'язаних із фізичними об'єктами — від отримання заготовок до надходження виробу у продаж або передачі замовнику — багато що досі залежить від людини. При цьому, якщо говорити про складний пристрій, а не про заготовку або кріплення, грамотний контроль передбачає поступову перевірку від меншого до більшого: вузли, блоки, прилад. Ретельний контроль необхідний не лише для нового виробу, що сходиться з конвеєра, а і для того, що знаходиться у експлуатації.

Як видно, фаз на яких можна допустити помилку чи прорахунок, достатньо. Разом з іншими аспекти сучасних засобів та умов діагностики у машинобудуванні, це задає підґрунтя для виникнення помилок: через людський фактор, через брак інформації щодо стану об'єкта, через великі обсяги виробництва тощо. Підвищення автоматизації процесу контролю та полегшення його виконання може якісно покращити ситуацію: підвищити ефективність при цьому зменшивши час, необхідний на його виконання.

Практичні приклади, наведені вище, доводять, що навіть найбільші компанії світу мають простір для вдосконалення своїх методів діагностики обладнання, що використовується, та продукції, яка випускається.

Вихрострумові методи діагностики здатні виявляти найдрібніші тріщини у структурі металу, визначати чистоту сплаву, аналізувати усі електропровідні матеріали, не залежно від їх магнітних властивостей. При цьому вони належать до неруйнівних методів контролю і не потребують безпосереднього контакту із поверхнею, яка перевіряється.

Отже, перспективи розробки і впровадження у практичне використання приладу, здатного проводити діагностику, застосовуючи вихрострумні методи, доволі широкі.

Характерною рисою сучасного машинобудування являється автоматизація та комп'ютеризація виробництва. Це не просто данина часу чи спосіб пришвидшити та полегшити трудову діяльність людини. Комп'ютерна система здатна збирати, зберігати, обробляти та аналізувати обсяги даних, надто великі для оперативного опрацювання їх людиною. Її застосування на виробництві відкриває нові можливості росту та розвитку.

У сфері діагностики комп'ютеризована система дозволить не тільки швидко отримувати дані щодо стану сировини та техніки, а й накопичувати і порівнювати їх. Що в свою чергу дасть можливість робити більш точні прогнози та виявляти потенційні небезпеки, які неможливо визначити іншими методами.

А упередження небезпек, прийняття завчасних заходів для усунення їх причин або виправлення наслідків, дасть можливість звести до мінімуму вірогідність виникнення непередбачуваних аварійних обставин, а отже і фінансових, майнових, репутаційних втрат підприємства. Підвищить рівень безпеки виробництва та користування продукцією машинобудування.

Тому розробка і впровадження комп'ютеризованої системи багатопараметрового вихрострумового контролю має великий потенціал попиту на різних рівнях виробництва: від тестування готової продукції до планової діагностики обладнання.

4.1. Опис ідеї проекту (товару, послуги, технології)

Мета цього розділу - проаналізувати стартап-проект, щоб визначити можливість його реалізації на ринку та можливі параметри реалізації цього впровадження.

Ідея проекту полягає в удосконаленні автоматизованого методу вихрострумowego контролю металу, що забезпечує можливість виявлення дефектів невеликих розмірів, а також в оптимізації процесу вихрострумowego неруйнівного контролю із застосуванням багатопараметричних вихрострумowych перетворювачів.

Таблиця 4.1. Опис ідеї стартап-проекту

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Розробка системи автоматичного управління великопараметричними вихровими перетворювачами	Підприємства з виробництва та обслуговування літаків	Можливість зміни налаштувань залежно від умов
	Вироби машинобудування	Виключення впливу людського фактора на результати контролю
	Підприємства з ремонту деталей відповідальної техніки	Перетворення даних у реальному часі у форму, яка не потребує додаткового дешифрування

Ця таблиця дає цілісне уявлення про зміст ідеї і можливих основних потенційних ринках, на яких слід шукати групи потенційних клієнтів. Основні області застосування ідеї - це її використання в різних галузях промисловості, таких як автомобілебудування, авіабудування та інші. Основні переваги користувача - скорочення часу на неруйнівного

контролю та усунення впливу людського фактора на результати контролю. Далі ми проаналізуємо потенційні техніко-економічні переваги даної ідеї в порівнянні з пропозиціями конкурентів. Визначимо, чим він відрізняється від існуючих аналогів і замінників. Результати представлені в таблиці 2:

Табл. 4.2. Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проекту

№ п/п	Техніко-економічні характеристики ідеї	(Потенційні) товари/концепції конкурентів				W (слабка сторона)	N (нейтральна сторона)	S (сильна сторона)
		Мій проект	«EloScan-system»	«World NDT»	«Робоскоп ВТМ3000»			
1.	Вартість, грн	38000 0	5500 00	7000 00	65000 0			+
2.	Точність вимірювання, %	98%	98%	99%	97%		+	
3.	Точність позиціонування, %	99%	98%	99%	97%		+	
4.	Довговічність	3 років	5 років	7 років	5 років		+	
5.	Збереження результатів контролю	+	-	+	-			+
6.	Керування в інтерактивному режимі	+	+	-	+	+		

Висновок: ця таблиця визначає список техніко-економічних властивостей та характеристик Ідеї; визначається попереднє коло

конкурентів, які вже існують на ринку, і визначаються слабкі, нейтральні та сильні характеристики Ідеї цього стартап-проекту. Однією з сильних сторін проекту є самоварт та збереження результатів контролю.

4.2. Технологічний аудит ідеї проекту

У цьому розділі проводиться аудит технологій, які можна використовувати для реалізації ідеального проекту (технологія створення продукту).

Визначення технологічної можливості реалізації ідеї проекту пропонує аналіз компонентів, перерахованих в таблиці (таблиця 4.3):

Таблиця 4.3. Технологічна здійсненність ідеї проекту

№ п/п	Ідея проекту	Технології її реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій
1.	Розробка системи великопараметричних вихрових перетворювачів для управління продукцією машинобудування	Виготовлення на підприємстві на замовлення	Наявна	Недоступна
		Замовлення компонентів та виготовлення власноруч	Наявна	Доступна
2.				
Обрана технологія ідеальної реалізації проекту: Реконструкція окремих компонентів і компонентів систем і збірка власних систем як оптимальна технологія реалізації проекту.				

Проаналізувавши таблицю, можна зробити висновок, що наш проект потрібно зібрати з готових блоків та мінімізувати шлях доставки замовлених деталей для автоматизованої системи.

4.3. Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту

У цьому розділі ми визначимо ринкові можливості, якими можна скористатися для виведення проекту на ринок, та ринкові загрози, які можуть перешкодити реалізації проекту. Цей аналіз дозволить нам спланувати розвиток проекту, беручи до уваги стан ринкового середовища, потреби потенційних замовників та пропозиції від конкуруючих проектів. Таблиця аналізу попиту 4: попит, обсяг та динаміка розвитку ринку.

Табл. 3.4. Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проекту

<i>№</i>	<i>Показники стану ринку (найменування)</i>	<i>Характеристика</i>
1	Кількість головних гравців, од	4
2	Загальний обсяг продаж, грн/ум.од	380000
3	Динаміка ринку (якісна оцінка)	зростає
4	Наявність обмежень для входу (вказати характер обмежень)	Обмежень немає
5	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	ISO, EN
6	Середня норма рентабельності в галузі (або по ринку), %	75 %

Таким чином, за результатами аналізу таблиці можна зробити висновок, що ринок привабливий для входу за попередніми оцінками.

У таблиці 4.5 ми визначаємо потенційні групи клієнтів і їх характеристики, а потім формуємо орієнтовний список вимог до продукту для кожної з груп клієнтів.

Табл.4.5. Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту

<i>№</i>	<i>Потреба, що формує ринок</i>	<i>Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)</i>	<i>Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів</i>	<i>Вимоги споживачів до товару</i>
1	Необхідність отримання якісного продукту	Виробничі підприємства	Нові вимоги до стандартизації продуктів. Простота модернізації нового обладнання до виробничого процесу	Ергономіка. Можливість Використовувати як модуль. легкість транспортування

Висновок: в цій таблиці ми визначили цільову аудиторію і її основні вимоги до продукту цього типу, визначили основні характеристики системи, які формують поведінку клієнтів по відношенню до нашої системи, і визначили основні вимоги до системи. При використанні цієї технології існують певні загрози. Для запобігання подібних ситуацій потрібне якісне обладнання, а установку і установку таких систем повинні проводити висококваліфіковані фахівці. Також потрібно своєчасне обслуговування цього продукту. Після визначення потенційних груп клієнтів ми аналізуємо ринкову середу. Складаємо таблиці факторів, які сприяють реалізації проекту на ринку, і чинників, що перешкоджають цьому (Таблиця 6).

Табл.4.6. Фактори загроз

№	Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
1	Конкурентні	Новий продукт, що виходить на ринок	Моніторинг ринку
2	Брак	Можливість поломки згодом	Збільшення часу тестування
3	Додаткове випробування	Необхідність частішої сертифікації, мінливі системні вимоги	Моніторинг поточних вимог до таких систем і своєчасна сертифікація
4	Постачання	Проблема з фірмами-постачальниками	Зміна політики розподілу продукції
5	Технічний	Програма вилітає з-за неправильної налаштування	Створення відділу технічної підтримки

Табл. 4.7. Фактори можливостей

№ n/n	Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
1	Політичний	Підтримка державного фінансування малого середнього бізнесу	Розширення асортименту продукції
2	Розроблення нових проектів	Залучення нових працівників	Проведення стартапів
3	Дистанційне управління	Управління через мобільний телефон, планшет, спеціальний пульс дистанційного керування	Створення пульса дистанційного керування (GPU), написання програм

4	Ринок збуту	Можливість виходу на міжнародний ринок	Розробка та виготовлення продукту за європейськими стандартами
5	Технічний	Контроль витрат рідини в трубках малого діаметру	Впровадження нової технології виготовлення системи

В таблицях 6 та 7 наведено основні фактори що загрожують та сприяють ринковому впровадженні даного проекту. В таблиці 8 проводиться аналіз пропозиції, тобто визначаються загальні риси конкуренції на ринку.

Таблиця 4.8. Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

Особливості конкурентного середовища	В чому проявляється дана характеристика	Вплив на діяльність компанії (можливі дії компанії для забезпечення конкурентоспроможності)
1. Вказати тип конкуренції олігополія	Невелика кількість фірм які виробляють дану продукцію	Конкуренція змушує розробляти нові привабливі ідеї
2. За рівнем конкурентної боротьби - глобальний	Продукція виробляється по всьому світі	Низька ціна, дешевша доставка, національна підтримка продукції
3. За галузевою ознакою - одногалузєва	Використання на підприємствах однієї галузі	Розробка нових пристроїв і технологій завжди дозволить вам бути високо конкурентним

4. Конкуренція за видами товарів: - товарно-родова	Конкуренція між традиційними технологіями і продуктами, які надають аналогічні функції і продукти	Реклама, нові функції технологій
5. За характером конкурентних переваг - нецінова	Поліпшення якості продукції, технологій виробництва, інновацій та нанотехнологій запатентовано і брендovanого і може продавати це	Необхідність постійного вдосконалення технологій
6. За інтенсивністю - не марочна	Придбання товару залежить не від торгової марки, а від завдань, які він вирішує	Розвиток бренду і його активна реклама

Проведений аналіз дозволяє зробити висновок, що основною характеристикою конкуренції на ринку є необхідність постійного вдосконалення технологічного процесу в конкурентному середовищі вузьким колом вузькоспеціалізованих компаній.

Докладніший аналіз умов конкуренції в галузі за М. Портером наведено в табл. 9.

Таблиця. 4.9. Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером

	Прямі конкуренти в галузі	Потенційні конкуренти	Постачальники	Клієнти	Товари-замінники
Складові аналізу	«WorldN DT»	Ціна, якість, швидкість доставки, вартість доставки	Вартість обсягу поставки для постачальників	Клієнти залишають відгуки, оцінюють роботу продавців, якість продукції, час доставки. Тому суб'єктивна оцінка з боку покупців завжди має високий рейтинг.	Неякісні товари
Висновки:	Висока конкуренція	Існує можливість виходу на ринок через державні замовлення. Конкуренти присутні.	Постачальники не впливають на ринкові умови	Клієнти вимагають якісних продуктів, якими легко керувати	Ринок захоплюють більш відомі компанії.

4.4. Фактори конкурентоспроможності

На підставі даних, представлених в аналізі конкуренції (табл. 9), а також з урахуванням характеристик ідеологічної складової проекту (табл. 2), споживчих очікувань товару (табл. 5) та факторів маркетингового середовища (Таблиця №№ 6-7) перелік факторів конкурентоспроможності. Аналіз факторів наведено в табл. 10.

Таблиця 4.10. Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

<i>№ п/п</i>	<i>Фактор конкурентоспроможності</i>	<i>Обґрунтування (наведення чинників, що роблять фактор для порівняння конкурентних проектів значущим)</i>
1	Велика кількість постачальників	Своєчасна доставка товару незалежно від ситуації на ринку постачальників.
2	Вартість	Зменшення вартості за рахунок використання ВСП
3	Рівень технологій процесу виробництва	Використання фазових характеристик сигналів для оптимізації контролю
4	Економічні зв'язки	Залучення додаткового фінансування

Аналіз дозволяє зробити висновок про фактори конкурентоспроможності, які є основними для цієї ідеї.

4.5. Аналіз сильних та слабких сторін стартап-проекту

З певних факторів конкурентоспроможності (Таблиця 10) був проведений аналіз сильних і слабких сторін стартового проекту (Таблиця 11).

Таблиця 4.11. Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін «EdControl»

№	Фактор конкурентоспроможності	Бали 1-20	Рейтинг товарів-конкурентів у порівнянні з («EdControl»)						
			-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
1	Велика кількість постачальників	12			●				
2	Вартість	15				●			
3	Загальний рівень техніки та технологій	17		●					
4	Економічні зв'язки	16					●		
5	Розміщення виробничих сил	9				●			
6	Наявність сировинних ресурсів	9				●			
7	Орієнтація на маркетингову концепцію	6		●					

З таблиць 10 і 11 видно, що фактори конкурентоспроможності мають позитивну динаміку. Перевагами є використання матричних VSP та використання обробки сигналів на основі їх фазових характеристик з точки зору технологічних компонентів та конкурентних витрат та диверсифікації постачальників.

4.6. SWOT-аналіз стартап-проекту

SWOT-аналізу сильних (Strength) та слабких (Weak) сторін, загроз (Troubles) та можливостей (Opportunities) (табл. 12) складено на основі виділених ринкових загроз та можливостей, та сильних і слабких сторін (табл.11).

Таблиця 4.12. SWOT- аналіз стартап-проекту

<i>Сильні сторони:</i> зниження впливу людського фактора, використання сучасної електронної бази даних, використання більш сучасних алгоритмів	<i>Слабкі сторони:</i> Консерватизм ринку щодо нових постачальників, тривалий процес пошуку нових клієнтів.
--	--

<p><i>Можливості:</i> Зміна опису такої системи в зв'язку з необхідністю поліпшення якості контролю</p>	<p><i>Загрози:</i></p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Можливість демпінгу ринку конкурентами 3. Політичні та економічні ризики ведення бізнесу; 4. Можливість дефекту при поставці нової продукції
---	--

У таблиці 12 описані сильні та слабкі сторони проекту, а також можливості та загрози, які слід враховувати при виході на ринок. Однак описані загрози не є остаточними і мають імовірнісний характер.

4.7. Альтернативи ринкової поведінки

На основі SWOT-аналізу необхідно розробити альтернативи ринковому поведінці, які будуть оптимальними з введенням на ринок програми стартапів, прислухається до конкурентам, а також потребам і тенденціям ринку.

Отримані результати пошуку альтернативних рішень пов'язані з аналізом предметної ймовірності їх успіху для оптимізації виведення проекту на ринок (Таблиця 13).

Таблиця 4.13. Альтернативи ринкового впровадження стартап-проекту

№ п/п	Альтернатива (орієнтовний комплекс заходів) ринкової поведінки	Ймовірність отримання ресурсів	Строки реалізації
1	Стратегія нейтралізації ринкових загроз сильними	Середня	14 місяців

	сторонами стартапу		
2	Пошук послуг які не представлені на ринку проте потенційно є перспективними	Висока	22 місяця
3	Пошук інвестицій	Висока	12 місяців

Результати АНАЛІЗУ альтернатив виходу на ринок вказують Вибір можливостей як альтернативу подальшим технічним ДОСЛІДЖЕННЯМ для створення нових можливостей та переваг, що збільшують Можливість успішного виходу на ринок. Іншою можливою альтернативою є пошук інвестиційних цінностей, що збільшить шанс на успіх за допомогою класичних методів (реклама, оптимізація виробництва).

4.8. Розроблення ринкової стратегії проекту

Створення ринкової стратегії передбачає необхідність визначення цільових груп споживачів (табл. 14).

Таблиця 4.14. Вибір цільових груп потенційних споживачів

№ п/п	Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовність споживачів сприйняти продукт	Орієнтовний попит в межах цільової групи (сегменту)	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота Входу у сегмент
1	Виробники виробів машинобудування	Висока	70%	Висока	Середня
2	Виробництва які використовують вироби	Висока	60%	середня	Середня
Які цільові групи обрано: виробництва що використовують вироби машинобудування.					

Вибір цільової групи проводився з урахуванням дещо меншою конкуренції в сегменті виробництв за використання продукції машинобудування в порівнянні з заводами, що займаються її безпосереднім виробництвом.

Для роботи в обраному сегменті ринку необхідно сформувати базову стратегію розвитку (Таблиця 15).

Таблиця 4.15. Визначення базової стратегії розвитку

<i>n/ n</i>	<i>Обрана альтернатива розвитку проекту</i>	<i>Стратегія охоплення ринку</i>	<i>Ключові конкурентоспро- можні позиції відповідно до обраної альтернативи</i>	<i>Базова стратегія розвитку*</i>
	Удосконалення власних технічних рішень для задоволення потреб ринку	Диференційований маркетинг	Технологічність, точність вимірювань	Стратегія диференціації

Стратегія диференціації є найбільш оптимальною з урахуванням обраного напрямку розвитку проекту (вдосконалення власних технічних рішень, призводить до створення чудових характеристик у порівнянні з конкурентами).

Наступним кроком є пошук стратегії конкурентної поведінки (табл. 16).

Таблиця 4.16. Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

<i>№ п/ п</i>	<i>Чи є проект «першопрохідцем » на ринку?</i>	<i>Чи буде компанія шукати нових споживачів, або забирати існуючих у конкурентів?</i>	<i>Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурента, і які?</i>	<i>Стратегія конкурентно ї поведінки*</i>
1	Ні	Передбачається розвиток ринку	Так	Зайняття конкурентно ї ніші

Зайняття конкурентної ніші є оптимальним стратегією виходячи з обраного шляху створення унікальних властивостей у порівнянні з конкурентами.

Важливою складовою стратегії проекту є стратегія позиціонування на ринку, яка повина відповідати та максимізувати ефект від обраних стратегії розвитку та конкурентної поведінки.

Таблиця 4.17. Визначення стратегії позиціонування

<i>п / п</i>	<i>Вимоги до товару цільової аудиторії</i>	<i>Базова стратегія розвитку</i>	<i>Ключові конкурентоспромо жні позиції власного стартап- проекту</i>	<i>Вибір асоціацій, які мають сформувану комплексну позицію власного проекту (три ключових)</i>
	Точність, раціональність використання, ціна	Стратегія диференці ації	Високоточні вимірювання, використання сучасних методів з можливістю оптимізації	Технологічність, надійність, зручність.

Результатом цієї таблиці є формування знака Бажанова, коли замовники ідентифікують цей проект. Результатом цього підрозділу є формування ринкової поведінки, яка забезпечить успіх проекту.

4.8. Розроблення маркетингової програми стартап-проекту

Розробка маркетингової програми включає в себе ряд етапів, першим з яких є розробка концепції. Для цього в табл. 18 представлені результати аналізу конкурентоспроможності продукції.

Таблиця 4.18. Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

<i>n/n</i>	<i>Потреба</i>	<i>Вигода, яку пропонує товар</i>	<i>Ключові переваги перед конкурентами (існуючі або такі, що потрібно створити)</i>
	Точність	Зменшення похибки при виявленні дефектів малих розмірів	Застосування фазових характеристик сигналу при обробці сигналів, що підвищує точність
	Раціональність	Збільшення швидкості контролю	Застосування багатоканальної системи

Певні переваги дозволяють підвищити ефективність потенційної маркетингової програми за рахунок її таргетингу.

Трирівнева маркетингова модель продукту: більш детально описаний ідеальний проект, його фізичні структури (табл. 19)

Таблиця 4.19. Опис трьох рівнів моделі товару

<i>Рівні товару</i>	<i>Сутність та складові</i>		
I. Товар за задумом	Автоматизована система виявлення дефектів вихрового приміщення, що дозволяє перевіряти вироби машинобудування на наявність поверхневих дефектів Зручність: точність, технологічність, раціональність		
II. Товар у реальному виконанні	Властивості/характеристики	М/Нм	Вр/Тх /Тл/Е/Ор
	1. Використання матричних ВСП	Нм	Тх
	2. Довговічність	Нм	Е
	3. Висока швидкість проведення контролю	Нм	Тл
	4. Низька ціна сервісного обслуговування	Нм	Вр
	5. Можливість масштабування системи	Нм	Тх
	Якість: контроль відповідає нормам ДСТУ 2709-94		
Пакування коробка			
Марка: EdControl			
III. Товар із підкріпленням	До продажу Можливість створення схеми контролю особливих дефектів		
	Після продажу Допомога в навчанні інспекторів НДТ для аналізу результатів інспекції		
За рахунок чого потенційний товар буде захищено від копіювання: свідоцтво на авторське право			

Таблиця 19 створює рівні продуктів для оптимізації маркетингової програми, виділяє основні характеристики вже створеного проекту і можливості його посилення.

Створимо цінові ліміти, які орієнтуються при встановленні ціни на потенційний товар, для цього проаналізуємо ціни на товари-аналоги або замітники товарів, а також аналіз рівня доходів потенційних клієнтів (табл. 20).

Таблиця 4.20. Визначення меж встановлення ціни

№ п/п	Рівень цін на товари-замінники	Рівень цін на товари-аналоги	Рівень доходів цільової групи споживачів	Верхня та нижня межі встановлення ціни на товар/послугу
1	670000 тис. грн	~ 2000000 грн	Сильно різняться	1500000/2500000 грн

У таблиці 20 аналізується вартість аналогічних товарів, однак рівень доходу споживача важко проаналізувати, оскільки він суттєво відрізняється в кожному випадку. Обмеження ціни на товар встановлюється на основі цін конкурентів.

Виберемо систему продажів, яка найкраще відповідає поставленим завданням (Таблиця 21):

Таблиця 4.21. Формування системи збуту

№ п/п	Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів	Функції збуту, які має виконувати постачальник товару	Глибина каналу збуту	Оптимальна система збуту
	Поодинокі замовлення Продаж в роздріб	Прямий продаж клієнтам продукції	висока	Проведення збуту власними силами

Раціональним рішенням при продажу даного товару є продаж своїми силами, так як прибуток в кожному випадку буде відрізнятись, а обсяги продажів невеликі і необхідності великих витрат на створення каналів продажів не очікується.

Ключовою складовою маркетингової програми є розробка концепції маркетингових комунікацій, в її основі - обрана стратегія позиціонування (Таблиця 22).

Таблиця 4.22. Концепція маркетингових комунікацій

№ п/п	Специфіка поведінки цільових клієнтів	Канали комунікацій, якими користуються цільові клієнти	Ключові позиції, обрані для позиціонування	Завдання рекламного повідомлення	Концепція рекламного звернення
1	Недовіра до нових поставщиків	Спеціалізовані виставки та форуми, особисті контакти	Технологічність та раціональність контролю	Повідомлення клієнтам про переваги, які вони отримали при використанні запропонованого продукту	Своєчасна оптимізація – гарантія постійного прибутку

Створена концепція маркетингових комунікацій забезпечить оптимальний результат від загальної маркетингової програми.

Висновки до розділу

В результаті аналізу стартап-проекту «EdControl» було виявлено ряд ключових чинників, що впливають на успіх цієї ідеї. Зокрема, визначено, що тенденції на цільовому ринку є позитивними для нових гравців, так як існує необхідність в оптимізації контролю машинобудівної продукції і підвищення ймовірності контролю дрібних дефектів. Цей факт говорить про можливість комерціалізації даної ідеї.

Також існує ряд перешкод для реалізації проекту через високу конкуренцію на ринку і пасивності потенційних покупців по відношенню до нових постачальникам такого обладнання. Тому головними факторами конкурентоспроможності є технологічність пропонованих рішень, раціональне використання цієї ідеї, що вигідно відрізняє проект від конкурентів і знижує недовіру з боку цільової групи.

Альтернативними варіантами запуску стартап-проекту на ринок є створення продуктових можливостей, які будуть задовольняти потреби клієнтів в найближчі кілька десятиліть, що зробить використання проекту перспективним для реалізації. Іншою альтернативою є залучення значних інвестицій в проект, так як це значно знизить недовіру серед клієнтів і мінімізує загрозу дефіциту і виробничих дефектів.

Можливість подальшої реалізації проекту безпосередньо залежить від якості практичної реалізації ідеї і пошуку ресурсів для її реалізації.

ВИСНОВКИ

В данній роботі було проведено і виконано ряд питань:

1) Проаналізовано відомі методи опрацювання сигналів для багатопараметрового ВСК.

2) Запропоновано використання амплітудно-фазового методу двохпараметрового ВСК, в якому амплітудний метод застосовано на верхній частоті для визначення діаметру прутка, а фазовий метод – на низькій частоті для визначення питомої електропровідності матеріалу прутка.

3) Розроблено структурну схему та принципіальну схеми вихрострумowego дефектоскопа, що реалізує запропонований метод двопараметрового контролю.

4) Сформовано рекомендації щодо впровадження розробленого проекту у виробництво.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

[1] Куц Ю. В. Імпульсний вихрострумовий контроль об'єктів циліндричної форми / Куц Ю. В., Лисенко Ю. Ю. // Вісник НТУУ «КПІ». Приладобудування : збірник наукових праць. – 2013. – Вип. 45. – С. 69–75.

[2] Куц Ю.В. Статистична фазометрія / Ю.В. Куц, Л.М. Щербак. – Тернопіль: Тернопільський державний університет ім. І. Пулюя, 2009. – 383 с.

[3] Неразрушающий контроль. В 5 кн. Кн. 2. Акустические методы контроля: Практ. пособие / И. Н. Ермолов, Н. П. Алешин, А. И. Потапов; Под ред. В.В.Сухорукова – М.: Высш. шк., 1991. – 283 с.: ил.

[4] Куц Ю.В., Щербак Л.М. Застосування перетворення Гільберта у фазометрії // Технологические системы. – 2004. –№2. – с.50 – 55.

[5] Ключев В. В. Неразрушающий контроль и диагностика: Справочник в 2 т. / В. В. Ключев. – М.: Машиностроение, 2003. – Т. 2: Вихретоковый контроль. – 688 с.

[6] Vasic D. Pulsed Eddy-Current Nondestructive Testing of Ferromagnetic Tubes / D. Vasic, V. Bilas, D. Ambrus // IEEE Trans. Instrum. Meas. – 2004. – vol. 53, no. 4. – pp. 1289 - 1294.

[7] Лисенко Ю. Ю. Исследование импульсной вихретоковой системы контроля диэлектрических покрытий / Ю. Ю. Лисенко, Ю. В. Куц, В. Ф. Петрик, О. Л. Дугін // Ж-л «Научни Известия НТСМ»: материалы междунар. конф. «Дни НК 2014», 09-18 червня, 2014р, – Созополь, 2014. – № 150 – С. 28 – 30.

[8] Kuts I. V. Pulsed Eddy Current Non-Destructive Testing of the Coating Thickness / Kuts Iu.V., Protasov A.G., Lysenko Iu.Iu., Dugin O.L // The e-Journal of Nondestructive Testing: XI European Conference on Non-Destructive Testing 2014, Prague, 06-10 October 2014. – 2014. – vol. 19, no.12.

[9] Y. Kuts, A. Protasov, Iu. Lysenko, O. Dugin, O. Bliznuk, V. Uchanin Using multidifferential transducer for pulsed eddy current object inspection // IEEE First Ukraine Conference on Electrical and computer engineering (Ukrcon) . Conference Proceedings. May 29 –June 2, 2017. Kyiv, Ukraine.– P.826 – 829

[10] Куц Ю.В., Петрик В.Ф., Лысенко Ю.Ю., Дугин А.Л. Экспериментальное исследование вихретоковой системы контроля крупногабаритных изделий // Научни известия на НТСМ 2013 (Болгария). – №2 (139). – С.72–74.

[11] Lashko O. Experience in the Organization of Non-Destructive Testing Formal Education in Ukraine. International Journal “NDT Days”. Vol. II, Issue 1. 2019. P. 91-95.

[12] Сляднева Н.А. «РОБОСКОП ВТ-3000» Роботизированный комплекс вихретокового контроля / Диагностические приборы. Средства и технологии неразрушающего контроля.– 2008, №1. – С.31.

[13] Тетерко А.Я. Селективна вихрострумова дефектоскопія / А.Я. Тетерко, З.Т. Назарчук; НАН України. Фіз.-мех. ін-т ім. Г.В.Карпенка. - Л., 2004. - 247 с.

[14] Дергунов О.В. Комп'ютеризована система вихрострумового неруйнівного контролю / О.В. Дергунов, Ю.В. Куц, // Системи обробки інформації. Вип. 8, Харків - 2013. - С.75-79.

[15] Учанин В.Н. Накладні вихрострумові перетворювачі подвійного диференціювання /В.М. Учанив. –Львів: СПОЛОМ, 2013. – 268 с.

[16] Учанин В.Н. Вихретоковые накладные преобразователи: расширенная классификация, сравнительный анализ и характерные примеры реализации / В.Н. Учанин // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2010. – № 4. – С. 24-30.

[17] Шарп Р. Методы неразрушающих испытаний. – М.: Мир, 1972. – 494 с.

[18] García-Martín J. Non-Destructive Techniques Based on Eddy Current Testing / J. García-Martín, J. Gómez-Gil, E. Vázquez-Sánchez // Sensors. – 2011. – No. 11. – P. 2525-2565. <https://doi.org/10.3390/s110302525>.

[19] Вихретоковой метод неразрушающего контроля тонколистовых металлических изделий, Москва, Машиностроение, 2007, 175 стр. Shaternikov V.E., Klyuev S.V., Eddy-current thermal method of nondestructive testing of thin sheet metal items, Moscow, Mashinostroenie, 2007, 175pp.).

ДОДАТКИ

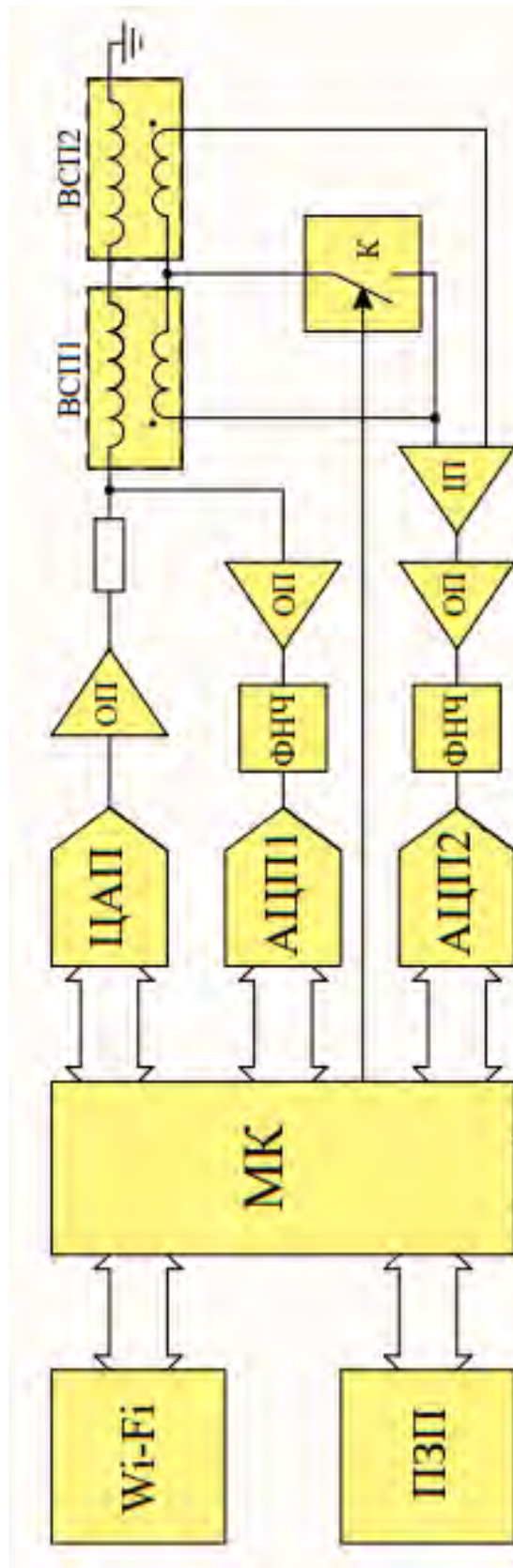
ДОДАТОК А

Табл. Залежність складових $\dot{\mu}_{ef}(\beta)$ від узагальненого параметру β

β	$Re\mu_{ef}$ 10^{-6}	$-Im\mu_{ef}$ 10^{-6}	β	$Re\mu_{ef}$ 10^{-6}	$-Im\mu_{ef}$ 10^{-6}	β	$Re\mu_{ef}$ 10^{-6}	$-Im\mu_{ef}$ 10^{-6}
0,1	999998	002500	3,0	499010	359963	6,8	208698	185790
0,2	999967	005000	3,1	479299	353612	7,0	202690	181122
0,3	999831	011247	3,2	461087	345849	7,2	197017	176769
0,4	999467	019985	3,3	444276	339840	7,4	191655	172434
0,5	998700	031194	3,4	428672	332720	7,6	186577	16386
0,6	997310	044834	3,5	414437	325594	7,8	181763	164520
0,7	995033	060832	3,6	401192	318544	8,0	177193	160824
0,8	991567	079073	3,7	388923	311632	8,2	172848	157287
0,9	98592	099284	3,8	377534	304901	8,4	168713	153901
1,0	979767	121523	3,9	366933	298380	8,6	164771	150650
1,1	970768	145172	4,0	357039	292090	8,8	161011	147542
1,2	959304	169931	4,1	347776	286038	9,0	157419	144554
1,3	945146	195324	4,2	339078	280227	9,2	153984	141683
1,4	928154	220813	4,3	330887	274655	9,4	150696	138923
1,5	908299	245819	4,4	323149	269317	9,6	147546	136266
1,6	885679	269756	4,5	315819	264202	9,8	144525	133711
1,7	860523	292068	4,6	308856	259901	10,0	141625	131248
1,8	833179	312269	4,7	302227	254602	12,0	117967	110800
1,9	804093	329967	4,8	295901	250093	14,0	101087	095949
2,0	773777	344896	4,9	289852	245762	16,0	088436	084439
2,1	742769	356920	5,0	284056	241598	18,0	078600	075451
2,2	711598	366035	5,2	273148	233762	20,0	070734	068189
2,3	680751	372347	5,4	263050	226397	30,0	047140	046029
2,4	650648	376057	5,6	259661	219540	40,0	035355	034730
2,5	621629	377429	5,8	244904	213100	50,0	028284	027884
2,6	593948	376766	6,0	236715	207030	80,0	017678	017521
2,7	567778	374385	6,2	229042	201292	100,0	014142	014042
2,8	543216	370599	6,4	221841	195855	200,0	007071	007046
2,9	520298	365703	6,6	215071	190695			

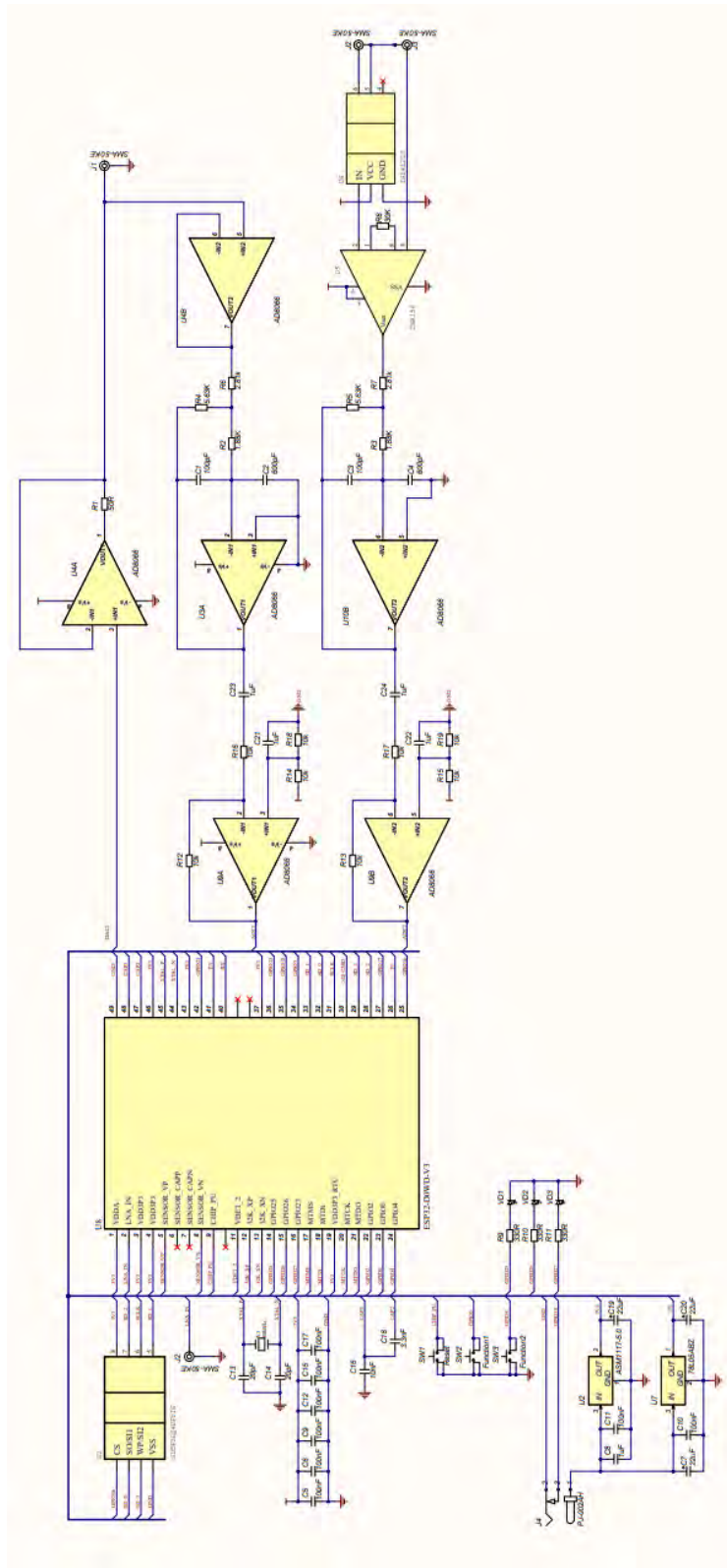
ДОДАТОК Б

Плакат «Структурна схема системи двопараметрового вихрострумowego контролю»



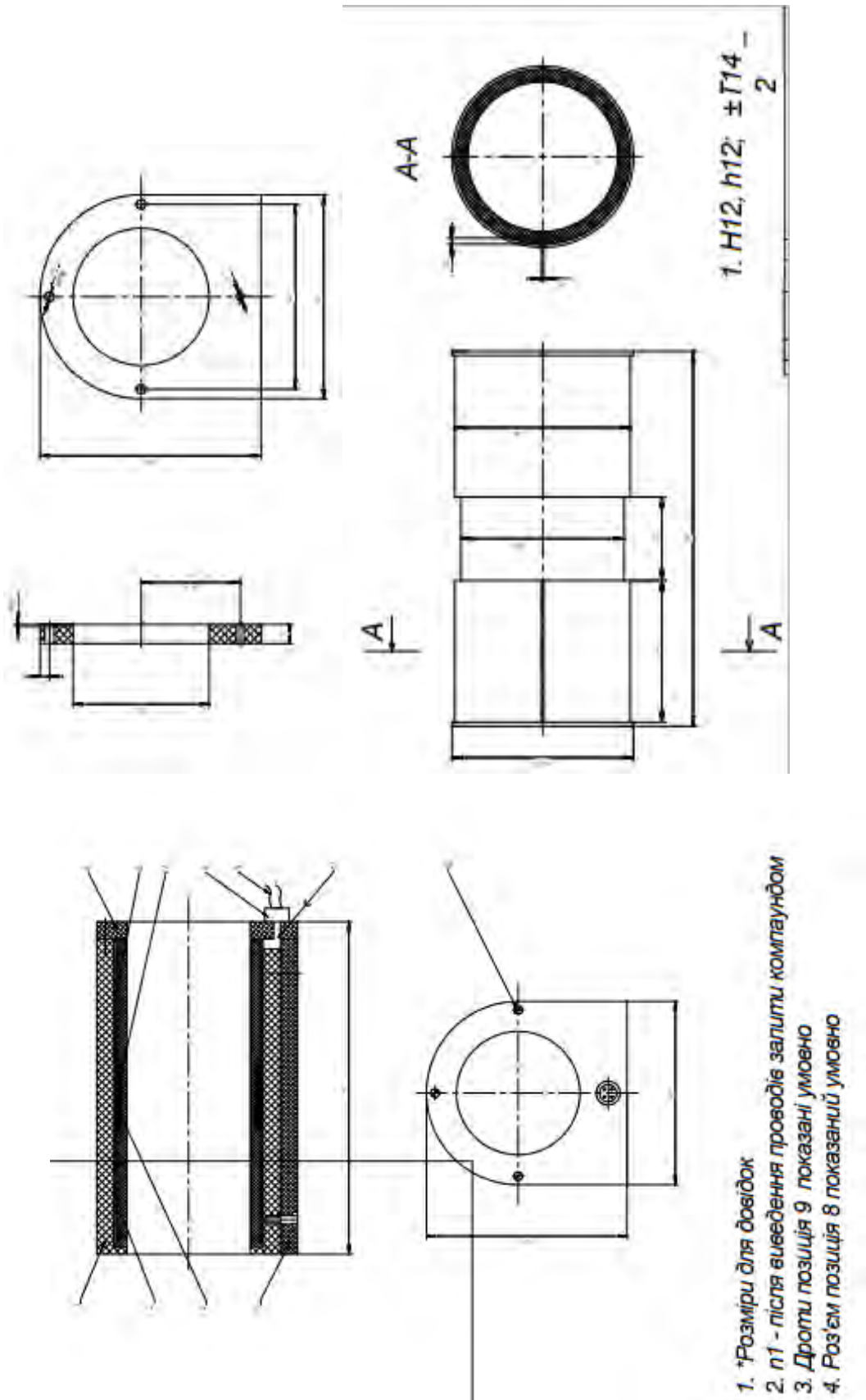
ДОДАТОК В

Плакат «Электрична схема системи двопараметрового вихрострумового контролю»



Додаток Г

«Складальний кресленник вихрострумового Трансформаторного прохідного перетворювач»



ДОДАТОК Д

Список наукових праць

Ф. № 3.3

СПИСОК НАУКОВИХ ПРАЦЬ Романюк Тетяни Анатоліївни

№ з/п	Найменування праць	Назва видавництва, журналу (номер, рік) або номер авторського свідоцтва, номер диплома на винахід	Кількість друкованих аркушів або сторінок разом	Прізвища співавторів праць
1	БАГАТО-ПАРАМЕТРОВИЙ ВИХРОВИЙ КОНТРОЛЬ ВИРОБІВ ЦИЛІНДРИЧНОЇ ФОРМИ	XVI Всеукраїнська наукова практична конференція студентів, аспірантів та молодих вчених «Ефективність та автоматизація інженерних рішень у приладобудуванні» 08-09 грудня 2020 р. М.Київ, Україна	4	-
2	ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ ТЕХНОЛОГІЇ ФАЗОВИХ АНТЕННИХ РЕШТОК	XII Відкрита Всеукраїнська науково-практична конференція студентів, аспірантів та молодих вчених «Погляд у майбутнє приладобудування» 13-14 травня 2020 р. М.Київ, Україна	3	Барановський Дмитро Віталійович

Автор



(підпис)

Тетяна РОМАНЮК

Зав. каф. ПСНК

(підпис)

Анатолій ПРОТАСОВ



Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Кафедра приладів і систем неруйнівного контролю



КОМП'ЮТЕРИЗОВАНА СИСТЕМА БАГАТОПАРАМЕТРОВОГО ВИХРОСТРУМОВОГО КОНТРОЛЮ ВИРОБІВ МАШИНОБУДУВАННЯ

Виконала студентка групи ПК-91 мп
Романюк Тетяна Анатоліївна
Науковий керівник
Куц Юрій Васильович

Київ, 2020 р.

ДОДАТОК Е
Презентація до захисту

Мета, об'єкт та предмет дослідження

Мета дослідження: Огляд актуальних задач багатопараметрового вихрострумowego контролю та розроблення двопараметрового амплітудно-фазового методу вихрострумowego контролю об'єктів циліндричної форми

Об'єкт дослідження: засоби багатопараметрового вихрострумowego контролю виробів машинобудування

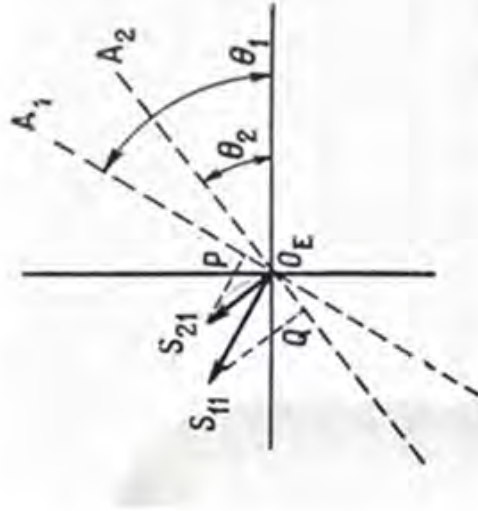
Предмет дослідження: система двопараметрового вихрострумowego контролю циліндричних зразків з ферромагнітних металів

Актуальність теми

Використання вихрострумowego методу стає ще більш актуальним з точки зору інноваційного розвитку різних галузей промисловості, заснованого на використанні новітніх досягнень фундаментальних та прикладних наук, широкому впровадженні нових конструкційних матеріалів, комплексуючих і передових технологічних процесів. Розвиток технології металів, зростання вимог до надійності матеріалів деталей ставлять нові задачі перед неруйнівними випробуваннями. Для їх вирішення необхідні нові методи випробувань, які дозволяють отримати більш повну інформацію про об'єкт контролю. До таких методів відноситься метод багатопараметрових (багаточастотних) вихрострумових випробувань.

Відомі способи багатопраметрового контролю:

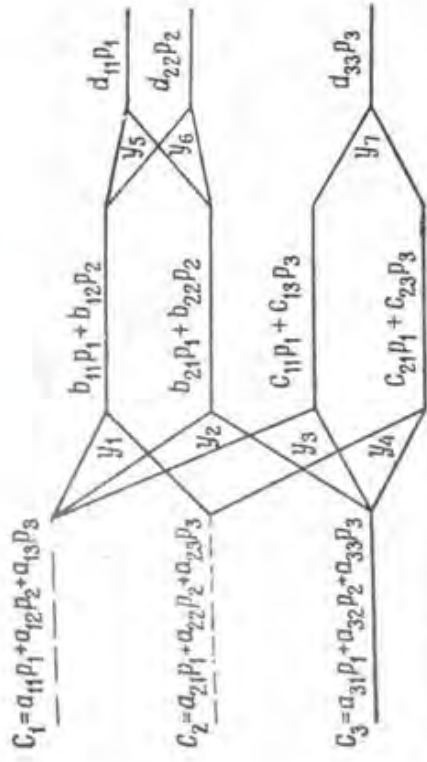
Узагальнення одночастотного метода заснованого на фазовій дискримінації:



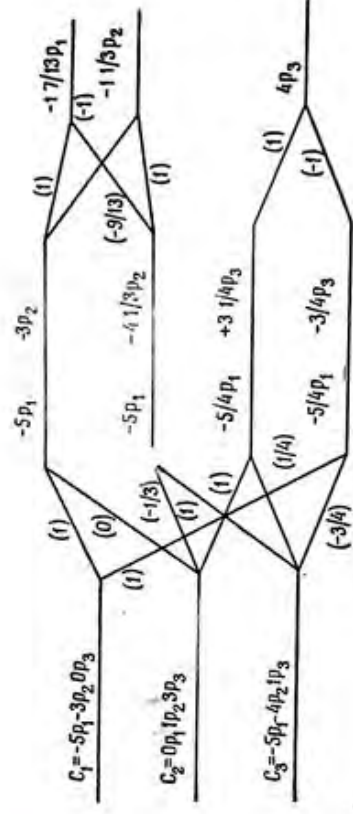
Сигнали вихростумового контролю для одночастотного двопараметрового методу фазової дискримінації.

При роботі на одній частоті зчитується один сигнал за допомогою одного фазового детектора і другий сигнал за допомогою другого фазового детектора. Це можливо навіть в тому випадку, якщо два сигнали виникають одночасно.

Алгебраїчний підхід, заснований на розв'язанні систем рівнянь



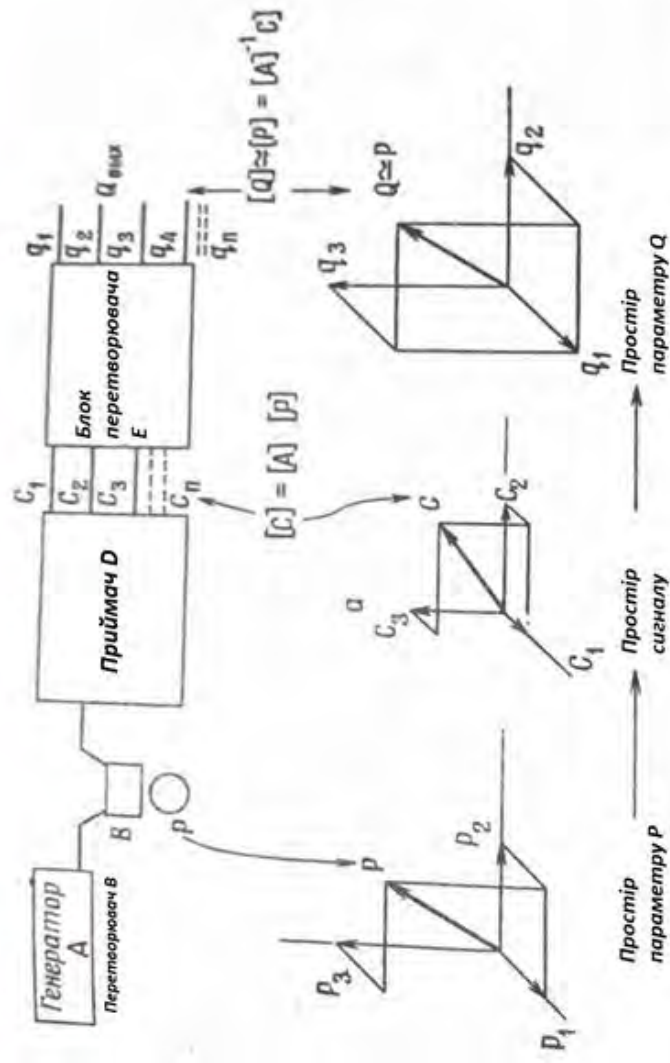
Розділення параметрів;
алгебраїчне уявлення



Лійна діаграма, що зображає розділ параметрів

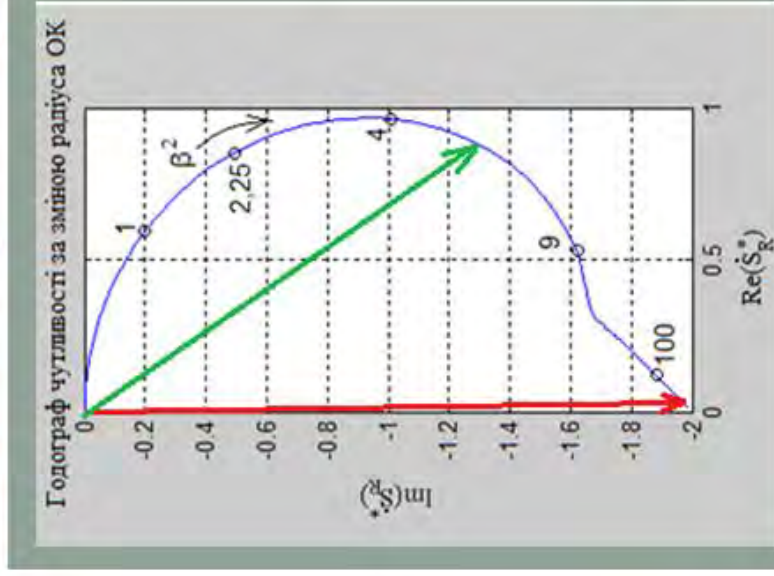
$$\left. \begin{aligned} a_{11}p_1 + a_{12}p_2 + a_{13}p_3 &= c_1 \\ a_{21}p_1 + a_{22}p_2 + a_{23}p_3 &= c_2 \\ a_{31}p_1 + a_{32}p_2 + a_{33}p_3 &= c_3 \end{aligned} \right\}$$

Геометричне представлення

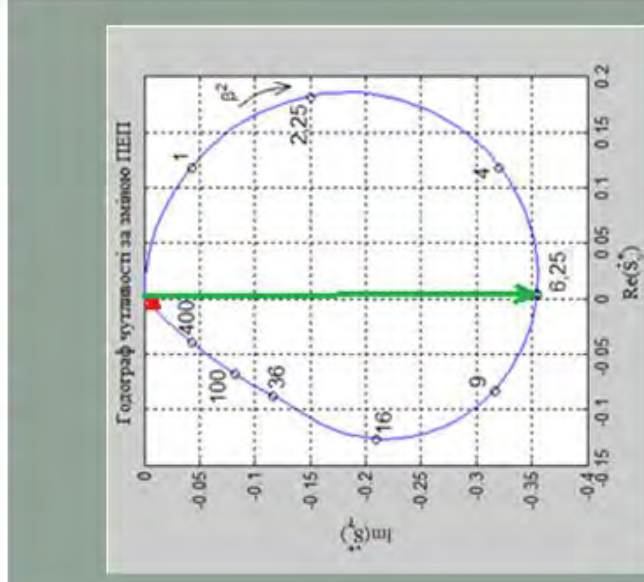


Простір параметрів; перетворення простору сигналів

Ідея запропонованого амплітудно-фазового способу двопараметрового ВСК



Годограф відносної комплексної чутливості до радіусу прутка



Годограф відносної комплексної чутливості до питомої прутка

Основні розрахункові формули

Оскільки згідно завдання матеріал прутка немагнітний, його відносна магнітна проникність $\mu^* = 1$ і аналітичні вирази для цих чутливостей набувають вигляд

$$\dot{S}_R^* = \frac{\partial \dot{U}_{\text{вн}}^*}{\partial R} \cdot R_0 = 0,5 \eta \beta^2 \dot{\mu}_{\text{еф}}^2,$$

$$\dot{S}_\gamma^* = \frac{\partial \dot{U}_{\text{вн}}^*}{\partial \gamma} \cdot \gamma_0 = j \eta (1 - \dot{\mu}_{\text{еф}} - 0,25 \cdot j \beta^2 \dot{\mu}_{\text{еф}}^2)$$

де $\beta = R \sqrt{2 \pi f \mu_0}$ – узагальнений параметр,

$$\dot{\mu}_{\text{еф}}(\beta) = \frac{2}{\dot{\kappa} R} \cdot \frac{I_1(\dot{\kappa} R)}{I_0(\dot{\kappa} R)} - \text{ефективна магнітна проникність,}$$

$$\dot{\kappa} = \sqrt{-j 2 \pi f \mu_0 \gamma} - \text{постійна вихрових струмів,}$$

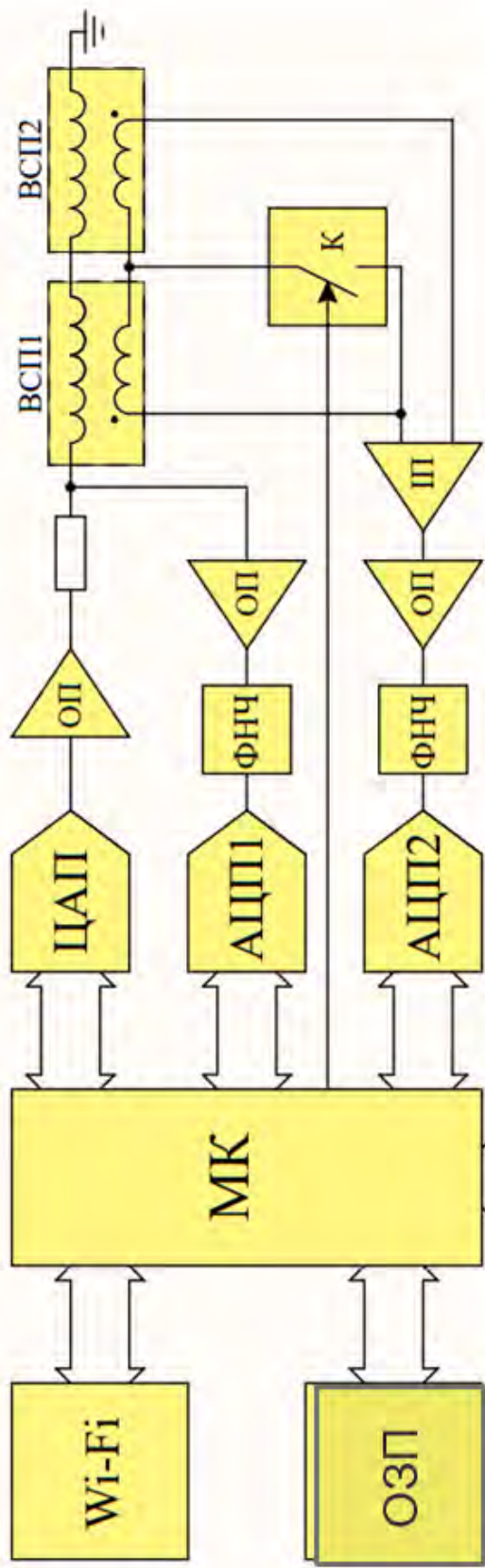
μ_0 – магнітна стала,

$|R_0, \gamma_0$ – номінальні значення відповідно радіусу прутка R і питомої електропровідності матеріалу прутка, за які приймаються, до прикладу максимальні значення цих параметрів.

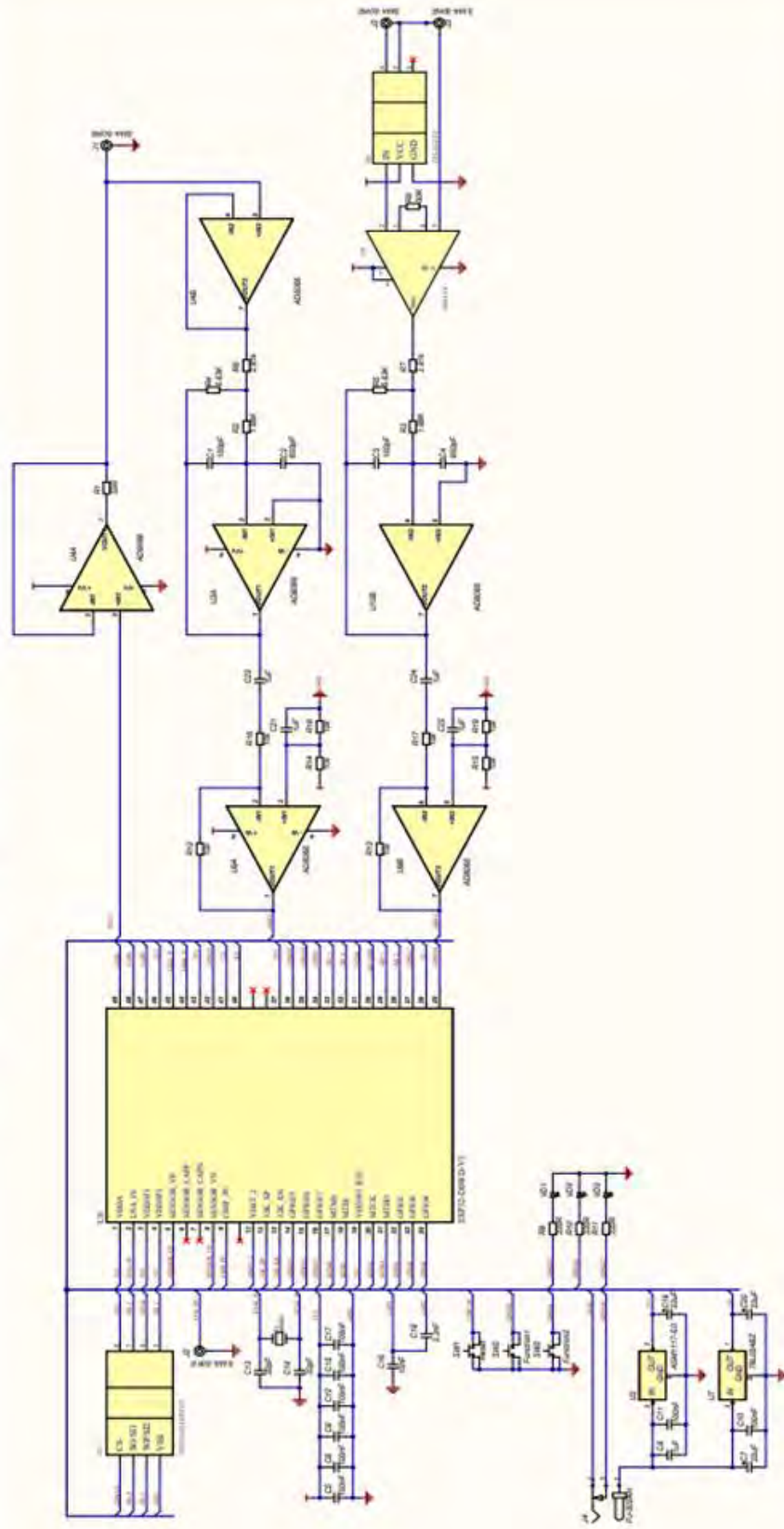
За лінійного наближення з урахуванням (формули 1) отримаємо значення радіусу

$$R = R_0 + \Delta R = R_0 \left(1 + \frac{\Delta \dot{U}_{\text{вн}}^*}{\dot{S}_R^*} \right)$$

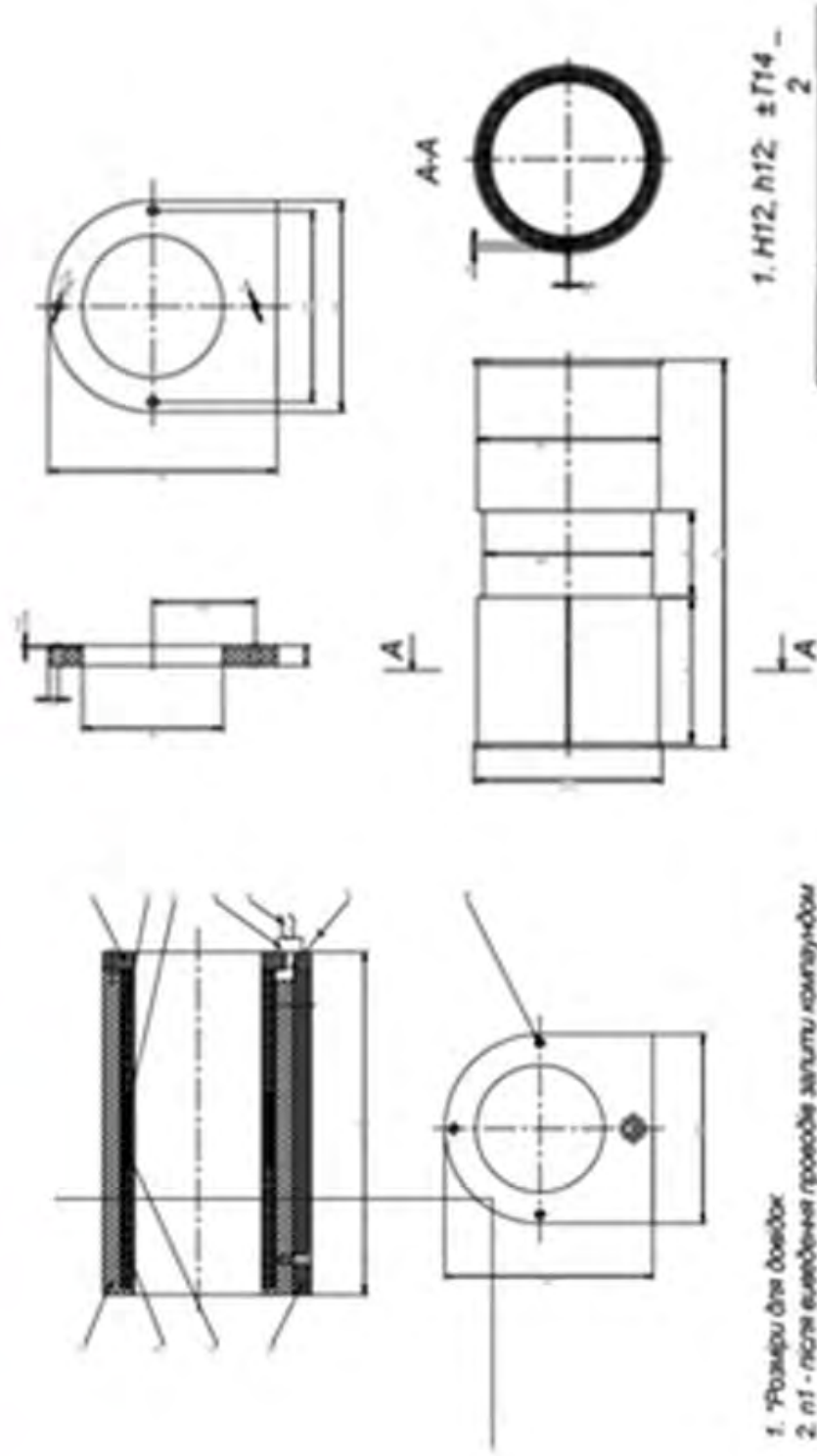
Структурна схема системи двопараметрового вихрострумового контролю



Електрична схема системи двопараметрового вихрострумного контролю



Складальний кресленок вихрострумового Трансформаторного прохідного перетворювач



1. Розміри для доводок
2. $n1$ - після введення провідів залити компаундом
3. Дроти позиція 9 показані умовно
4. Роз'єм позиція 8 показаний умовно

ВИСНОВКИ

- 1) Проаналізовано відомі методи опрацювання сигналів для багатопараметрового ВСК
- 2) Запропоновано використання амплітудно-фазового методу двохпараметрового ВСК, в якому амплітудний метод застосовано на верхній частоті для визначення діаметру прутка, а фазовий метод – на низькій частоті для визначення питомої електропровідності матеріалу прутка.
- 3) Розроблено структурну схему та принципіальну схему вихрострумowego дефектоскопа, що реалізує запропонований метод двопараметрового контролю.
- 4) Сформовано рекомендації щодо впровадження розробленого проекту у виробництво.