

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

Приладобудівний факультет

Кафедра приладів та систем неруйнівного контролю

До захисту допущено:

Завідувач кафедри

_____ Анатолій ПРОТАСОВ

«__» _____ 2020 р.

Дипломний проєкт

на здобуття ступеня бакалавра

за освітньо-професійною програмою «Комп'ютерно-інтегровані системи та технології неруйнівного контролю і діагностики»

спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

на тему: «Портативний вихрострумний дефектоскоп»

Виконав:

Студент IV курсу, групи ПК-61

Маляр Артем Миколайович _____

Керівник:

К.т.н., доцент

Петрик Валентин Федорович _____

Консультант з графічного розділу:

Старший викладач, к.т.н.,

Богдан Галина Анатоліївна _____

Рецензент:

К.т.н., доцент

Мокійчук Валентин Михайлович _____

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

Студент (-ка) _____

Київ – 2020 року

ВІДОМІСТЬ ДИПЛОМНОГО ПРОЄКТУ

№ з/п	Формат	Позначення	Найменування	Кількість листів	Примітка
1	A4		Завдання на дипломний проєкт	2	
2	A4	ДП 61.10.0000.000 ПЗ	Пояснювальна записка	53	
3	A2	ДП ПК61.10.00.001 СК	Складальний кресленик. Трансформаторний вихрострумний перетворювач	1	
4	A3	ДП ПК61.10.00.002 СК	Каркас котушки	1	
5	A3	ДП ПК61.10.00.003 СК	Кришка	1	
6	A0	ДП ПК61.100000 ЕЗ	Схема електрична принципова	1	
7	A4	ДП ПК61.100000 Е1	Схема структурна	1	
8	A3	ДП ПК61.100000 Е2	Схема функціональна	1	

				ДП ПК61 10.000.00		
		ПІБ	Підп.	Дата		
Розробн.	Маляров А.М.				Лист	Листів
Керівн.	Петрик В.Ф.				1	1
Консулт.					Відомість дипломного проєкту КПІ ім. Ігоря Сікорського Каф. ПСНК Гр. ПК-61	
Н/контр.	Лашко О.В.					
Зав.каф.	Протасов А.Г.					

**Пояснювальна записка
до дипломного проєкту на тему: Портативний
вихрострумний дефектоскоп**

Київ – 2020 року

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

Приладобудівний факультет

Кафедра приладів та систем неруйнівного контролю

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

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

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

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Анатолій ПРОТАСОВ

«__» _____ 2020 р.

ЗАВДАННЯ

на дипломний проєкт студенту

Маляров Артем Миколайович

1. Тема проєкту «Портативний вихрострумний дефектоскоп», керівник проєкту Петрик Валентин Федорович, к.т.н., доцент, затверджені наказом по університету від «25» травня 2020 р. №1180-с

2. Термін подання студентом проєкту 13.06.2020

3. Вихідні дані до проєкту: Розробити портативний вихрострумний дефектоскоп для контролю прокатно-листового металу.

4. Зміст пояснювальної записки:

Вступ

1. Аналітичний огляд

2. Бездротові системи зв'язку

3. Розрахунок портативного вихрострумного дефектоскопу

4. Вибір апаратної частини приладу

Висновок

Список використаних джерел

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

1)Складальний кресленик. Трансформаторний вихрострумний перетворювач.

2)Каркас котушки.

3)Кришка.

4)Схема електрична принципова.

5)Схема функціональна.

6)Схема структурна.

6. Консультанти розділів проєкту*

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Графічний	Богдан Г. А.		
Електричний	Баженов В. Г.		

7. Дата видачі завдання 11.03.2020

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проєкту	Термін виконання етапів проєкту	Примітка
1	Формулювання завдання проєкту	12.03.2020	
2	Проведення аналітичного огляду	18.04.2020	
3	Розрахунок компонентів	15.05.2020	
4	Оформлення пояснювальної записки	30.05.2020	
5	Розробка креслеників	03.06.2020	

Студент

Артем МАЛЯРОВ

Керівник

Валентин ПЕТРИК

* Якщо визначені консультанти. Консультантом не може бути зазначено керівника дипломного проєкту.

Анотація

На дипломний проєкт студента четвертого курсу групи ПК-61 Малярова Артема з теми: «Портативний вихрострумний дефектоскоп».

У цьому дипломному проєкті був розроблений портативний багаточастотний вихрострумний дефектоскоп для контролю прокатно-листового металу.

В першому розділі були представлені загальні теоретичні відомості вихрострумного контролю. Також наведені теоретичні відомості про класифікацію вихрострумних перетворювачів.

У другому розділі цього дипломного проєкту було представлено теоретичні відомості про бездротові системи зв'язку. Наведені типи та види бездротового зв'язку, а також їх переваги та недоліки.

В розрахунковій частині проєкту представлені розрахунки самого вихрострумного перетворювача, а саме: трансформаторного накладного перетворювача. Проведені розрахунки для багаточастотного вихрострумного дефектоскопу для контролю об'єктів різної товщини. Також підібрані мікроконтролер, АЦП, розраховані коефіцієнти підсилення та похибки.

Останній розділ описує апаратну частину приладу. Наведена структурна схема та опис її роботи. Описані компоненти прилади та наведені їх опис та загальний вид.

Annotation

On the diploma project of the fourth-year student of group PK-61 Maliarov Artem on the topic: "Portable eddy current flaw detector".

In this diploma project, a portable multi-frequency eddy current flaw detector for the control of rolled sheet metal was developed.

In the first section the general theoretical data of eddy current control were presented. Theoretical information on the classification of eddy current converters is also given.

The second section of this dissertation presented theoretical information about wireless communication systems. The types and types of wireless communication, as well as their advantages and disadvantages.

The calculation part of the project presents the calculations of the eddy current converter, namely: transformer overhead converter. Calculations were performed for a multi-frequency eddy current flaw detector to control objects of different thickness. Also selected microcontroller, ADC, calculated gain and error.

The last section describes the hardware of the device. The structural scheme and the description of its work are resulted. The components of the device are described and their description and general appearance are given.

ЗМІСТ

ВСТУП	9
РОЗДІЛ 1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД	11
1.1. Загальна характеристика вихрострумовим методам контролю ...	11
1.2. Класифікація вихрострумових перетворювачів	15
РОЗДІЛ 2. БЕЗДРОТОВІ СИСТЕМИ ЗВ'ЯЗКУ	25
РОЗДІЛ 3. РОЗРАХУНОК ПОРТАТИВНОГО ВИХРОСТРУМОВОГО ДЕФЕКТΟΣКОПА	30
3.1. Розрахунок системи ВСП – ОК	30
3.2. Підбір мікроконтролера	43
3.3. Підбір АЦП	44
3.4. Розрахунок підсилювача	45
3.5. Розрахунок похибок	48
3.5.1. Розрахунок похибки АЦП	48
3.5.2. Розрахунок похибки підсилювача	48
РОЗДІЛ 4. ВИБІР АПАРАТНОЇ ЧАСТИНИ ПРИЛАДУ	50
ВИСНОВОК	53
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	54

					<i>ПК61.100000.000 ПЗ</i>			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.		Маляров А.М.			<i>Портативний вихрострумовий дефектоскоп</i>	Лім.	Арк.	Акрушів
Перевір.		Петрик В.Ф.					7	58
Н. Контр.						<i>ПБФ, ПК-61</i>		
Затверд.		Петрик В.Ф.						

ВСТУП

Сучасний розвиток технології дає можливість знайти нові способи, що забезпечують придбання, перетворення та передачу інформації через різні канал зв'язку.

Однією з головних проблем є перевірка якості виробу без руйнування його окремих деталей та частин. Тому однією з найголовніших складових цієї перевірки є неруйнівний контроль, тому що саме він забезпечує подальше функціонування приладу без порушень.

Застосування НК забезпечує необхідний фактичний запас міцності і надійності машин і механізмів при одночасному зниженні кількості матеріалів і маси.

Методи НК використовуються для товщинометрії, для вимірювання товщини стінок труб, товщини стрічок і листів, діаметра дроту і прутків, товщини покриттів, для структуроскопії, для визначення хімічного складу сплавів, для контролю термічної і механічної обробки матеріалів, а також для дефектоскопії, тобто. для виявлення порушень суцільності в контрольованому виробі.

З огляду на необхідність отримання величезних масивів інформації при контролі багатьох виробів все ширше впроваджуються автоматизовані і роботизовані системи НК. Особливо перспективні контрольні-діагностичні автомати там, де людині незручно або небезпечно перебувати, наприклад при контролі дуже великих поверхонь, в умовах високої радіації, підвищених температур, агресивних середовищ, космосу і т.д.

Точність роботи таких систем залежить від чутливості і роздільної здатності входять до них вимірювальних каналів і перетворювачів інформації. Робота багатьох приладів заснована на проведенні відносних вимірювань: їх похибки залежать від відтворюваності показань і точності еталонів фізичних

					<i>ПК61.100000.000 ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
						9
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

величин, використовуваних під час градуювання і калібрування вимірювальних схем. Автоматизація градуювання і калібрування вимірювальних схем разом з вбудованою автодіагностикою отримує все більш широке поширення в системах НК.

Тому метою даної роботи є створення портативного вихрострумового дефектоскопу для контролю прокатно-листового металу різної товщини.

					<i>ПК61.100000.000 ПЗ</i>	Арк.
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		<i>10</i>

РОЗДІЛ 1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД

1.1. Загальна характеристика вихрострумових методів контролю

В основі НК методом вихрових струмів (МВС) лежить відношення інтенсивності і розподілу вихрових струмів в контрольованому об'єкті від його геометричних, електромагнітних (і пов'язаних з ними) параметрів і від розміщення вимірювального перетворювача (ВП) і об'єкта контролю. У ВП застосовуються зазвичай індуктивні котушки (одна або кілька). Змінний струм, який діє в котушках ВП, створює електромагнітне поле, яке збуджує вихрові струми в електропровідному об'єкті контролю. Електромагнітне поле вихрових струмів впливає на котушки ВП, що викликає в них ЕРС або змінює їх повний опір. Таким чином, фіксуючи напругу на затискачах котушок ВП або їх опір, одержують інформацію про характеристики контрольованого об'єкта або про становище ВП щодо нього.

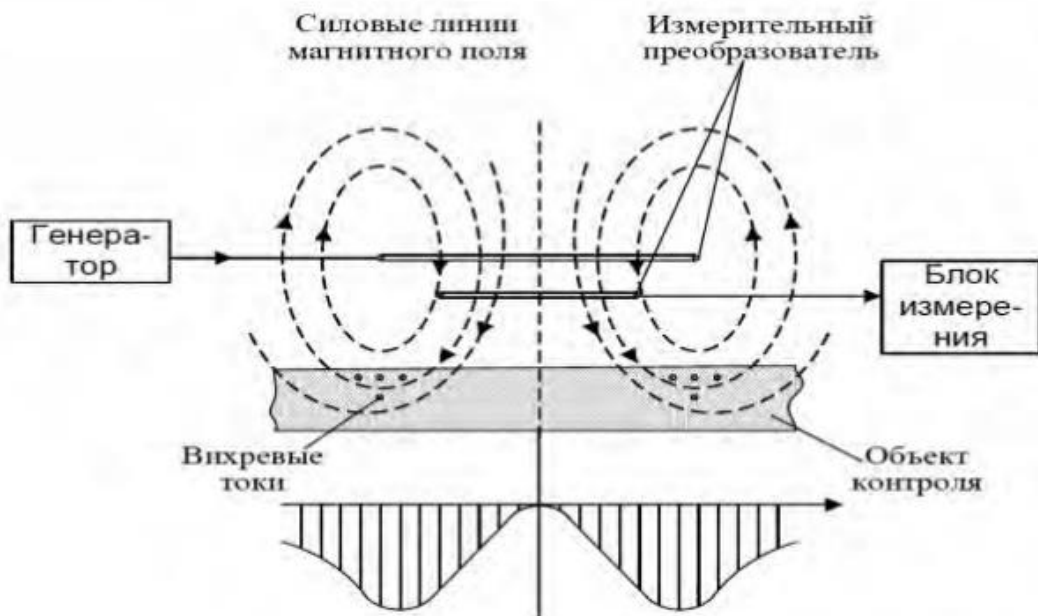


Рис. 1.1. Загальна схема вихрострумового контролю

На рис. 1.1 наведена узагальнена схема функціоналу вихрострумового контролю. Вимірювальний перетворювач складається з збудливою обмотки,

					ПК61.100000.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		11

підключеної до генератора змінного струму, і вимірювальної обмотки, підключеної до блоку вимірювання. Магнітне поле ВП збуджує в плоскому об'єкті контролю концентричні вихрові струми, щільність яких найбільша на поверхні електропровідного об'єкта в контурі, діаметр якого приблизно дорівнює діаметру збудливою обмотки. Магнітне поле вихрових струмів протилежно первинному магнітному полю збудливою обмотки, внаслідок цього результуюче поле залежить від електромагнітних властивостей контрольованого об'єкта і від відстані між перетворювачем і об'єктом (від зазору), оскільки розподіл щільності вихрових струмів залежить від цих чинників. У вимірювальній обмотці перетворювача наводиться ЕРС, що визначається потокозчепленням. Ця ЕРС служить сигналом, що передає інформацію про об'єкт в блок виміру.

Зауважимо, що ЕРС (або напруга) вимірювальної обмотки несе інформацію не тільки про один параметр об'єкта контролю. У розглянутому нами випадку це напруга залежить від товщини листа T , від його питомої електричної провідності, від магнітної проникності, від стану поверхні, від наявності і розмірів дефектів, від зазору і орієнтації осі перетворювача і від швидкості його руху щодо листа. Величина E в свою чергу визначаються багатьма факторами, наприклад хімічним складом і структурним станом матеріалу листа, його температурою, наявністю механічних напружень в ньому і т. д. Таким чином, інформація вихрострумів перетворювачів (ВСП) має багатопараметровий характер. Високий ступінь інформативності ВСП визначає переваги та недоліки реалізації МВС. З одного боку, МВС дозволяє здійснювати багатопараметровий контроль, з іншого боку, він вимагає застосування спеціальних прийомів для поділу інформації на окремі параметри об'єкта. При контролі одного з параметрів вплив інших на сигнал перетворювача створює заваду, і цей вплив необхідно зменшувати.

Інша виключність МВС складається в його безконтактність. Взаємодія ВП з об'єктом відбувається зазвичай на невеликих відстанях, але достатніх для вільного руху ВП щодо об'єкта (від мікрометрів до декількох міліметрів). МВС

					<i>ПК61.100000.000 ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		12

дозволяє одержувати результати при таких швидкостях руху об'єктів контролю, які практично недоступні іншим методам. Як правило, при електромагнітному контролі обмеження швидкості накладаються не самим методом, а обмеженим швидкодією реєстраторів інформації або пристроїв, що сортують. Наслідком цього є висока продуктивність МВС.

Одержання початкової інформації у виді електричних сигналів, безконтактність і велика швидкодія МВС обумовлюють великі можливості автоматизації контролю.

Одна з важливих особливостей МВС полягає в слабкій залежності результатів контролю від параметрів навколишнього середовища. Багато видів ВСП нечутливі до коливань температури навколишнього середовища (але не об'єкта контролю).

Простота конструкції ВСП - одне з важливих переваг МВС. Переважно котушки ВСП поміщаються в запобіжний корпус і заливаються компаундами. Внаслідок чого вони досить стійкі до механічних і атмосферних впливів, можуть працювати в агресивних середовищах в досить великому діапазоні температур і тисків. Особливості МВС, що обмежують області його застосування, визначаються наступними обставинами. По-перше, МВС, оскільки він базується на збудженні вихрових струмів, використовується переважно для контролю якості електропровідних об'єктів: металів, сплавів, графіту, напівпровідникових структур. З цієї точки зору він значно поступається акустичному, радіаційного, теплового, капілярному, оптичному видам НК. По-друге, МВС властива мала глибина зони контролю, обумовлена глибиною проникнення в контрольовану середу електромагнітного поля. Через скін-ефекту ця глибина не перевищує зазвичай декількох міліметрів.

					<i>ПК61.100000.000 ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		<i>13</i>

Незважаючи на зазначені обмеження, МВС має широкі області застосування у трьох напрямках НК: дефектоскопії, товщинометрії і структуроскопії.

У дефектоскопії МВС застосовується для виявлення дефектів, що виходять на поверхні або залягають на невеликій глибині під поверхнею в електропровідних листах, прутках, трубах, дроті, в дрібних деталях, в деталях турбін, в металоконструкціях, двигунах внутрішнього згорання, залізничних рейках і т. д. Виявляються такі дефекти, як різноманітні тріщини, розшарування, заходи, полон, раковини, неметалеві включення і т. д. Мінімальні розміри дефектів виявляються в значній мірі залежать від впливу заважають контролю чинників: від варіації електричних і магнітних властивостей і геометрії об'єкта, від нерівностей його поверхні. При сприятливих умовах контролю і застосуванні придушення впливу чинників, що заважають вдається виявити тріщини глибиною 0,1-0,2 мм довжиною 1-2 мм (при використанні накладного перетворювача) або тріщини глибиною 2-5% діаметра контрольованої дроту, прутка і протяжністю близько 1 мм.

МВС дозволяє успішно вирішувати багато завдань товщинометрії. Завдяки цьому методу вимірюють діаметр дроту, прутків і труб, товщину металевих листів і стінок труб при односторонньому доступі, товщину електропровідних (наприклад, гальванічних) і діелектричних (наприклад, лакофарбових) покриттів на електропровідних підставах, товщину шарів багат шарових структур (що містять електропровідні шари). Вимірювані товщини коливаються в межах від одиниць мікрон до десятків міліметрів. Точність вимірювання визначається ступенем впливу чинників, що заважають, але для більшості приладів знаходиться в межах 5-10%. За точністю електромагнітні товщиноміри зазвичай поступаються ультразвуковим, проте їх перевага в простоті, безконтактності і можливості вимірювання малої товщини (одиниці мікрон) робить їх цілком конкурентоспроможними. Мінімальна площа зони контролю може бути

					<i>ПК61.100000.000 ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		<i>14</i>

доведена до 1 мм², що дозволяє вимірювати товщину покриття на малих деталях і деталях складної конфігурації (наприклад, на голівці кріпильного гвинта).

У структуроскопії МВС грає важливу роль. Справа в тому, що структурний стан металів і сплавів значно впливає на їх електромагнітні характеристики. Завдяки цьому виявляється можливим контролювати не тільки варіації хімічного складу, але і структуру металів і сплавів, а також наявність механічної напруги в них. Відомо широке застосування вихрострумівих вимірників питомої електричної провідності і інших приладів для сортування по маркам (за хімічним складом). За допомогою електромагнітних приладів контролюють якість термічної і хіміко-термічної обробки деталей, стан поверхневих шарів після механічної обробки (шліфування, наклеп), виявляють залишкові механічні напруги, виявляють втомні явища в металах на ранніх стадіях їх розвитку, виявляють наявність -фази і т. д. На жаль, в деяких випадках зв'язок контрольованого параметра з показаннями електромагнітних приладів виявляється досить складним, що залежить від впливу багатьох чинників, що заважають. Тому при структуроскопії МВС потрібно ретельне відпрацювання методики контролю.[1-4]

1.2 Класифікація вихрострумівих перетворювачів

За робочим положенням, щодо об'єкта контролю перетворювачі ділять на прохідні, накладні і комбіновані. Як правило накладні ВСП являють собою одну або кілька котушок, до торців яких підводиться поверхня об'єкта (рис. 1.2). Котушки цих перетворювачів бувають круглими коаксіальними (рис. 1.2, а), прямокутними (рис. 1.2, б), прямокутними хрестоподібними (рис. 1.2, в), з взаємно перпендикулярними осями (рис. 1.2, г) та ін.

					<i>ПК61.100000.000 ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		15

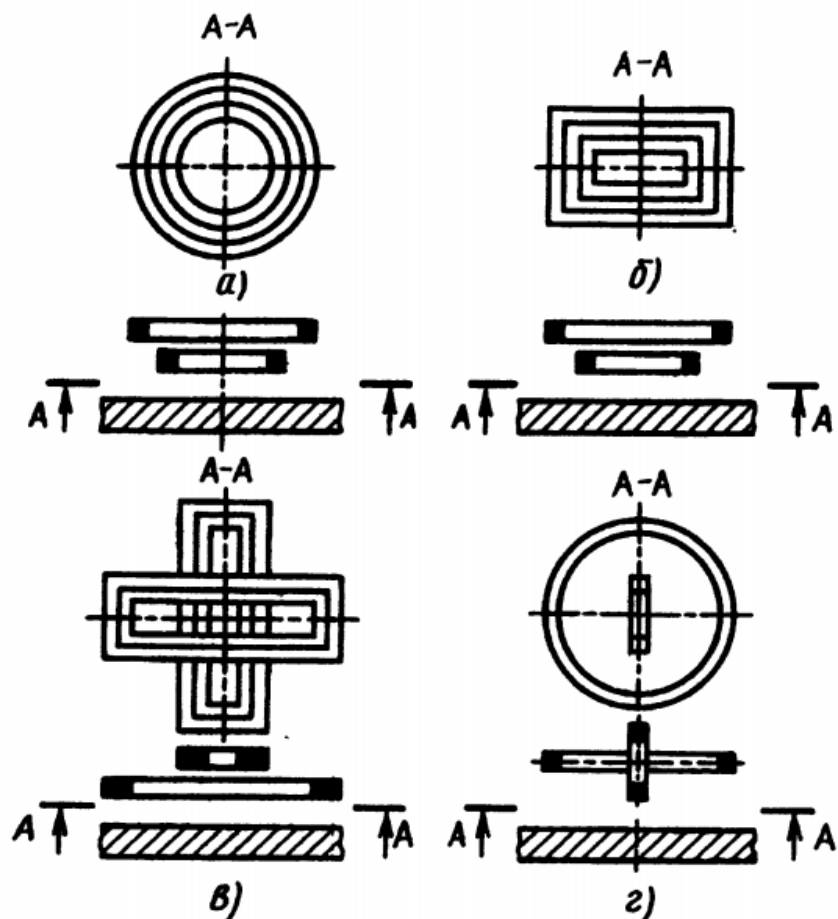


Рис. 1.2. Накладні перетворювачі

Накладні перетворювачі виробляють з феромагнітними сердечниками або без них. Завдяки феромагнітного осердя (зазвичай феритовому) зростає абсолютна чутливість перетворювача і зменшується зона контролю завдяки локалізації магнітного потоку. На рис. 1.3 приведені деякі типи перетворювачів з сердечниками. Тут $2R$ - еквівалентний геометричний параметр ВСП, що входить в формулу для визначення узагальненого параметра контролю β .

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

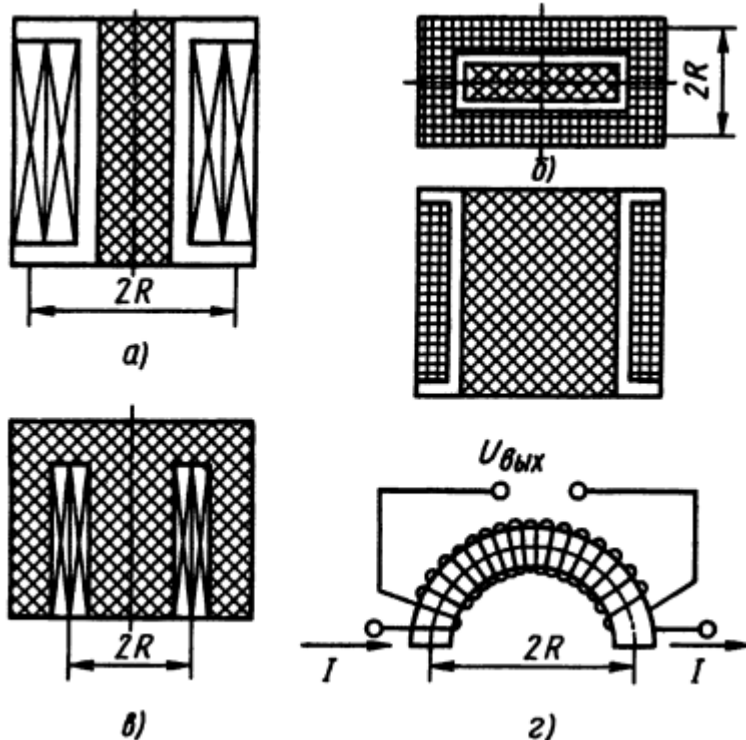


Рис. 1.3. Накладні перетворювачі з сердечниками: а – циліндричний; б – прямокутний; в – полуброневого типу; г – у вигляді полутороїда

Прохідні ВСП ділять на зовнішні, внутрішні, заглибні. Основною відмінністю прохідних ВСП є те, що коли проводиться контроль, вони проходять або зовні об'єкта, охоплюючи його (зовнішні, рис. 1.4, а - в), або всередині об'єкта (внутрішні, рис. 1.4, г, д), або занурюються в рідкий об'єкт (заглибні, рис. 1.4, е, ж). Найчастіше прохідні ВСП мають однорідне магнітне поле в зоні контролю, в результаті чого радіальні зміщення однорідного об'єкта контролю не впливають на вихідний сигнал перетворювача. Для цього довжина L_v , збуджувальної обмотки повинна не менше ніж в 3 ... 4 рази перевищувати її діаметр D_v , а довжина L_i , вимірювальної обмотки, розміщеної в середині збуджуючої обмотки, мусить бути набагато меншою за довжину останньої. Однорідне поле одержують також, використовуючи збуджувальну обмотку, яка виконана у вигляді кільця Гельмгольца, а вимірювальну - у вигляді короткої котушки, причому $L_i \ll 2d$, $D_i \ll 2d$ (рис. 1.4, в).

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

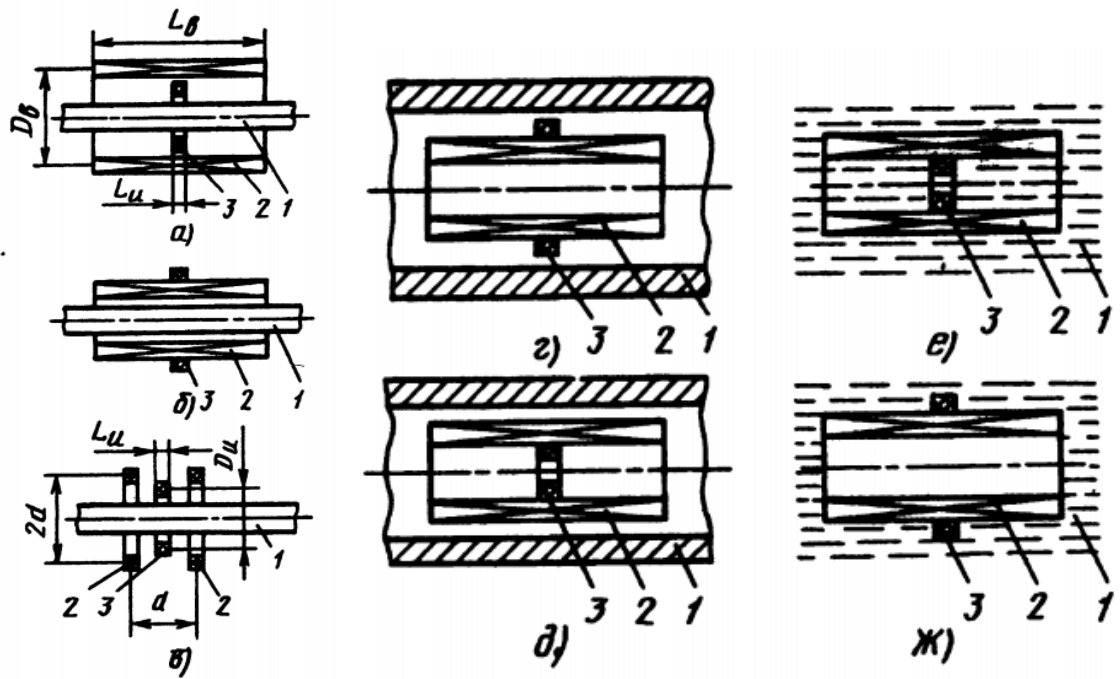


Рис. 1.4 Прхідні ВСП: 1 – ОК;

2, 3 – збуджуюча і вимірювальна котушки відповідно

Комбіновані перетворювачі являють собою комбінацію накладних і прохідних ВСП. На рис. 1.5, а показані деякі різновиди комбінованих ВСП. До них належать також ВСП у вигляді лінійно-протяжних витків або рамок, які зазвичай називають лінійними (рис. 1.5, б).

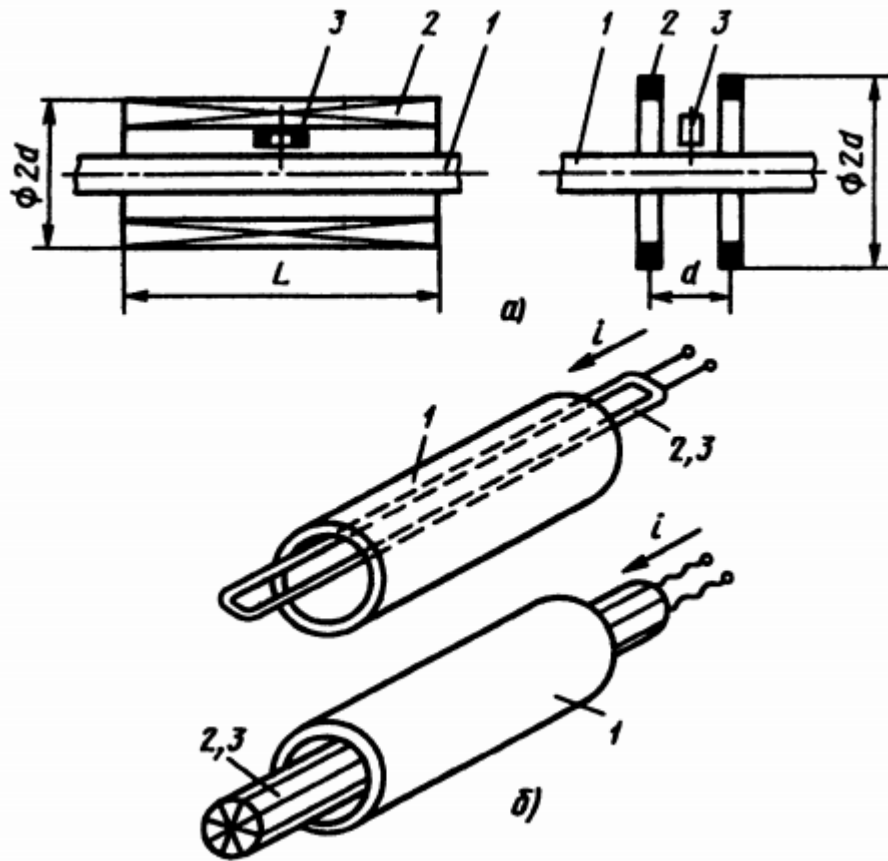


Рис. 1.5. Комбіновані ВСП (позиції див. на рис. 2.3): а – з прохідною збуджуючою та накладною вимірювальними обмотками; б – лінійні

Досить сильно відрізняються собою екранні ВСП. Їх збуджують вимірювальні обмотки, які розділені контрольованим об'єктом. Розрізняють накладні екранні (рис. 1.6, а) і прохідні екранні ВСП - відповідно перетворювачі першого і другого типів (рис. 1.6, б, в).

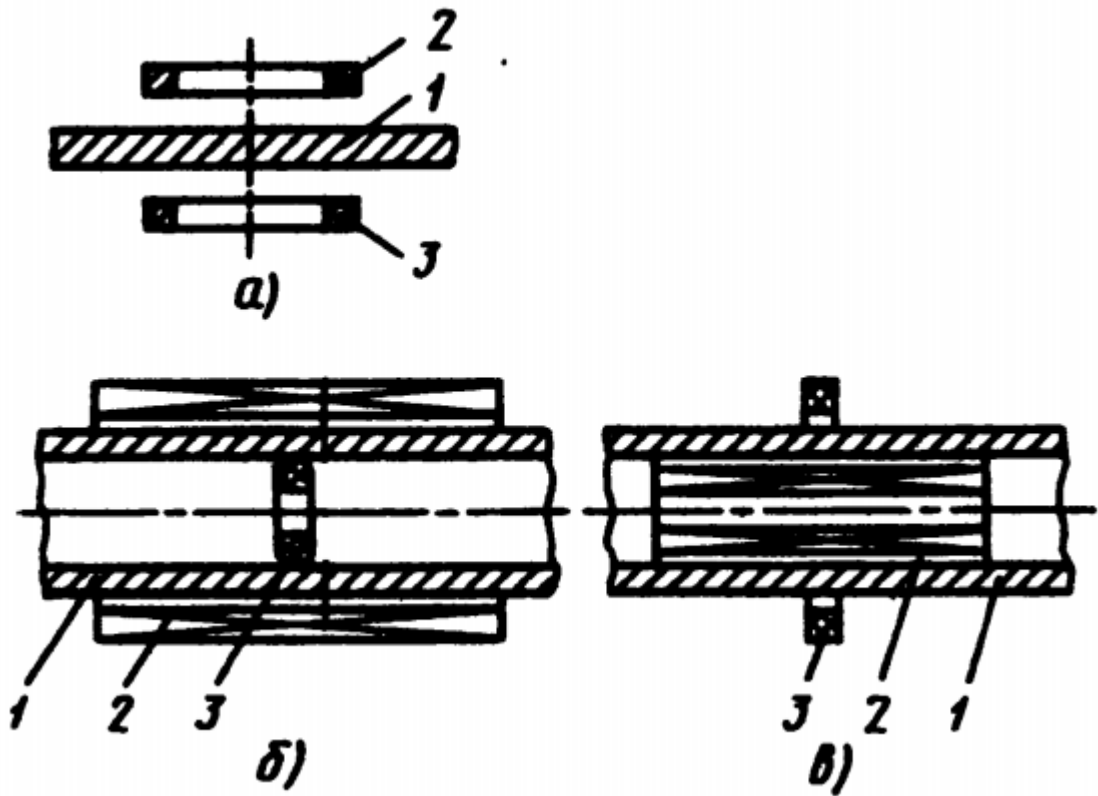


Рис. 1.6. Накладний (а) і прохідний екранний ВСП першого (б) і другого (в) типів (позиції див. на рис. 1.4)

За видом перетворення параметрів об'єкта контролю у вихідний сигнал ВСП ділять на трансформаторні і параметричні. У трансформаторних, які зазвичай мають як мінімум дві обмотки (збудливу і вимірвальну), параметри об'єкта контролю перетворюються в напругу вимірвальної обмотки, а в параметричних, що мають, як правило, одну обмотку, - в комплексний опір. Основною перевагою цих ВСП є їх простота, а недоліком є співвідношення вихідного сигналу до температури перетворювача.

За способом з'єднання обмоток відрізняють абсолютні і диференціальні ВСП.

Вихідний сигнал абсолютного ВСП визначається абсолютним значенням параметрів об'єкта, а диференціального - змінами цих параметрів. На рис. 1.7 наведені схеми прохідних трансформаторних ВСП (на рис. 1.7, а показана схема

абсолютного ВСП, а на рис. 1.7, б - диференціального). Вихідний сигнал диференціального ВСП залежить і від абсолютних значень параметрів об'єкта, але при малих збільшеннях цих параметрів можна вважати, що він визначається тільки приростами.

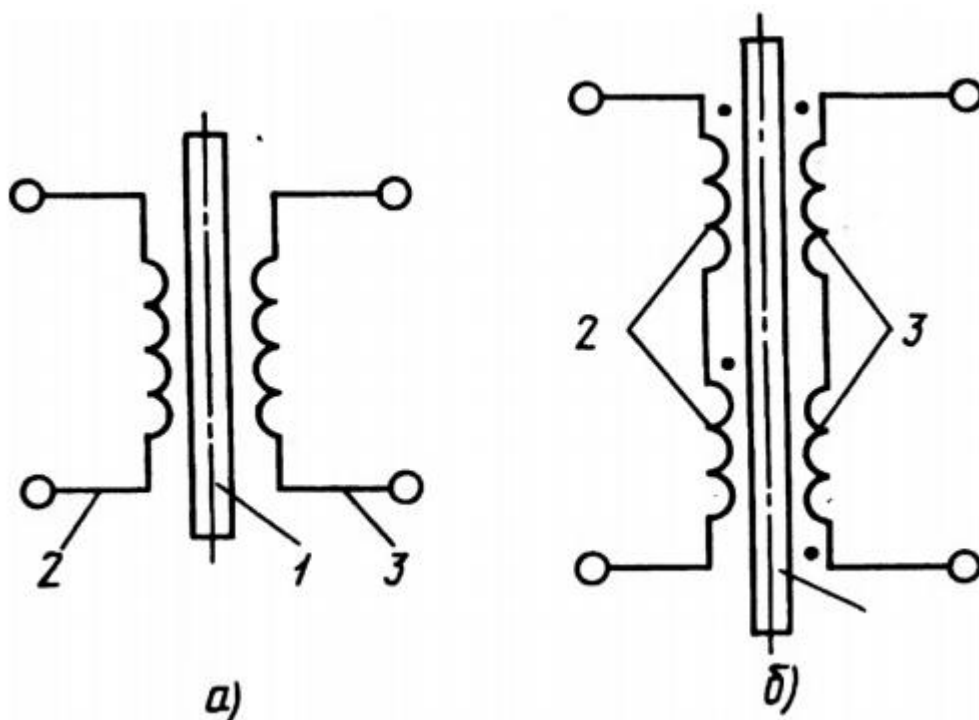


Рис. 1.7. Схеми прохідних трансформаторних ВСП
(позиції див. на рис. 1.4)

Накладними ВСП зазвичай контролюють об'єкти, які мають складну форму та об'єкти з плоскою поверхнею. Ці перетворювачі застосовують, коли необхідно зберегти локальність і велику чутливість контролю. Зовнішніми прохідними ВСП контролюють лінійно-протяжні об'єкти (дріт, прутки, труби і т. д). Внутрішніми прохідними ВСП контролюють внутрішні поверхні труб, а також стінки отворів в різних деталях. За допомогою прохідних ВСП можна отримати інтегральну оцінку контрольованих параметрів по периметру об'єкта, тому завдяки ним можна отримати меншу чутливість до локальних варіацій його властивостей.

Занурювальні ВСП застосовують для контролю рідких середовищ, екранні накладні - для контролю листів, фольги, тонких плівок, а екранні прохідні - для контролю труб.

Завдяки диференціальним ВСП «самопорівняння» можна значно збільшити відношення сигнал / перешкода в дефектоскопії. При цьому обмотки перетворювача розташовують так, щоб їх сигнали виходили від близько розміщених ділянок контролю одного об'єкта. Завдяки цьому можна скоротити вплив повільних змін електрофізичних і геометричних параметрів об'єктів. При застосуванні прохідних перетворювачів з однорідним магнітним полем в зоні контролю значно послаблюється вплив радіальних переміщень об'єкта. Застосовуючи екранні накладні перетворювачі, можна практично виключити вплив зсувів об'єкта між збуджувальною і вимірювальною обмотками. Перетворювачі з взаємно перпендикулярними осями обмоток (див. рис. 1.2, г) нечутливі до зміни електрофізичних характеристик однорідних об'єктів. При порушенні однорідності об'єкта, наприклад при появі тріщин, на виході перетворювача виникає сигнал. Подібно працюють і комбіновані перетворювачі (див. рис. 1.5, а, б). Їх також застосовують в дефектоскопії, Але недоліком є сильний вплив перекосів осей перетворювачів щодо поверхні об'єктів контролю.

Щоб зменшити вплив краю об'єкта на сигнали ВСП, застосовують концентратори магнітного поля у вигляді феритових сердечників (рис. 1.3) і електропровідні неферомагнітними екрани, що витісняють магнітне поле з зайнятої ними зони. При розміщенні екранів в торцях прохідних перетворювачів вплив країв об'єктів контролю зменшується, але при цьому погіршується однорідність поля в зоні контролю. Спеціальні екрани з отворами можуть служити «масками», при цьому отвір служить джерелом магнітного поля, що збуджує вихрові струми в об'єкті. При використанні «масок» значно знижується чутливість ВСП, але підвищується їх локальність. Підвищення локальності ВСП досягають також комбінацією кільцевих феромагнітних сердечників з електропровідними неферомагнітними (зазвичай мідними) екранами і

					<i>ПК61.100000.000 ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		22

короткозамкненими витками, які витісняють магнітний потік з сердечників в зону контролю (рис. 1. 8, а, б). Кільцеві феритові сердечники служать також основою щілинних ВСП, що застосовуються для контролю дроту (рис. 1.8, в, г). Для ослаблення впливу радіальних переміщень об'єкта контролю на сигнали ВСП застосовують екранування магнітопроводу поблизу щілини з метою підвищення однорідності магнітного поля в щілині.

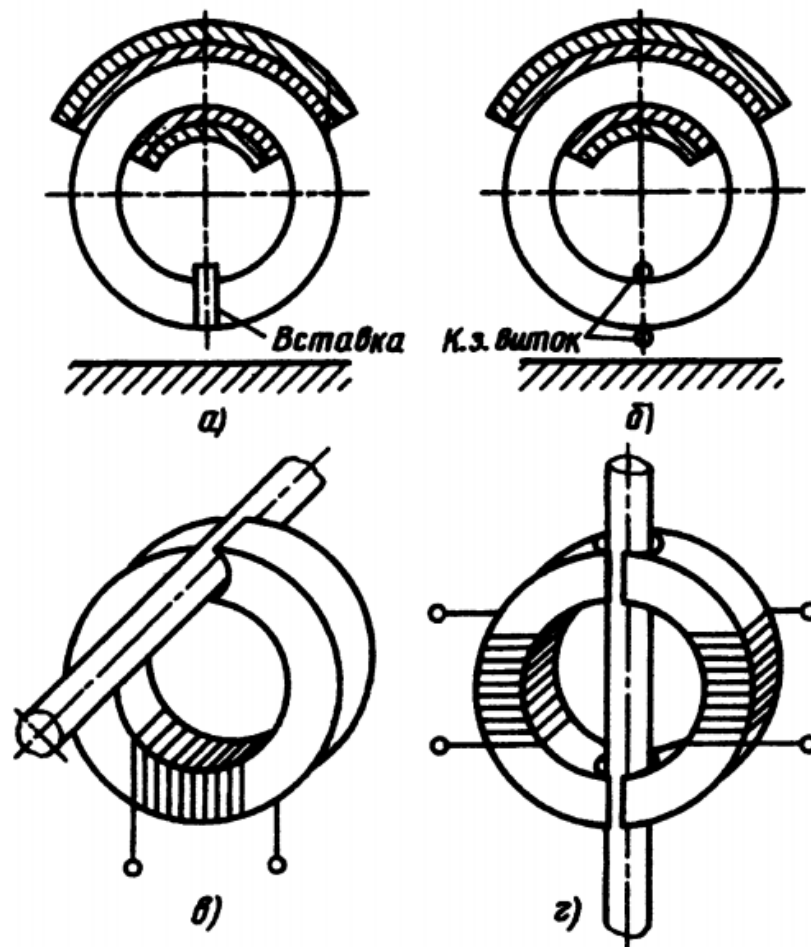


Рис. 1.8. Перетворювачі з кільцевими сердечниками: а – з мідною вставкою (екраном) у зазорі; б – з короткозамкненими витками; в, г – з зазорами для контролю дроту

Трансформаторні ВСП зазвичай включають по диференціальній схемі. При цьому можливі схема порівняння зі стандартним зразком і схема «самопорівняння». У першому випадку робочий і зразковий ВСП не пов'язані

індуктивно і мають незалежні вимірювальні і збуджуючі обмотки. У другому збуджуюча обмотка часто служить загальною для двох вимірювальних. При включенні ВСП з диференціальної схемою підвищується стабільність роботи приладу. Однак в ряді випадків вимірювальну обмотку включають послідовно з компенсатором, що представляє собою регулятор амплітуди і фази напруги. При цьому компенсатор виконує роль зразкового ВСП: коли робочий ВСП контролює стандартний зразок, то компенсатором встановлюється необхідну напругу компенсації. Така схема дозволяє усунути нестабільність, пов'язану з розігрівом стандартного зразка вихровими струмами.

При використанні диференціальної схеми зазвичай не виключається застосування компенсатора, який в цьому випадку необхідний для компенсації напруги, викликаного не ідентичністю робочого і зразкового ВСП, він включається послідовно з зустрічно-ввімкненими вимірювальними обмотками.

Компенсатори часто виконують у вигляді різноманітних фазорегуляторів і аттенюаторів - пасивних (RC - і LC - типів) і активних. Ефективні компенсатори у вигляді регуляторів дійсної та уявної складових вектора напруги, що компенсує.

Параметричні ВСП включають в схему, перетворюючи зміну їх комплексного опору в зміну амплітуди і фази (або частоти) напруги. При включенні параметричних ВСП в резонансні контури, а також в контури автогенераторів абсолютна чутливість пристрою підвищується. Часто параметричні ВСП включають в мостові ланцюги, де два плеча моста утворюються обмотками робочого зразкового ВСП, а два інших - резисторами. Підбираючи параметри елементів моста, можна досягти зменшення впливу фактора, що заважає, на сигнали ВСП, а також високої чутливості до контрольованого параметру навіть при малій добротності котушки ВСП.[1]

					<i>ПК61.100000.000 ПЗ</i>	Арк.
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		24

РОЗДІЛ 2. БЕЗДРОТОВІ СИСТЕМИ ЗВ'ЯЗКУ

Визначення технічних умов великих та важкодоступних конструкцій - це загальне завдання, яке вирішується у всьому світі. Крім великих розмірів, ці споруди можуть мати значну довжину. Цей тип будівництва включає нафто- та газопроводи, трубопроводи опалення та водопостачання, цистерни, канати тощо. Важливим аспектом неруйнівних випробувань є забезпечення безпеки під час періоду перевірки шляхом моніторингу технічних умов споруд. З цією метою необхідно виявити дефекти і в міру їх критичності вжити відповідних заходів щодо їх усунення або усунення їх потенційного впливу. З досвіду перевірки, щоб виявити дефекти трубопроводу, а також інших великих або невеликих об'єктів, варто згадати необхідність відносно великого обсягу допоміжних робіт. Така допоміжна робота може суттєво вплинути на експлуатаційні витрати НК. Труби часто знаходяться під землею, під залізницями та іншими проходами, деякі ділянки можуть бути занурені у воду.[5-8]

Усі ці фактори суттєво ускладнюють інженерні завдання постачання та управління НК. Однією з загальних проблем є організація каналу передачі даних від об'єкта управління (ОК) до блоку обробки даних.[6]

Організація каналів передачі інформації в НК, як уже було сказано, є надзвичайно важливою, особливо при створенні автоматизованих систем збору та передачі даних. Бездротова передача даних (БПД), як один із нових способів, дозволяє скоротити витрачений час на огляд об'єкта, зменшити кількість обслуговуючого персоналу для багатьох віддалених об'єктів, що може бути довгим у випадку трубопроводів, і лише віддалено від оператора управління. Нещодавні досягнення в галузі мініатюризації електронних пристроїв та інтеграції датчиків дозволили отримати чутливі елементи, оснащені комунікацією та бездротовою пам'яттю для зберігання та обробки даних. На основі цих елементів можна створити «розумний» пристрій, в якому роботу різних датчиків можна координувати для створення мережі для передачі даних.[9-12]

					<i>ПК61.100000.000 ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		25

Після розробки та налаштування кабельних систем для передачі даних багато інженерів зіткнулися з проблемою впровадження подібної системи в радіо. Всі ці зусилля призвели до створення персональних бездротових мереж у нижній частині ієрархії мережевих пристроїв. Винахід отримав назву WPAN (Wireless Personal Area Networks) і сьогодні є одним із стандартів організації бездротових мереж передачі даних. WPAN - система обмеженого радіусу обміну даними на відносно невеликих відстанях (3-60 м). Він використовується як для підключення окремих пристроїв один до одного, так і для підключення їх до мереж вищого рівня, включаючи всесвітню павутину, яка створює канали даних у діапазоні частот від 400 МГц до 2,4 ГГц.[10]

Через відсутність ліцензійних вимог частоту 2,4 ГГц було розширено. Канали даних з основною частотою 2,4 ГГц стали популярними для промислових, наукових, медичних пристроїв, а також для дешевих бездротових WPAN рішень. Ці канали не вимагають оплати за допомогою радіо та сертифіковані як місцевий зв'язок. Варто відзначити зростаючий інтерес до програм, які використовують багатоадресну передачу. Бездротові системи не мають багатьох недоліків кабельного зв'язку.[13]

Системи БПД для віддаленої передачі даних представлені у вигляді пристроїв, що використовують канали GSM / GPRS (EDGE), UMTS (3G, 4G). Привабливість цін цих технологій дозволяє активно їх використовувати у сфері віддаленого промислового моніторингу, систем відновлення інформації та управління процесами.[14]

Переваги та недоліки бездротової передачі даних для вирішення проблем з НК. Вагомим недоліком відомих сьогодні методів є необхідність влаштування інформаційного кабелю між перетворювачем і блоком обробки кабельної інформації. Це створює значну складність в отриманні та обробці інформації в місцях з обмеженим доступом, а також складність автоматизованого зберігання вимірюваних даних. Використання БПД дає змогу зменшити витрати на доставку обладнання до об'єкта управління та зменшити експлуатаційні витрати.

					<i>ПК61.100000.000 ПЗ</i>	Арк.
						26
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

Мета бездротових технологій - спростити процес прийому та передачі даних у неруйнівних тестових системах, велика ймовірність передачі даних, використовуючи цифрову обробку та цифрову передачу інформації безпосередньо з первинного перетворювача в блок обробки даних (персональний комп'ютер для запису , аналіз отриманих даних та перевірка діагностичного процесу).

До недоліків БПД можна віднести:

- Несумісність пристрою (часткова або повна) між різними типами або поколіннями БПД;
- Додаткове споживання енергії;
- Безпека. Необхідно використовувати ключі шифрування БПД та ключі конфіденційності. У всіх стандартах БПД є все необхідне, щоб швидко та легко вирішити цю проблему."
- Низька швидкість передачі даних Сьогодні показник БПД за цим показником нижчий, ніж кабельний зв'язок.

При правильному підході до завдання в НК можна оптимізувати або мінімізувати вплив усіх цих недоліків. Деякі з них абсолютно не впливають на запуснений процес КК.[15-18]

Переваги включають мобільність та просте створення та оновлення.

Технологія бездротових даних WiFi базується на стандарті IEEE 802.11. Стандарт IEEE 802.11 визначає протоколи, необхідні для організації бездротових локальних мереж (WLAN). Основні з них - протокол MAC (Medium Access Control) та протокол сигналізації PHY.

В якості основного методу доступу до навколишнього середовища стандарт 802.11 визначає механізм CSMA / CA (множинний доступ з обмеженим зіткненням носієм) - доступ до декількох станцій з векторним управлінням та запобіганням конфліктам. Стандарт 802.11 заснований на стільниковій архітектурі, і мережа може складатися з однієї або декількох точок. Кожна

					<i>ПК61.100000.000 ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		27

комірка управляється базовою станцією, яка разом з робочими станціями в межах діапазону та робочими станціями користувача утворює основну зону обслуговування. Точки доступу для багатоадресної передачі співпрацюють між собою за допомогою системи розподілу, еквівалентної магістральній лінії зв'язку. Оскільки пристрої, що працюють на максимальній швидкості, мають менший діапазон, ніж нижчі швидкості, стандарт 802.11b / g / n дозволяє автоматично знижувати швидкість, коли якість сигналу погіршується. WiFi фокусується на передачі великої кількості інформації. Це може бути потокове відео, аудіо HiFi, голос, локальна мережа.[19-20]

Бездротова технологія Bluetooth заснована на стандарті IEEE 802.15.1 і є стандартом, який визначає роботу компактних систем зв'язку на невеликих відстанях між ноутбуками, мобільними телефонами та іншими портативними пристроями.

Bluetooth - це недорогий радіо-інтерфейс з низькою потужністю (потужність передавача до 1 мВт) для персональних мереж, що забезпечує передачу цифрових даних та аудіо-сигналів у режимі реального часу. Дальність радіо-інтерфейсу залишилася на 10 метрів, але специфікації Bluetooth вже визначили другу зону приблизно 100 м. Для роботи радіо-інтерфейсу Bluetooth використовується так званий нижній діапазон ISM (2,45 ГГц) (промисловий, науковий, медичний), призначений для управління промисловими, науковими та медичними пристроями. Радіоканал має повну пропускну здатність 1 Мбіт / с, що дозволяє створювати асиметричний канал передачі даних зі швидкістю 723,3 / 57,6 Кбіт / с або повний дуплексний канал зі швидкістю 433,9 Кбіт / с.[21-24]

Дуплексне аудіо може передавати до 3-х каналів з 64 Кбіт / с у кожному напрямку. Можлива також комбінована передача даних та звуку. Що стосується зв'язку Bluetooth, то він відповідає специфікаціям стандарту IEEE 802 LAN і використовує прогресивні дифузійні сигнали частоти (FHSS) з псевдовипадковим законом зі швидкістю 1600 комутаторів в секунду в діапазоні

					<i>ПК61.100000.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		28

2400-2483,5 МГц. Bluetooth працює як аналогічно керований багатоточковий радіоканал GSM Mobile Communication з багаторівневим протоколом.

Технологія глобальної системи мобільного зв'язку (GSM) - глобальний цифровий стандарт мобільного зв'язку; з поділом каналів TDMA та високим ступенем безпеки завдяки криптографії відкритого ключа. Він був розроблений наприкінці 1980-х років під егідою Європейського інституту стандартів зв'язку (ETSI).[25]

Зв'язок здійснюється на двох основних частотах 900 і 1800 МГц. Максимальна випромінювана потужність мобільних телефонів GSM-1800 - 1 Вт, порівняно з GSM-900 - 2 Вт. Існують технології CSD (Circuit Switched Data), GPRS (General Packet Radio Service) та EDGE GPRS для передачі даних. З їх допомогою можна отримати такі швидкості передачі даних: CSD - 9,6 кбіт / с; GPRS - 53,6 кбіт / с; EDGE - до 384 кбіт / с. Технологія UMTS (3G, 4G) більш сучасна, ніж GSM. Завдяки розробці W-CDMA, UMTS дозволяє підтримувати швидкість передачі даних на теоретичному рівні до 21 Мбіт / с (HSPA +).

Використання БПД для впровадження НК в наш час, безумовно, дозволяє нам отримати кращий ефект та економічну привабливість. Зручність, надійність та простота створення обладнання та систем для НК з БПД відкриває новий напрямок у дефектоскопії. Через відсутність з'єднувальних кабелів для передачі даних, НК до будинків і з них дозволяє контролювати в будь-якому просторовому положенні та в місцях з обмеженим доступом, також забезпечує відсутність перешкод і зменшує спотворення даних, що виникають при проходженні через електричний сигнальний кабель. тому що при використанні БПД передається лише цифрова інформація. Мобільність та простота організації віддаленого доступу до об'єкта управління, а також віддаленої обробки даних в центрі управління оператора. Підключення та застосування персонального комп'ютера в системі НК дозволяє використовувати різні методи обробки даних та автоматичне записування та зберігання результатів діагностики.[26-28]

					<i>ПК61.100000.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		29

РОЗДІЛ 3. РОЗРАХУНОК ПОРТАТИВНОГО ВИХРОСТРУМОВОГО ДЕФЕКТОСКОПА

3.1 Розрахунок системи ВСП – ОК

Виконуємо розрахунок накладного трансформаторного вихрострумowego перетворювача.

Діаметр обмотки збудження призначимо:

$$\text{діаметр } D = 10 \text{ (мм);}$$

$$\text{радіус } R = 5 \text{ (мм);}$$

Для розрахунків значення електропровідності призначимо $\gamma = 10 \left(\frac{\text{МСМ}}{\text{м}}\right)$;

Визначимо узагальнений параметр за цією формулою[1]:

$$\beta = R\sqrt{\omega \cdot \gamma \cdot \mu_0} \quad (3.1)$$

де ω – це кутова частота, яка розраховується за формулою:

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f \quad (3.2)$$

f – частота, призначимо 2 (кГц);

Відповідно

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot 2000 = 12\,570 \left(\frac{\text{рад}}{\text{с}}\right)$$

μ_0 – магнітна стала, яка дорівнює $4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \left(\frac{\text{Гн}}{\text{м}}\right)$;

Тоді підставив значення в формулу (3.1) отримаємо:

$$\beta = 5 \cdot 10^{-3} \sqrt{12570 \cdot 10 \cdot 10^6 \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}} = 1.987$$

З конструктивних міркувань внутрішній діаметр вимірювальної котушки d_1 визначаємо як:

					ПК61.100000.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		30

$$d_1 = D + 0.2 \text{ мм} * 2 + 2 \cdot h_k \quad (3.3)$$

де $h_k = 1$ (мм)

Вибір у відповідності із рекомендацією 0.4 мм двостороннього зазору між ОК і каркасом вимірювальної котушки ВСП.

Підставив значення в формулу (3.5) отримаємо:

$$d_1 = 10 + 0.4 + 2 = 12.4 \text{ (мм)}$$

Вибір у відповідності із рекомендацією діаметрів проводу збуджуючої та вимірювальної котушок:

$$d_{\text{пр1}} = d_{\text{пр2}} = 0.05 \text{ (мм)}$$

Діаметр проводу з ізоляцією:

$$d_{\text{пр2ізол}} = 0.065 \text{ (мм)}$$

З конструктивних міркувань призначимо кількість витків збуджуючої котушки:

$$W1 = 1000 - \text{витків}$$

З конструктивних міркувань призначимо 20 шарів $d_{\text{пр2ізол}}$: $20 \cdot 0.065 = 1.3 \text{ (мм)}$

Тоді можемо розрахувати зовнішній діаметр вимірювальної котушки за формулою:

$$D_1 = d_1 + 2 \cdot 0.325 = 12.4 + 1.3 = 13.7 \text{ (мм)} \quad (3.4)$$

Визначимо ефективний діаметр за формулою[2]:

$$D_{\text{еф}} = \sqrt{\frac{D_1^2 + d_1^2 + D_1 \cdot d_1}{3}} \quad (3.5)$$

$$D_{\text{еф}} = \sqrt{\frac{13.7^2 + 12.4^2 + 13.7 \cdot 12.4}{3}} = 13 \text{ (мм)}$$

					<i>ПК61.100000.000 ПЗ</i>	Арк.
						31
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

З конструктивних міркувань призначимо кількість витків вимірювальної котушки:

$$W_2 = 1000 - \text{витків}$$

Вибір у відповідності з рекомендацією аксіальної довжини:

$$l = 3 \cdot D \quad (3.6)$$

$$l = 3 \cdot 10 = 30 \text{ (мм)}$$

Визначимо струм збудження з умови відсутності значного перегріву котушки[1]:

$$I_{\text{еф}} = 0.9 \cdot d_{\text{пр2}} \cdot \sqrt{\frac{\lambda \cdot \theta \cdot S_{\text{ох}}}{4 \cdot \rho \cdot w_1 \cdot d_{1\text{cp}}}} \quad (3.7)$$

Визначимо площу поверхні охолодження за формулою[3]:

$$S_{\text{ох}} = \pi \cdot l \cdot (D_1 + d_1) \quad (3.8)$$

$$S_{\text{ох}} = \pi \cdot 30 \cdot (13.7 + 12.4) = 2.46 \cdot 10^{-3} \text{ (м}^2\text{)}$$

Допустима температура перегріву за рекомендацією призначаємо:

$$\theta = 5 \text{ }^\circ\text{C}$$

Коефіцієнт теплопередачі λ обираємо з умови[1]:

$$\lambda = (8 \div 12) \left(\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2} \right)$$

Питомий електричний опір ρ міді:

$$\rho = 0.0175 \left(\text{Ом} \frac{\text{мм}^2}{\text{м}} \right)$$

Визначимо середній діаметр:

$$d_{1\text{cp}} = d_1 + 0.65 \text{ мм} \quad (3.9)$$

$$d_{1\text{cp}} = 12.4 + 0.65 = 13.05 \text{ (мм)}$$

					<i>ПК61.100000.000 ПЗ</i>	Арк.
						32
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Тоді, підставивши значення в формулу (3.9), отримаємо:

$$I_{\text{еф}} = 0.9 \cdot 0.05 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt{\frac{10 \cdot 5 \cdot 2.46 \cdot 10^{-3}}{4 \cdot 0.0175 \cdot 10^{-6} \cdot 1000 \cdot 13.05 \cdot 10^{-3}}} = 0.017(\text{A})$$

Визначимо напругу холостого ходу за формулою[1]:

$$U_0 = \frac{\pi^2}{2} \cdot f \cdot \mu_0 \cdot w_1 \cdot w_2 \cdot I_{\text{еф}} \cdot \frac{D_{\text{еф}}^2}{l} \quad (3.10)$$

$$U_0 = \frac{\pi^2}{2} \cdot 2000 \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 1000 \cdot 1000 \cdot 0.017 \cdot \frac{(13 \cdot 10^{-3})^2}{30 \cdot 10^{-3}} = 1.164 (\text{В})$$

Абсолютна внесена напруга визначаємо за формулою:

$$U_{\text{вн}} = U_0 \cdot U_{\text{вн}}^* \quad (3.11)$$

де $U_{\text{вн}}^*$ - відносна внесена напруга

Визначимо відносну внесену напругу за формулою:

$$U_{\text{вн}}^* = j \cdot \eta \cdot (\mu_{\text{еф}} - 1) \quad (3.12)$$

За допомогою MatLab розрахуємо ефективну магнітну проникність $\mu_{\text{еф}}$ для $\beta = 1.987$:

$$\mu_{\text{еф}} = 0.7778 - 0.3431j$$

Коефіцієнт заповнення η визначаємо як[3]:

$$\eta = \frac{D^2}{D_{\text{еф}}^2} \quad (3.13)$$

$$\eta = \frac{10^2}{13^2} = 0.587$$

Підставив значення в формулу (3.12) відносна внесена напруга дорівнюватиме:

$$U_{\text{вн}}^* = j \cdot 0.587 \cdot (0.7778 - 0.3431j - 1) = 0.201 - 0.13i$$

					<i>ПК61.100000.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		33

Тоді можемо розрахувати абсолютну внесену напругу за допомогою формули (3.11):

$$U_{\text{вн}} = 1.164 \cdot 0.201 - 0.13i \text{ (В)}$$

Абсолютну вихідну напругу розрахуємо за формулою:

$$U = j \cdot U_0 + U_{\text{вн}} \quad (3.14)$$

$$U = j \cdot 1.164 + 0.201 - 0.13i = 0.234 + 1.012i \text{ (В)}$$

Модуль абсолютної вихідної напруги дорівнюватиме:

$$|U| = 1.039 \text{ (В)}$$

Для різних робочих частот (2, 4, 8, 16, 32, 64, 125, 250 кГц) визначаємо абсолютну вихідну напругу.

Різні частоти беремо для різних товщин об'єкта контролю. Але для великих частот буде зростати модуль вихідної напруги, що призведе до великого відведення тепла та зробить неможливим використання операційного підсилювача. Якщо модуль вихідної напруги перевищить за 3В, то будемо зменшувати кількість витків вимірювальної котушки, що зменшить напругу холостого ходу, абсолютну внесену напругу та абсолютну вихідну напругу.

Обираємо частоту $f = 4000$ (Гц)

Тоді за формулою (3.2):

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot 4000 = 25\,130 \left(\frac{\text{рад}}{\text{с}}\right)$$

Визначимо узагальнений параметр для нової частоти за формулою (3.1):

$$\beta = 5 \cdot 10^{-3} \sqrt{25130 \cdot 10 \cdot 10^6 \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}} = 2.81$$

Визначимо напругу холостого ходу за формулою (3.10):

$$U_0 = \frac{\pi^2}{2} \cdot 4000 \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 1000 \cdot 1000 \cdot 0.017 \cdot \frac{(13 \cdot 10^{-3})^2}{30 \cdot 10^{-3}} = 2.357 \text{ (В)}$$

					<i>ПК61.100000.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		34

За допомогою MatLab розрахуємо ефективну магнітну проникність $\mu_{\text{еф}}$ для $\beta = 2.81$:

$$\mu_{\text{еф}} = 0.5409 - 0.3702j$$

Визначимо відносну внесену напругу за формулою (3.12):

$$U_{\text{вн}}^* = j \cdot 0.587 \cdot (0.5409 - 0.3702j - 1) = 0.217 - 0.269j$$

Розрахуємо абсолютну внесену напругу за формулою (3.11):

$$U_{\text{вн}} = 2.357 \cdot 0.217 - 0.269j = 0.512 - 0.635j \text{ (В)}$$

Визначимо абсолютну вихідну напругу за формулою (3.14):

$$U = j \cdot 2.357 + 0.512 - 0.635j = 0.512 + 1.722j \text{ (В)}$$

Модуль абсолютної вихідної напруги:

$$|U| = 1.796 \text{ (В)}$$

Так як значення модуля вихідної напруги не перевищує 3В, то кількість витків вимірювальної обмотки не зменшуємо.

Обираємо частоту $f = 8000$ (Гц)

Тоді за формулою (3.2):

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot 8000 = 50\,270 \left(\frac{\text{рад}}{\text{с}}\right)$$

Визначимо узагальнений параметр для нової частоти за формулою (3.1):

$$\beta = 5 \cdot 10^{-3} \sqrt{50270 \cdot 10 \cdot 10^6 \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}} = 3.974$$

Визначимо напругу холостого ходу за формулою (3.10):

$$U_0 = \frac{\pi^2}{2} \cdot 8000 \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 1000 \cdot 1000 \cdot 0.017 \cdot \frac{(13 \cdot 10^{-3})^2}{30 \cdot 10^{-3}} = 4.713 \text{ (В)}$$

За допомогою MatLab розрахуємо ефективну магнітну проникність $\mu_{\text{еф}}$ для $\beta = 3.974$:

					<i>ПК61.100000.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		35

$$\mu_{\text{эф}} = 0.3595 - 0.2937j$$

Визначимо відносну внесену напругу за формулою (3.12):

$$U_{\text{вн}}^* = j \cdot 0.587 \cdot (0.3595 - 0.2937j - 1) = 0.172 - 0.376j$$

Розрахуємо абсолютну внесену напругу за формулою (3.11):

$$U_{\text{вн}} = 4.713 \cdot 0.172 - 0.376i = 0.812 - 1.771j \text{ (В)}$$

Визначимо абсолютну вихідну напругу за формулою (3.14):

$$U = j \cdot 4.713 + 0.812 - 1.771j = 0.812 + 2.942i \text{ (В)}$$

Модуль абсолютної вихідної напруги:

$$|U| = 3.052 \text{ (В)}$$

Так як значення модуля абсолютної вихідної напруги перевищило 3В, тоді зменшуємо кількість витків вимірювальної котушки:

$$W_2 = 800 \text{ витків}$$

Визначимо напругу холостого ходу за формулою (3.10):

$$U_0 = \frac{\pi^2}{2} \cdot 8000 \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 1000 \cdot 800 \cdot 0.017 \cdot \frac{(13 \cdot 10^{-3})^2}{30 \cdot 10^{-3}} = 3.77 \text{ (В)}$$

Розрахуємо абсолютну внесену напругу за формулою (3.11):

$$U_{\text{вн}} = 3.77 \cdot 0.172 - 0.376j = 0.65 - 1.417j \text{ (В)}$$

Визначимо абсолютну вихідну напругу за формулою (3.14):

$$U = j \cdot 3.77 + 0.65 - 1.417j = 0.65 + 2.354i \text{ (В)}$$

Модуль абсолютної вихідної напруги:

$$|U| = 2.442 \text{ (В)}$$

Обираємо частоту $f = 16\,000$ (Гц)

Тоді за формулою (3.2):

					<i>ПК61.100000.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		36

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot 16\,000 = 100\,500 \left(\frac{\text{рад}}{\text{с}}\right)$$

Визначимо узагальнений параметр для нової частоти за формулою (3.1):

$$\beta = 5 \cdot 10^{-3} \sqrt{100\,500 \cdot 10 \cdot 10^6 \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}} = 5.62$$

Визначимо напругу холостого ходу за формулою (3.10):

$$U_0 = \frac{\pi^2}{2} \cdot 16\,000 \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 1000 \cdot 800 \cdot 0.017 \cdot \frac{(13 \cdot 10^{-3})^2}{30 \cdot 10^{-3}} = 7.541 \text{ (В)}$$

За допомогою MatLab розрахуємо ефективну магнітну проникність $\mu_{\text{еф}}$ для $\beta = 5.62$:

$$\mu_{\text{еф}} = 0.2528 - 0.2189j$$

Визначимо відносну внесену напругу за формулою (3.12):

$$U_{\text{вн}}^* = j \cdot 0.587 \cdot (0.2528 - 0.2189j - 1) = 0.128 - 0.438j$$

Розрахуємо абсолютну внесену напругу за формулою (3.11):

$$U_{\text{вн}} = 7.541 \cdot (0.128 - 0.438j) = 0.968 - 3.306j \text{ (В)}$$

Визначимо абсолютну вихідну напругу за формулою (3.14):

$$U = j \cdot 7.541 + 0.968 - 3.306j = 0.968 + 4.235j \text{ (В)}$$

Модуль абсолютної вихідної напруги:

$$|U| = 4.344 \text{ (В)}$$

Так як значення модуля абсолютної вихідної напруги перевищило 3В, тоді зменшуємо кількість витків вимірювальної котушки:

$$W_2 = 500 \text{ витків}$$

Визначимо напругу холостого ходу за формулою (3.10):

$$U_0 = \frac{\pi^2}{2} \cdot 16\,000 \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 1000 \cdot 500 \cdot 0.017 \cdot \frac{(13 \cdot 10^{-3})^2}{30 \cdot 10^{-3}} = 4.713 \text{ (В)}$$

					<i>ПК61.100000.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		37

Розрахуємо абсолютну внесену напругу за формулою (3.11):

$$U_{\text{вн}} = 4.713 \cdot 0.128 - 0.438j = 0.605 - 2.066j(\text{В})$$

Визначимо абсолютну вихідну напругу за формулою (3.14):

$$U = j \cdot 4.713 + 0.605 - 2.066j = 0.605 + 2.647j(\text{В})$$

Модуль абсолютної вихідної напруги:

$$|U| = 2.715(\text{В})$$

Обираємо частоту $f = 32\,000$ (Гц)

Тоді за формулою (3.2):

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot 32\,000 = 201\,100 \left(\frac{\text{рад}}{\text{с}}\right)$$

Визначимо узагальнений параметр для нової частоти за формулою (3.1):

$$\beta = 5 \cdot 10^{-3} \sqrt{201\,100 \cdot 10 \cdot 10^6 \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}} = 7.948$$

Визначимо напругу холостого ходу за формулою (3.10):

$$U_0 = \frac{\pi^2}{2} \cdot 32\,000 \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 1000 \cdot 500 \cdot 0.017 \cdot \frac{(13 \cdot 10^{-3})^2}{30 \cdot 10^{-3}} = 9.426(\text{В})$$

За допомогою MatLab розрахуємо ефективну магнітну проникність $\mu_{\text{еф}}$ для $\beta = 7.948$:

$$\mu_{\text{еф}} = 0.1784 - 0.1618j$$

Визначимо відносну внесену напругу за формулою (3.12):

$$U_{\text{вн}}^* = j \cdot 0.587 \cdot (0.1784 - 0.1618j - 1) = 0.095 - 0.482j$$

Розрахуємо абсолютну внесену напругу за формулою (3.11):

$$U_{\text{вн}} = 9.426 \cdot 0.095 - 0.482i = 0.895 - 4.544j(\text{В})$$

					<i>ПК61.100000.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		38

Визначимо абсолютну вихідну напругу за формулою (3.14):

$$U = j \cdot 9.426 + 0.895 - 4.544j = 0.895 + 4.882i \text{ (В)}$$

Модуль абсолютної вихідної напруги:

$$|U| = 4.964 \text{ (В)}$$

Так як значення модуля абсолютної вихідної напруги перевищило 3В, тоді зменшуємо кількість витків вимірювальної котушки:

$$W_2 = 250 \text{ витків}$$

Визначимо напругу холостого ходу за формулою (3.10):

$$U_0 = \frac{\pi^2}{2} \cdot 32\,000 \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 1000 \cdot 250 \cdot 0.017 \cdot \frac{(13 \cdot 10^{-3})^2}{30 \cdot 10^{-3}} = 4.713 \text{ (В)}$$

Розрахуємо абсолютну внесену напругу за формулою (3.11):

$$U_{\text{вн}} = 4.713 \cdot 0.095 - 0.482j = 0.447 - 2.272j \text{ (В)}$$

Визначимо абсолютну вихідну напругу за формулою (3.14):

$$U = j \cdot 4.713 + 0.447 - 2.272j = 0.447 + 2.441j \text{ (В)}$$

Модуль абсолютної вихідної напруги:

$$|U| = 2.482 \text{ (В)}$$

Обираємо частоту $f = 64\,000$ (Гц)

Тоді за формулою (3.2):

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot 64\,000 = 402\,100 \left(\frac{\text{рад}}{\text{с}} \right)$$

Визначимо узагальнений параметр для нової частоти за формулою (3.1):

$$\beta = 5 \cdot 10^{-3} \sqrt{402\,100 \cdot 10 \cdot 10^6 \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}} = 11.24$$

Визначимо напругу холостого ходу за формулою (3.10):

					<i>ПК61.100000.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		39

$$U_0 = \frac{\pi^2}{2} \cdot 64\,000 \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 1000 \cdot 250 \cdot 0.017 \cdot \frac{(13 \cdot 10^{-3})^2}{30 \cdot 10^{-3}} = 9.426(\text{В})$$

За допомогою MatLab розрахуємо ефективну магнітну проникність $\mu_{\text{еф}}$ для $\beta = 11.24$:

$$\mu_{\text{еф}} = 0.1260 - 0.1178j$$

Визначимо відносну внесену напругу за формулою (3.12):

$$U_{\text{вн}}^* = j \cdot 0.587 \cdot (0.1260 - 0.1178j - 1) = 0.069 - 0.513j$$

Розрахуємо абсолютну внесену напругу за формулою (3.11):

$$U_{\text{вн}} = 9.426 \cdot 0.069 - 0.513j = 0.651 - 4.834j(\text{В})$$

Визначимо абсолютну вихідну напругу за формулою (3.14):

$$U = j \cdot 9.426 + 0.651 - 4.834j = 0.651 + 4.593i(\text{В})$$

Модуль абсолютної вихідної напруги:

$$|U| = 4.639(\text{В})$$

Так як значення модуля абсолютної вихідної напруги перевищило 3В, тоді зменшуємо кількість витків вимірювальної котушки:

$$W_2 = 125 \text{ витків}$$

Визначимо напругу холостого ходу за формулою (3.10):

$$U_0 = \frac{\pi^2}{2} \cdot 64\,000 \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 1000 \cdot 125 \cdot 0.017 \cdot \frac{(13 \cdot 10^{-3})^2}{30 \cdot 10^{-3}} = 4.713(\text{В})$$

Розрахуємо абсолютну внесену напругу за формулою (3.11):

$$U_{\text{вн}} = 4.713 \cdot 0.069 - 0.513j = 0.326 - 2.417j(\text{В})$$

Визначимо абсолютну вихідну напругу за формулою (3.14):

$$U = j \cdot 4.713 + 0.326 - 2.417j = 0.326 + 2.296j(\text{В})$$

Модуль абсолютної вихідної напруги:

					<i>ПК61.100000.000 ПЗ</i>	Арк.
						40
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$|U| = 2.319(\text{В})$$

Обираємо частоту $f = 125\,000$ (Гц)

Тоді за формулою (3.2):

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot 125\,000 = 785\,400 \left(\frac{\text{рад}}{\text{с}}\right)$$

Визначимо узагальнений параметр для нової частоти за формулою (3.1):

$$\beta = 5 \cdot 10^{-3} \sqrt{785\,400 \cdot 10 \cdot 10^6 \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}} = 15.708$$

Визначимо напругу холостого ходу за формулою (3.10):

$$U_0 = \frac{\pi^2}{2} \cdot 125\,000 \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 1000 \cdot 125 \cdot 0.017 \cdot \frac{(13 \cdot 10^{-3})^2}{30 \cdot 10^{-3}} = 9.205(\text{В})$$

За допомогою MatLab розрахуємо ефективну магнітну проникність $\mu_{\text{еф}}$ для $\beta = 15.708$:

$$\mu_{\text{еф}} = 0.0901 - 0.0859j$$

Визначимо відносну внесену напругу за формулою (3.12):

$$U_{\text{вн}}^* = j \cdot 0.587 \cdot (0.0901 - 0.0859j - 1) = 0.05 - 0.534j$$

Розрахуємо абсолютну внесену напругу за формулою (3.11):

$$U_{\text{вн}} = 9.205 \cdot (0.05 - 0.534j) = 0.464 - 4.914j(\text{В})$$

Визначимо абсолютну вихідну напругу за формулою (3.14):

$$U = j \cdot 9.205 + 0.464 - 4.914j = 0.464 + 4.291j(\text{В})$$

Модуль абсолютної вихідної напруги:

$$|U| = 4.316(\text{В})$$

Так як значення модуля абсолютної вихідної напруги перевищило 3В, тоді зменшуємо кількість витків вимірювальної котушки:

					<i>ПК61.100000.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		41

$$W_2 = 65 \text{ витків}$$

Визначимо напругу холостого ходу за формулою (3.10):

$$U_0 = \frac{\pi^2}{2} \cdot 125\,000 \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 1000 \cdot 65 \cdot 0.017 \cdot \frac{(13 \cdot 10^{-3})^2}{30 \cdot 10^{-3}} = 4.787 \text{ (В)}$$

Розрахуємо абсолютну внесену напругу за формулою (3.11):

$$U_{\text{вн}} = 4.787 \cdot 0.05 - 0.534j = 0.241 - 2.555j \text{ (В)}$$

Визначимо абсолютну вихідну напругу за формулою (3.14):

$$U = j \cdot 4.787 + 0.241 - 2.555j = 0.241 + 2.231j \text{ (В)}$$

Модуль абсолютної вихідної напруги:

$$|U| = 2.244 \text{ (В)}$$

Обираємо частоту $f = 250\,000$ (Гц)

Тоді за формулою (3.2):

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot 250\,000 = 1\,571\,000 \left(\frac{\text{рад}}{\text{с}}\right)$$

Визначимо узагальнений параметр для нової частоти за формулою (3.1):

$$\beta = 5 \cdot 10^{-3} \sqrt{1\,571\,000 \cdot 10 \cdot 10^6 \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}} = 22.214$$

Визначимо напругу холостого ходу за формулою (3.10):

$$U_0 = \frac{\pi^2}{2} \cdot 250\,000 \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 1000 \cdot 65 \cdot 0.017 \cdot \frac{(13 \cdot 10^{-3})^2}{30 \cdot 10^{-3}} = 9.573 \text{ (В)}$$

За допомогою MatLab розрахуємо ефективну магнітну проникність $\mu_{\text{еф}}$ для $\beta = 22.214$:

$$\mu_{\text{еф}} = 0.0637 - 0.0616j$$

Визначимо відносну внесену напругу за формулою (3.12):

$$U_{\text{вн}}^* = j \cdot 0.587 \cdot (0.0637 - 0.0616j - 1) = 0.036 - 0.549j$$

					<i>ПК61.100000.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		42

Розрахуємо абсолютну внесену напругу за формулою (3.11):

$$U_{\text{вн}} = 9.573 \cdot 0.036 - 0.549j = 0.346 - 5.259j(\text{В})$$

Визначимо абсолютну вихідну напругу за формулою (3.14):

$$U = j \cdot 9.573 + 0.346 - 5.259j = 0.346 + 4.314j(\text{В})$$

Модуль абсолютної вихідної напруги:

$$|U| = 4.328(\text{В})$$

Так як значення модуля абсолютної вихідної напруги перевищило 3В, тоді зменшуємо кількість витків вимірювальної котушки:

$$W_2 = 30 \text{ витків}$$

Визначимо напругу холостого ходу за формулою (3.10):

$$U_0 = \frac{\pi^2}{2} \cdot 250\,000 \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 1000 \cdot 30 \cdot 0.017 \cdot \frac{(13 \cdot 10^{-3})^2}{30 \cdot 10^{-3}} = 4.419(\text{В})$$

Розрахуємо абсолютну внесену напругу за формулою (3.11):

$$U_{\text{вн}} = 4.419 \cdot 0.036 - 0.549j = 0.16 - 2.427j(\text{В})$$

Визначимо абсолютну вихідну напругу за формулою (3.14):

$$U = j \cdot 4.419 + 0.16 - 2.427j = 0.16 + 1.991j(\text{В})$$

Модуль абсолютної вихідної напруги:

$$|U| = 1.998(\text{В})$$

3.2 Підбір мікроконтролера

В якості мікроконтролера була обрана мікросхема STM32F103RCY6TR з корпусом LQFP64.

Сімейство лінійних характеристик STM32F103X C / D / E включає в себе високоефективне 32-бітове ядро RISC Arm Cortex-M3, що працює на частоті 72

					<i>ПК61.100000.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		43

МГц, вбудовану швидкісну пам'ять (флеш-пам'ять до 512 Кбайт і SRAM до 64 Кбайт), а також широкий спектр розширених ввідів-виводів та периферійних пристроїв, підключених до двох шин APB. Усі пристрої пропонують три 12-бітні АЦП, чотири 16-бітові таймери загального призначення плюс два таймери ШІМ, а також стандартний та розширений інтерфейс зв'язку: до двох I2C, три SPI, два I2S, один SDIO, п'ять USART, USB і CAN.

Сімейство високопродуктивних ліній високої щільності STM32F103xC / D / E працює в діапазоні температур від -40 до $+105$ °C, від джерела живлення від 2,0 до 3,6 В. Комплексний набір енергозберігаючого режиму дозволяє розробляти додатки з малою потужністю.

Ці функції роблять сімейство мікроконтролерів лінійних мікроконтролерів високої щільності STM32F103xC / D / E, придатних для широкого спектру застосувань.

3.3 Підбір АЦП

Для розрахунку АЦП нам необхідно визначитися з класом точності:

$$\frac{c}{d} = \frac{0.05}{0.02}$$

Після того, як ми визначилися з класом точності ми можемо розрахувати розрядність АЦП:

$$N = \left\lceil \log_2 \frac{c}{100} \right\rceil = 11$$

Далі розрахуємо частоту дискретизації за формулою (3.15). Для забезпечення точності результатів введемо коефіцієнт запасу $K_3 = 1.8$

$$f = 5 \cdot K_3 \cdot f_B \quad (3.15)$$

Де f_B – найбільша частота спектра вхідного сигналу.

Тоді маємо частоту дискретизації:

					<i>ПК61.100000.000 ПЗ</i>	Арк.
						44
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$f = 5 \cdot 1.8 \cdot 2000 = 18 \text{ (кГц)}$$

В якості аналого-цифрового перетворювача був обраний мікроконтролер STM32F103RCY6TR з вбудованим АЦП. Даний АЦП має три 12-бітні аналого-цифрові перетворювачі вбудовані в лінійні пристрої продуктивності STM32F103RCY6TR, і кожен АЦП розділяє до 21 зовнішніх каналів, виконуючи перетворення в режимах одиночної зйомки або сканування. У режимі сканування автоматичне перетворення здійснюється на вибраній групі аналогових входів.

Додаткові логічні функції, вбудовані в інтерфейс АЦП, дозволяють:

- Одночасний вибір і утримання;
- Переплетений зразок і утримання;
- Поодинокий шунт

АЦП може обслуговуватися контролером DMA.

Аналогова функція «сторожового» догляду дозволяє дуже точно контролювати перетворену напругу одного, деяких або всіх обраних каналів. Перерив створюється, коли перетворена напруга знаходиться поза запрограмованими порогоми.

Події, згенеровані таймерами загального призначення (TIMx) та таймерами розширеного управління (TIM1 і TIM8), можуть бути внутрішньо підключені до тригера запуску АЦП та тригера інжекції відповідно, щоб програма могла синхронізувати аналого-цифрові перетворення та таймери.

3.4 Розрахунок підсилювача

Для роботи з сигналом, його потрібно підсилити до рівня, з яким ми будемо працювати, тобто до вихідної внесеної напруги.

В якості підсилювача обрано ОП серії AD8045:

					<i>ПК61.100000.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		45

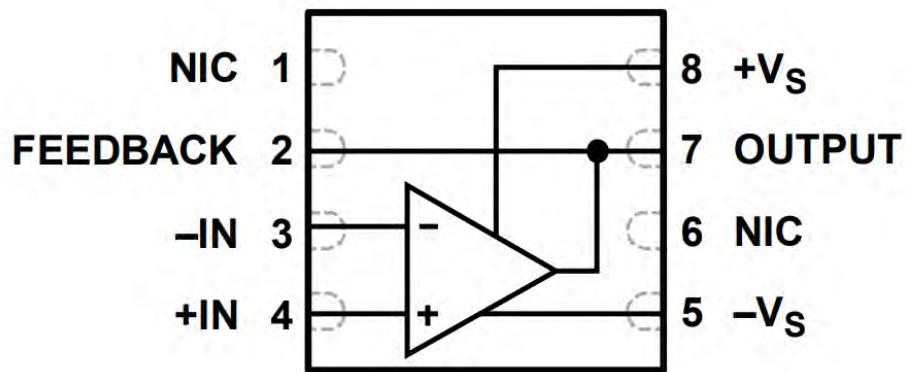


Рис. 3.1 Підсилювач AD8045

AD8045 - це односильний підсилювач зворотного зв'язку стабільного напруги з наднизьким спотворенням, низьким рівнем шуму та високою швидкістю наростання вихідної напруги. AD8045 має ідеальне рішення для різноманітних застосувань, включаючи ультразвукове, автоматизоване тестове обладнання (АТО), активні фільтри та аналого-цифровий перетворювач (АЦП).

AD8045 має низький рівень викривлення для LFCSP, що покращує викривлення другого гармонічного зображення та спрощує компоновання плати.

Підсилювач AD8045 випускається в LFCSP 3 мм × 3 мм та стандартному 8-провідному SOIC. Обидва пакети мають оголене весло, яке забезпечує шлях низького термічного опору до друкованої плати (PCB). Це дозволяє більш ефективно передавати тепло і підвищує надійність. AD8045 працює в розширеному промисловому температурному діапазоні (від -40 °C до +125 °C).

Модуль абсолютної вихідної напруги: $|U_{\text{вих}}| = 1.039$ (В);

Модуль абсолютної внесеної напруги: $|U_{\text{вн}}| = 0.283$ (В);

Коефіцієнт підсилення розраховується за формулою:

$$K_U = \frac{U_{\text{вих}}}{U_{\text{вн}}} = \frac{R_2}{R_1} \quad (3.16)$$

$$K_U = \frac{1.039}{0.283} = 3.671$$

Звідки:

$$\frac{R_2}{R_1} = 3.671$$

Приймаємо $R_1 = 8.2$ (кОм), тоді $R_2 = R_1 * 3.671 \approx 30$ (кОм)

AD8397 містить два операційні підсилювачі зворотного зв'язку, здатні рухати великі навантаження з відмінною лінійністю.

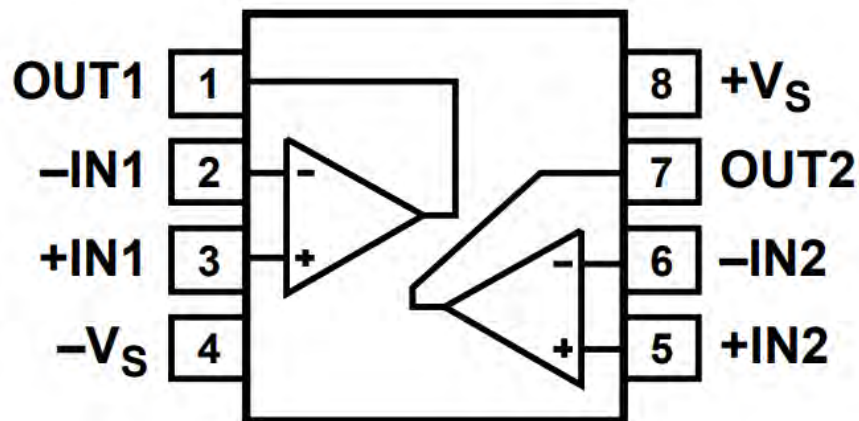


Рис. 3.2 Підсилювач AD8397

Загальний випромінювач, вихідна шина, етап якої перевершує здатність вихідної напруги типового емітерного вихідного каскаду і може коливатися до 0,5 В будь-якої шини з опором в 25 Ω навантаження.

Низьке спотворення, високий вихідний струм та широкий динамічний діапазон виходу роблять AD8397 ідеальним для застосувань, які потребують великого перекидання сигналу у велике навантаження.

Високошвидкісний додатковий біполярний високовольтний процес (XFCSB-HV), висока пропускну здатність і швидкий показник скорочення AD8397 зводять спотворення до мінімуму. AD8397 доступний у стандартному 8-провідному пакеті SOIC_N, а для застосувань, що розсіюють більшу потужність,

									Арк.
									47
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ПК61.100000.000 ПЗ				

пакеті SOIC_N_EP з 8-провідним терміном. Обидва пакети можуть працювати від -40°C до $+85^{\circ}\text{C}$.

3.5 Розрахунок похибок

3.5.1 Розрахунок похибки АЦП

АЦП та ЦАП розрізняють чотири типи помилок постійного струму: помилка поляризації, помилка орієнтації та два типи помилок, пов'язані з лінійністю: неінтегральна та диференціальна лінійність. Похибки поляризації та управління АЦП та ЦАП аналогічні помилкам поляризації та керування підсилювачів [29].

Похибка роздільної здатності:

$$\Delta_{\text{кван}} = \frac{\Delta}{2} \quad (3.17)$$

Роздільна здатність АЦП представлена як:

$$\Delta = \frac{1}{2^N} \cdot 100\% \quad (3.18)$$

де N – розрядність АЦП

$$\Delta = \frac{1}{2^{12}} \cdot 100\% = 0.02\%$$

Тоді похибка роздільної здатності буде дорівнювати:

$$\Delta_{\text{кван}} = \frac{0.02}{2} = 0.01\%$$

3.5.2 Розрахунок похибки підсилювача

Розрахуємо похибку підсилювача за формулою:

					<i>ПК61.100000.000 ПЗ</i>	Арк.
						48
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$\Delta_{\text{підс}} = \frac{\Delta_{\text{к}}}{1 + \frac{R_1}{R_1 + R_2}} \quad (3.19)$$

де $\Delta_{\text{к}}$ – мультиплікативна похибка, яка дорівнює 0.1%

Тоді, підставимо значення в формулу (3.19):

$$\Delta_{\text{підс}} = \frac{0.1}{1 + \frac{8.2}{8.2 + 30}} = 0.082\%$$

Тоді загальна похибка буде дорівнювати[29]:

$$\Delta_{\text{заг}} = \Delta_{\text{кван}} + \Delta_{\text{підс}} = 0.01 + 0.082 = 0.092\%$$

					<i>ПК61.100000.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		49

РОЗДІЛ 4. ВИБІР АПАРАТНОЇ ЧАСТИНИ ПРИЛАДУ

Структурна схема портативного вихрострумowego дефектоскопу наведена на рис.4.1

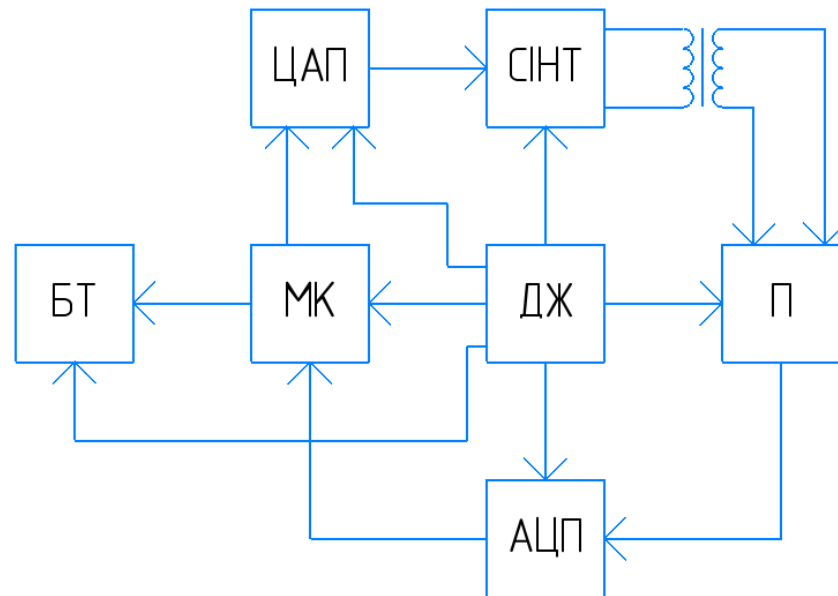


Рис. 4.1 Структурна схема портативного вихрострумowego дефектоскопу

МК – мікроконтролер

ДЖ – джерело живлення

БТ – bluetooth-модуль

ЦАП - цифро-аналоговий перетворювач

АЦП – аналогово-цифровий перетворювач

СІНТ – синтезатор

П - підсилювач

Мікроконтролер(МК) через цифро-аналоговий перетворювач(ЦАП) керує синтезатором(СІНТ), в якому знаходиться двокаскадний підсилювач через який сигнал йде на трансформаторний датчик, після чого сигнал підсилюється за допомогою підсилювача(П). Потім сигнал передається на аналогово-цифровий перетворювач(АЦП) і знову йде на мікроконтролер(МК). З мікроконтролера

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ПК61.100000.000 ПЗ

Арк.

50

сигнал передається на Bluetooth-модуль(БТ). Джерело живлення(ДЖ) живить усі блоки: МК, БТ, СІНТ, АЦП, ЦАП, П.

МК являє собою мікросхему STM32F103RCY6TR на основі ARM, який має 256-512кб флеш-накопичувач, USB, 3 АЦП, 11 таймерів та 13 комунікаційних інтерфейсів.

Опис виводів мікроконтролера STM32F103RCY6TR приведено на рис. 4.2

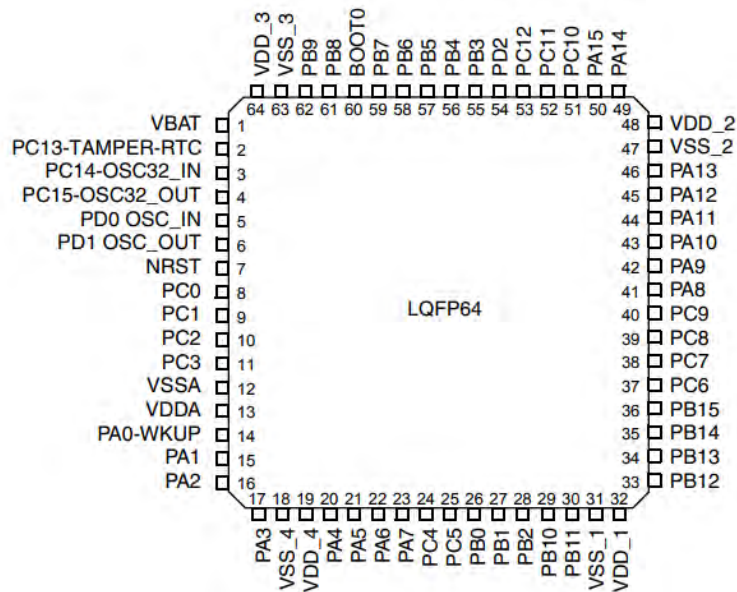


Рис. 4.2 Опис виводів мікроконтролера STM32F103RCY6TR

Загальний вид мікроконтролера приведено на рис. 4.3

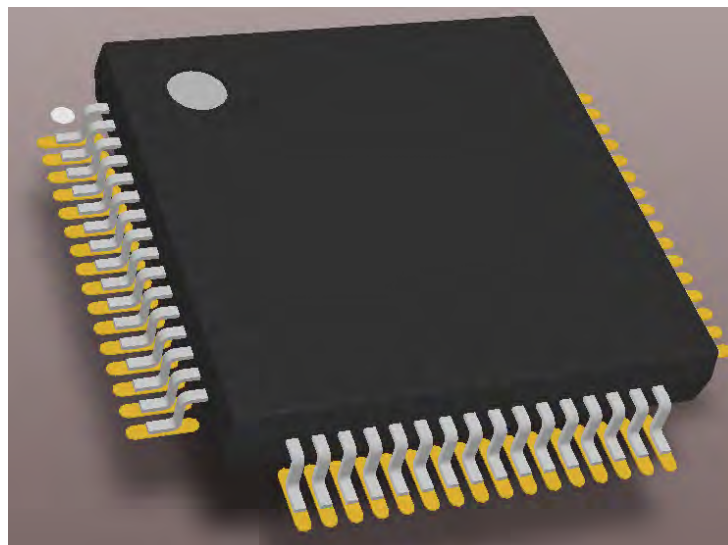


Рис. 4.3 Загальний вид мікроконтролера STM32F103RCY6TR

Блок П являє собою підсилювачі AD8045 - це підсилювач зворотного зв'язку стабільного рівня напруги із надзвичайно рівнем спотворень, низьким рівнем шуму та високою швидкістю наростання вихідної напруги. Резистори на цьому підсилювачі керуються мікроконтролером для різного коефіцієнту підсилення. Це необхідно для різних частот нашого портативного вихрострумове дефектоскопу.

Блок БТ являє собою Bluetooth-модуль RN4871U в який інтегровано моделюючий контролер Bluetooth 4.2, також є цифрові та аналогові входи і виходи. Цей модуль має малі розміри, що є необхідним для нашої плати, а також в нього гарний температурний діапазон(-20° до +70°).

Для розподілу навантаження та керування заряду акумулятора за допомогою перехідного адаптера АС-DC в схемі живлення(ДЖ) був обраний пристрій MCP73871, який є найбільш придатний для нашої схеми живлення із за його невеликих розмірів. Для стабілізації напруги до 3.3В був обраний високоефективний підвищувальний перетворювач з одним індуктором і перемикачем TPS63001. Для стабілізації напруги до 5В був обраний синхронний перетворювач напруги TPS61200 і регулятор ультра-низького рівня шуму LP2985AIM5-5.0. Для стабілізації напруги до -5В був обраний TPS72301.

					<i>ПК61.100000.000 ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		52

ВИСНОВОК

Основною метою даного дипломного проекту є проектування портативного вихрострумowego дефектоскопа.

В аналітичній частині було розглянуто основні положення вихрострумowego контролю. Переваги, недоліки та класифікацію вихрострумowych перетворювачів.

Наступним етапом було розглянуто бездротові системи зв'язку. Наведено їх класифікацію, переваги та недоліки кожного виду.

Наступним розділом були проведені розрахунки накладного трансформаторного перетворювача для різних частот, та при використанні різних вимірювальних котушок. Також підібрані мікроконтролер, АЦП. Розраховані підсилювачі та похибки.

Після цього було розроблено структурну схему та описано принцип роботи портативного вихрострумowego дефектоскопу.

Результатом дипломного проекту став розроблений портативний вихрострумовой дефектоскоп з бездротовою технологією передачі даних, який буде застосовуватись для контролю листового матеріалу.

					ПК61.100000.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		53

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Неразрушающий контроль и диагностика: Справочник / В.В. Клюев, Ф.Р. Соснин, А.В. Ковалев, и др.; Под ред. В.В. Клюева. 2-е изд., испр. и доп. – М.: Машиностроение, 2003. 656 с., ил.
2. Вихретоковый контроль. Учебн. пособие / В. А. Троицкий. -К.:— «Феникс». - 2011. - с. 148. илл.
3. Неразрушающий контроль качества изделий. Н54 электромагнитными методами/ Герасимов В. Г., Останин Ю. А., Покровский А. Д. и др. — М.: Энергия, 1978.— 216 с, ил.
4. Куц, Ю.В. Экспериментальное исследование вихретоковой системы контроля крупногабаритных изделий / Ю. В. Куц, В. Ф. Петрик, Ю. Ю. Лысенко, А. Л. Дугин // Научни известия на НТСМ : матеріали міжнародної конференції «Дни НК 2013». – 2013. – № 2(139). – С. 72–75.
5. Петрик, В. Ф. Бездротова передача даних у неруйнівному контролі / О. Л. Кустовський, В. Ф. Петрик // Сучасні прилади, матеріали і технології для неруйнівного контролю і технічної діагностики машинобудівного і нафтогазопромислового обладнання : матеріали V Міжнародної науково-технічної конференції, м. Івано-Франківськ, 2-5 грудня 2008 року. – Івано-Франківськ : ІФНТУНГ, 2008. – С. 120.
6. Povshenko, O. Portable Ultrasound Flaw Detector / O. Povshenko, V. Petryk, A. Protasov // Неруйнівний контроль в контексті асоційованого членства України в Європейському Союзі : матеріали 2-ої науково-технічної конференції, Польща, м. Люблін, 15-19 жовтня 2018 року. - Люблін, Польща, 2018.- С. 34-36.
7. Повшенко, О. А. Безпроводна передача даних в системах неруйнівного контролю шляхом застосування GSM/GPRS технологій / О. А. Повшенко, В. Ф. Петрик // Сучасні прилади, матеріали і технології для неруйнівного контролю і технічної діагностики машинобудівного і

					ПК61.100000.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		54

нафтогазопромислового обладнання : матеріали VIII Міжнародної науково-технічної конференції, м. Івано-Франківськ, 14-16 листопада 2017 р. – Івано-Франківськ : ІФНТУНГ, 2017. – С. 45–47. – Бібліогр.: 3 назви.

8. Petryk, V. Wireless data transmission in ultrasonic nondestructive testing = Беспроводная передача данных в ультразвуковом неразрушающем контроле / Valentyn Petryk, Anatoliy Protasov, Kostiantyn Syeryu, Serhiy Ukrainec // Ж-л «Научни Известия на НТСМ»: материалы международной конференции «Дни НК 2017». – Созополь, 2017. – №1 (216). – С. 121–123.
9. Кустовський, О. Л. Бездротовий акустичний дефектоскоп / О. Л. Кустовський, В. Ф. Петрик, Р. С. Савченко // Методи та засоби неруйнівного контролю промислового обладнання : матеріали II науково-практичної конференції, м. Івано-Франківськ, 25–26 листопада 2009 року. – Івано-Франківськ : ІФНТУНГ, 2009. – С. 79.
10. Дугін, О. Л. Використання бездротових технологій у вихрострумовій дефектоскопії / О. Л. Дугін, О. Л. Кустовський, В. Ф. Петрик // X Міжнародна науково-технічна конференція «Приладобудування: стан і перспективи», 19-20 квітня 2011 р., м. Київ, Україна : збірник тез доповідей / НТУУ «КПІ», ПБФ. – Київ, 2011. – С. 204–205.
11. Petryk, V. Portable non-destructive testing device based on serial mobile devices / V. Petryk, A. Protasov, O. Povshenko // матеріали 9-ї Національної науково-технічної конференції і виставки «Неруйнівний контроль та технічна діагностика – UkrNDT-2019», 19-21 листопада 2019 р., м. Київ, Україна – Київ : УТ НКТД, 2019. – С. 227-229.
12. Петрик, В.Ф. Розвиток технологій неруйнівного контролю / В.Ф.Петрик, А.Г.Протасов // Збірник тез доповідей XIX Міжнародної науково-технічної конференції «Приладобудування: стан і перспективи», 13-14 травня 2020 року, м. Київ / ПБФ, КПІ ім. Ігоря – № 40. – С.71-77. – Бібліогр.: 5 назв.

									Арк.
									55
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					

ПК61.100000.000 ПЗ

- 13.Петрик, В. Ф. Вихретоковый дефектоскоп с беспроводной системой передачи данных / В. Ф. Петрик, В. В. Карпинский // Ключови въпроси в съвременната наука – 2016: материалы XII международна научна практична конференция, 15-22 април 2016. – София : «Бял ГРАД-БГ» ООД, 2016. – Том 23. – С. 47–48. – Библиогр.: 2 назви.
- 14.Петрик, В. Ф. Телеметрический вихретоковый дефектоскоп / В. Ф. Петрик, А. Г. Протасов, А. Л. Дугин // Журнал «Научни Известия НТСМ» : материалы международной конференции «Дни НК 2014», г. Созополь, 09-18 июня, 2014 г. – Созополь, 2014. – № 1(150) – С. 34 – 36.
- 15.Патент України на корисну модель UA 76830 U, G01N 27/00. Вихрострумний дефектоскоп / О.Л. Кустовський, О.Л. Дугін, В.Ф. Петрик. – № u201212788; заявл. 09.11.2012; опубл. 10.01.2013. – Бюл. № 1/2013.
- 16.Патент України на корисну модель UA 121451 U, G01N 29/00, G01N 29/34 (2006.01), G01N 29/26 (2006.01), H04W 88/04 (2009.01). Телеметричний вихрострумний дефектоскоп / В.Ф. Петрик, А.Г.Протасов, К.М.Серий, С.С.Українець. – № u201704998; заявл. 23.05.2017; опубл. 11.12.2017. – Бюл. № 23/2017.
- 17.Петрик, В.Ф. Використання серійних мобільних пристроїв при проектуванні портативних дефектоскопів / Петрик В.Ф., Протасов А.Г., Серый К.Н., Повшенко А.А. // Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: технічні науки. – 2019. - Том 30 (69), Ч. 2, № 6. - С.12-16.
- 18.Petryk, V. Study of a mobile eddy current flaw detector / Valentyn Petryk, Olexandr Povshenko // CUTTING-EDGE SCIENCE – 2018 : materials of the International XIII scientific and practical conference, Sheffield, April 30–May 7, 2018. – Sheffield : «Science and aducation» LTD, 2018. – Volume 20. – Pp. 19–22.
- 19.Petrik, V. Using wireless data transmission in eddy current nondestructive testing / Valentin Petrik, Anatoliy Protasov, Kostiantyn Syeryu, Iuliia

					<i>ПК61.100000.000 ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		56

Lysenko // Приборостроение - 2017 : материалы 10-й Международной научно -технической конференции, 1-3 ноября 2017 года, Минск, Республика Беларусь / Белорусский национальный технический университет; редкол.: О. К. Гусев [и др.]. - Минск : БИТУ, 2017. - С. 74-76.

20.Povshenko, O. Modeling of ultrasonic signals in diagnostic devices / O. Povshenko, A. Protasov, V. Petryk // Неруйнівний контроль в контексті асоційованого членства України в Європейському Союзі : матеріали 3-ої науково-технічної конференції, Україна , м. Київ, 17-19 вересня 2019 року. - Київ, Україна, 2019.- С. 57-60.

21. Петрик, В. Ф. О возможности передачи данных неразрушающего контроля объектов на большие расстояния / В. Ф. Петрик, А. А. Миргородский // Найновите постижения на Европейската наука – 2017: материалы за XIII международна научна практична конференция, г. София, 15–22 юни 2017 г. – София : «БялГРАД» ООД, 2017. – С. 45-46.

22.Petryk, Valentyn. Defectoscope Based on Modern Mobile Devices / Valentyn Petryk, Anatolii Protasov // Збірник тез доповідей XVIII Міжнародної науково-технічної конференції «Приладобудування: стан і перспективи», 15-16 травня 2019 року, м. Київ / ПБФ, КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – С. 160.

23.Petryk, V. Ultrasound Flaw Detector Based on a Mobile Phone / Valentyn Petryk, Anatolii Protasov // CUTTING-EDGE SCIENCE – 2019 : materials of the International XV scientific and practical conference, Sheffield, April 30–May 7, 2019. – Sheffield : «Science and aducation» LTD, 2019. – Volume 14. – P. 64–66.

24.Куц, Ю.В. Исследование импульсной вихретоковой системы контроля диэлектрических покрытий / Ю. В. Куц, В. Ф. Петрик, О. Л. Дугин, Ю. Ю. Лисенко // Журнал «Научни Известия НТСМ»: материалы международной конференции «Дни НК 2014», 09-18 червня, 2014 р. – Созополь, 2014. – № 150 – С. 28–30.

					<i>ПК61.100000.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		57

- 25.Петрик, В.Ф. Мобильный вихретоковый дефектоскоп с беспроводной системой передачи данных / В. Ф. Петрик, А. Л. Дугин, В. В. Карпинский, Ю. Ю. Лисенко // Журнал «Научни Известия НТСМ» : материалы международной конференции «Дни на безразрушительния контрол 2016», г. Созополь, 2016 г. – Созополь, 2016. – № 1(187) – С. 43–45.
- 26.Протасов, А.Г. Вихрострумовий дефектоскоп з телеметричним каналом зв'язку / А. Г. Протасов, К. М. Серий, О. Л. Дугін, В. Ф. Петрик // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Електроенергетика та перетворювальна техніка. – 2014. – № 19 (1062). – С. 132–139.
- 27.Петрик, В.Ф. Использование беспроводных технологий в дефектоскопии / В. Ф. Петрик, Г. М. Ковтун, Д. М. Топиха // Ж-л «Научни Известия НТСМ» : материалы международной конференции «Дни НК 2014». – Созополь, 2014. – № 150 – С. 486 – 488.
- 28.Дугін, О. Л. Мобільний вихрострумовий дефектоскоп / О. Л. Дугін , О. Л. Кустовський, В. Ф. Петрик // XX-та Міжнародна конференція та виставка «Сучасні методи та засоби неруйнівного контролю та технічної діагностики», м. Гурзуф, 01 - 05 жовтня 2012 р. – Гурзуф : УІЦ «Наука. Техніка. Технологія», 2012.
- 29.Петрик, В. Ф. Метрологія, стандартизація та сертифікація в неруйнівному контролі [Електронний ресурс] : навчальний посібник з дисциплін «Метрологія» та «Сертифікація і стандартизація» / В. Ф. Петрик, А. Г. Протасов ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 3,04 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2015. – 266 с.
- 30.Куц Ю.В. Магнітний неруйнівний контроль: Навчальний посібник / Ю.В. Куц, А.Г. Протасов, В.К. Цапенко, В.С. Єременко, Ю.Ю. Лисенко – К: НТУУ "КПІ". – 2012. – 139 с.

					<i>ПК61.100000.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		58