

**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

«__» _____ 20__ р.

Дипломний проект

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: «Вихрострумний дефектоскоп для визначення провідності матеріалу»

Виконав:

студент ІV курсу, групи ПК-61 Залеський Юрій Михайлович _____

Керівник:

к.т.н., доцент Баженов Віктор Григорович _____

Консультант з графічного розділу:

ст.вик., к.т.н. Богдан Г. А. _____

Консультант з розробки ел. схеми:

к.т.н., доцент Баженов В. Г. _____

Рецензент:

к.т.н., доцент Макійчук В. А. _____

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

Студент _____

Київ – 2020 року

**Пояснювальна записка
до дипломного проекту
на тему: «Вихрострумний дефектоскоп для визначення
провідності матеріалу»**

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

«__» _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ

на дипломний проект студенту

Залеський Юрій Михайлович

1. Тема проекту «Вихрострумний дефектоскоп для визначення провідності матеріалу», керівник проекту Баженов Віктор Григорович, кандидат технічних наук, доцент, затверджені наказом по університету від «25» травня 2019 р. № 1180-с

2. Термін подання студентом проекту 9 червня 2020 року

3. Вихідні дані до проекту: тип перетворювача – параметричний накладний ВСП; метод вимірювання – метод вищих гармонік; матеріал ОК – сталь;

4. Зміст пояснювальної записки

Вступ

1. Аналітичний огляд

2. Розрахунок ВСП

3. Складання електричної схеми приладу та розрахунок її елементів

Висновки

Список використаних джерел

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслеників, плакатів, презентацій тощо) 3 кресленника

1 – Схема електрична принципова

2 – Схема електрична структурна

3 – Параметричний вихрострумний перетворювач

6. Консультанти розділів проекту*

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Графічний	ст.вик., к.т.н. Богдан Г.А.		
Електричний	к.т.н., доцент Баженов В.Г.		

7. Дата видачі завдання 15 лютого 2020 року _____

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проекту	Термін виконання етапів проекту	Примітка
1	Формулювання завдання проекту	10.02.2020	
2	Обговорення змісту ПЗ	18.02.2020	
3	Розрахунок компонентів	20.03.2020	
4	Оформлення пояснювальної записки	24.04.2020	
5	Розробка креслеників	3.06.2020	

Студент

Юрій ЗАЛЄСЬКИЙ

Керівник

Віктор БАЖЕНОВ

Анотація

У дипломному проекті був спроектований вихрострумний дефектоскоп для контролю електропровідності матеріалу. У вступі обґрунтовано актуальність розробки.

У першому розділі проведено аналітичний огляд, в якому розглянуто: електромагнітні характеристики речовин, котушки індуктивності, методи електромагнітної структуроскопії, а також розглянуто особливості ОК та властивості матеріалу ОК – сталі.

У другому розділі проведено розрахунок вихрострумного перетворювача. Обрані конструктивні параметри перетворювача, розраховано вихідні сигнали, граничне значення струму перегріву котушки, глибина проникнення вихрових струмів тощо.

У третьому розділі було розроблено електричну структурну схему приладу, описано принцип її роботи. Також було підібрано, описано та розраховано елементи електричної принципіальної схеми. Створено програмний код мікроконтролера.

Дипломний проект складається із пояснювальної записки обсягом 63 сторінок, включає 20 ілюстрацій, 1 таблицю, 3 креслення, 10 посилань, 1 додаток, 35 формул.

Summary

In this project an eddy current flaw detector for determining the material conductivity was designed. The introduction substantiates the relevance of the development.

In the first section the analytical review is carried out in which the following are considered: electromagnetic characteristics of substances, inductors, methods of electromagnetic structuroscopy, and features of the controlled object and properties of its material (steel) are considered.

In the second section, the calculation of the eddy current transducer is performed. The design parameters of the transducer are selected, the output signals, the limit value of the coil overheating current, the depth of penetration of eddy currents, etc. are calculated.

In the third section the electric structural scheme of the device was developed, with its work description. Elements of the electrical circuit diagram were selected, described and calculated. The program code of the microcontroller is made.

The diploma project consists of an explanatory note of 63 pages, includes 20 illustrations, 1 table, 3 schemes, 10 references, 2 attachments, 35 formulas.

Зміст

ВСТУП.....	8
РОЗДІЛ 1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД.....	9
1.1. Електромагнітні характеристики речовини	9
1.2. Датчики	15
1.3. Електрична провідність.....	17
1.4. Методи електромагнітної структуроскопії феромагнетиків.....	18
1.5. Аналіз ОК.....	21
1.6. Властивості сталей.....	22
1.7. Вплив термообробки на властивості сталей.....	24
Висновки до I розділу.	27
РОЗДІЛ 2. РОЗРАХУНОК ВСП	28
2.1. Розрахунок конструктивних параметрів ВСП.....	28
2.2. Розрахунок вихідних сигналів ВСП	30
Висновки до II розділу.....	35
РОЗДІЛ 3. СКЛАДАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ СХЕМИ ПРИЛАДУ ТА РОЗРАХУНОК ЇЇ ЕЛЕМЕНТІВ.....	36
3.1. Вибір та обґрунтування електричної структурної схеми приладу	36
3.2. Вибір та розрахунок елементів електричної принципіальної схеми .	39
3.2.1. Синтезатор частоти AD9834.....	39

					ДП ПК 61.07.000 ПЗ		
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			
Розроб.	Залеський Ю.М.				Лім.	Арк.	Аркушів
Перевір.	Баженів В.Г.				5	61	
Н. Контр.	Лашко О.В.				ПБФ, ПК-61		
Затверд.	Баженів В.Г.						

3.2.2. Програмування синтезатору частоти AD9834.....	41
3.2.3. Підсилювач AD797	43
3.2.4. Синхронний детектор AD630	45
3.2.5. Фільтр нижніх частот	48
3.2.6. АЦП AD7878	49
3.2.7. Мікроконтролер	51
Висновки до III розділу.....	57
Список використаних джерел.....	59

					<i>ПК61.07.0000.000 ПЗ</i>	Арк.
						6
Змн	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Перелік умовних позначень, символів, скорочень і термінів:

НК – неруйнівний контроль

ЕМНК – електромагнітний неруйнівний контроль

ВСК – вихрострумний контроль

ВТП – вихрострумний перетворювач

МВГ – метод вищих гармонік

ОК – об'єкт контролю

ЕРС – електрорушійна сила

АЦП – аналого-цифровий перетворювач

ФНЧ – фільтр нижніх частот

FIFO – first-in-first-out

TWI – two-wire interface

ПК – персональний комп'ютер

					<i>ПК61.07.0000.000 ПЗ</i>	Арк.
						7
Змн	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Вступ

Дефекти виникають в об'єктах протягом усього їх життєвого циклу - на стадіях розробки заготовок (дефекти лиття, дефекти прокатки, дефекти кування); на стадії виготовлення деталі (дефекти при загартуванні, при відпуску, при термічній та хімічній обробці); на стадії експлуатації (дефекти, пов'язані із втомою металу, руйнування). Але найчастіше до руйнування деталі призводять невчасно виявлені дефекти на стадії виготовлення. В якості сталей дуже важливу роль грають процеси загартування та відпуску. При неправильній технології сталь стає занадто крихкою та не може бути використана в якості конструкційного матеріалу, а через зміну структури її електромагнітні характеристики не будуть відповідати встановленим нормам. Методи контролю вихровим струмом засновані на аналізі взаємодії перетворювача вихрового струму (ВСП) з електромагнітним полем в електропровідному ОК. Вихрострумний контроль надає можливість виявляти як поверхневі, так і підповерхневі дефекти. Цей метод контролю можна використовувати лише для контролю виробів, виготовлених з електропровідних матеріалів.

Переваги методу вихрострумного контролю перед іншими методами неруйнівного контролю: можливість проводити контроль із зазором між перетворювачем та поверхнею об'єкту контролю; висока чутливість до дефектів, що розташовані на поверхні або поблизу поверхні об'єкту контролю, та, при контролі феромагнетиків, до магнітних параметрів об'єкту контролю; висока швидкість; можливість контролю навіть за наявності непровідних покриттів; можливість контролю об'єктів в труднодоступних місцях та об'єктів із складною геометрією; мінімальні вимоги до стану поверхні; контроль вихровими струмами безпечний для здоров'я оператора.

					ПК61.07.0000.000 ПЗ	Арк.
						8
Змн	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД

1.1. Електромагнітні характеристики речовини

В електротехніці при використанні постійного струму мають справу з омичним опором провідника або його провідністю, а питому електропровідність отримується розрахунковим шляхом, або з таблиць. За законом Ома опір – коефіцієнт пропорційності між електричним током та падінням напруги на провіднику.

При індукційному контролі зазвичай цікавляться структурою невеликих ділянок матеріалу, що мають дуже малий опір, який можливо виміряти лише за допомогою подвійних мостів та компенсаційних потенціометрів. Основна складність таких вимірів полягає в виготовленні зразків та здійснення надійних контактів для струмових та потенційних електродів.

Електрична провідність всіх провідних матеріалів при кімнатній температурі лежить в діапазоні від 0.02 до 62 м/(Ом*мм²). У Міжнародній системі одиниць СІ одиницею електропровідності є сим/м. В 1 сим/м 10⁻⁶ м/(Ом*мм²). Природу електропровідності металів пояснює електронна теорія, з якої виходить, що при утворенні кристалічної решітки від атомів металу відділяється слабш за все зв'язані валентні електрони, які стають колективною власністю усього куска металу. Якщо вважати, що від кожного атома відділяється один електрон, то їх концентрація в одиниці об'єму буде рівна $n=10^{28} - 10^{29} \text{ м}^{-3}$.

Вважають, що електрони поводять себе як молекули ідеального газу. Тому середня швидкість теплового руху електронів оцінюється за формулою

$$V = \sqrt{\frac{8k_0t}{\pi m}}$$

					ПК61.07.0000.000 ПЗ	Арк.
						9
Змн	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

де $k_0 = 1.38 * 10^{-23} \text{ Дж/град}$ – постійна Больцмана;

t – температура, K ;

$m = 0.91 * 10^{-30}$ – маса електрону, $кг$

Звідси для кімнатної температури середня швидкість теплового руху дорівнює $V = 10^5 \text{ м/с}$

При накладанні магнітного поля ця швидкість додається до деякої середньої швидкості пробігу електронів u . Для міді при щільності струму $J = 10^7 \text{ а/м}^2$ ($e = 1.6 * 10^{-19} \text{ Кл}$) $u = 10^{-3} \text{ м/с}$, тобто вона у багато разів менша за швидкість теплового руху.

Якщо припустити, що одразу після чергового зіткнення електрону його швидкість дорівнює нулю, то під дією поля електрон отримає постійне прискорення, яке дорівнює eE/m , та до кінця пробігу швидкість впорядкованого руху стане рівною

$$u_{max} = \frac{eE}{m} \tau$$

де E – напруженість електричного поля, $в/м$;

τ – середній час між двома послідовними зіткненнями, що приблизно дорівнює l/V ;

l – середнє значення довжини вільного пробігу електрону.

Звідси

$$U_{max} = \frac{eEl}{mV}$$

Так як ця швидкість за час пробігу змінюється лінійно, середня за пробіг швидкість дорівнює

					ПК61.07.0000.000 ПЗ	Арк.
						10
Змн	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$u = \frac{eEl}{2mV}$$

Звідси щільність струму дорівнює

$$J = \frac{ne^2l}{2mV}E$$

а електрична провідність

$$\sigma = \frac{ne^2l}{2mV}$$

Намагнічування магнетика характеризується магнітним моментом одиниці об'єму. Цю величину називають вектором намагніченості. Він пов'язаний з напруженістю магнітного поля H співвідношенням

$$J_m = \alpha H$$

де α – магнітна сприйнятливості речовини.

В залежності від знаку та величини магнітної сприйнятливості магнетика ділять на три групи. У випадку, якщо вектор намагніченості направлений проти поля H і магнітна сприйнятливості – від'ємна, то речовина діамагнітна. Фізична природа діамагнетизму витікає з уявлення про електрон, що рухається навколо ядра. Кутова швидкість руху електрону та магнітний момент змінюються під дією магнітного поля, що орієнтоване перпендикулярно площині обертання електрону. В такому разі електрон являє собою невелику індуктивність, у якій згідно правила Ленца створюється ЕРС, що протидіє прикладеному полю.

Деякі атоми та іони мають постійний магнітні моменти, які зазвичай орієнтовані хаотично по всіх напрямках та під дією магнітного поля орієнтуються за напрямком поля незалежно один від одного. Такі речовини називаються парамагнетиками. Їх магнітна сприйнятливості додатна.

					ПК61.07.0000.000 ПЗ	Арк.
						11
Змн	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Будь-який парамагнетик має властивість діамагнетизму, але оскільки ці ефекти протидіють один одному, сумарні магнітні властивості визначаються найбільшим з них.

Феромагнетизм обумовлений взаємною орієнтацією постійних магнітних моментів груп атомів в одному напрямку. Природа парамагнетизму та феромагнетизму одна. До феромагнетиків належить залізо, кобальт, нікель та деякі рідкоземельні елементи. Загальною властивістю всіх феромагнітних матеріалів є їх електронна структура. Залізо, кобальт та нікель належать до перехідної 3d групи, а рідкоземельні елементи – до перехідної 4f групи [Л. 1].

У розмагнічених феромагнітних матеріалах домени орієнтовані випадково і їх магнітні поля нейтралізують один одного. Дія магнітного поля призводить до орієнтації доменів у напрямку прикладеного поля і їх магнітні моменти складаються.

У магнітом'яких матеріалів навіть невелике зовнішнє поле призводить до орієнтації доменів уздовж силових ліній поля, але внаслідок малої утримуючої сили при знятті зовнішнього поля залишається лише слабе намагнічування. У магнітожорстких матеріалів для переорієнтації доменів повинно бути прикладене сильне зовнішнє поле, а після зняття цього поля орієнтація доменів зберігається і зразок стає постійним магнітом.

Залежність магнітної індукції B від H при зміні H не являє собою єдину криву, а характеризується петлею гістерезису. Площа петлі гістерезису відповідає роботі, необхідній для проведення одного циклу перемагнічування зразку. Форма петлі, максимальне значення індукції, положення точок перетину з осями координат залежать від умов термообробки феромагнітного матеріалу, його хімічного складу та інших факторів.

					<i>ПК61.07.0000.000 ПЗ</i>	Арк.
						12
Змн	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

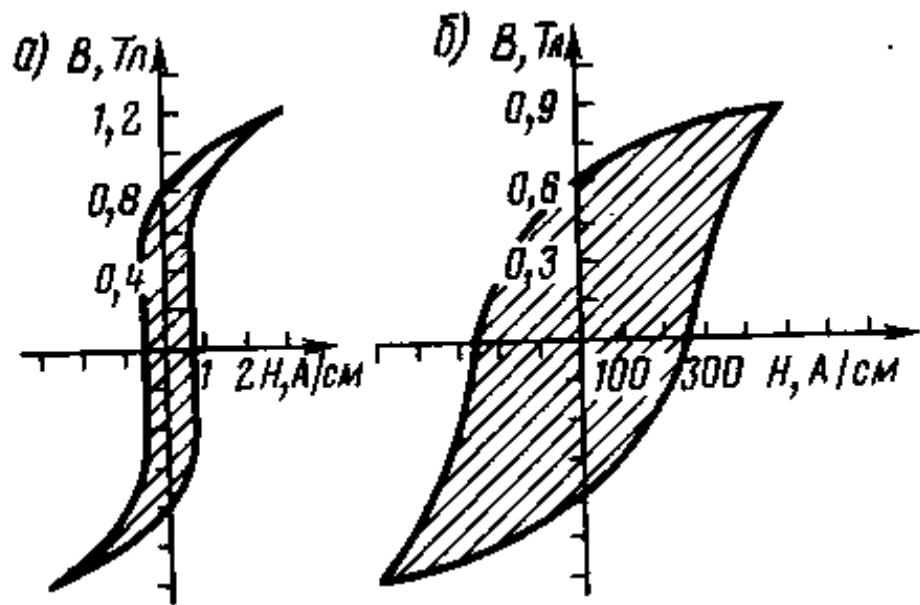


Рис. 1 - Петлі гістерезису для магнітно-м'яких та магнітно-твердих матеріалів

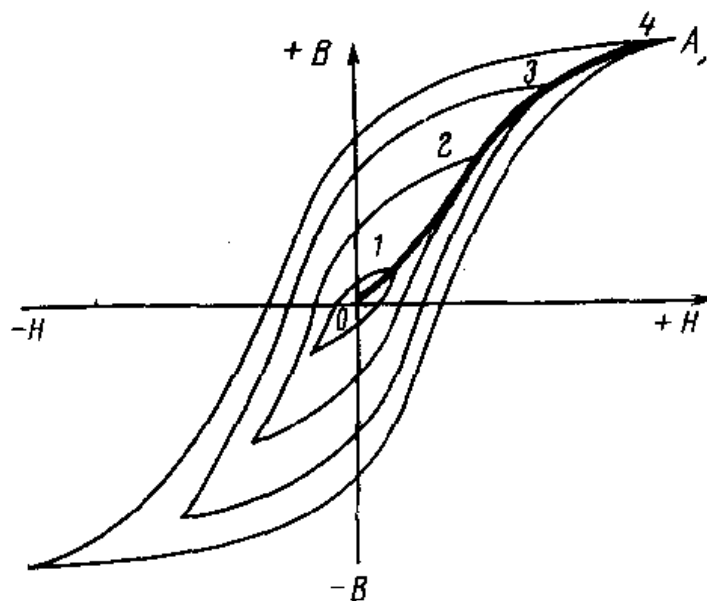


Рис. 2 - Петлі гістерезису при різних значеннях напруженості поля H

На кривій намагнічування три області: нижня ділянка – ділянка «зміщення», що характеризується зміщенням меж між областями мимовільної намагніченості. У більш сильних полях виконується процес

повороту областей мимовільної намагніченості у напрямку поля. Ця ділянка називається областю обертання. Останній етап намагнічування, що виконується у полях вище за технічне насичення, називається парапроцесом або істинним намагнічуванням. Характер кривої намагнічування обґрунтовується кристалічною структурою речовини, а також внутрішніми навантаженнями, що пов'язані з магніострикцією.

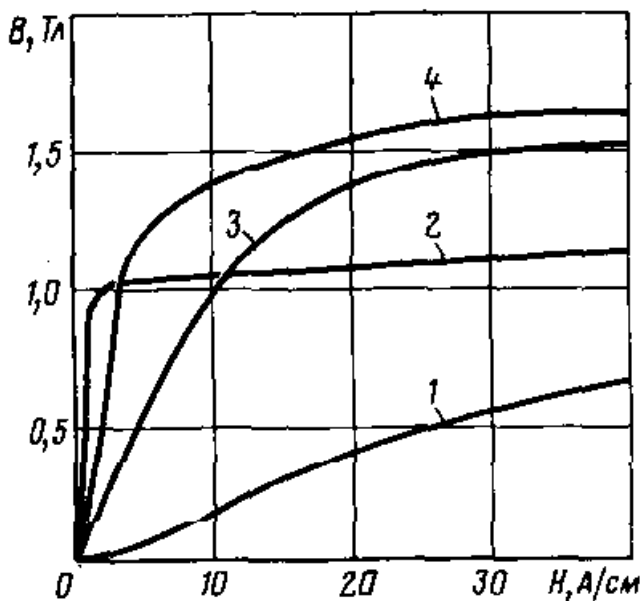


Рис. 3 - Криві намагнічування різних матеріалів (1 – чавун, 2 – пермалой, 3 – сталь звичайна, 4 – сталь електротехнічна)

Існує якнайменш чотири типи петель гістерезису: нормальна петля (із співвідношенням $B_r/B_{\text{МАКС}} = 0,5..0,7$); прямокутна петля, характерна для деяких типів феритів; перетягнута петля; стрілоподібна петля. На форму петлі впливають зовнішні пружні навантаження, температура, геометричні розміри, частота зміни намагнічуючого поля, наявність постійного підмагнічуючого поля та інше.

Джерелами змінного магнітного поля при вимірюваннях методом вихрових струмів є котушки індуктивності, по яким протікає змінний струм.

1.2. Датчики

Форми та розміри котушок індуктивності, що використовуються у якості датчиків при індукційному контролі, визначаються апаратурою, розмірами та формою об'єкту контролю.

Для інтегральної оцінки структурного стану матеріалу протяжних деталей використовуються прохідні котушки, а для локального контролю окремих ділянок деталей – накладні котушки.

У приладах з накладними датчиками використовуються котушки індуктивності без сердечників та з сердечниками з магнітодіелектричних матеріалів, таких як ферити. Використання котушок із сердечниками дозволяє створити високочутливі прилади з датчиками діаметром 1-1.5 мм.

В структуроскопії використовуються котушки, запечені з фериту. Ферит – це феромагнетик, що по своїх властивостях відрізняється від феромагнітних матеріалів, з яких виготовляють карбонільні та альсіферові сердечники. Ферит має дві підрешітки з магнітними моментами, що направлені антипаралельно. Компенсація відбувається тоді, коли ці моменти будуть рівними. Намагніченість насичення у феритів менша, ніж у магнетиків. Вплив температури на початкову динамічну магнітну проникність зростає з ростом цієї величини.

Якщо поблизу котушки розмістити феромагнітний метал, будуть спостерігатися такі явища: частина енергії поглинається металом та перетворюється в тепло; друга частина віддзеркалюється від поверхні металу, зменшуючи індуктивність котушки. Також буде спостерігатися деяке збільшення індуктивності котушки внаслідок зменшення магнітного опору та значне збільшення активних втрат з ростом частоти живлючого струму.

Таким чином, загальна дія цих факторів призводить до різкого зростання активних втрат і деякому незначному зміненню індуктивності.

					ПК61.07.0000.000 ПЗ	Арк.
						15
Змн	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Ці зміни характеризуються величиною внесених опорів. Схема заміщення котушки, що розташована поблизу металічної поверхні, зображується у вигляді двох послідовно ввімкнених активних та індуктивних опорів $R + R_{\text{вн}}$ та $\omega L_0 + \omega L_{\text{вн}}$. Зі збільшенням частоти живлючого струму доводиться ускладнювати еквівалентну схему, включаючи додаткові ємності та індуктивності, що характеризують ємність між витками котушки та ефект близькості.

При індукційному контролі важливим є характер зміни внесених опорів під дією таких факторів як електропровідність контрольованого металу та частота живлючого струму.

При зміні електричної провідності немагнітних металів від нуля до нескінченності внесений індуктивний опір змінюється від нуля до деякого граничного значення. При контролі феромагнітних матеріалів знак внесеного опору залежить від частоти. На низьких частотах внесений індуктивний опір додатній, а на високих – від’ємний.

Якщо котушка розташована поблизу немагнітних металів с різною провідністю, то при незмінній частоті струму годограф вектору внесеного опору, що зображений на комплексній площині, буде уявляти собою криву, близьку до дуги окружності. Хордою цієї дуги є відрізок на осі ординат до точки максимального значення внесеного індуктивного опору, що відповідає матеріалам з нескінченно великою провідністю.

Накладні вихрострумові перетворювачі поділяються на параметричні та трансформаторні. Параметричні ВСП зазвичай мають лише одну обмотку та простіші в розрахунках. Вихідний параметр параметричного накладного ВСП – комплексний опір. Вихідний сигнал з такого датчику дуже сильно залежить від температури. Трансформаторні датчики мають якнайменш дві обмотки – збуджуючу та вимірювальну. Трансформаторні датчики мають високу температурну стабільність та чутливість.

					<i>ПК61.07.0000.000 ПЗ</i>	Арк.
						16
Змн	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Частина питомого опору, що залежить від коливань іонів у вузлах решітки і степені спотворення решітки $\rho_{\text{дом}}$ визначається наявністю домішок, що порушують ідеальну періодичність кристалів та збільшують пружне розсіяння електронів. При невеликих концентраціях домішок питомий опір змінюється пропорційно їх концентрації. В металах з більш високою концентрацією та у твердих розчинах подвійних сплавів питомий опір приблизно пропорційний $x(1-x)$, де x – атомна концентрація одного з компонентів сплаву. Це несправедливо, якщо існує порядок ближньої або дальньої дії, адже у цьому випадку збільшення впорядкування призводить до зменшення опору [Л. 1]

Третя складова частина питомого опору $\rho_{\text{м}}$ пов'язана з розсіянням електронів провідності атомами з некомпенсованими електронами. Це характерно для рідкоземельних і деяких перехідних металів. Ця складова питомого опору збільшується при зміні температури до точки Кюрі і після цього залишається незмінною.

Повний питомий опір за правилом Маттисена:

$$\rho_{\text{повн}} = \rho_{\text{темп}} + \rho_{\text{дом}} + \rho_{\text{м}} + \rho_{\text{т}}$$

де $\rho_{\text{т}}$ – складова питомого опору, що залежить від тиску та деформації.

У перехідних металів та феромагнетиків температурний коефіцієнт електричної провідності має порядок 10^{-3} .

1.4. Методи електромагнітної структуроскопії феромагнітних матеріалів

Основні характеристики феромагнітних матеріалів – коерцитивна сила, залишкова магнітна індукція, основна крива намагнічування, магнітна проникність, площа та форма петлі, спектральний склад індукції або ЕРС. Вони використовуються для сортування і оцінки твердості і якості

					<i>ПК61.07.0000.000 ПЗ</i>	Арк.
						18
Змн	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

термообробки феромагнітних матеріалів. Найбільш структурно-чутливими параметрами у неферомагнітних матеріалах є питома електрична провідність, а у феромагнітних – їх магнітні властивості. Взаємодія змінного магнітного поля з феромагнітним металом викликає у датчику два ефекти: збільшення індуктивності через зменшення розсіяння магнітного поля, що залежить від величини магнітної проникності і магнітного опору, а також зменшення індуктивності та зростання втрат за рахунок дії вихрових струмів, що ярко виражені на частотах більше 100 кГц. В залежності від контрольованого параметру матеріалу розрізняють такі види структуроскопії феромагнітних матеріалів: контроль шляхом зміни коерцитивної сили (коерцитиметрія), контроль по залишковій намагніченості, контроль за методом шумів (магнітошумовий контроль Баркгаузена), контроль магнітної проникності матеріалу, осцилографічний метод та метод вищих гармонік (МВГ) [Л. 3, 5, 6].

Значення коерцитивної сили залежить від структури і хімічного складу матеріалу і є показником якості його термічної обробки. Існує декілька визначень поняття коерцитивної сили. У неруйнівному контролі її прийнято визначати по намагніченості або по індукції. Чисельно коерцитивна сила дорівнює напруженості розмагнічення поля, що необхідна для зміни його намагніченості від значення залишкової намагніченості до нуля. Вимір коерцитивної сили складається якнайменш з двох операцій: намагнічування та розмагнічування зразку.

Метод вищих гармонік заснований на використанні нелінійних властивостей феромагнітних виробів і гармонійного аналізу електромагнітних параметрів датчику. Метод має значно більшу інформативність та чутливість до зміни параметрів виробу, ніж інші методи контролю. На малюнках 5 та 6 приведені графіки залежності вихідного сигналу перетворювача від прикладеної напруги. Верхній ряд – залежність амплітуд, нижній ряд – залежність фази.

					<i>ПК61.07.0000.000 ПЗ</i>	Арк.
						19
Змн	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1.5 Аналіз ОК

Сталь є одним з найбільш важливих продуктів металургії, оскільки практично кожна галузь промисловості потребує використання сталі.

Області використання деяких марок сталей:

- Ст 2 – рами, вісі та деталі, що цементуються.
- Ст 3 — деталі з високою твердістю поверхі та з малою міцністю серцевини, деталі металоконструкцій, рами, крюки кранів.
- Ст 5 – деталі з підвищеними вимогами до міцності, зубчасті колеса, вали.
- Ст 6 – деталі з підвищеними вимогами до міцності, вали, муфти.
- 30ХГСА – зварні конструкції, деталі з підвищеними вимогами до міцності.
- 18ХГТ – зубчасті колеса, вали, муфти, що працюють на високих швидкостях та зазнають ударних напружень.
- 09Г2С – парові котли та ємності, що працюють під тиском при екстремальних температурах, а також в хімічній та нафтовій промисловості.
- 40, 45 – деталі з підвищеними вимогами до міцності, що піддаються термічній обробці.
- А30, А40Г – деталі, що важко оброблювати та що працюють при значних навантаженнях.
- 10ХСНД – для зварювальних конструкцій в судобудуванні, в хімічній промисловості.
- 40Х – зубчасті колеса, вали, що працюють на високих швидкостях.
- 08Х18Н10 – деталі, що працюють в агресивній середі при підвищених температурах.
- У8А – зенковки, стамески, деталі з високою твердістю поверхні.
- ХВГ – інструменти для різання.

					ПК61.07.0000.000 ПЗ	Арк.
						21
Змн	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

В дійсності поверхня контрольованої деталі має бути плоскою або її радіус кривизни повинен бути значно більшим за діаметр котушки. Даний метод НК потребує використання високочастотних збуджуючих сигналів, але при використанні таких сигналів глибина проникнення вихрових струмів стає дуже невеликою. Через це можливий лише контроль поверхневої структури деталей, поверхневого загартування тощо. Такі деталі та вироби мають високу твердість поверхні та високу міцність серцевини. Також деталь повинна мати деяку товщину, що буде більша за глибину проникнення вихрових струмів, тому контроль пластин є неможливим.

1.6. Властивості сталей

Властивості сталей та чавунів залежать від вмісту вуглецю. В низьковуглецевих сталях збільшення вмісту вуглецю призводить до підвищення міцності та зниження пластичності, максимальна магнітна проникність падає, коерцитивна сила та електричний опір збільшуються.

Розчинність вуглецю в залізі залежить від того, в якій кристалічній формі існує залізо. α -залізо розчинює 0,0025% при 20 °С, а γ -залізо розчинює 2% при 1130 °С. Твердий розчин вуглецю в α -залізі називається феритом, в γ -залізі – аустенітом. Розпад аустеніту починається при 723 °С.

Залізо з вуглецем створює ряд хімічних з'єднань FeC , Fe_2C , Fe_3C , але лише цементит Fe_3C відносять до стійких з'єднань. Вуглець в цементиті складає 6.67%, температура плавлення – 1550 °С. Цементит має високу електропровідність. Він слабо феромагнітний, втрачає магнітні властивості при 217 °С, має високу твердість та дуже низьку пластичність.

В залежності від вмісту вуглецю сталі поділяють на доевтектоїдні ($C \leq 0.83\%$), евтектоїдні ($C = 0.83\%$) та заевтектоїдні ($C > 0.83\%$).

					<i>ПК61.07.0000.000 ПЗ</i>	Арк.
						22
Змн	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



Рис. 7 - Зразок цементованої сталі

Евтектоїдні сталі характерні тим, що вся маса аустеніту в них переходить в евтектоїдний розчин, в котрому розрізняють невеликі виділення цементиту, що розсіяні в фериті. Така структура називається перлітом. Заевтектоїдна сталь складається з перліту з надлишковим вмістом цементиту. В доевтектоїдних сталях окрім перліту є надлишковий ферит. На відміну від цементиту він може заповнювати значні ділянки в сталі.

					<i>ПК61.07.0000.000 ПЗ</i>	Арк.
						23
Змн	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1.7. Вплив термообробки на властивості сталей

Термічна обробка складається з відпалу, фазову перекристалізацію, загартування, відпуск та старіння, а також може включати хіміко-термічну обробку. У більшості низьковуглецевих сталей температура загартування приблизно дорівнює 900 °С, у середньовуглецевих – 850 °С.

Властивості матеріалу при термообробці визначаються декількома факторами. При невеликій кількості цементитних включень пластична деформація розвивається відносно без перешкод і матеріал характеризується невеликою твердістю, більшою електричною провідністю та магнітною проникністю.

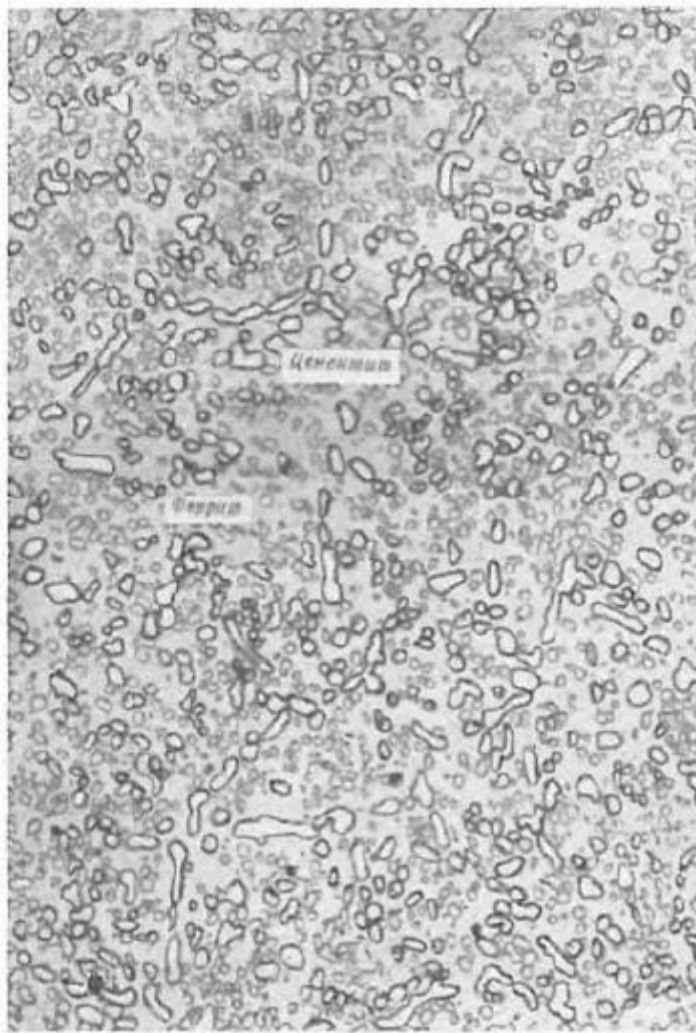


Рис. 8 - Перліт зернистий. Зерна цементиту в феритовій основі.

					ПК61.07.0000.000 ПЗ	Арк.
						24
Змн	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Найбільш суттєвий вплив на властивості сталі має температура відпуску. Відпуск сталей полягає в нагріванні загартованих сталей до температур, що не перевищують температури утворення аустеніту, витримуванні при цих температурах для перетворення мартенситу гартування у рівноважні структури та наступного охолодження. Дрібноголчаста структура досягається лише при початковій дрібнозернистій аустенітній структурі. Типова структура загартованої сталі – голчастий мартенсит, що містить певну кількість аустеніту, має твердість приблизно 60 по Роквелу.

Будь-яка термообробка сталей, що призводить до утворення твердого розчину (аустеніту або мартенситу), знижує її електричну провідність. При загартування на мартенсит електричний опір збільшується. При відпуску він зменшується внаслідок переходу з твердого розчину до гетерогенної суміші. Найбільш різко опір знижується при найбільшій швидкості розпаду мартенситу – в інтервалі температур 100-300 °С.

Марка	Tз, °С	Tотп, °С	ρ, нОм*м
18Х2Н4ВА	850	20	0,405
		200	0,398
		400	0,381
		500	0,367
		550	0,36
		600	0,368
30ХГСНА	900	20	0,425
		200	0,412
		400	0,396
		500	0,383
		600	0,371
38 ХНЗМФА	850	20	0,417
		200	0,377
		300	0,361
		400	0,369
		500	0,348
		550	0,339
		600	0,318
30Х14НМС	950	20	0,924
		200	0,908

		400	0,865
		500	0,82
		550	0,854
		600	0,82
60С2	850	20	0,484
		200	0,425
		300	0,418
		400	0,393
		500	0,395
		600	0,4
60С2ХФА	950	20	0,534
		200	0,465
		300	0,482
		400	0,46
		500	0,43
		600	0,396
60Х2СМФ	900	20	0,58
		200	0,521
		300	0,497
		400	0,48
		500	0,457
		600	0,391
		700	0,377

Табл. 1 – Залежність електричної провідності сталей від марки, температури загартування та температури відпуску

Електричний опір тим вище, чим більше вуглецю перейшло в твердий розчин при загартуванні. В доевтектоїдних сталях опір зростає інтенсивніше, ніж в заевтектоїдних. Електричний опір сталей при температурі 20 °С, з вмістом вуглецю до 1% і загартованих при 850 °С визначається як

$$\rho_{20} = 10.3 + 1.6p + 23.6p^2$$

де p – вміст вуглецю у відсотках маси.

Висновки до I розділу

В даному розділі проаналізовано структурні та електромагнітні параметри феромагнітних сталей, залежність цих параметрів від температури середовища, вмісту вуглецю, умов загартування, штучного старіння та відпуску, а також сталей. Оглянуто вихрострумові перетворювачі, обґрунтованість використання параметричних накладних ВСП, а також методи вимірювання параметрів матеріалів.

					ПК61.07.0000.000 ПЗ	Арк.
						27
Змн	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 2. РОЗРАХУНОК ВСП

2.1. Розрахунок конструктивних параметрів ВСП

1. Вибір основних розмірів перетворювача

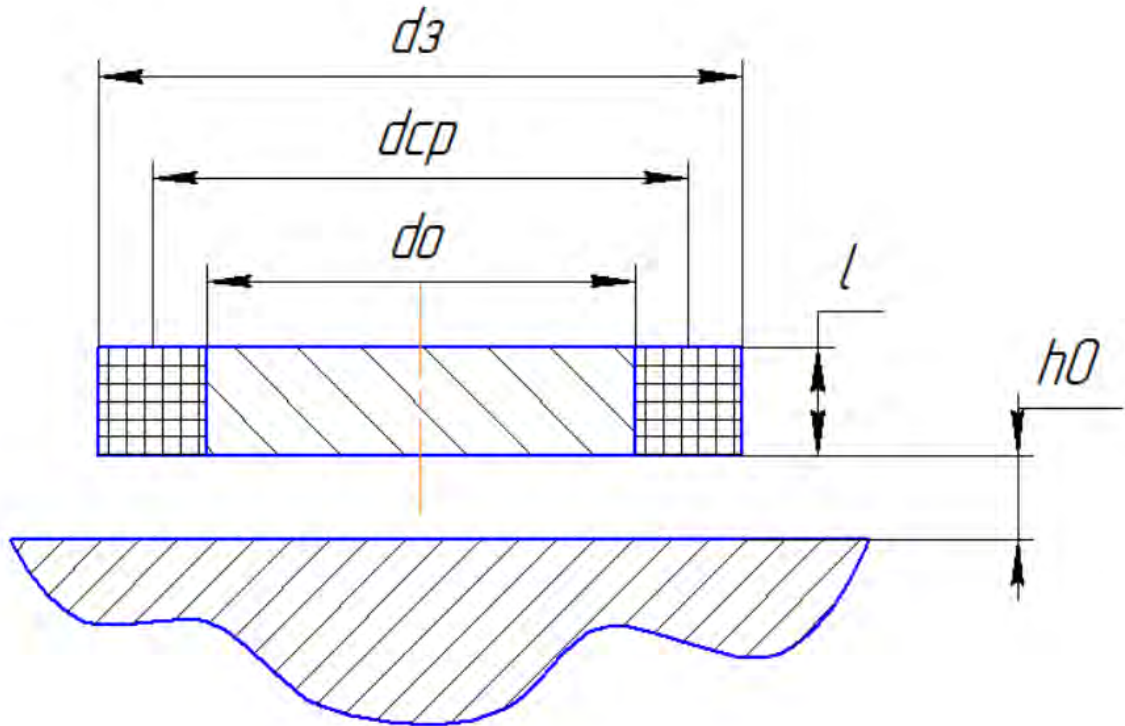


Рис. 9 - Основні розміри ВСП

Для розрахунку параметричного накладного ВТП потрібно задати діаметр осердя d_o , діаметр дроту d_d , діаметр ізоляції дроту $d_{із}$ та величину зазору h_0 між перетворювачем та ОК.

$$d_o = 3 \text{ мм}$$

$$d_d = 0.12 \text{ мм}$$

$$d_{із} = 0.105 \text{ мм}$$

$$h_0 = 0.5 \text{ мм}$$

Кількість шарів обмотки $n = 3$

Діаметр дроту з урахуванням ізоляції:

					ПК61.07.0000.000 ПЗ	Арк.
						28
Змн	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$d_{\text{діз}} = d_{\text{д}} + d_{\text{із}} = 0.12 + 0.105 = 0.225 \text{ мм}$$

Матеріал осердя – мідь.

$$\text{Електричний опір міді } \rho = 0.0175 \text{ Ом} \cdot \frac{\text{мм}^2}{\text{м}}$$

2. Вибір середнього діаметру обмотки:

$$D_{\text{ср}} \leq 0.1 * D_{\text{ок}}$$

де $D_{\text{ок}}$ – діаметр кривизни ОК.

$$D_{\text{ср}} = d_{\text{o}} + n * d_{\text{діз}} = 3 + 3 * 0.225 = 3.675 \text{ мм}$$

3. Вибір узагальненого параметру β з умови досягнення максимальної чутливості перетворювача до електропровідності σ матеріалу ОК.

$$\beta \cong 3.5$$

4. Вибір кількості витків котушки

3 конструктивних міркувань обираємо кількість витків в одному шарі обмотки $W' = 5$

5. Розрахунок довжини котушки

$$l \geq W' * d_{\text{діз}} = 5 * 0.225 = 1.125 \text{ мм}$$

6. Розрахунок еквівалентного діаметру котушки:

$$D_{\text{екв}} = D_{\text{ср}} + 1.5 * h_{\text{ср}}$$

					<i>ПК61.07.0000.000 ПЗ</i>	Арк.
						29
Змн	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

де $h_{\text{ср}}$ – відстань між поверхнею ОК і середнім витком обмотки котушки

$$h_{\text{ср}} = h_0 + \frac{l}{2} = 0.5 + \frac{1.2}{2} = 1.1 \text{ мм}$$

Тоді:

$$D_{\text{екв}} = 3.675 + 1.5 * 1.1 = 5.325 \text{ мм}$$

2.2 Розрахунок вихідних сигналів ВСП

1. Розрахунок частоти струму збудження

$$\beta = \frac{D_{\text{екв}}}{\sqrt{\omega\gamma\mu_0}} \Rightarrow f = \frac{1}{2\pi} * \frac{4\beta^2}{D_{\text{екв}}^2\gamma\mu_0}$$

де γ – питома електропровідність матеріалу

для вуглецевої сталі прийmemo $\gamma = 7.69 \frac{\text{МСм}}{\text{м}}$

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Гн}}{\text{м}}$ – магнітна стала

$$\omega = 2\pi f$$

$$f = \frac{1}{2\pi} * \frac{4 * 3.5^2}{(5.325 * 10^{-3})^2 * 7.69 * 10^6 * 4\pi * 10^{-7}} = 30 \text{ кГц}$$

2. Розрахунок глибини проникнення вихрових струмів:

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega\gamma\mu_0}}$$

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{2\pi\gamma\mu_0}} = \sqrt{\frac{1}{2\pi * 30 * 10^3 * 7.69 * 10^6 * 4\pi * 10^{-7}}} = 0.94 \text{ мм}$$

					ПК61.07.0000.000 ПЗ	Арк.
						30
Змн	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Скоректуємо значення β з умови $\delta \ll T$, де T – товщина ОК.

Також потрібно врахувати необхідність збільшення частоти збуджуючого струму для досягнення максимального значення внесеного опору.

$$T \cong 3.5 \text{ мм}$$

При $\beta = 6.5$:

$$f = \frac{1}{2\pi} * \frac{4 * 6.5^2}{(3.66 * 10^{-3})^2 * 7.69 * 10^6 * 4\pi * 10^{-7}} = 98 \text{ кГц}$$

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{2\pi\gamma\mu_0}} = \sqrt{\frac{1}{2\pi * 206 * 10^3 * 7.69 * 10^6 * 4\pi * 10^{-7}}} = 0.4 \text{ мм} \ll T$$

Приймаємо $f = 100$ кГц

3. Розрахунок струму збудження I з умови перегріву котушки за формулою

$$I = (0.85..0.9)I_{\text{пр}}$$

$$I_{\text{пр}} = \sqrt{\frac{\lambda S_{\text{охл}}[\theta]_{\text{д}}}{R}}$$

де $\lambda = 8.12 \text{ Вт/м}^2$ – коефіцієнт теплопередачі

$S_{\text{охл}}$ – поверхня охолодження котушки

$[\theta]_{\text{д}}$ – допустима температура перегріву

$R = 4\rho W \frac{D_{\text{ср}}}{d_{\text{д}}^2}$ – активний опір котушки, де $d_{\text{д}}$ задається в міліметрах

					ПК61.07.0000.000 ПЗ	Арк.
						31
Змн	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ρ – електричний опір міді

Обираємо:

$$\lambda = 10$$

$$[\theta]_d < 25^\circ\text{C}$$

$$\begin{aligned} S_{\text{охл}} &= 2\pi * (d_o + n * d_{\text{діз}} + (n - 1) * 0.1) * l \\ &= 2\pi * (3 + 3 * 0.225 + 2 * 0.1) * 1.2 = 29 \text{ мм}^2 \end{aligned}$$

$$R = 4\rho W \frac{D_{\text{ср}}}{d_d^2} = 4 * 0.0175 * 16 * \frac{3.66 * 10^{-3}}{0.12^2} = 0.27 \text{ Ом}$$

Тоді

$$I_{\text{пр}} = \sqrt{\frac{10 * 29 * 10^{-6} * 25}{0.27}} = 0.165 \text{ А}$$

$$I = 0.85 I_{\text{пр}} = 0.85 * 0.165 = 0.14 \text{ А}$$

4. Розрахунок внесеного опору

Вихідний сигнал параметричного накладного ВТП – комплексний опір \dot{Z}

$$\dot{Z} = \dot{Z}_0 + \dot{Z}_{\text{вн}}$$

де $\dot{Z}_0 = R_0 + j\omega L_0$ – опір котушки на холостому ході

$$\dot{Z}_{\text{вн}} = \omega L_0 * \dot{Z}_{\text{вн}}^* * e^{-3\xi} - \text{внесений опір ОК}$$

ξ – відносна подвоєна відстань між середнім витком ВТП та поверхнею ОК

L_0 – індуктивність на холостому ході

					ПК61.07.0000.000 ПЗ	Арк.
						32
Змн	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Розрахунок опору холостого ходу:

$$R_0 = R = 0.27 \text{ Ом}$$

$$L_0 = \mu_0 W^2 D_{\text{ср}} = 4\pi * 10^{-7} * 15^2 * 3.66 * 10^{-3} = 1 * 10^{-6} \text{ Гн}$$

$$\dot{Z}_0 = 0.27 + j * 2\pi * 100 * 10^6 * 1 * 10^{-6} = 0.27 + j0.65 \text{ Ом}$$

Розрахунок внесеного опору:

$$\xi = \frac{2h_{\text{ср}}}{D_{\text{екв}}} = \frac{2 * 1.1}{5.33} = 0.413$$

Значення $\dot{Z}_{\text{вн}}^*$ визначається за годографом

Для параметричного накладного ВТП $\dot{U}_{\text{вн}}^* = \dot{Z}_{\text{вн}}^*$

$$\dot{Z}_{\text{вн}}^* = R_{\text{вн}}^* + jL_{\text{вн}}^*$$

Для $\beta = 6.5$:

$$R_{\text{вн}}^* = \text{Re}\dot{Z}_{\text{вн}}^* = 0.25 \text{ Ом}$$

$$L_{\text{вн}}^* = \text{Im}\dot{Z}_{\text{вн}}^* = -0.64 \text{ Ом}$$

$$\dot{Z}_{\text{вн}}^* = 0.25 - j0.64$$

					ПК61.07.0000.000 ПЗ	Арк.
						33
Змн	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

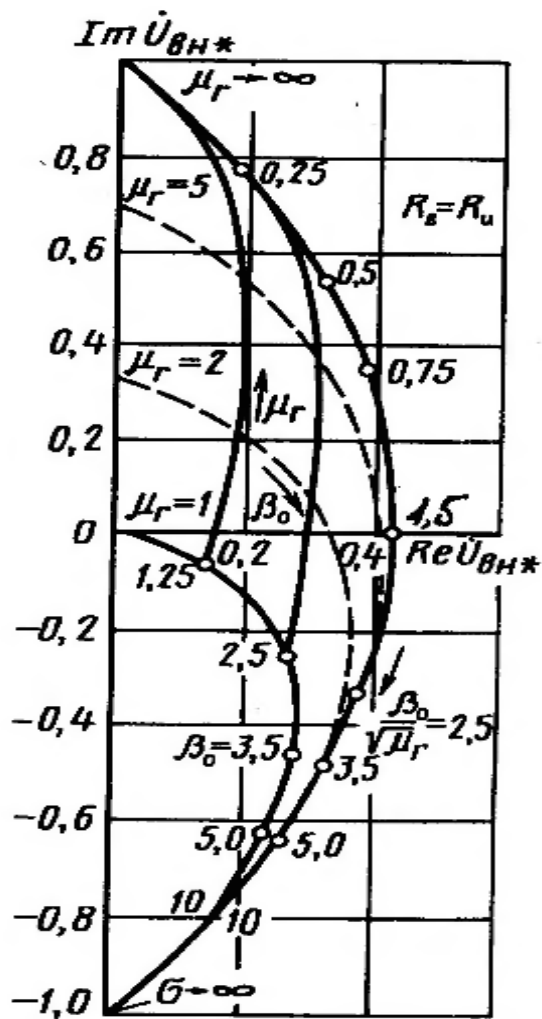


Рис. 10 - Годографи відносної внесеної напруги параметричного накладного вихрострумowego перетворювача, що розташований над провідною феромагнітною середою

Тоді внесений опір $\dot{Z}_{вн}$:

$$\dot{Z}_{вн} = 2\pi * 100 * 10^3 * 1 * 10^{-6} * (0.25 - j0.64) * e^{-3*0.413} = 0.05 - j0.15$$

Загальний комплексний опір:

$$\dot{Z} = \dot{Z}_0 + \dot{Z}_{вн} = 0.27 + j0.65 + 0.05 - j0.15 = 0.32 + j0.5$$

Висновки до II розділу

В даному розділі виконано розрахунок параметричного накладного ВСП, проаналізовано залежність вихідного сигналу від електричної провідності матеріалу та від частоти струму збудження. Розраховано геометричні розміри ВСП. За годографом визначено вихідний комплексний опір.

					<i>ПК61.07.0000.000 ПЗ</i>	Арк.
						35
Змн	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 3. СКЛАДАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ СХЕМИ ПРИБАДУ ТА РОЗРАХУНОК ЇЇ ЕЛЕМЕНТІВ

3.1 Вибір та обґрунтування електричної структурної схеми приладу

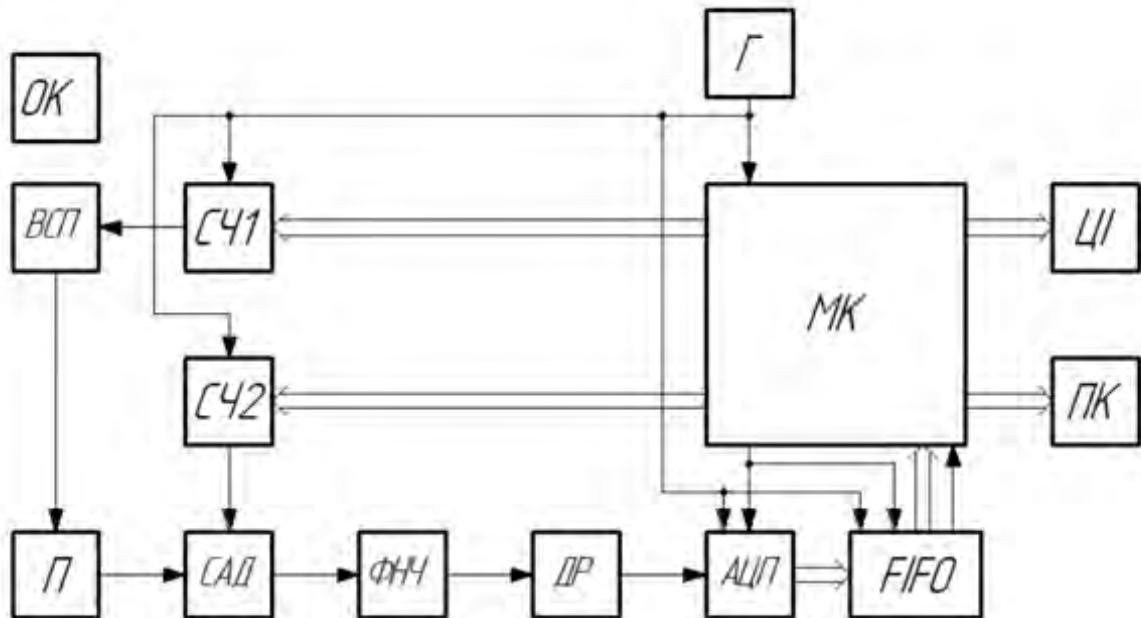


Рис. 11 - Структурна схема приладу

Прилад працює наступним чином. За допомогою мікроконтролера МК та генератору опорної частоти Γ на виходах синтезаторів частоти СЧ1 та СЧ2 задаються сигнали із заданими частотами. Сигнал з виходу синтезатору СЧ1 надходить на вихрострумний перетворювач ВСП, який взаємодіє з об'єктом контролю ОК. Сигнал на виході ВСП буде залежати від параметрів ОК та наявності в ньому дефектів. Цей сигнал підсилюється на підсилювачі П і надходить на синхронний амплітудний детектор САД разом з сигналом з виходу синтезатора СЧ2. На синтезаторі СЧ2 частота послідовно змінюється на кратну кількість частот на виході СЧ1 для відокремлення відповідних гармонік сигналу, причому фаза на виході СЧ2 періодично змінюється на 90 градусів. В результаті на виході синхронного детектору з'явиться сигнал, залежний від амплітуди і фази такої гармоніки вимірювального сигналу, частота якої співпадає з частотою сигналу на виході СЧ2. Цей сигнал

відфільтровується фільтром нижніх частот ФНЧ, після чого через драйвер ДР подається на аналого-цифровий перетворювач АЦП. Цифровий сигнал з АЦП записується в пам'ять FIFO. На достатньо високих частотах збудження (від 100 кГц) прилад може бути використаний у якості структуроскопу. При послідовній зміні сигналу на виході синтезатору СЧ1 на виході САД будуть отримані залежності амплітуд та фаз непарних гармонік вимірювального сигналу, що будуть послідовно записуватись в регістр та оброблятися мікроконтролером для подальшого відображення на ЦІ або для передавання інформації на ПК. Також існує можливість підключення до МК термічного датчику для корегування результатів.

Обробка сигналу полягає в визначенні амплітуди та фази цього сигналу.

Сигнал на виході підсилювача П буде мати вигляд

$$S(t) = A_1 \sin(\omega t + \varphi_1) + A_2 \sin(2\omega t + \varphi_2) + \dots + A_n \sin(n\omega t + \varphi_n) + \dots$$

Тоді, оскільки САД математично виконує операцію множення, а СЧ2 періодично змінює фазу на 90 градусів, то отриманий на виході САД сигнал буде мати вигляд

$$k \cdot a_n(t) \cdot b1_n(t) = k \cdot A_n \sin(n\omega t + \varphi_n) \cdot B \sin(n\omega t)$$

$$k \cdot a_n(t) \cdot b1_n(t) = \frac{k}{2} A_n B [\cos(n\omega t - n\omega t + \varphi_n) - \cos(n\omega t + n\omega t + \varphi_n)]$$

або

$$k \cdot a_n(t) \cdot b2_n(t) = k \cdot A_n \sin(n\omega t + \varphi_n) \cdot B \cos(n\omega t)$$

$$k \cdot a_n(t) \cdot b2_n(t) = \frac{k}{2} A_n B [\sin(n\omega t - n\omega t + \varphi_n) + \sin(n\omega t + n\omega t + \varphi_n)]$$

де $a_n(t) = A_n \sin(n\omega t + \varphi_n)$ – одна гармоніка сигналу з ВСП

$b1_n(t) = B \sin(n\omega t)$ – сигнал з СЧ2

$b2_n(t) = B \cos(n\omega t)$ – сигнал з СЧ2 з фазою, зміненою на 90 градусів

					<i>ПК61.07.0000.000 ПЗ</i>	Арк.
						37
Змн	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

n – номер вимірюваної гармоніки

k – коефіцієнт передачі САД

Фільтр нижніх частот відфільтровує складові $-\cos(2n\omega t + \varphi_n)$ та $\sin(2n\omega t + \varphi_n)$, а також усі гармоніки, частота яких не співпадає з частотою сигналу на виході СЧ2. Тому, отримані сигнали мають вигляд

$$c_c = \frac{1}{2} k A_n B \cos(\varphi_n)$$

та

$$c_s = \frac{1}{2} k A_n B \sin(\varphi_n)$$

Тоді амплітуда та фаза сигналу визначаються відповідно як

$$A = \frac{2\sqrt{c_s^2 + c_c^2}}{kB}$$

$$\varphi = \operatorname{arctg}\left(\frac{c_s}{c_c}\right)$$

					ПК61.07.0000.000 ПЗ	Арк.
						38
Змн	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3.2 Вибір та розрахунок елементів електричної принципіальної схеми

3.2.1. Синтезатор частоти AD9834

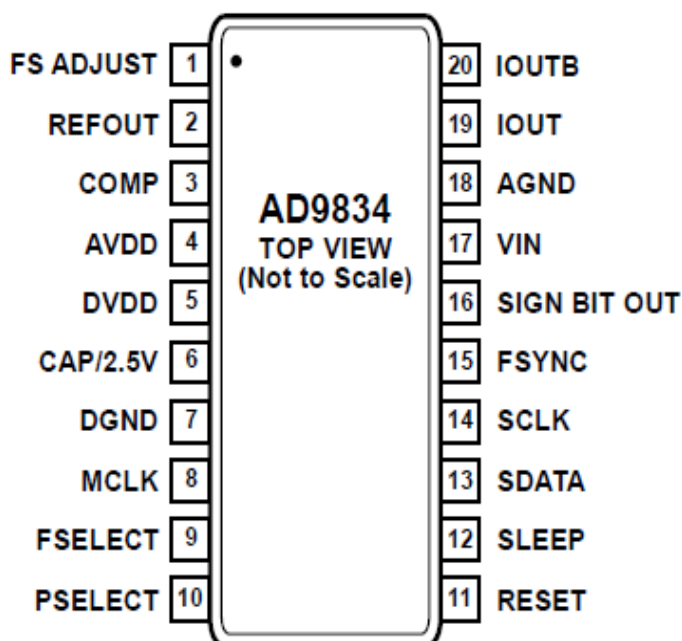


Рис. 12 - Конфігурація виводів AD9834

AD9834 – мікросхема з низькою потужністю, що реалізовує метод DDS на частоті 75 МГц, здатний виробляти синусоїдні та трикутні виходи. Він також має вбудований компаратор, що дозволяє виробляти квадратну хвилю для генерації годинників. Споживає лише 20 мВт електроенергії при напрузі 3 В.

Пристрій працює з джерелом живлення від 2,3 В до 5,5 В. Аналоговий та цифровий секції незалежні і можуть працювати від різних джерел живлення.

Також надається можливість для фазової модуляції та частотної модуляції. Мікросхема має 28-бітні реєстри частоти. З тактовою частотою 75 МГц можна досягти роздільної здатності 0.28 Гц. На частотну та фазову модуляцію впливають завантаження реєстрів через послідовний інтерфейс та перемикання реєстрів за допомогою програмного забезпечення або виводів FSELECT та контакту PSELECT.

AD9834 призначений для використання 3-провідного послідовного інтерфейсу. Цей послідовний інтерфейс працює з тактовою частотою до 40 МГц і сумісний із стандартами DSP та мікроконтролерів.

Призначення виводів:

- FS ADJUST – вхід корегування IOOUT
- REFOUT – вихід опорної напруги, 1.2 В
- VIN – ввід до компаратору
- IOOUT, IOOUTB – джерело струму
- AVDD, DVDD – напруга живлення для аналогової та цифрової секції
- DGND, AGND – цифрова та аналогова земля
- MCLK – вхід цифрових годинникових імпульсів
- FSELECT, PSELECT – вхід вибору частоти та фази
- RESET – вхід установки внутрішніх регістрів на 0
- SLEEP – вхід відключення ЦАП
- SDATA – вхід послідовної інформації
- SCLK – вхід послідовних годинникових імпульсів
- FSYNK – синхронізація сигналу
- SIGN BIT OUT – логічний вихід

					<i>ПК61.07.0000.000 ПЗ</i>	Арк.
						40
Змн	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3.2.2. Програмування синтезатору частоти AD9834

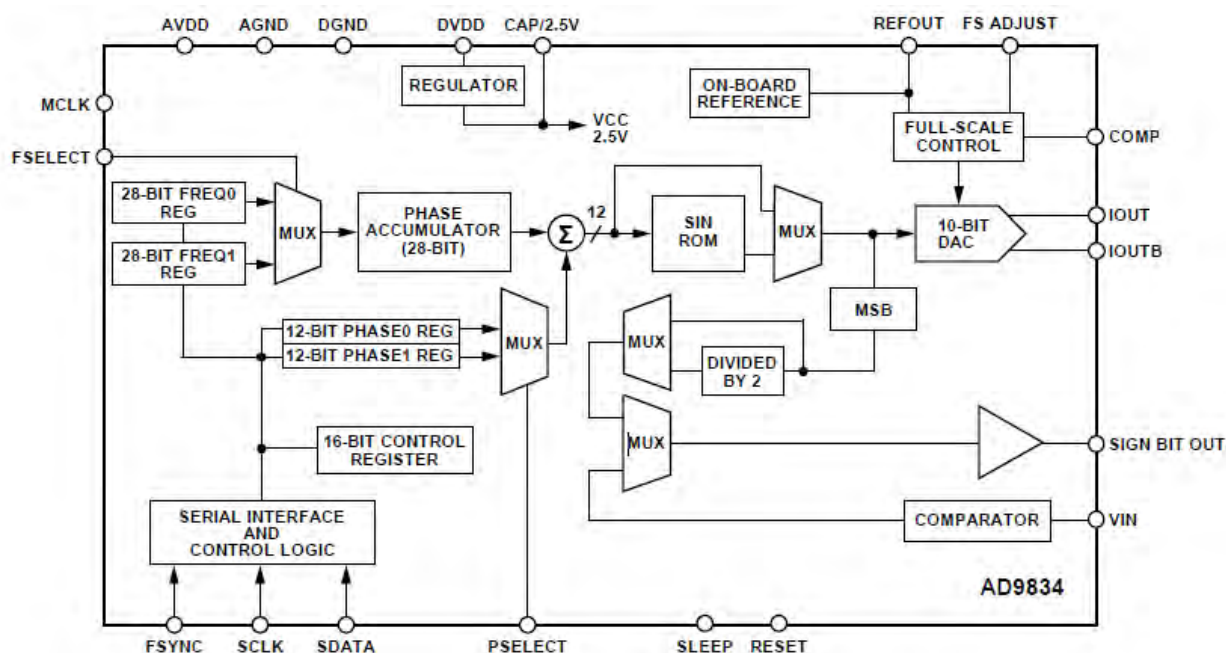


Рис. 13 - Функціональна блок-діаграма мікросхеми

Коли AD9834 вмикається, мікросхему слід скинути. Це скидає внутрішні регістри до 0, щоб забезпечити аналоговий вихід середнього масштабу. Щоб уникнути помилкових виходів ЦАП під час ініціалізації AD9833, біт RESET слід встановити на 1 до тих пір, поки мікросхема не буде готова розпочати генерацію вихідного сигналу. Біт RESET не скидає фазу, частоту або регістр управління. Ці регістри будуть містити недійсні дані, а значить, користувач повинен встановлювати відомі значення. Після цього біт RESET слід встановити на 0, щоб почати генерувати вихідний сигнал. Дані з'являються на виході ЦАП за вісім циклів MCLK після встановлення RESET на 0.

Код набору для генерування вихідної частоти визначається за формулою:

$$FreqReg_{10} = \frac{f_{OUT} * 2^{28}}{f_{MCLK}}$$

Тобто для генерування вихідного сигналу з частотою 400 Гц з MCLK 25 МГц:

$$FreqReg_{10} = \frac{400 * 2^{28}}{25 * 10^6} = 4295$$

$$FreqReg_{16} = 0x10C7$$

$$FreqReg_{2-10} = 0001\ 0000\ 1100\ 0111$$

Необхідна початкова послідовність *FreqReg*:

0x2100 – 0010 0001 0000 0000 – Регістр контролю

DB13 встановлюється на 1. Це дозволяє завантажити повне слово у регістр частот у двох послідовних записах. Перший запис містить 14 LSB. Другий запис містить 14 MSB. Біт RESET DB8 встановлюється на 1. Це скидає внутрішні регістри на 0, що відповідає аналоговому виходу середнього масштабу.

0x50C7 – 0101 0000 1100 0111 – Регістр частоти 0 LSB

DB15 та DB14 встановлюються відповідно на 0 та 1, що є адресою регістру частот 0. Наступні 14 біт - це 14 бітів LSB.

0x4000 – 0100 0000 0000 0000 – Регістр частоти 0 MSB

DB15 та DB14 встановлюються відповідно на 0 та 1, що є адресою регістру частот 0. Наступні 14 біт - це 14 бітів MSB.

0xC000 – 1100 0000 0000 0000 – Регістр фази 0

DB15, DB14 та DB13 встановлюються на 1, 1 та 0 відповідно, а DB12 встановлюється на «не важливо» (X), що є адресою для фазового регістру 0. Наступні 12 біт - це біти даних для встановлення фази.

0x2000 – 0010 0000 0000 0000 – Скидання виходу

Через сім циклів MCLK після встановлення RESET на 0 на виході ЦАП з'являється сигнал.

					<i>ПК61.07.0000.000 ПЗ</i>	Арк.
						42
Змн	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3.2.3. Підсилювач AD797

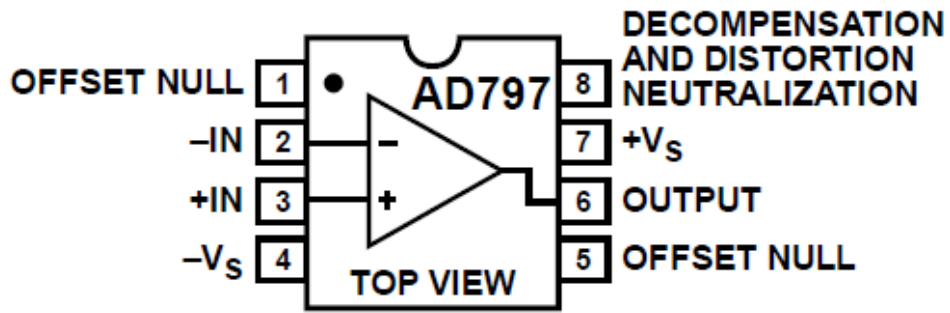


Рис. 14 - Конфігурація виводів AD797

AD797 має дуже низький рівень шуму та низький рівень спотворень. Низький рівень шуму, як правило $0,9 \text{ нВ}/\sqrt{\text{Гц}}$ (максимальний - $1,2 \text{ нВ}/\sqrt{\text{Гц}}$), та низьке загальне спотворення гармонік -120 дБ в звукових смугах дають широкий динамічний діапазон, необхідний для підсилювачів мікрофонів та змішувальних консолей. Крім того, AD797 має частоту скорочення $20 \text{ В} / \text{мкс}$ та пропускну здатність посилення 110 МГц , що робить його дуже придатним для задач з використанням низькочастотного ультразвуку. Ключові характеристики, такі як привід вихідного струму 50 мА і діапазон напруги живлення від $\pm 5 \text{ В}$ до $\pm 15 \text{ В}$, роблять AD797 відмінним підсилювачем загального призначення.

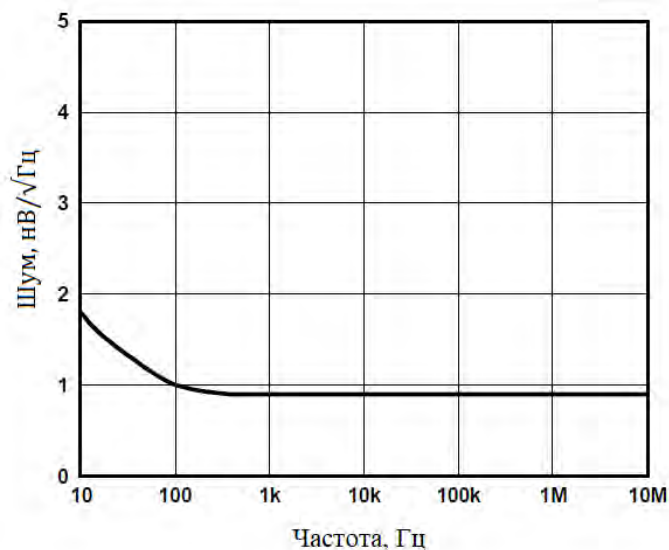


Рис. 15 - Щільність шуму напруги AD797

Через високий вхідний опір підсилювачу напруга з ВСП приблизно буде становити:

$$V_{in} = Z * I_{out}$$

де I_{out} – вихідний струм синтезатору частоти, що за паспортом дорівнює 3 мА

Z – комплексний опір ВСП

$$\text{Тоді } V_{in} = (0.32 + j0.5) * 0.003 = 0.96 + j1.5 \text{ мВ}$$

Сигнал на виході САД повинен знаходитись в межах ± 5 В. На амплітуду вихідного сигналу впливає також амплітуда сигналу з синтезатори частоти СЧ2, максимальне значення якої за паспортом дорівнює 0.6 В. Виходячи з цього, можна розрахувати необхідний коефіцієнт підсилення K підсилювача. Підсилювач AD797 дозволяє встановлювати дуже великі коефіцієнти підсилення за рахунок низького рівню шуму та спотворень. При коефіцієнті підсилення 2000 вихідна напруга буде становити

$$V_{out} = V_{in} * K = (0.96 + j1.5) * 10^{-3} * 2000 = 1.92 + j3 \text{ В}$$

$$\sqrt{Re(V_{out})^2 + Im(V_{out})^2} = \sqrt{1.92^2 + 3^2} = 3.356 \text{ В}$$

Оскільки

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

то приймаємо $R_1 = 10$ Ом, $R_2 = 20$ кОм

Остаточне підсилення сигналу буде здійснюватися за допомогою коефіцієнта передачі ФНЧ $K_f = 2$

Підсилювач створює шуми $0,9 \text{ нВ}/\sqrt{\text{Гц}}$. Частота п'ятої гармоніки дорівнює 500 кГц, тобто шуми на підсилювачі дорівнюють

$$\Delta = 0.9 * 10^{-9} * \sqrt{500000} = 6.37 * 10^{-6} \text{ В}$$

					<i>ПК61.07.0000.000 ПЗ</i>	Арк.
						44
Змн	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3.2.4. Синхронний детектор AD630

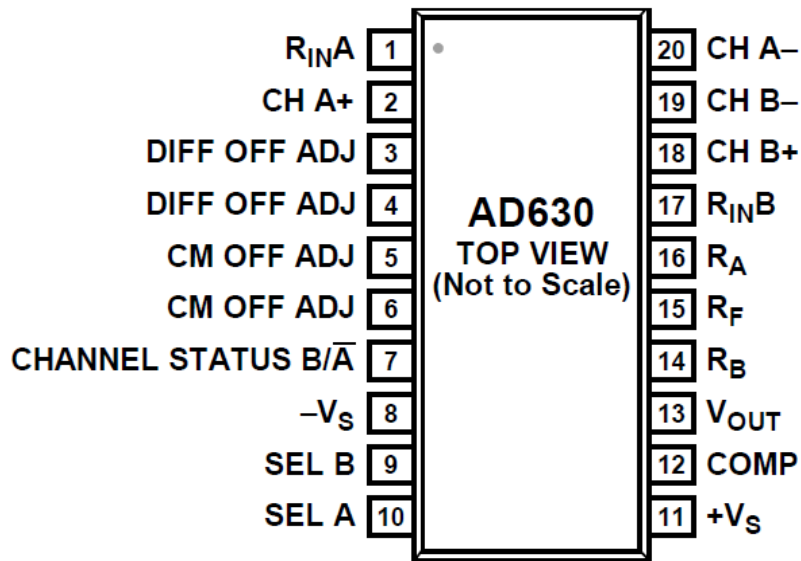


Рис. 16 - Конфігурація виводів AD630

AD630 поєднує в собі гнучку комутаційну архітектуру з точністю і стабільністю температури, що забезпечуються тонкоплівними резисторами. Ці резистори також можуть бути використані для точного налаштування посилення мультиплексора 1, 2, 3 або 4. Зовнішній зворотній зв'язок дозволяє забезпечити високий коефіцієнт посилення або складні топології зворотного зв'язку.

Особливості AD630 включають програмовану частоту компенсації; необов'язковий вхідний резистор компенсації струму зміщення, регулювання напруги загального режиму та диференціального зміщення та вихід стану каналу, який вказує, який з двох диференціальних входів активний.

Призначення виводів:

- R_{INA} – резистор 2.5 кОм до неінвертуючого входу підсилювача А
- R_{INB} – резистор 2.5 кОм до неінвертуючого входу підсилювача В
- $CH A +$ – неінвертуючий вхід до підсилювачу А

- $CH A$ – – інвертуючий вхід до підсилювачу A
- $CH B +$ – неінвертуючий вхід до підсилювачу B
- $CH B -$ – неінвертуючий вхід до підсилювачу B
- DIFF OFF ADJ – диференціальна корекція зміщення
- CM OFF ADJ – загальна корекція зміщення
- Channel Status B/\bar{A} – статус каналу B або A
- $-V_S$ – негативна напруга живлення
- $+V_S$ – позитивна напруга живлення
- SEL A – вхід компаратору каналу A
- SEL B – вхід компаратору каналу B
- COMP – вхід для підключення внутрішнього компенсаційного конденсатору
- V_{OUT} – вихідна напруга
- R_B – резистор налаштування, 10 кОм
- R_F – резистор зворотного зв'язку, 10 кОм
- R_A – резистор зворотного зв'язку, 5 кОм

Використання AD630 у якості балансного модулятора. Прикладні резистори забезпечують точне симетричне посилення ± 1 або ± 2 . Розташування ± 1 показано на малюнку 17. Резистори компенсації струму зміщення 2,5 кОм виконують однакову функцію у випадку посилення ± 1 . Малюнок 18 демонструє продуктивність AD630 при використанні для модуляції несучої квадратної хвилі 100 кГц синусоїдою 10 кГц, та з підсиленням ± 2 . Ця топологія балансного модулятора приймає два входи, вхід сигналу (або модуляції), що прикладається до каналів посилення, і опорний вхід (або вхід несучої частоти), застосований до компаратора.

					<i>ПК61.07.0000.000 ПЗ</i>	Арк.
						46
Змн	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

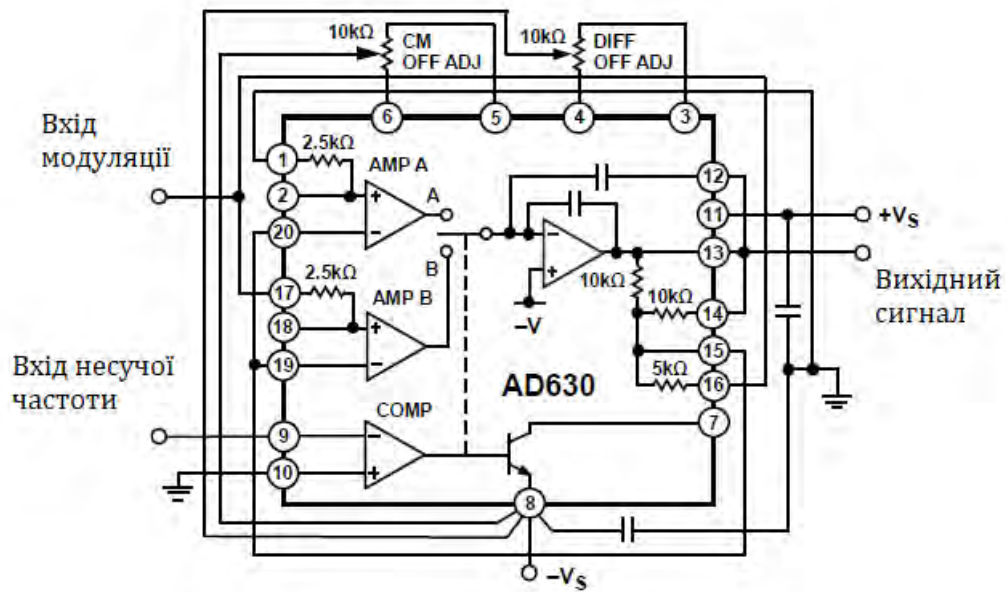


Рис. 17 - Схема включення AD630 у якості балансного модулятора

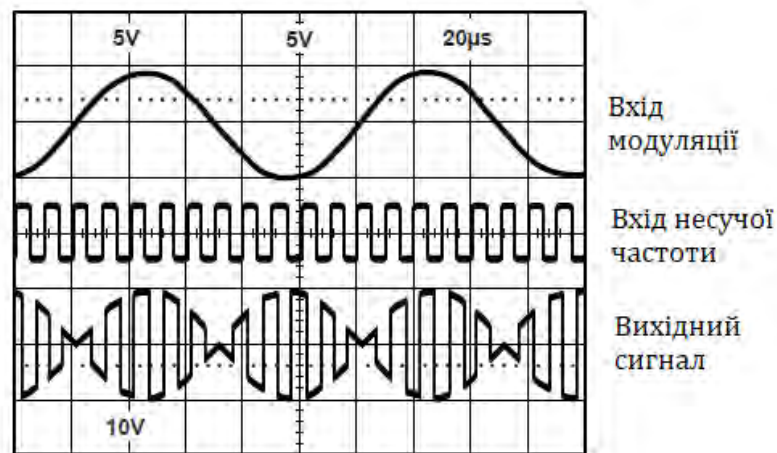


Рис. 18 - Сигнали при використанні схеми у якості балансного модулятора

Топологія балансного модулятора також може бути застосована як зрівноважений демодулятор (синхронний детектор), якщо на вхід сигналу (модуляції) подається модульований сигнал, а сигнал несучої частоти прикладається до входу несучої частоти. Також присутні компоненти носія вищого порядку, які можна видалити за допомогою фільтра низьких частот.

3.2.5. Фільтр нижніх частот

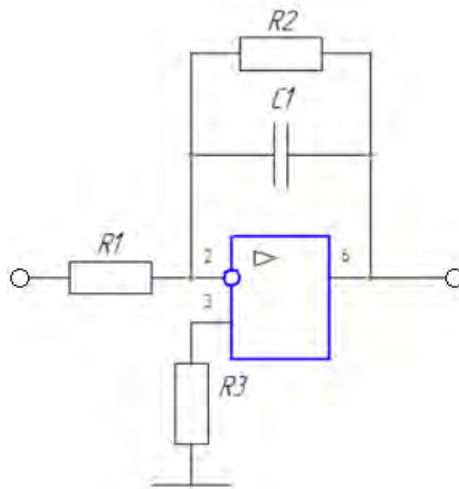


Рис. 19 – Фільтр нижніх частот

Фільтр нижніх частот використовується для відфільтрування високочастотних складових сигналу, якими є шуми.

Коефіцієнт передачі для даного фільтру приймаємо $K_f = -R_2/R_1 = -2$, тобто $R_1 = 1$ кОм, $R_2 = 2$ кОм

Формула визначення частоти зрізу для даного фільтру має вигляд:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi R_1 C_1}$$

Приймаємо $C_1 = 33$ нФ

Тоді

$$f_0 = \frac{1}{2\pi * 10^3 * 33 * 10^{-9}} = 4822.8 \text{ Гц}$$

3.2.6. АЦП AD7878

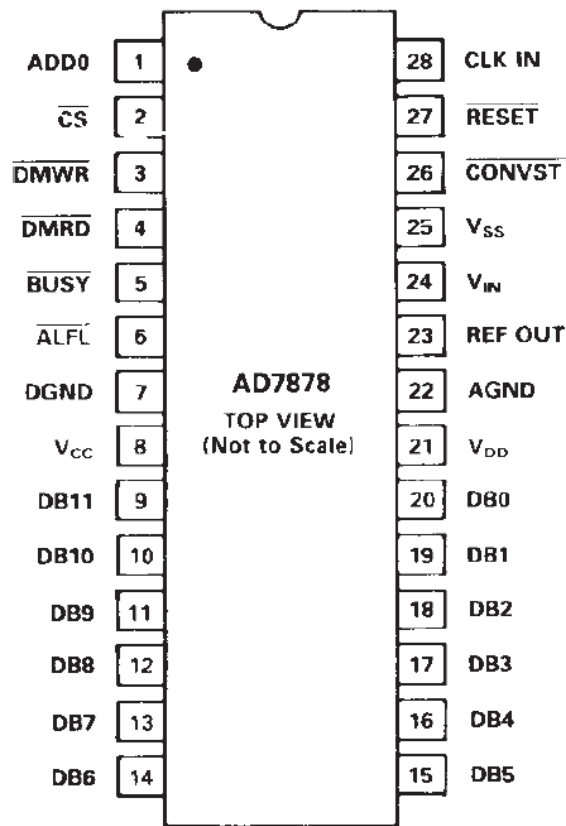


Рис. 19 - Конфігурація виводів AD7878

AD7878 - це швидкий 12-розрядний АЦП із універсальним DSP-інтерфейсом, що складається з вбудованої пам'яті first-in-first-out (FIFO) та відповідної логіки управління.

Пам'ять FIFO дозволяє робити запис інформації до того як мікропроцесор почне обслуговування АЦП. Швидкий час доступу до даних (41 нс) дозволяє безпосередньо взаємодіяти з процесорами DSP та високошвидкісними 16-бітовими мікропроцесорами. Реєстр статусу/керування на мікросхемі дозволяє користувачеві програмувати ефективну довжину FIFO і містить інформацію про перевищення діапазону FIFO, інформацію про порожність FIFO та інформацію про кількість слів в FIFO.

Призначення виводів:

- $ADD0$ – вхід адреси, що визначає, звідки береться слово, що подається на шину даних – з пам'яті FIFO, або з регістру статусу/контролю. Логічний 0 – дані беруться з FIFO, логічна 1 – з регістру.
- \overline{CS} – вхід вибору чіпу.
- \overline{DMWR} – Запис даних у пам'ять регістру. Використовується, коли \overline{CS} встановлений на логічний 0, а $ADD0$ – на 1
- \overline{DMRD} – вхід зчитування даних
- \overline{BUSY} – логічний вихід, що встановлюється на 0, коли АЦП отримує імпульс \overline{CONVST} .
- \overline{ALFL} – FIFO майже повне. Логічний 0 свідчить про те, що кількість слів в FIFO пам'яті досягла запрограмованої кількості слів в регістрі статусу/контролю. \overline{ALFL} оновлюється в кінці кожного перетворення. \overline{ALFL} скидається на логічну 1 коли слово зчитується з пам'яті FIFO і кількість слів нижча за запрограмовану кількість слів.
- $DGND$ - цифрова земля
- $AGND$ – аналогова земля
- Vcc – цифрове позитивне живлення, +5 В.
- Vdd – аналогове позитивне живлення, +5 В.
- Vss – аналогове негативне живлення, -5 В.
- DB1–DB4 – біти даних 1-4. Виходи TTL.
- DB5-DB10 – біти даних 5-10. Входи/виходи TTL.
- DB11 – біт даних 11. Вихід TTL. Кодування слів даних в пам'яті FIFO.
- REF OUT – вихід опорної напруги, 3 В.

					ПК61.07.0000.000 ПЗ	Арк.
						50
Змн	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Розрядність: 8/16-біт

Пам'ять: 384 кб внутрішньої флеш-пам'яті

8 кб секції завантаження

4 кб EEPROM

32 кб внутрішньої SRAM

Робоча напруга: 1.6 – 3.6 В

Робоча частота: 0 – 12 МГц при напрузі 1.6 В

0 – 32 МГц при напрузі 2.7 В

Особливості:

Вбудована в систему програмована флеш-пам'ять з можливістю зчитування інформації під час запису. Внутрішні EEPROM та SRAM. Чотирьох-канальна система подій та програмований багаторівневий контролер переривань. 50 звичайних ліній I/O, 16-розрядний лічильник реального часу. П'ять 16-розрядних таймерів/лічильників з каналами порівняння та каналом PWM. Два TWI (two-wire serial interface), також відомого як I2C. Два SPI. Один шістнадцяти-канальний 12-розрядний АЦП з програмованим підсиленням. Два аналогових компаратори з віконним режимом. Програмований слідкуючий таймер з внутрішнім генератором. Точні внутрішні генератори з можливістю коригування. Доступний інтерфейс програмування та налагодження на швидкому двоканальному інтерфейсі. В мікроконтролері існує функція скидання при вмиканні та функція виявлення відключення.

Також Atmel надає безкоштовну бібліотеку QTouch для вбудовування функціоналу сенсорних кнопок та слайдерів.

					<i>ПК61.07.0000.000 ПЗ</i>	Арк.
						52
Змн	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Висновки до III розділу

В даному розділі розроблено структурну схему приладу, описано принцип дії приладу, математично описано принцип отримання даних з вихідного сигналу. Підібрано та описано елементи електричної принципової схеми. Описаний принцип програмування синтезаторів частоти. Розраховано коефіцієнти підсилення, частоту зрізу фільтру нижніх частот. Створено програмний код мікроконтролеру.

					ПК61.07.0000.000 ПЗ	Арк.
						53
Змн	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВИСНОВКИ

За завданням дипломного проекту було розроблено дефектоскоп для визначення електромагнітних та структурних параметрів матеріалу, що працює за методом вищих гармонік.

В ході виконання дипломного проекту отримали наступні результати. В якості датчику використовується параметричний накладний ВСП. Найкращим способом виділення інформації з сигналу, що надходить з ВСП, є метод вищих гармонік, що по черзі виділяє перші п'ять гармонік сигналу. Розроблено структурну та програмну частину засобу.

					ПК61.07.0000.000 ПЗ	Арк.
						54
Змн	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Список використаних джерел

1. Дорофеев А. Л. – Индукционная структуроскопия, М., «Энергия», 1973
2. Дорофеев А. Л. – Вихревые токи. М., «Энергия», 1977
3. Клюев В. В. – Неразрушающий контроль: Справочник: В 7 т. Т. 2: В 2 кн. – М.: Машиностроение, 2003
4. Клюев В. В. – Неразрушающий контроль: Справочник: В 8 т. Т. 6: В 3 кн. Кн. 1 В. В. Клюев, В. Ф. Мужичкий, Э. С. Горкунов, В. Е. Щербинин. Магнитные методы контроля. – М.: Машиностроение, 2006
5. Киренский Л. В., Саланский Н. М., Родичев А. М. – Эффект Баркгаузена при приближении петли гистерезиса к прямоугольной. – «Физика металлов и металловедение», 1963, т. 16, вып. 4.
6. Лисенко Ю.Ю., Дугін О.Л., Куц Ю.В., Протасов А.Г. Застосування накладних перетворювачів в імпульсному вихрострумовому контролі // Вісник національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут” серія приладобудування. - Київ : Вид-во НТУУ “КПІ”, 2016, вип. 51.
7. 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. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2015. – 266 с.
8. Михеев М. Н., Морозова В. М. – Магнитные и электрические свойства отожженной и деформированной стали 20. – «Физика металлов и металловедение», 1963, т. 15, вып. 3.

					ПК61.07.0000.000 ПЗ	Арк.
						55
Змн	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

9. Немцов М. В., Шамаев Ю. М. – Справочник по расчету параметров катушек индуктивности. – М.: Энергоиздат, 1981
10. Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники. М., «Высшая школа», 1967
11. И. Г. Лещенко – Контроль и измерения методом высших гармоник / *Известия Томского Ордена Октябрьской Революции и Ордена Трудового Красного Знамени Политехнического Института им. С.М. Кирова* т.248, 1975
12. Багатофункціональний вихрострумовий дефектоскоп : пат. 45908 Україна : МПК G01N 27/00. № и 2009 07688 ; заявл. 21.07.2009 ; опубл. 25.11.2009, Бюл. № 22.
13. Bazhenov, V., Protasov, A., Gloinik, K. (2017). Increasing of operation speed of digital eddy current defectoscopes based on frequency synthesizer. 2017 IEEE Microwaves, Radar and Remote Sensing Symposium (MRRS). doi: 10.1109/mrrs.2017.8075051
14. Bazhenov, V. H., Hloinik, K. A. (2016). Design features of eddy current flaw detectors on the microcontrollers. Scientific proceedings NDT days 2016 XXXI International Conference «Defectoscopia 16». Sozopol, Bulgaria
15. Баженов, В.Г. Гльойнік, К. А. Ходневич, С. В. - Ортогональний амплітудно-фазовий метод вимірювання при проектуванні вихрострумових дефектоскопів на базі мікроконтролерів . Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси.-Х.:НТУ «ХПІ»-2017р.-№19(124)-166с.
16. Yuriy KALENYCHENKO, Victor BAZHENOV, Aleksandr KALENYCHENKO, Viktor KOVAL, Sergiy RATSEBARSKIY

					ПК61.07.0000.000 ПЗ	Арк.
						56
Змн	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Determination of mechanical properties of paramagnetic materials by multi-frequency method Scientific proceedings NDT days 2019 XXXI International Conference «Defectosopia 19» june 17-20. Sozopol, Bulgaria 21с

17. 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.

18. Analysis of an Eddy-Current Transducer with Impulsive Excitation in the Nondestructive Testing of Cylindrical Objects / Y. Kuts, Y. Lysenko, A. Dugin, A. Zakrevskii // Materials Science – 2016. – vol. 52, no. 3. - pp 431–437.

19. Дугін О.Л. Використання мультидиференціального перетворювача в імпульсному вихрострумовому неруйнівному контролі / Лисенко Ю.Ю., Куц Ю.В., Дугін О.Л. // Збірник доповідей Ії науково-технічної конференції з міжнародною участю «НК в контексті асоційованого членства України в ЄС – NDT-UA 2017» / Люблін, Польща: УТ НКТД, 2017 – С. 58-64

20. Лисенко Ю.Ю. Проектування засобів електромагнітного неруйнівного контролю / Лисенко Ю.Ю., Куц Ю.В., Протасов А.Г. // Збірник доповідей Ії науково-технічної конференції з міжнародною участю «НК в контексті асоційованого членства України в ЄС – NDT-UA 2017» / Люблін, Польща: УТ НКТД, 2017 – С. 43-49

21. Dugin O. Using of parametric transducers in pulsed eddy current testing / Kuts Y., Maievskiy S., Protasov A., Lysenko I., Dugin O. // NDT in Context of the Associated Membership of Ukraine in the EU (NDT-UA 2018): Conference proceedings / Lublin, Poland: USNDT, – 2018 – №2, – pp. 30-33.

					<i>ПК61.07.0000.000 ПЗ</i>	Арк.
						57
Змн	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Додатки

Лістинг програмного коду контролеру

```
#include ...
```

					ПК61.07.0000.000 ПЗ	Арк.
						58
Змн	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

