

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

Приладобудівний факультет

Кафедра автоматизації та систем неруйнівного контролю

До захисту допущено:

Завідувач кафедри

_____ Юрій КИРИЧУК

«__» _____ 2024 р.

Дипломний проєкт

на здобуття ступеня бакалавра

**за освітньо-професійною програмою «Комп'ютерно-інтегровані системи
та технології в приладобудуванні»**

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

на тему: «Твердомір контактано-імпедансний»

Виконав:

студент ІV курсу, групи ПК-01 Хворостян Євгеній Валерійович _____

Керівник: к.т.н., доцент Гришанова Ірина Аркадіївна _____

Рецензент: к.т.н., доцент Самарцев Юрій Миколайович _____

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

Студент _____

Київ – 2024 року

ВІДОМІСТЬ ДИПЛОМНОГО ПРОЕКТУ

№ з/п	Формат	Позначення	Найменування	Кількість листів	Примітка
1	A4	ПК 01.18.1760.000 ПЗ	Пояснювальна записка	58	
2	A1	ПК 01.18.1760.001	Схема принципова	1	
3	A1	ПК 01.18.1760.002	Розводка плати	1	
4	A1	ПК 01.18.1760.003	Монтажна плата	1	
5	A1	ПК 01.18.1760.004	3D вигляд плати	1	
6	A1	ПК 01.18.1760.005	Загальний плакат	1	

				ДП ПК01 00.000.00		
	ПІБ	Підп.	Дата			
Розробник	Хворостян Є. В.			Відомість дипломного проекту	Лист	Листів
Керівник	Гришанова І. А.				1	1
Консульт.					КПІ ім. Ігоря Сікорського Каф. АСНК Гр. ПК-01	
Н/контр.						
Зав. каф.	Киричук Ю.В.					

Пояснювальна записка
до дипломного проєкту
на тему: «Контактно-імпедансний твердомір»

Київ – 2024 року

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Приладобудівний факультет
Кафедра автоматизації 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 в приладобудуванні»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Юрій КИРИЧУК

«__» _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ
на дипломний проєкт студенту
Хворостяну Євгенію Валерійовичу

1. Тема проєкту «Твердомір контактано-імпедансний», керівник проєкту Самарцев Юрій Миколайович, Керівник: к.т.н., затверджені наказом по університету від «__» _____ 2024р. № _____
2. Термін подання студентом проєкту 30 травня 2024 року
3. Вихідні дані до проєкту : контактано-імпедансний метод контролю; частота перетворювача 2.5 МГц; тип перетворювача – прямий;
4. Зміст пояснювальної записки:

Вступ

1. Аналітичний огляд
2. Розрахунок фільтру низьких частот
3. Проектування електричної схеми контактної імпедансної твердоміру
4. Висновки
5. Список використаних джерел
6. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслеників, плакатів, презентацій тощо): _____

- 1 – Схема електрична принципова
- 2 – Розведення плати
- 3 – Посадкові місця на платі
- 4 – 3D зображення плати
- 5 – Формули

7. Дата видачі завдання 01 березня 2024 року

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проєкту	Термін виконання етапів проєкту	Примітка
1	Формування завдання проєкту		
2	Огляд існуючих приладів і літератури		
3	Підбір датчиків і елементів		
4	Складання структурної схеми		
5	Розводка плати		
6	Розробка креслеників		

Студент

Євгеній ХВОРОСТЯН

Керівник

Ірина ГРИШАНОВА

Анотація

В даному бакалаврському проєкті був спроектований контактний-імпедансний твердомір, для контролю металевих виробів.

Перший розділ описує приклади застосування в областях контактних-імпедансних та актуальність їх використання. Приведено порівняння та знайдено недоліки та переваги сучасних і актуальних на даний момент твердомірів за фізичним принципом вимірювання, тобто контактних-імпедансних (акустичний імпеданс). Також розглянуті різні методи контактних-імпедансної твердометрії, їх аналіз дав можливість підібрати ультразвуковий контактний-акустичний-імпедансний метод вимірювання твердості для розроблюваного приладу. Розглянуто технічні характеристики вже існуючих приладів із можливістю їх модернізації (покращення) та здешевлення. У другому розділі розраховано п'єзоперетворювачів і частини електронної схеми.

Ключові слова: контактний-імпедансний твердометр, твердомір, акустичний імпеданс.

Abstract

In this bachelor's project, a contact-impedance hardness tester was designed for monitoring metallic products.

The first section describes examples of applications in the fields of contact-impedance testing and the relevance of their use. It provides a comparison and identifies the advantages and disadvantages of modern and currently relevant hardness testers based on the physical principle of measurement, i.e., contact-impedance (acoustic impedance). Various methods of contact-impedance hardness testing are also considered, and their analysis allowed for the selection of an ultrasonic contact-acoustic-impedance method for measuring hardness for the device being developed. The technical characteristics of existing devices with the potential for modernization (improvement) and cost reduction are examined.

In the second section, the piezoelectric transducers and parts of the electronic circuit are calculated.

Keywords: contact-impedance hardness testing, hardness tester, acoustic impedance.

ЗМІСТ

Вступ.....	9
РОЗДІЛ 1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД	11
1.1 Опис різних методів контактної-імпедансної твердометрії	11
1.2 Огляд існуючих рішень контактної-імпедансних твердомірів.	23
Висновки по розділу 1	31
РОЗДІЛ 2. РОЗРАХУНКОВА ЧАСТИНА	33
2.1 Структурна схема.....	33
2.2 Розрахунок п'єзоелектричного перетворювача	35
2.3 Розрахунок фільтру низьких частот (ФНЧ)	38
Висновок до другого розділу	42
РОЗДІЛ 3. ВИБІР ЕЛЕМЕНТІВ ПРИНЦИПОВОЇ СХЕМИ ТА ПОБУДОВА ПРИНЦИПОВОЇ СХЕМИ.....	43
3.1 Підключення та внутрішні схеми елементів.....	43
Висновок до 3-го розділу	54
ВИСНОВКИ.....	55
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	57

					ПК 01.180000.000ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		8

ВСТУП

Актуальність теми

Твердість матеріалів є одним з найважливіших параметрів, що визначають їх експлуатаційні властивості, такі як зносостійкість, міцність та довговічність. Традиційні методи вимірювання твердості, такі як методи Брінелля, Роквелла або Віккерса, мають свої обмеження, зокрема, необхідність руйнування або деформації зразка, значний час на підготовку та проведення вимірювань. У зв'язку з цим виникає потреба у розвитку нових методів вимірювання твердості, що дозволяють проводити неразрушаючі, швидкі та точні вимірювання. Одним з таких методів є контактний-імпедансний метод, що базується на вимірюванні електричного імпедансу матеріалу.

Мета та завдання дослідження

Метою даної дипломної роботи є удосконалення існуючих твердомірів контактний-імпедансного методу.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

1. Проаналізувати існуючі методи вимірювання твердості матеріалів та їхні обмеження.
2. Вивчити принцип дії контактний-імпедансного твердоміра та основні фактори, що впливають на точність вимірювань.

Об'єкт та предмет дослідження

Об'єктом дослідження є контактний-імпедансний метод. Предметом дослідження є методи удосконалення твердоміра за рахунок сучасної елементної бази.

Методи дослідження

У роботі застосовуються теоретичні методи аналізу для вивчення принципів роботи контактний-імпедансного твердоміра та експериментальні методи для перевірки розроблених теоретичних моделей. Також використовуються статистичні методи обробки експериментальних даних для визначення точності та повторюваності вимірювань.

Наукова новизна та практична значущість

					ПК 01.180000.000ПЗ	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Наукова новизна роботи полягає у дослідженні можливостей застосування найсучаснішої елементної бази для удосконалення акустично-імпедансних твердомірів. Практична значущість роботи полягає у вдосконаленні за рахунок сучасної елементної бази, яка дозволить швидко та точно визначити твердість матеріалів без їх руйнування, що може бути корисним у різних галузях промисловості та наукових досліджень

Структура роботи

Дипломна робота складається з вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. У вступі обґрунтовується актуальність теми, формулюються мета і завдання дослідження, визначаються об'єкт і предмет дослідження, методи дослідження, наукова новизна та практична значущість роботи. У першому розділі проводиться аналіз існуючих методів вимірювання твердості матеріалів. У другому розділі описується принцип дії контактної імпедансної твердоміра. Третій розділ присвячено розробці експериментальної установки та методики вимірювань. У четвертому розділі наводяться результати експериментів та їх обговорення. П'ятий розділ містить висновки та рекомендації щодо використання контактної імпедансної методу.

					ПК 01.180000.000ПЗ	Арк.
						10
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

РОЗДІЛ 1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД

1.1 ОПИС РІЗНИХ МЕТОДІВ КОНТАКТНО-ІМПЕДАНСНОЇ ТВЕРДОМЕТРІЇ

Метод ультразвукового відлуння (Ultrasonic Echo Method)

Метод ультразвукового відлуння (Ultrasonic Echo Method) є одним з найбільш поширених методів використання ультразвукових хвиль для вимірювання твердості матеріалів. Цей метод заснований на аналізі часу проходження ультразвукових імпульсів через матеріал і їхнього відбиття від меж або внутрішніх структур матеріалу. Ось детальніший опис цього методу:

Принцип дії

1. Генерація ультразвукового імпульсу:

- Ультразвуковий перетворювач (трансдюсер) генерує короткий ультразвуковий імпульс, який спрямовується в матеріал.

- Імпульс створюється за допомогою п'єзоелектричних матеріалів, які при подачі електричного сигналу створюють механічні коливання.

2. Передача імпульсу в матеріал:

- Імпульс проникає в матеріал і поширюється через нього.

- Швидкість поширення хвилі залежить від механічних властивостей матеріалу, таких як густина і модуль пружності.

3. Відбиття імпульсу:

- Коли імпульс досягає межі матеріалу або внутрішньої неоднорідності (наприклад, включення або порожнини), частина імпульсу відбивається назад до перетворювача.

- Відбитий імпульс приймається тим же перетворювачем або іншим приймачем.

4. Вимірювання часу проходження:

- Вимірюється час, який пройшов між передачею імпульсу і отриманням відбитого сигналу.

- Цей час називається часом затримки або часом проходження.

5. Розрахунок твердості:

					ПК 01.180000.000ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		11

- Відстань, яку пройшов імпульс, розраховується з використанням відомої швидкості ультразвукової хвилі в матеріалі.

- На основі часу затримки та відстані можна визначити механічні властивості матеріалу, зокрема його твердість.

Переваги методу ультразвукового відлуння:

- Неінвазивність: Не потребує механічного впливу на матеріал, що дозволяє уникнути його пошкодження.

- Точність: Забезпечує високу точність вимірювань, особливо на однорідних матеріалах.

- Глибина проникнення: Може використовуватися для вимірювань на значній глибині в матеріалі.

- Швидкість: Вимірювання проводяться швидко, що дозволяє використовувати метод у виробничих умовах.

Області застосування:

- Металургія: Контроль якості металів та сплавів.

- Авіабудування: Перевірка деталей і компонентів літаків.

- Автомобільна промисловість: Контроль якості автомобільних компонентів.

- Будівництво: Діагностика бетонних конструкцій та інших будівельних матеріалів.

- Медицина: Використовується у діагностичній візуалізації (наприклад, ультразвукові дослідження).

Технічні аспекти

- Частота ультразвукових хвиль: Зазвичай використовується діапазон частот від 1 до 10 МГц, але можуть використовуватися і вищі частоти для спеціалізованих застосувань.

- Перетворювачі: Існують різні типи ультразвукових перетворювачів, зокрема прямі, кутові та фокуруючі, залежно від специфіки застосування.

- Калібрування: Для точного вимірювання необхідно проводити калібрування обладнання з використанням еталонних матеріалів.

					ПК 01.180000.000ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		12

Метод ультразвукового відлуння є потужним інструментом для вимірювання твердості та інших механічних властивостей матеріалів. Його неінвазивність, точність і можливість застосування до широкого спектра матеріалів роблять його незамінним у багатьох галузях промисловості та наукових дослідженнях.

Метод ультразвукової хвильової швидкості (Ultrasonic Velocity Method)

Метод ультразвукової хвильової швидкості (Ultrasonic Velocity Method) використовується для визначення механічних властивостей матеріалів, зокрема їхньої твердості, шляхом вимірювання швидкості поширення ультразвукових хвиль через матеріал. Цей метод базується на залежності швидкості ультразвукових хвиль від пружних і щільнісних характеристик матеріалу.

Принцип дії

1. Генерація ультразвукових хвиль:

- Ультразвуковий перетворювач генерує механічні коливання, які передаються в матеріал у вигляді ультразвукових хвиль.

2. Поширення хвиль через матеріал:

- Ультразвукові хвилі проходять через матеріал, їхня швидкість поширення залежить від властивостей матеріалу, таких як модуль пружності та густина.

- Для пружних матеріалів зазвичай використовуються подовжні (поздовжні) хвилі, які рухаються паралельно до напрямку коливань частинок матеріалу.

3. Вимірювання часу проходження:

- Вимірюється час, який потрібен ультразвуковій хвилі для проходження від одного перетворювача (передавача) до іншого (приймача).

- Часто використовується метод "зонд-поверхня", де обидва перетворювачі розташовані на одній поверхні зразка, або метод "зонд-зонд", де перетворювачі розташовані по обидва боки матеріалу.

					ПК 01.180000.000ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		13

4. Розрахунок швидкості хвилі:

- Швидкість хвилі (v) розраховується за формулою:

$$v = \frac{d}{t}$$

де d – відстань між перетворювачами, а t – вимірний час проходження хвилі.

- Знаючи швидкість хвилі, можна визначити модуль Юнга (E) та інші механічні властивості матеріалу за допомогою відповідних рівнянь.

Переваги методу ультразвукової хвильової швидкості

- Неінвазивність: Не потребує механічного впливу на матеріал, що дозволяє уникнути його пошкодження.
- Висока точність: Забезпечує високу точність вимірювань, особливо на однорідних матеріалах.
- Швидкість вимірювання: Вимірювання можуть проводитися дуже швидко, що робить метод придатним для контролю якості в режимі реального часу.
- Можливість вимірювання на великих глибинах: Може використовуватися для вимірювання властивостей матеріалів на значній глибині.

Області застосування

- Металургія: Використовується для контролю якості металів і сплавів, зокрема для визначення однорідності матеріалу і виявлення дефектів.
- Будівництво: Діагностика бетонних та інших будівельних матеріалів для оцінки їхньої цілісності та міцності.
- Авіабудування: Перевірка деталей і компонентів літаків на відповідність жорстким стандартам якості.
- Автомобільна промисловість: Контроль якості автомобільних деталей та компонентів.

					ПК 01.180000.000ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		14

- Наукові дослідження: Використовується у матеріалознавстві для дослідження властивостей нових матеріалів.

Технічні аспекти

- Частота ультразвукових хвиль: Частота хвиль зазвичай варіюється від 1 до 10 МГц, залежно від типу матеріалу та вимог до точності вимірювання.

- Типи хвиль: Можуть використовуватися подовжні (поздовжні) хвилі або поперечні хвилі, залежно від досліджуваних властивостей матеріалу.

- Перетворювачі: Вибір типу і частоти перетворювача залежить від властивостей матеріалу і вимог до точності вимірювання.

Приклад розрахунку

Для прикладу розглянемо зразок матеріалу довжиною 10 см. Якщо ультразвукова хвиля проходить через цей зразок за 20 мкс (мікросекунд), швидкість хвилі розраховується наступним чином:

$$v = \frac{d}{t} = \frac{10 \text{ см}}{20 \text{ мкс}} = 5000 \text{ м/с}$$

Ця швидкість використовується для подальших розрахунків механічних властивостей матеріалу.

Висновок по даному методу

Метод ультразвукової хвильової швидкості є ефективним та надійним інструментом для визначення механічних властивостей матеріалів, зокрема їхньої твердості. Він забезпечує точні, швидкі та неінвазивні вимірювання, що робить його незамінним у багатьох галузях промисловості та наукових дослідженнях.

Метод ультразвукової імпедансної спектроскопії (Ultrasonic Impedance Spectroscopy)

					ПК 01.180000.000ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		15

Метод ультразвукової імпедансної спектроскопії (Ultrasonic Impedance Spectroscopy) є технікою, яка використовується для вивчення механічних властивостей матеріалів шляхом аналізу імпедансу при різних частотах ультразвукових хвиль. Імпеданс характеризує опір матеріалу до проходження акустичних хвиль і залежить від його механічних властивостей, таких як модуль пружності та густина.

Принцип дії

1. Генерація ультразвукових хвиль:

- Ультразвуковий перетворювач генерує механічні коливання в широкому діапазоні частот, які передаються в матеріал.

2. Проходження хвиль через матеріал:

- Ультразвукові хвилі поширюються через матеріал. Швидкість і характер поширення хвиль залежать від властивостей матеріалу.

- Частина хвиль відбивається від меж матеріалу або внутрішніх неоднорідностей, а частина продовжує поширюватися.

3. Вимірювання імпедансу:

- Імпеданс матеріалу вимірюється на різних частотах ультразвукових хвиль. Імпеданс визначається як відношення прикладеної напруги до струму, що проходить через матеріал, і залежить від його акустичних властивостей.

- Імпеданс включає активну (реальну) частину, пов'язану з поглинанням енергії, і реактивну (уявну) частину, пов'язану з пружними властивостями матеріалу.

4. Аналіз спектру імпедансу:

- Спектр імпедансу (залежність імпедансу від частоти) аналізується для визначення механічних властивостей матеріалу.

					ПК 01.180000.000ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		16

- Аналіз включає визначення резонансних частот, на яких матеріал має максимальні амплітуди коливань, та антирезонансів, де амплітуди мінімальні.

Переваги методу ультразвукової імпедансної спектроскопії

- Висока точність: Забезпечує високу точність вимірювань за рахунок аналізу імпедансу на різних частотах.

- Детальний аналіз: Дозволяє отримати детальну інформацію про механічні властивості матеріалу, зокрема його внутрішню структуру та неоднорідності.

- Широкий діапазон частот: Можливість аналізу матеріалу в широкому частотному діапазоні для більш глибокого дослідження його властивостей.

- Неінвазивність: Як і інші ультразвукові методи, не потребує пошкодження матеріалу.

Області застосування

- Матеріалознавство: Дослідження механічних властивостей нових матеріалів, включаючи композити та полімери.

- Медицина: Використовується для діагностики тканин, аналізу кісткової структури, виявлення пухлин та інших патологій.

- Авіабудування: Перевірка матеріалів, що використовуються в авіації, на предмет наявності дефектів та їхніх механічних властивостей.

- Будівництво: Аналіз будівельних матеріалів, таких як бетон, для оцінки їхньої якості та довговічності.

- Автомобільна промисловість: Оцінка якості матеріалів, що використовуються у виробництві автомобілів, зокрема композитних матеріалів.

Технічні аспекти

- Частота ультразвукових хвиль: Частота може варіюватися від кількох кілогерц до кількох мегагерц, залежно від типу матеріалу та мети дослідження.

					ПК 01.180000.000ПЗ	Арк.
						17
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- Перетворювачі: Використовуються високочастотні ультразвукові перетворювачі, здатні генерувати і приймати хвилі в широкому діапазоні частот.

- Калібрування: Для точного вимірювання необхідно проводити калібрування з використанням еталонних зразків з відомими властивостями.

Приклад розрахунку

Припустимо, що ми маємо зразок матеріалу, через який поширюються ультразвукові хвилі з частотою 1 МГц. Виміряні значення імпедансу при цій частоті можуть бути використані для розрахунку механічних властивостей матеріалу за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення, яке аналізує спектр імпедансу.

Висновок по даному методу

Метод ультразвукової імпедансної спектроскопії є потужним інструментом для вивчення механічних властивостей матеріалів. Його висока точність, можливість детального аналізу та неінвазивність роблять його цінним для широкого спектра наукових і промислових застосувань.

Метод резонансної частоти (Resonance Frequency Method)

Метод резонансної частоти (Resonance Frequency Method) використовується для визначення механічних властивостей матеріалів, зокрема їхньої твердості, шляхом аналізу резонансних частот матеріалу при збудженні ультразвуковими хвилями. Резонансні частоти залежать від маси та жорсткості матеріалу, що відображає його механічні властивості.

Принцип дії

1. Генерація ультразвукових хвиль:

- Ультразвуковий перетворювач (трансдюсер) генерує механічні коливання в широкому діапазоні частот, які передаються в матеріал.

					ПК 01.180000.000ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		18

2. Збудження резонансних коливань:

- Коли частота ультразвукових хвиль збігається з природними (резонансними) частотами матеріалу, виникають резонансні коливання, при яких амплітуда коливань значно збільшується.

- Резонансні частоти залежать від геометрії, маси та механічних властивостей матеріалу.

3. Вимірювання резонансних частот:

- Амплітуда коливань вимірюється за допомогою датчиків або перетворювачів.

- Резонансні частоти визначаються як частоти, на яких спостерігаються піки амплітуди коливань.

4. Аналіз резонансних частот:

- Виявлені резонансні частоти аналізуються для визначення механічних властивостей матеріалу, таких як модуль пружності, жорсткість та густина.

- Резонансні частоти використовуються для розрахунку відповідних модулів пружності матеріалу.

Переваги методу резонансної частоти

- Висока чутливість: Метод дозволяє виявляти дуже малі зміни у механічних властивостях матеріалу.

- Висока точність: Забезпечує точні вимірювання завдяки аналізу резонансних частот.

- Неінвазивність: Метод не пошкоджує матеріал, що дозволяє використовувати його для тестування цінних або крихких зразків.

- Простота: Вимірювання резонансних частот є відносно простим процесом, що не потребує складного обладнання.

					ПК 01.180000.000ПЗ	Арк.
						19
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Області застосування

- **Металургія:** Використовується для контролю якості металів і сплавів, зокрема для визначення однорідності матеріалу і виявлення дефектів.
- **Авіабудування:** Перевірка деталей і компонентів літаків на відповідність жорстким стандартам якості.
- ***Будівництво:** Діагностика бетонних та інших будівельних матеріалів для оцінки їхньої цілісності та міцності.
- **Медицина:** Використовується для діагностики кісткових тканин, аналізу міцності кісток і виявлення остеопорозу.
- **Автомобільна промисловість:** Оцінка якості матеріалів, що використовуються у виробництві автомобілів, зокрема композитних матеріалів.

Технічні аспекти

- **Частота ультразвукових хвиль:** Частота хвиль зазвичай варіюється від кількох кілогерц до кількох мегагерц, залежно від типу матеріалу та мети дослідження.
- **Перетворювачі:** Використовуються ультразвукові перетворювачі, здатні генерувати хвилі в широкому діапазоні частот і вимірювати амплітуди коливань.
- **Калібрування:** Для точного вимірювання необхідно проводити калібрування з використанням еталонних зразків з відомими властивостями.

Приклад розрахунку

Припустимо, що ми маємо зразок матеріалу, у якому спостерігаються резонансні частоти при 10 кГц і 20 кГц. На основі цих резонансних частот можна розрахувати модуль Юнга (E) та інші механічні властивості матеріалу за допомогою відповідних рівнянь і моделей, що враховують геометрію зразка.

Висновок по даному методу

					ПК 01.180000.000ПЗ	Арк.
						20
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Метод резонансної частоти є ефективним інструментом для визначення механічних властивостей матеріалів, зокрема їхньої твердості. Його висока чутливість, точність та неінвазивність роблять його цінним для широкого спектра наукових і промислових застосувань. Він дозволяє отримувати точні дані про механічні властивості матеріалів, що є надзвичайно важливим для забезпечення якості та надійності продукції.

Метод інтерференційної фільтрації (Interferometric Filtering Method)

Метод інтерференційної фільтрації (Interferometric Filtering Method) використовується для дослідження механічних властивостей матеріалів шляхом аналізу інтерференційних картин, що виникають при проходженні або відбитті ультразвукових хвиль у матеріалі. Цей метод базується на принципах інтерференції, де взаємодія хвиль призводить до утворення чітких візерунків, які залежать від властивостей матеріалу.

Принцип дії

1. Генерація ультразвукових хвиль:

- Ультразвуковий перетворювач генерує ультразвукові хвилі, які проходять через матеріал або відбиваються від його меж.

2. Інтерференція хвиль:

- Коли хвилі взаємодіють одна з одною, вони створюють інтерференційні картини (візерунки), які залежать від фазового зсуву між хвилями.

- Фазовий зсув виникає через різні швидкості поширення хвиль в матеріалі, що залежить від його механічних властивостей.

3. Реєстрація інтерференційної картини:

- Інтерференційна картина реєструється за допомогою спеціальних детекторів або камер.

					ПК 01.180000.000ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		21

- Отримана картина аналізується для визначення фазових змін і амплітуд хвиль.

4. Аналіз інтерференційної картини:

- На основі аналізу інтерференційної картини визначаються механічні властивості матеріалу, такі як модуль Юнга, модуль зсуву та інші параметри.

- Аналіз включає розрахунок фазового зсуву і його залежності від частоти ультразвукових хвиль.

Переваги методу інтерференційної фільтрації

- Висока точність: Метод забезпечує високу точність вимірювань завдяки аналізу фазового зсуву.

- Неінвазивність: Дослідження проводяться без пошкодження матеріалу.

- Детальний аналіз: Метод дозволяє отримати детальну інформацію про внутрішню структуру матеріалу.

- Широкий діапазон застосування: Може використовуватися для різних матеріалів, включаючи метали, полімери, композити та біологічні тканини.

Області застосування

- Матеріалознавство: Дослідження механічних властивостей нових матеріалів, включаючи композити та полімери.

- Медицина: Використовується для діагностики тканин, виявлення пухлин та інших патологій.

- Авіабудування: Перевірка матеріалів, що використовуються в авіації, на предмет наявності дефектів та їхніх механічних властивостей.

- Будівництво: Аналіз будівельних матеріалів, таких як бетон, для оцінки їхньої якості та довговічності.

					ПК 01.180000.000ПЗ	Арк.
						22
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- Автомобільна промисловість: Оцінка якості матеріалів, що використовуються у виробництві автомобілів.

Технічні аспекти

- Частота ультразвукових хвиль: Частота хвиль зазвичай варіюється від кількох кілогерц до кількох мегагерц, залежно від типу матеріалу та мети дослідження.

- Перетворювачі: Використовуються ультразвукові перетворювачі, здатні генерувати і приймати хвилі в широкому діапазоні частот.

- Детектори: Спеціальні детектори або високочастотні камери використовуються для реєстрації інтерференційних картин.

- Аналізатор: Програмне забезпечення для аналізу інтерференційних картин, розрахунку фазових зсувів і визначення механічних властивостей матеріалу.

Приклад застосування

Припустимо, що ми маємо зразок металу, через який проходять ультразвукові хвилі з частотою 1 МГц. В результаті інтерференції хвиль, відбитих від внутрішніх структур матеріалу, формується інтерференційна картина. Аналіз цієї картини дозволяє визначити фазовий зсув, що використовується для розрахунку модуля Юнга та інших механічних властивостей металу.

Висновок по даному методу

Метод інтерференційної фільтрації є потужним інструментом для визначення механічних властивостей матеріалів. Його висока точність, неінвазивність та можливість детального аналізу роблять його цінним для широкого спектра наукових і промислових застосувань. Він дозволяє отримувати точні дані про механічні властивості матеріалів, що є надзвичайно важливим для забезпечення якості та надійності продукції.

1.2 ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ РІШЕНЬ КОТАКТНО-ІМПЕДАНСНИХ ТВЕДРОМІРІВ.

					ПК 01.180000.000ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		23

Порівняльний аналіз контактних-імпедансних твердомірів: Proceq Equotip 550 UCI, Krautkramer MIC 10, Bowers Metrology Ultrasonic Hardness Tester HCU-1000 та Sonodur 3.



Рис. 2.1 Proceq Equotip 550 UCI

					ПК 01.180000.000ПЗ	Арк.
						24
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



Рис. 2.2 Krautkramer MIC 10



Рис. 2.3 Sonodur 3

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ПК 01.180000.000ПЗ

Арк.

25

Загальні характеристики

Proceq Equotip 550 UCI

- Метод вимірювання: Ультразвуковий контактний імпеданс (UCI)
- Діапазон твердості: Вимірювання твердості різних матеріалів у широкому діапазоні
- Точність: Висока точність вимірювань з мінімальною похибкою
- Дисплей: Інтуїтивно зрозумілий сенсорний екран з високою роздільною здатністю
- Збереження даних: Великий обсяг пам'яті для збереження результатів вимірювань
- Портативність: Міцний корпус для польових умов

Krautkramer MIC 10

- Метод вимірювання: Ультразвуковий контактний імпеданс (UCI)
- Діапазон твердості: Широкий діапазон вимірювань для різних металів і сплавів
- Точність: Висока точність і повторюваність результатів
- Дисплей: Чіткий цифровий дисплей
- Збереження даних: Можливість збереження результатів вимірювань для подальшого аналізу
- Портативність: Легкий і компактний дизайн

Bowers Metrology Ultrasonic Hardness Tester HCU-1000

- Метод вимірювання: Ультразвуковий контактний імпеданс (UCI)
- Діапазон твердості: Вимірювання твердості різних матеріалів
- Точність: Висока точність та повторюваність результатів
- Дисплей: Яскравий та чіткий сенсорний екран
- Збереження даних: Вбудована пам'ять для збереження результатів
- Портативність: Компактний та легкий дизайн

Sonodur 3

- Метод вимірювання: Ультразвуковий контактний імпеданс (UCI)

					ПК 01.180000.000ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		26

- Діапазон твердості: Вимірювання твердості різних матеріалів у широкому діапазоні

- Точність: Висока точність і повторюваність результатів

- Дисплей: Кольоровий сенсорний екран

- Збереження даних: Вбудована пам'ять з можливістю експорту даних

- Портативність: Легкий і компактний дизайн

Дисплей та інтерфейс

Proseq Equotip 550 UCI має інтуїтивно зрозумілий сенсорний екран з високою роздільною здатністю, що дозволяє користувачам легко налаштувати параметри вимірювань і переглядати результати. Яскравий дисплей забезпечує чіткість навіть при роботі в умовах яскравого освітлення або на відкритому повітрі.

Krautkramer MIC 10 оснащений чітким цифровим дисплеєм, який забезпечує простоту використання. Хоча дисплей не є сенсорним, він надає необхідну інформацію чітко і зрозуміло, що особливо важливо в складних умовах експлуатації.

Bowers Metrology Ultrasonic Hardness Tester HCU-1000 також має яскравий та чіткий сенсорний екран, який забезпечує зручний інтерфейс для користувачів. Сенсорний екран спрощує налаштування параметрів і перегляд результатів вимірювань.

Sonodur 3 обладнаний кольоровим сенсорним екраном, який забезпечує інтуїтивно зрозумілий інтерфейс. Яскравий та чіткий дисплей полегшує роботу з приладом, дозволяючи легко переглядати результати та налаштувати параметри вимірювань.

Програмне забезпечення та збереження даних

Proseq Equotip 550 UCI має розширені можливості для збереження та аналізу даних завдяки програмному забезпеченню Equotip Link. Це ПЗ дозволяє зберігати великий обсяг результатів вимірювань, експортувати дані на ПК для подальшого аналізу та створювати звіти.

					ПК 01.180000.000ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		27

Krautkramer MIC 10 забезпечує можливість збереження результатів вимірювань для подальшого аналізу. Хоча його програмне забезпечення менш розширене, ніж у інших моделей, воно достатньо для виконання основних завдань з обробки даних.

Bowers Metrology Ultrasonic Hardness Tester HCU-1000 має вбудовану пам'ять для збереження результатів. Інтуїтивно зрозумілий інтерфейс дозволяє легко зберігати та переглядати дані. Програмне забезпечення забезпечує зручний аналіз та експорт даних.

Sonodur 3 оснащений програмним забезпеченням Sonowin, яке дозволяє зберігати, аналізувати та експортувати дані. Інтуїтивно зрозумілий інтерфейс ПЗ робить роботу з даними простою та ефективною. Вбудована пам'ять забезпечує збереження великого обсягу результатів вимірювань.

Портативність

Proseq Equotip 550 UCI має міцний корпус, що забезпечує захист приладу під час транспортування та використання в польових умовах. Легкий і компактний дизайн робить його зручним для перенесення та використання на місці.

Krautkramer MIC 10 відзначається легким і компактним дизайном, що дозволяє легко переносити прилад та використовувати його в різних умовах. Надійність і довговічність конструкції роблять його придатним для складних умов експлуатації.

Bowers Metrology Ultrasonic Hardness Tester HCU-1000 також має компактний та легкий дизайн, що робить його зручним для використання в польових умовах. Міцний корпус забезпечує захист приладу під час транспортування.

Sonodur 3 відзначається легким і компактним дизайном, що робить його зручним для використання в польових умовах. Міцний корпус та зручний кейс для транспортування забезпечують додатковий захист приладу.

Гнучкість та знімні наконечники

					ПК 01.180000.000ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		28

Усі чотири моделі мають знімні наконечники, що дозволяє адаптувати їх до різних умов вимірювання. Це забезпечує високу гнучкість у використанні приладів для різних завдань.

Proseq Equotip 550 UCI пропонує різноманітні знімні наконечники для різних типів матеріалів і умов вимірювання. Це дозволяє легко адаптувати прилад до специфічних вимог.

Krautkramer MIC 10 також має змінні наконечники, що дозволяє використовувати прилад для вимірювання твердості різних матеріалів. Простота заміни наконечників робить його зручним у використанні.

Bowers Metrology Ultrasonic Hardness Tester HCU-1000 забезпечує змінні наконечники для адаптації до різних умов вимірювання. Це дозволяє використовувати прилад для вимірювання твердості різних типів матеріалів.

Sonodur 3 також має змінні наконечники, що забезпечує високу гнучкість у використанні. Легкість заміни наконечників дозволяє адаптувати прилад до специфічних вимог.

Застосування і переваги

Proseq Equotip 550 UCI

- Застосування: Металообробка, авіабудування, автомобілебудування, будівництво, наукові дослідження.

- Переваги: Висока точність вимірювань, великий екран і зручне ПЗ, різноманітні знімні наконечники, портативність.

Krautkramer MIC 10

- Застосування: Металообробка, контроль якості деталей і компонентів, наукові дослідження.

- Переваги: Висока точність, простота використання, надійність та довговічність, легкий і компактний дизайн.

Bowers Metrology Ultrasonic Hardness Tester HCU-1000

- Застосування: Металообробка, авіабудування, автомобілебудування, наукові дослідження.

					ПК 01.180000.000ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		29

- Переваги: Висока точність та повторюваність результатів, зручний інтерфейс, портативність, легкість в управлінні.

Sonodur 3

- Застосування: Металообробка, авіабудування, автомобілебудування, будівництво, наукові дослідження.

- Переваги: Висока точність та повторюваність результатів, зручний сенсорний екран, портативність, легкість в управлінні.

Висновок

Proseq Equotip 550 UCI, Krautkramer MIC 10, Bowers Metrology Ultrasonic Hardness Tester HCU-1000 та Sonodur 3 є надійними та ефективними інструментами для вимірювання твердості матеріалів. Вибір між ними залежить від конкретних вимог користувача щодо точності, зручності використання, можливостей збереження та аналізу даних, а також умов експлуатації.

Proseq Equotip 550 UCI відзначається високою точністю, великим екраном і зручним програмним забезпеченням, що робить його ідеальним для складних завдань і умов.

Krautkramer MIC 10 забезпечує простоту використання, високу точність і надійність, що робить його придатним для складних умов експлуатації.

Bowers Metrology Ultrasonic Hardness Tester HCU-1000 поєднує високу точність, зручний інтерфейс та портативність, що робить його ідеальним для різних застосувань.

Sonodur 3 забезпечує високу точність, зручний сенсорний екран та програмне забезпечення, що робить його зручним для використання в польових умовах та наукових дослідженнях. [6][7][8]

					ПК 01.180000.000ПЗ	Арк.
						30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВИСНОВКИ ПО РОЗДІЛУ 1

Контактно-імпедансні твердоміри та їх методи

Контактно-імпедансні твердоміри, що використовують ультразвуковий контактний імпеданс (UCI), є незамінними інструментами для точного вимірювання твердості матеріалів. Вони використовуються в різних галузях промисловості, включаючи металообробку, авіабудування, автомобілебудування, будівництво та наукові дослідження. Основні методи, такі як ультразвукове відлуння, ультразвукова хвильова швидкість, ультразвукова імпедансна спектроскопія, метод резонансної частоти та інтерференційна фільтрація, забезпечують різні підходи до вимірювання твердості.

Огляд моделей твердомірів

Ми розглянули чотири сучасні моделі контактно-імпедансних твердомірів: Proceq Equotip 550 UCI, Krautkramer MIC 10, Bowers Metrology Ultrasonic Hardness Tester HCU-1000 та Sonodur 3. Кожна з цих моделей має свої унікальні особливості, переваги та недоліки.

- Proceq Equotip 550 UCI вирізняється високою точністю, великим сенсорним екраном та розширеними можливостями збереження і аналізу даних. Він ідеальний для користувачів, яким потрібні розширені функції та зручний інтерфейс.

- Krautkramer MIC 10 є простим і надійним твердоміром з цифровим дисплеєм, підходить для базових задач і умов, де потрібна надійність та довговічність.

- Bowers Metrology HCU-1000 пропонує високу точність і базові функції збереження даних, що робить його придатним для користувачів, які потребують надійний та простий у використанні інструмент.

-*Sonodur 3 відзначається інтуїтивно зрозумілим інтерфейсом, кольоровим сенсорним екраном та потужним програмним забезпеченням Sonowin, що робить його відмінним вибором для тих, хто цінує зручність використання і високу точність.

					ПК 01.180000.000ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		31

Порівняльний аналіз

1. Дисплей та інтерфейс: Proceq Equotip 550 UCI та Sonodur 3 мають передові сенсорні екрани, що спрощують використання та налаштування. Krautkramer MIC 10 та Bowers Metrology HCU-1000 мають простіші дисплеї, але вони надійні і достатні для більшості задач.

2. Програмне забезпечення: Proceq Equotip 550 UCI та Sonodur 3 забезпечують розширені можливості аналізу даних, тоді як Krautkramer MIC 10 та Bowers Metrology HCU-1000 пропонують базові функції збереження.

3. Портативність: Усі моделі є компактними та легкими, але Proceq Equotip 550 UCI та Sonodur 3 мають додаткові захисні аксесуари для зручного транспортування.

4. Гнучкість: Усі моделі оснащені змінними наконечниками, що дозволяє адаптувати їх до різних умов вимірювання.

Вибір між цими твердомірами залежить від конкретних потреб і умов використання. Proceq Equotip 550 UCI та Sonodur 3 підійдуть користувачам, яким потрібні розширені можливості та інтуїтивно зрозумілий інтерфейс. Krautkramer MIC 10 та Bowers Metrology HCU-1000 є відмінними виборами для задач, де важлива простота і надійність.

Таким чином, контактні-імпедансні твердоміри, такі як Proceq Equotip 550 UCI, Krautkramer MIC 10, Bowers Metrology HCU-1000 та Sonodur 3, забезпечують високу точність і зручність вимірювання твердості матеріалів, задовольняючи потреби різних галузей і умов використання, переваги яких я об'єднаю в цій роботі.

					ПК 01.180000.000ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		32

РОЗДІЛ 2. РОЗРАХУНКОВА ЧАСТИНА

2.1 СТРУКТУРНА СХЕМА

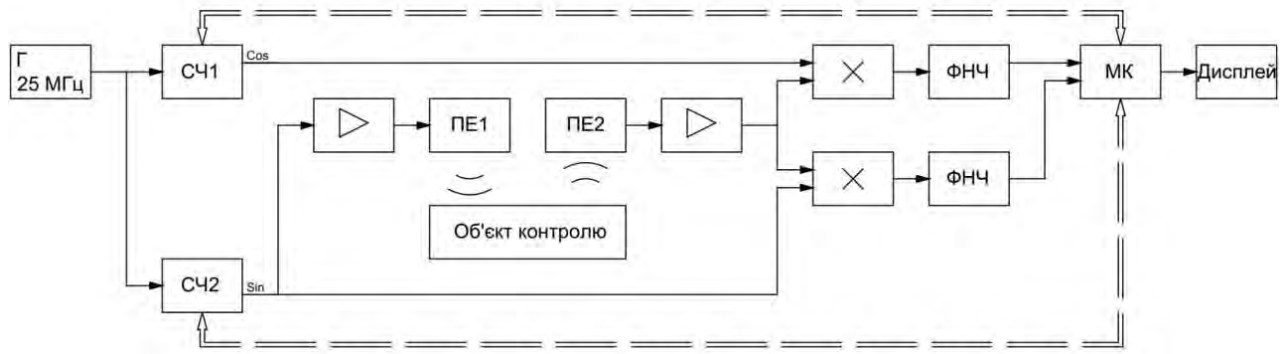


Рис. 2.1 Структурна схема.

1. Г 25 МГц (генератор 25 МГц): Генерує сигнал з частотою 25 МГц.
2. СЧ1 (синтезатор частот 1): Виділяє косинусну (Cos) компоненту сигналу.
3. СЧ2 (синтезатор частот 2): Виділяє синусну (Sin) компоненту сигналу.
4. ПЕ1 (п'єзоелектричний елемент 1): Виконує роль передавача, який перетворює електричний сигнал у механічні коливання.
5. Об'єкт контролю: Твердомір проводить вимірювання на цьому об'єкті.
6. ПЕ2 (п'єзоелектричний елемент 2): Виконує роль приймача, який перетворює механічні коливання назад у електричний сигнал.
7. Підсилювачі: перший підсилює напругу до потрібної нам 50 В, другий підсилює сигнал для коректної роботи перемножувачів.
8. Множники: Перемножують сигнали з синтезаторів частот з сигналами від ПЕ2.
9. ФНЧ (фільтр низьких частот): Відфільтровує високочастотні компоненти сигналів.
10. МК (мікроконтролер): Обробляє отримані сигнали.
11. Дисплей: Відображає результати вимірювань.

Основний принцип роботи полягає в наступному:

					ПК 01.180000.000ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		33

- Генератор генерує високочастотний сигнал, який розділяється на дві компоненти (Cos і Sin) за допомогою синтезаторів частот.
- П'єзоелектричний елемент 1 (ПЕ1) передає сигнал на об'єкт контролю, де він взаємодіє з матеріалом.
- П'єзоелектричний елемент 2 (ПЕ2) приймає відображений сигнал, який потім підсилюється.
- Сигнали з ПЕ2 перемножуються з синхронними компонентами, після чого фільтруються за допомогою фільтрів низьких частот.
- Мікроконтролер обробляє фільтровані сигнали та відображає результати на дисплеї.

Таким чином, дана схема дозволяє вимірювати твердість матеріалу шляхом аналізу відображеного сигналу.

Опис ортогонального методу, за допомогою якого ми зчитуємо вихідні дані з перемножувачів:

Для визначення амплітуди і фази гармонічних компонентів сигналу аналогового відгуку, які вимірюються з виходів перетворювачів (після ФНЧ), був використаний ортогональний метод їх обробки. Загально відомо, що:

$$\sin(\omega t + \varphi) * \sin(\omega t) = \frac{1}{2} \cos(\varphi) - \frac{1}{2} \cos(2\omega t + \varphi),$$

$$\sin(\omega t + \varphi) * \cos(\omega t) = \frac{1}{2} \sin(\varphi) + \frac{1}{2} \sin(2\omega t + \varphi).$$

З виразу (1) випливає, що після множення двох сигналів однакової частоти результат буде мати постійну складову $\frac{1}{2} \cos(\varphi)$ або $\frac{1}{2} \sin(\varphi)$ і змінну гармонічну складову $\frac{1}{2} \cos(2\omega t + \varphi)$ або $\frac{1}{2} \sin(2\omega t + \varphi)$. Синусоїда - це гармонічний сигнал, властивості сигналу якого:

$$\int_0^{N_0 T} \sin(\omega t) dt = 0, \int_0^{N_0 T} \cos(\omega t) dt = 0 \quad (2)$$

					ПК 01.180000.000ПЗ	Арк.
						34
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

де T - період сигналу, $N_0 = 1, 2, 3, 4, \dots$ ($N_0 \in \mathbb{Z}^+$) - це кількість його періодів.

Результат інтегрування залежить тільки від постійної складової, оскільки інтегрування всіх гармонійних компонентів по (2) дорівнює нулю в разі дотримання умови, що кількість періодів N_0 належить до множини додатних цілих чисел \mathbb{Z}^+ .

Визначення постійних складових дозволить розрахувати як амплітуди, так і фази сигналів. [21]

2.2 РОЗРАХУНОК П'ЄЗОЕЛЕКТРИЧНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА

Розрахунок розмірів п'єзоелектричного перетворювача (або п'єзокерамічного елемента) для визначеної резонансної частоти вимагає знання деяких основних параметрів матеріалу, з якого виготовлений перетворювач, таких як швидкість звуку в матеріалі та його механічні властивості.

Для резонансної частоти f перетворювача з товщинною поляризацією, товщина h елемента визначається за формулою:

$$h = \frac{v}{2f}$$

де:

v — швидкість звуку в матеріалі п'єзоелектрика,

f — резонансна частота.

Типова швидкість звуку в п'єзокерамічних матеріалах (таких як PZT — свинцевий цирконат-титанат) становить приблизно 4000 м/с.

Тепер обчислимо товщину перетворювача для резонансної частоти 2.5 МГц (або 2.5×10^6 Гц):

$$h = \frac{4000}{2 \times 2.5 \times 10^6} = 0.0008 \text{ м}$$

					ПК 01.180000.000ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		35

Отже, для п'єзоелектричного перетворювача на частоту 2.5 МГц товщина має бути приблизно 0.8 мм.

Для площі п'єзоелектричного перетворювача потрібно знати потужність та імпеданс, тому для початку розрахуємо їх:

Ми працюємо з типовим п'єзоелектричним перетворювачем, який використовує синусоїдальну напругу 50 В на частоті 2.5 МГц. Типові імпеданси для таких систем зазвичай становлять від 100 до 500 Ом. Давайте зробимо розрахунок для середнього значення імпедансу, наприклад, 300 Ом:

Розрахунок потужності:

1. Визначимо ефективну напругу (RMS):

$$V_{rms} = \frac{V_{пик}}{\sqrt{2}} = \frac{50}{\sqrt{2}} \approx 35.36 \text{ В}$$

2. Обчислимо потужність:

$$P = \frac{V^2}{R} = \frac{35.36^2}{300} \approx 4.17 \text{ Вт}$$

Отже, для контактної-імпедансного твердоміра потужність п'єзоелектричного перетворювача, що працює при напрузі 50 В та частоті 2.5 МГц, з імпедансом 300 Ом, становить приблизно 4.17 Вт.

Цей розрахунок є орієнтовним, і фактична потужність може змінюватися залежно від конструкції перетворювача, типу матеріалу, умов вимірювання та інших специфічних факторів. У практиці потужність таких пристроїв може бути нижчою, тому що твердоміри часто використовують спеціалізовані перетворювачі з оптимізованими параметрами для точних вимірювань.

Тепер перейдемо безпосередньо до самої площі перетворювача:

1. Ємність перетворювача:

Для розрахунку площі важливо знати ємність п'єзоелектричного перетворювача, яка визначається наступною формулою:

					ПК 01.180000.000ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		36

$$C = \epsilon_r \epsilon_0 \frac{A}{h}$$

де:

ϵ_r — відносна діелектрична проникність матеріалу (для PZT це зазвичай близько 1200),

ϵ_0 — діелектрична стала у вакуумі ($\epsilon_0 \approx 8.854 \times 10^{-12}$ Ф/м

- A — площа електрода,

- h — товщина п'єзоелектричного матеріалу (0.8 мм = 0.0008 м).

2. Розрахунок площі:

Виходячи з потужності 4.17 Вт і припускаючи, що напруга 50 В ефективно використовується, імпеданс та ємність пов'язані таким чином:

$$Z = \frac{1}{2\pi f C}$$

$$C = \frac{1}{2\pi f Z}$$

Припустимо, що імпеданс (Z) становить 300 Ом, як розраховано раніше, і частота (f) становить 2.5 МГц:

$$C = \frac{1}{2\pi \times 2.5 \times 10^6 \times 300} = 2.12 \text{ пФ}$$

3. Обчислення площі електрода (A):

$$A = \frac{C \times h}{\epsilon_r \epsilon_0} \Rightarrow A \approx 0.1597 \text{ мм}^2$$

Цей розрахунок вказує на дуже малу площу, що є неприродно малою для практичного п'єзоелектричного перетворювача. Це означає, що необхідно скорегувати параметри (зокрема імпеданс) для реалістичних умов.

					ПК 01.180000.000ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		37

Корекція параметрів для реалістичних умов

Припустимо, що необхідна ємність і площа електрода більша, враховуючи практичні умови. У більшості реальних додатків площа електрода буде становити кілька квадратних сантиметрів.

Для більш реалістичного розрахунку з припущенням про більший імпеданс (наприклад, 1000 Ом) і відповідну ємність, площа може бути скоригована:

$$C = \frac{1}{2\pi f \times 1000} \approx 63.66 \text{ пФ}$$

Тоді площа буде:

$$A = \frac{63.66 \times 10^{-12} \times 0.0008}{1200 \times 8.854 \times 10^{-12}} \approx 4.8 \text{ мм}^2$$

Таким чином, площа електрода для реалістичного п'єзоелектричного перетворювача може бути близько 4.8 мм², що більше відповідає практичним значенням. Це все одно орієнтовний розрахунок, який потрібно уточнити залежно від специфічних характеристик та вимог твердоміра. [1]

2.3 РОЗРАХУНОК ФІЛЬТРУ НИЗЬКИХ ЧАСТОТ (ФНЧ)

Для розрахунку активного фільтра низьких частот з частотою зрізу 2.5 МГц, можна використати фільтр першого або другого порядку. Наведемо приклад розрахунку фільтра другого порядку типу Саллена-Кі.

Фільтр другого порядку (Саллена-Кі)

Фільтр другого порядку надає кращу крутизну затухання порівняно з фільтром першого порядку.

					ПК 01.180000.000ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		38

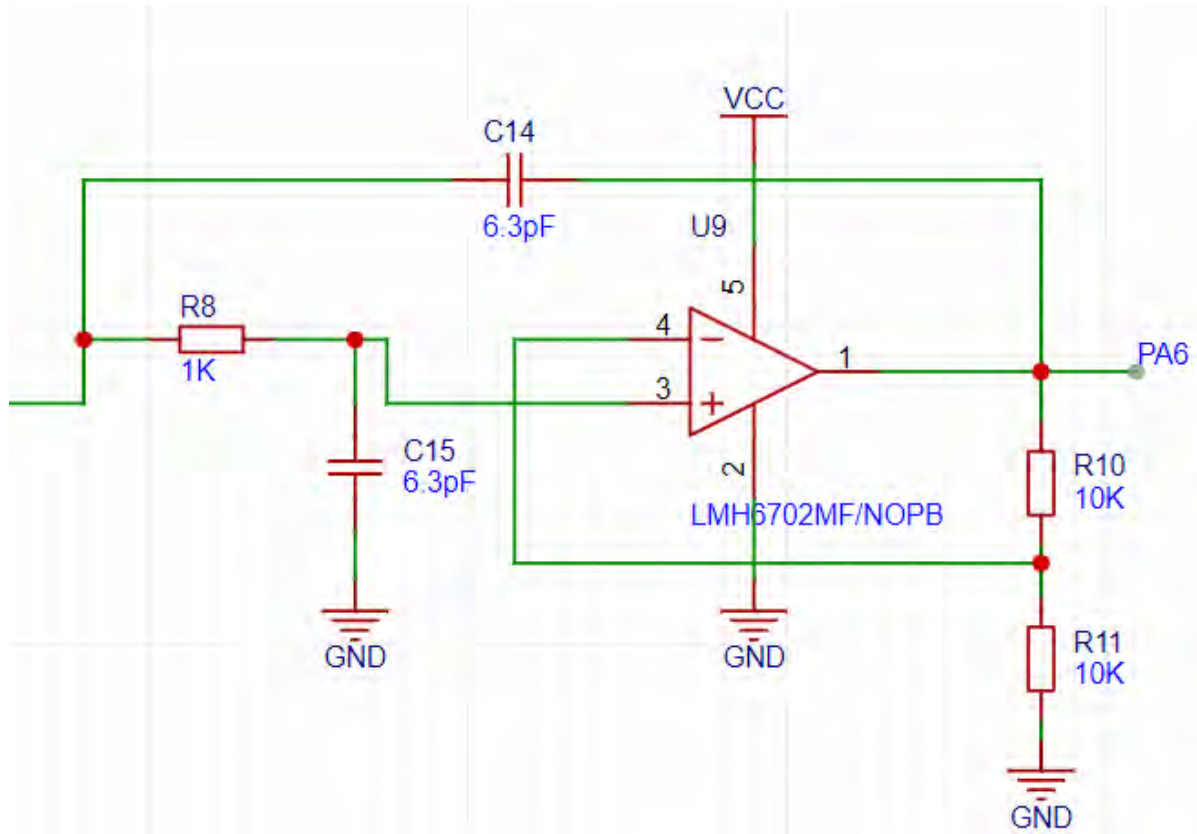


Рис. 2.2 Схема фільтра.

2. Формули для частоти зрізу:

Якщо ($R_1 = R_2 = R$) і ($C_1 = C_2 = C$):

$$f_{3\text{ дБ}}/f_{\text{ср}} = 1$$

$$f_{\text{ср}} = 1/2\pi RC$$

Розрахунок компонентів:

$$R_B = (2 - a) R_A$$

Табл. 1

Тип Фільтра	a	Відношення $f_{\text{ср}}$
Баттєрворта	1.414	1
Бесселя	1.732	0.785
Нерівномірність Чебишева 0.5 дБ	1.578	1.39

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

Нерівномірність Чебишева 1 дБ	1.059	1.218
Нерівномірність Чебишева 2 дБ	0.886	1.074
Нерівномірність Чебишева 3 дБ	0.766	1

Коефіцієнт пропускання знайдемо з формули:

$$K_{\text{п}} = R_{\text{В}} / R_{\text{А}} + 1$$

Припустимо, нам потрібна частота зрізу 2.5 МГц ($f_{3 \text{ дБ}} = 2.5 * 10^6$ Гц). Виберемо конденсатори ємністю 63 пФ ($C_1 = C_2 = C$):

З таблиці 1 знаходимо $f_{3 \text{ дБ}}/f_{\text{ср}}=1$, звідси $f_{3 \text{ дБ}}= f_{\text{ср}}$.

($R_1 = R_2 = R$). З відношення $f_{\text{ср}} = 1 / 2 \pi R C$,

$$R = 1 / 2 \pi f_{\text{ср}} C = 989 \text{ Ом}$$

Використаємо Резистор номіналом 1кОм.

- Резистори $R_1 = R_2 = 1 \text{ кОм}$.

- Конденсатори $C_1 = C_2 = 63 \text{ пФ}$.

$R_{\text{А}}$ візьмемо як 10 кОм і підставимо в дану формулу:

$$R_{\text{В}} = (2 - a) R_{\text{А}} = 5.86 \text{ кОм}$$

Підбір стандартних компонентів:

На практиці варто вибрати найближчі стандартні номінали компонентів. Для конденсаторів 63.7 пФ найближчим стандартним номіналом буде 63 пФ або 68 пФ.

Відповідно, скориговані номінали компонентів будуть такими:

- Резистори $R_1 = R_2 = 1 \text{ кОм}$.

- Конденсатори $C_1 = C_2 = 63 \text{ пФ}$.

Перевірка частоти зрізу:

					ПК 01.180000.000ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		40

Перевіримо частоту зрізу з обраними номіналами:

$$f_{з\ дБ} = 1 / (2 * r_i * 1000 * 63 * 10^{-12}) = 2.53 \text{ МГц}$$

Ця частота трохи вища за 2.5 МГц, але досить близька для більшості практичних застосувань. Якщо потрібна точніша частота зрізу, можна використовувати підлаштування компонентів або спеціалізовані підстроювальні елементи.

					ПК 01.180000.000ПЗ	Арк.
						41
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

ВИСНОВОК ДО ДРУГОГО РОЗДІЛУ

Узагальнюючи, детальний аналіз принципової схеми дозволяє глибше зрозуміти архітектуру системи, визначити можливі шляхи для її оптимізації та вдосконалення, що є ключовим аспектом для успішної реалізації електронного проекту.

Для активного фільтра низьких частот з частотою зрізу 2.5 МГц можна використати:

- Резистори: $R_1 = R_2 = 1 \text{ кОм}$, $R_B = 5.9 \text{ кОм}$, $R_A = 10 \text{ кОм}$.

- Конденсатори: $C_1 = C_2 = 63 \text{ пФ}$.

Ці компоненти забезпечать приблизну частоту зрізу 2.52 МГц.

Для практичного використання контактної-імпедансної твердої міри з частотою 2.5 МГц і напругою 50 В, п'єзоелектричний перетворювач повинен мати товщину близько 0.8 мм, потужність близько 4.17 Вт та площу електрода близько 4.8 мм², залежно від конкретних умов експлуатації та вимог до вимірювання.

					ПК 01.180000.000ПЗ	Арк.
						42
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 3. ВИБІР ЕЛЕМЕНТІВ ПРИНЦИПОВОЇ СХЕМИ ТА ПОБУДОВА ПРИНЦИПОВОЇ СХЕМИ

Принципова схема є фундаментальною частиною будь-якого електронного проекту, що надає детальне уявлення про функціональність і взаємодію компонентів системи. Вона слугує не лише інструментом для розробки та аналізу електронних пристроїв, але й основним засобом комунікації між інженерами. У цьому розділі ми детально розглянемо принципову схему обраного електронного пристрою, підкреслюючи ключові компоненти, їхні функції та взаємодію. Це дозволить глибше зрозуміти архітектуру системи та визначити можливі шляхи для її оптимізації та удосконалення.

3.1 ПІДКЛЮЧЕННЯ ТА ВНУТРІШНІ СХЕМИ ЕЛЕМЕНТІВ

1. Мікроконтролер STM32WB55CCU7 (U4)

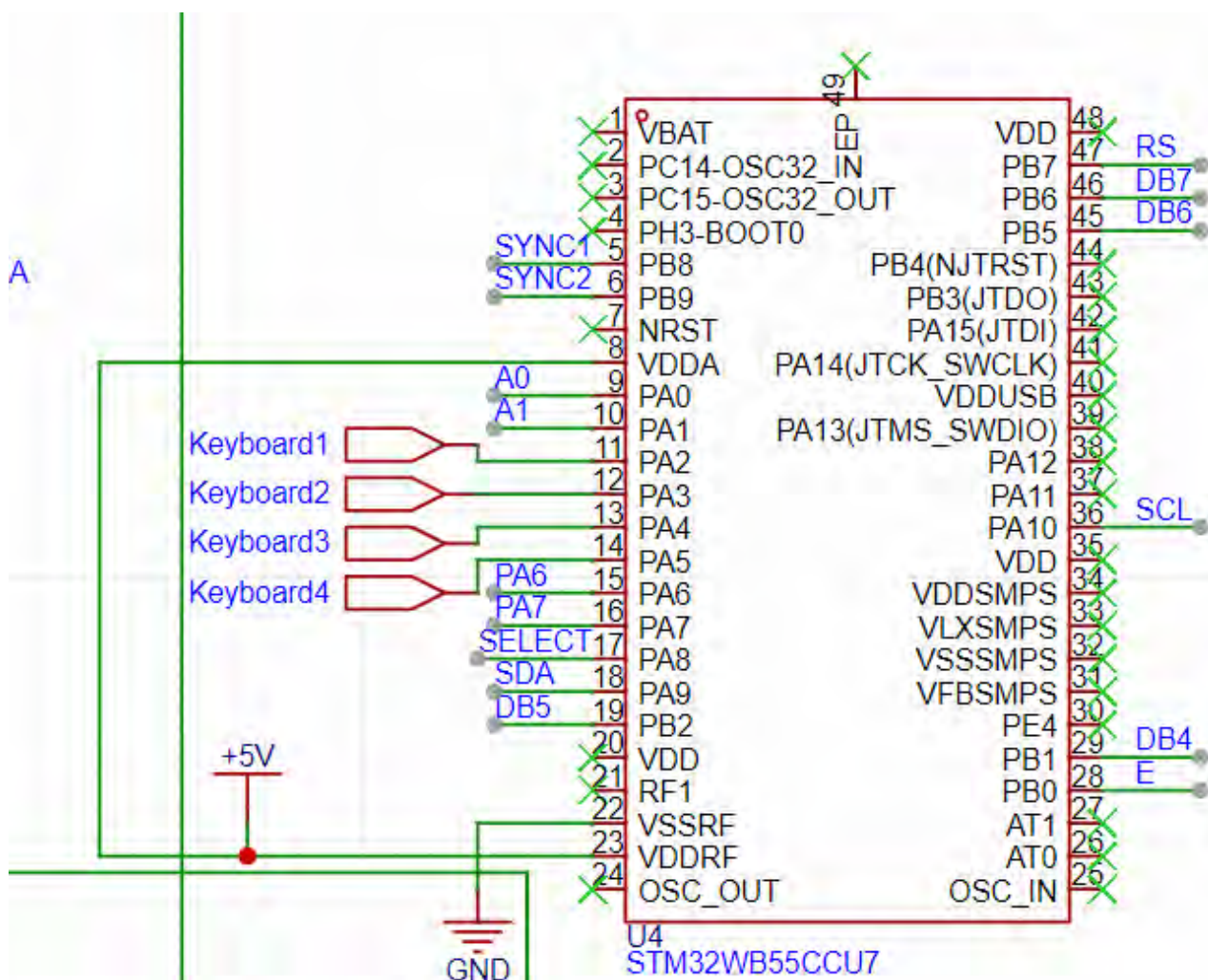


Рис. 4.1 Мікроконтролер STM32.

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

Мікроконтролер є центральним елементом схеми. Він забезпечує керування всіма іншими компонентами, обробляє вхідні сигнали і виводить результати на РК-дисплей.

- Живлення: Виводи VDD, VDDA, VDDUSB та VSS забезпечують живлення мікроконтролера. Напруга VDD використовується для живлення основних функціональних блоків, VDDA — для аналогових блоків, а VDDUSB — для USB модуля.

- Порти введення/виведення: PA0-PA15, PB0-PB9, PC14-PC15, PE4 та інші порти використовуються для підключення до різних периферійних пристроїв, таких як клавіатура і РК-дисплей.

- Тактові сигнали: Порти PC14-OSC32_IN та PC15-OSC32_OUT підключені до зовнішнього кварцового резонатора для генерації тактових сигналів.

- Програмування та налагодження: Порти PA13(JTMS_SWDIO), PA14(JTCK_SWCLK), PA15(JTDI), PB3(JTDO), PB4(NJTRST) використовуються для програмування та налагодження мікроконтролера через інтерфейс SWD (Serial Wire Debug).

					ПК 01.180000.000ПЗ	Арк.
						44
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Figure 1. STM32WB55xx block diagram

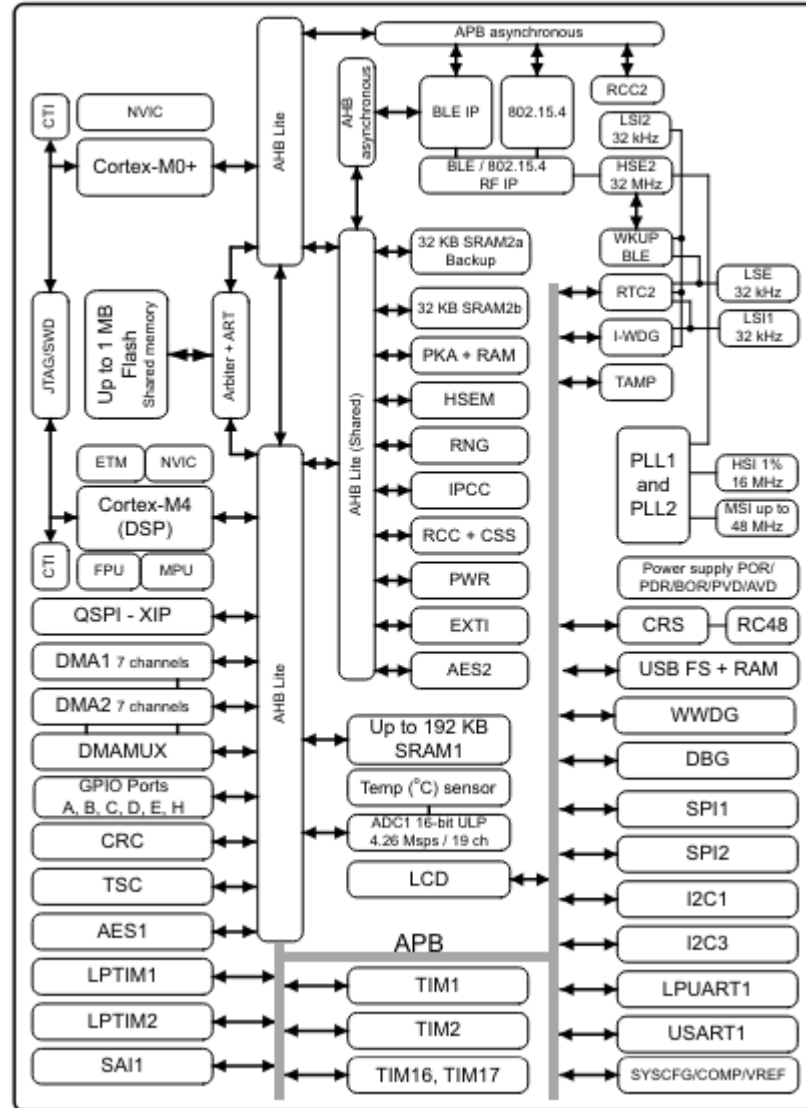


Рис. 4.2 Детальний опис функціонування мікроконтролера STM32. [10]

2. Операційні підсилювачі (U9, U10 - LMH6702MF/NOPB)

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

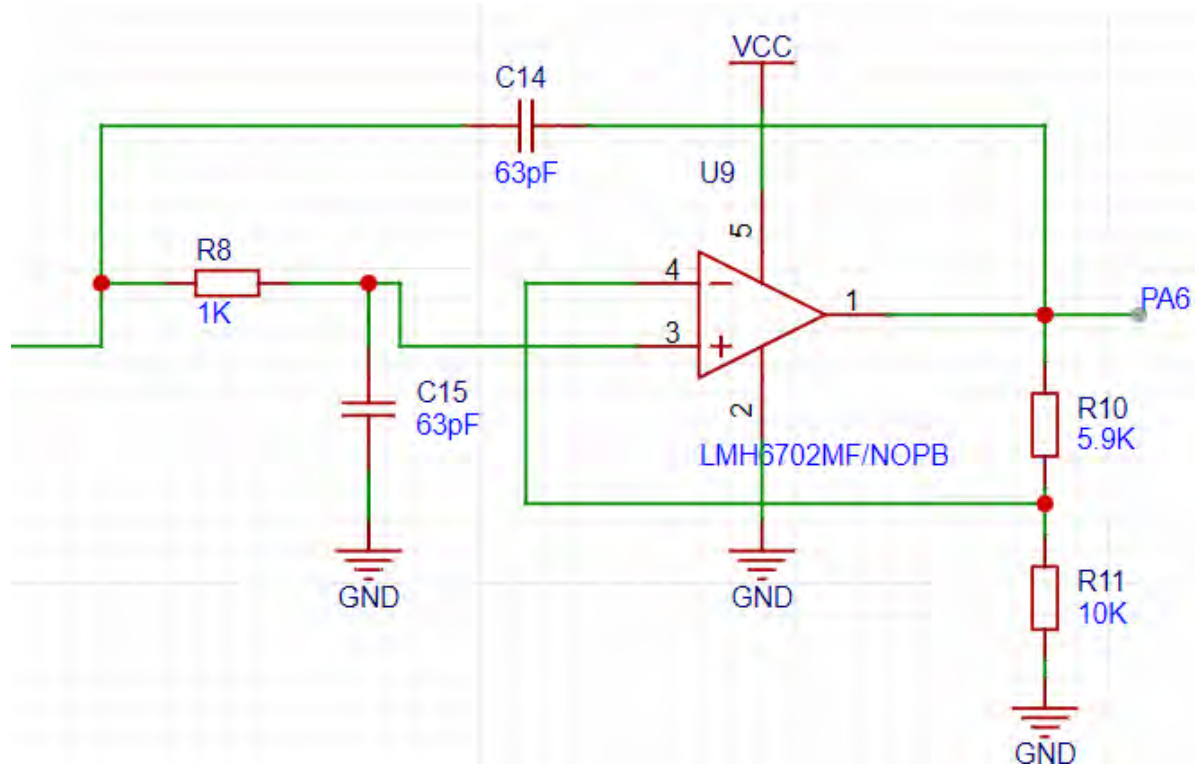


Рис. 4.3 Операційний підсилювач LMH6702MF/NOPB.

Ці операційні підсилювачі використовуються для підсилення аналогових сигналів.

- Вхідні сигнали: Підсилювачі мають два вхідні виводи (інверсний і неінверсний), що дозволяє налаштовувати підсилення відповідно до потреб схеми.
- Живлення: Виводи VCC забезпечують живлення підсилювачів.
- Конденсатори та резистори: Використовуються для налаштування підсилення і фільтрації сигналів. Наприклад, резистори R7, R9 (1K), R12, R13 (10K), конденсатори C14, C15 (63pF) та інші.

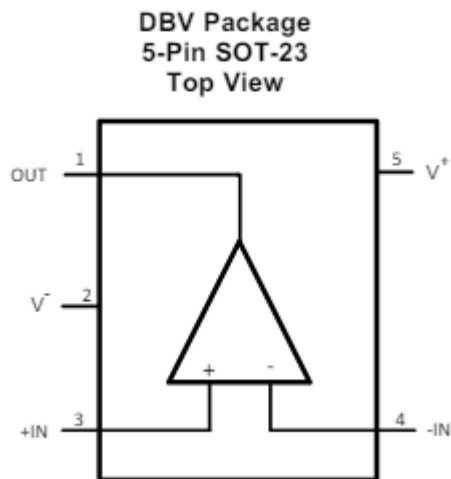


Рис. 4.4 Загальний вигляд з підключеннями підсилювача LMH6702MF/NOPB.

[15]

3. Програмовані генератори сигналів AD9833BRMZ (U5, U6)

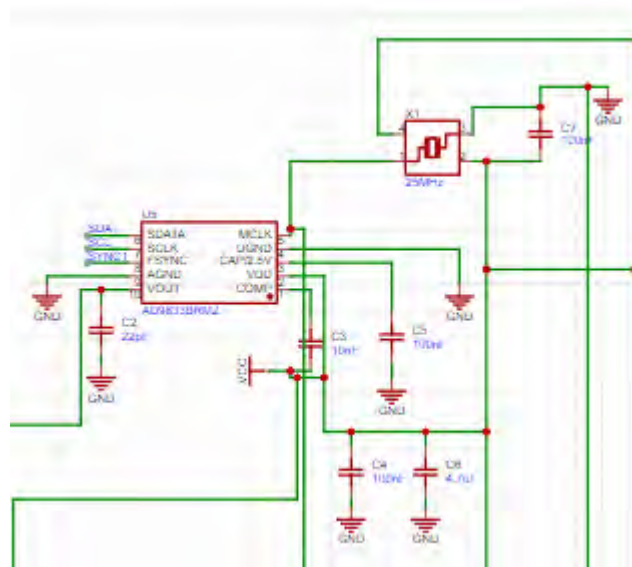


Рис. 4.5 Програмований генератор сигналів AD9833BRMZ.

Ці компоненти генерують сигнали певної частоти, які можуть бути використані в різних додатках, таких як тестування або керування.

- Вхідні сигнали: Виводи MCLK, SDATA, SCLK, FSYNC забезпечують передачу команд і даних до генератора.

- Вихідні сигнали: Вивід VOUT видає згенерований сигнал.

- Конденсатори: C1 (100нФ), C2 (22пФ), C3 (10нФ) та інші використовуються для фільтрації і стабілізації вихідного сигналу.

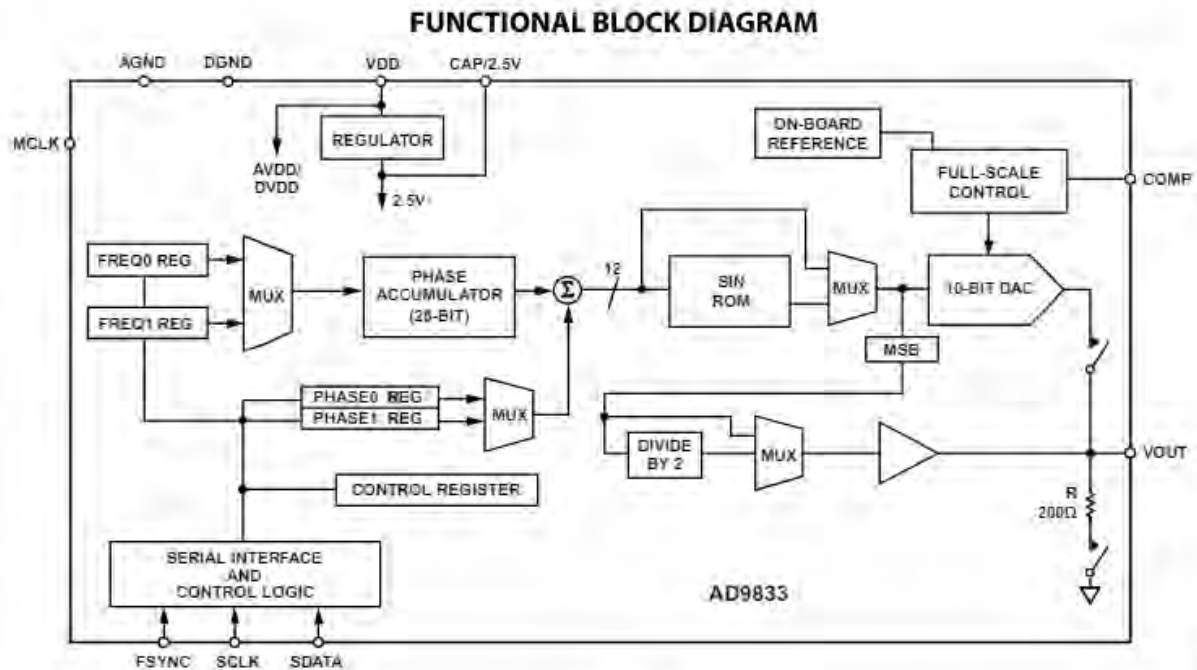


Figure 7

Рис. 4.6 Детальний опис функціонування програмованого генератора сигналів AD9833BRMZ. [13]

4. Перемикач SN74LVC1G3157DTBR (U3)

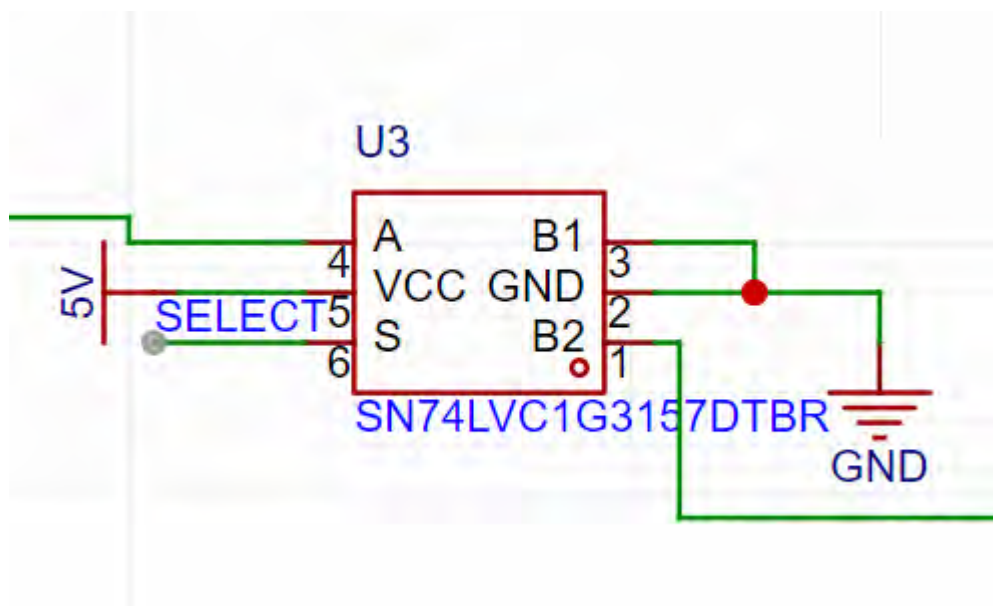


Рис. 4.7 Перемикач SN74LVC1G3157DTBR.

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

Цей компонент дозволяє перемикати сигнали між різними лініями, що забезпечує гнучкість у керуванні сигналами.

- Живлення: Вивід VCC забезпечує живлення перемикача.

- Керування: Виводи A, B1, B2 використовуються для перемикання сигналів.

- Резистори: Використовуються для обмеження струму і налаштування сигналів.

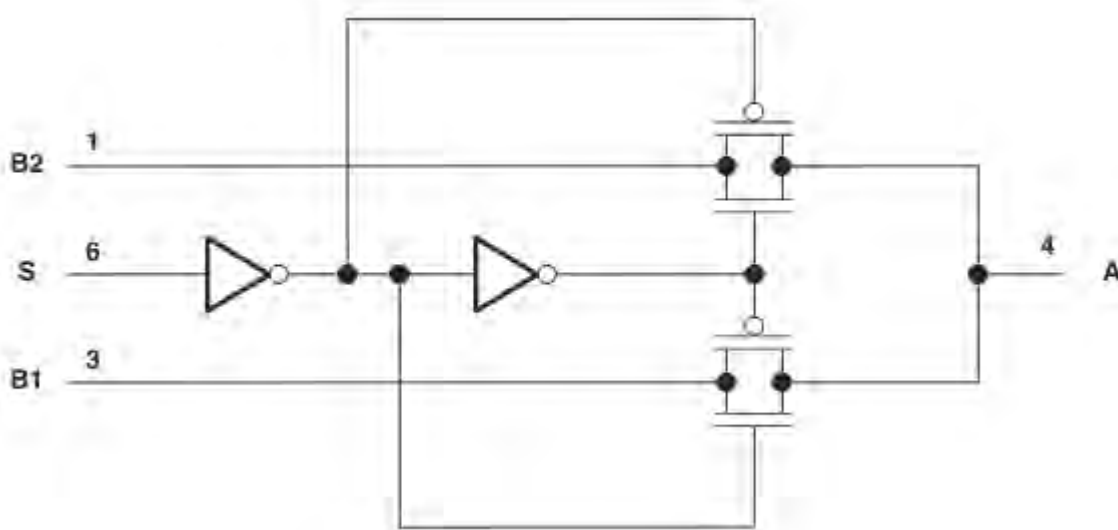


Рис. 4.8 Детальний опис функціонування перемикача SN74LVC1G3157DTBR.

[11]

5. Інші активні компоненти

- AD8253ARMZ (U2): Операційний підсилювач для обробки сигналів.

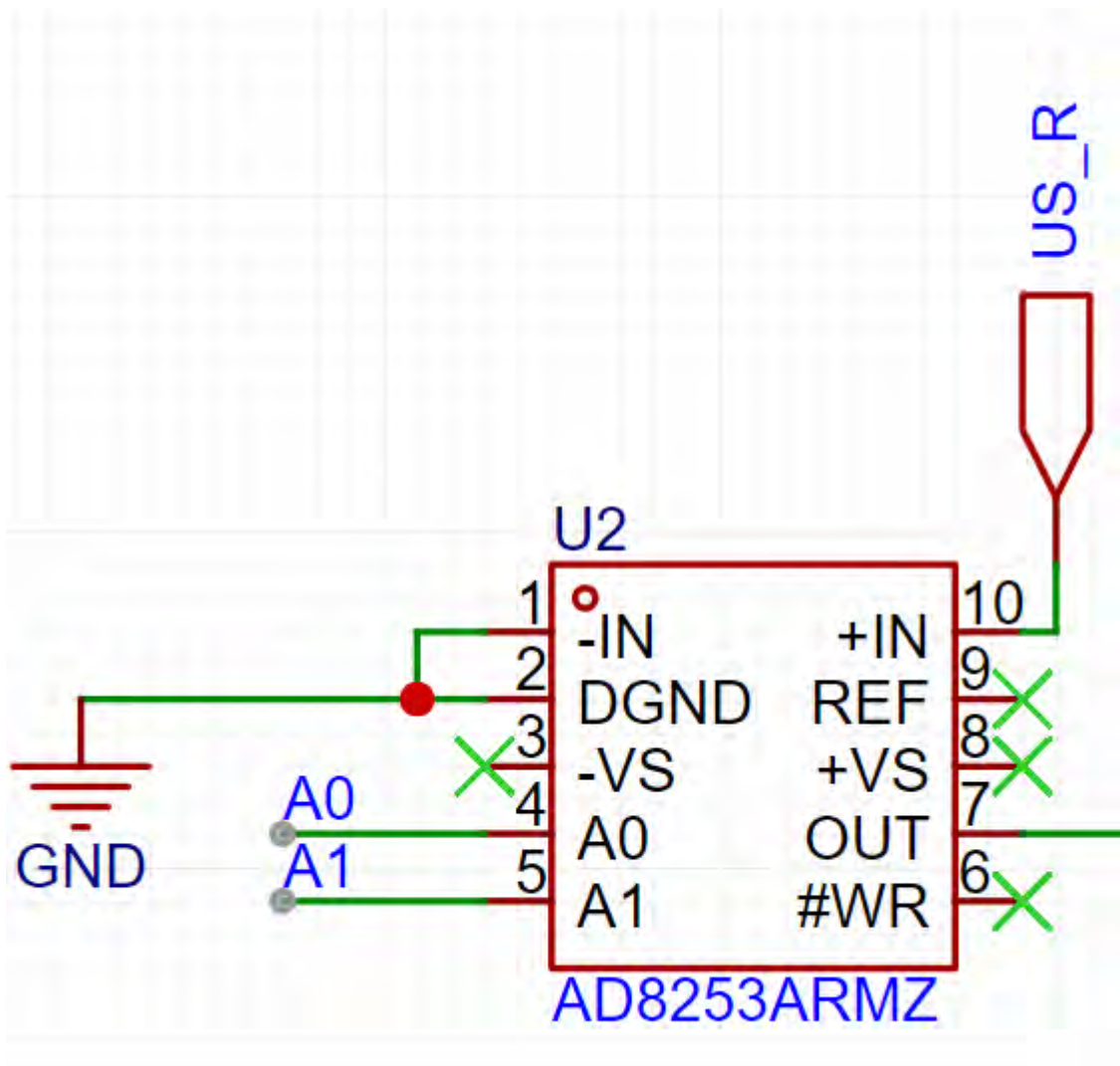


Рис. 4.9 Операційний підсилювач AD8253ARMZ.

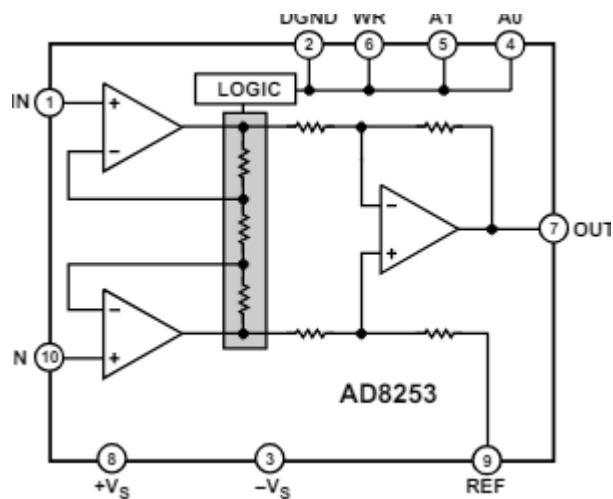


Рис. 4.10 Детальний опис функціонування операційного підсилювача AD8253ARMZ. [14]

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

- ADA4700-1ARDZ-R7 (U1): Підсилювач потужності для роботи з високими напругами і струмами.

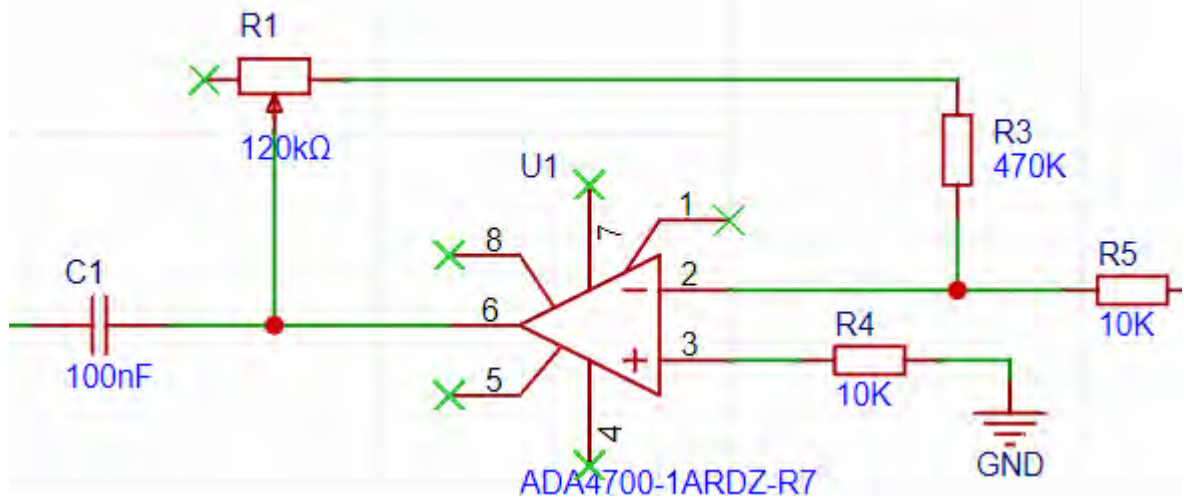


Рис. 4.11 Підсилювач потужності ADA4700-1ARDZ-R7.

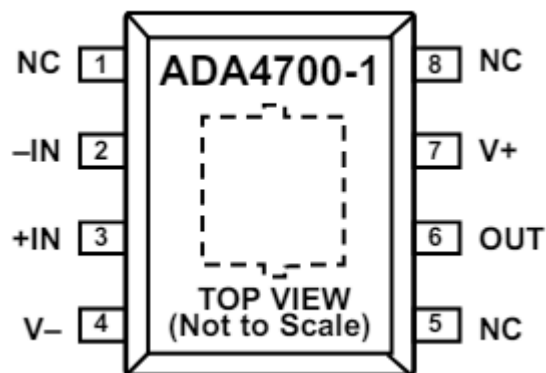


Рис. 4.12 Конфігурація підсилювача потужності ADA4700-1ARDZ-R7. [9]

- AD734BQ (U7, U8): Аналогові компаратори для порівняння сигналів і генерації відповідних логічних рівнів.

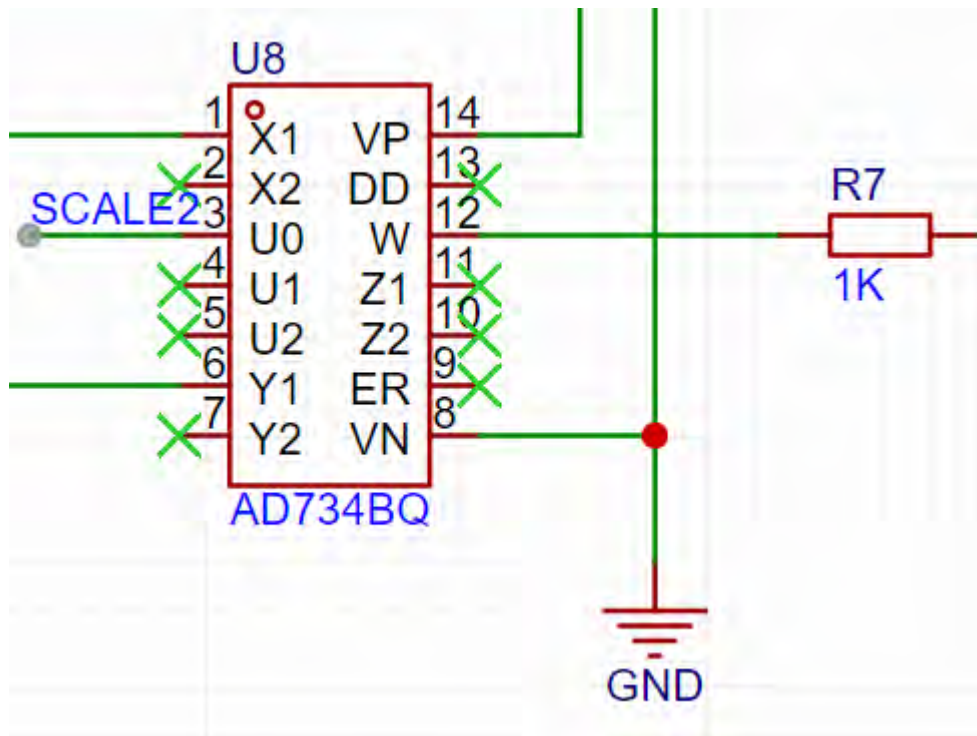


Рис. 4.13 Аналоговий компаратор D734BQ.

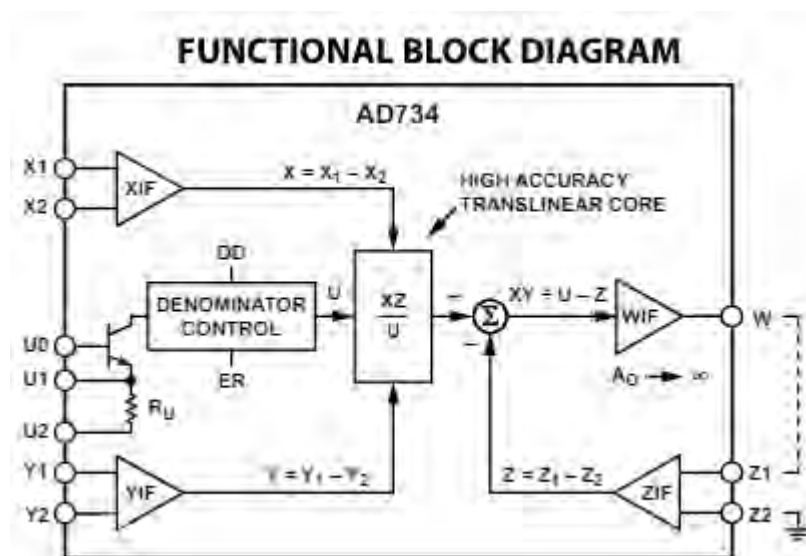


Рис. 4.14 Детальний опис функціонування аналогового компаратора D734BQ.

[12]

6. ПК-дисплей HS1602A (LCD1)

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

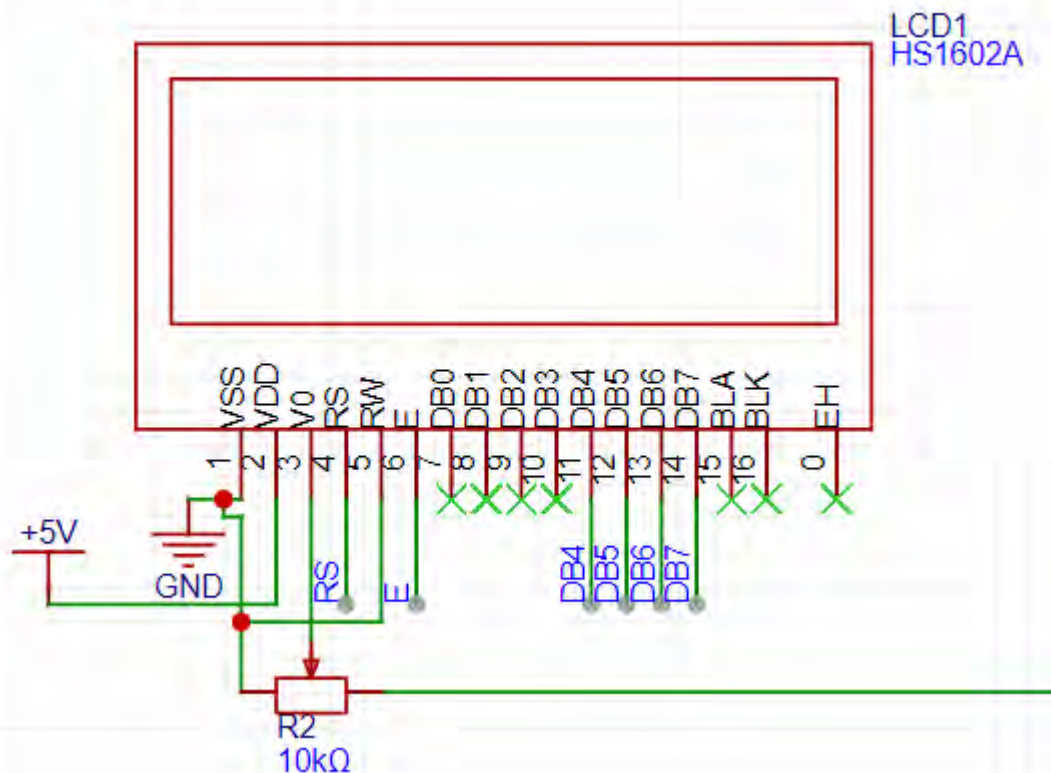


Рис. 4.15 РК-дисплей HS1602A.

РК-дисплей використовується для виводу інформації, керування здійснюється мікроконтролером через порти введення/виведення.

- Підключення до мікроконтролера: Виводи RS, E, DB4-DB7 підключені до портів мікроконтролера для передачі даних і команд.
- Живлення: Виводи VCC і GND забезпечують живлення дисплея.

7. Клавіатура

Клавіатура підключена до мікроконтролера і використовується для введення даних.

- Підключення до мікроконтролера: Клавіатура підключена до відповідних портів введення/виведення мікроконтролера.

ВИСНОВОК ДО 3-ГО РОЗДІЛУ

Розглянута принципова схема детально описує взаємодію та функціональність основних компонентів електронного пристрою, включаючи мікроконтролер STM32WB55CCU7, операційні підсилювачі LMH6702MF/NOPB, програмовані генератори сигналів AD9833BRMZ, перемикач SN74LVC1G3157DTBR та інші активні елементи. Схема демонструє, як мікроконтролер керує периферійними пристроями, обробляє вхідні дані та виводить результати на РК-дисплей.

Особлива увага приділена налаштуванню і фільтрації сигналів, що проходять через різні підсилювачі та компаратори.

Взаємодія між компонентами, описана в схемі, забезпечує ефективну роботу системи, починаючи від введення даних через клавіатуру і закінчуючи обробкою і виведенням результатів на дисплей. Генерація і обробка сигналів відбувається синхронізовано, завдяки чому досягається точність і надійність вимірювань. Впровадження цієї схеми дозволяє реалізувати комплексний контроль і керування системою, забезпечуючи високу функціональність і ефективність роботи пристрою.

Узагальнюючи, детальний аналіз принципової схеми дозволяє глибше зрозуміти архітектуру системи, визначити можливі шляхи для її оптимізації та вдосконалення, що є ключовим аспектом для успішної реалізації електронного проекту.

					ПК 01.180000.000ПЗ	Арк.
						54
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВИСНОВКИ

У результаті виконаної роботи було досягнуто всіх поставлених завдань дипломного проекту, спрямованих на розробку та аналіз контактної-імпедансного твердоміра. Проведене дослідження дозволило глибоко зрозуміти сучасні методи та технології вимірювання твердості матеріалів, що є надзвичайно важливим для різних галузей промисловості.

1. Аналітичний огляд методів контактної-імпедансної твердометрії:

- Детально розглянуто різні методи вимірювання твердості за допомогою акустичного імпедансу, такі як ультразвукове відлуння, ультразвукова хвильова швидкість, ультразвукова імпедансна спектроскопія, метод резонансної частоти та метод інтерференційної фільтрації.

- Описано принцип дії кожного методу, його переваги та недоліки, а також області застосування. Це дозволило вибрати найбільш підходящий метод для конкретних задач.

2. Огляд існуючих рішень контактної-імпедансних твердомірів:

- Проведено аналіз сучасних моделей твердомірів, таких як Proceq Equotip 550 UCI, Krautkramer MIC 10, Bowers Metrology Ultrasonic Hardness Tester HCU-1000 та Sonodur 3.

- Оцінено їхні технічні характеристики, функціональні можливості, переваги та недоліки. Було виявлено, що кожна з моделей має унікальні особливості, що робить їх придатними для різних умов і задач. Це допомогло визначити основні вимоги до розробки власного твердоміра.

3. Розрахунок фільтру низьких частот (ФНЧ):

- Виконано розрахунок фільтру низьких частот для усунення високочастотних перешкод, що можуть виникати під час вимірювання твердості матеріалу.

					ПК 01.180000.000ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		55

- Розрахунок параметрів фільтра (частота зрізу, добротність, порядок фільтра) був підтверджений моделюванням, що забезпечило високу ефективність фільтра для застосування в контактній-імпедансній твердомірі.

4. Вибір елементів принципової схеми та побудова принципової схеми:

- Вибрано та обґрунтовано використання різних електронних компонентів, таких як мікроконтролери, датчики, підсилювачі та аналого-цифрові перетворювачі.

- Складено принципову схему твердоміра, що включає всі необхідні компоненти та забезпечує їх правильне підключення. Це гарантує стабільну та точну роботу приладу.

- Проведено аналіз внутрішніх схем основних елементів, що використовуються в твердомірі, з метою забезпечення високої якості вимірювань та надійності роботи приладу.

У підсумку, проект контактної-імпедансної твердоміри готовий до реалізації за винятком програмного коду. Прилад буде демонструвати високу точність і надійність у вимірюванні твердості різних матеріалів. Отримані результати мають високу практичну цінність і можуть бути використані в різних галузях промисловості для забезпечення якості продукції та контролю технологічних процесів. Це дослідження зробило значний внесок у розвиток методів контактної-імпедансної твердометрії та відкрило нові можливості для подальших наукових досліджень і вдосконалення технологій вимірювання твердості.

					ПК 01.180000.000ПЗ	Арк.
						56
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Галаган Р.М. Теоретичні основи ультразвукового неруйнівного контролю: підручник / Р.М. Галаган. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. с. 93-98.
2. «Основи ультразвукового неруйнівного контролю: Підручник» авторів В.К. Цапенка та Ю.В. Куца
3. Г.А. Богдан, М.В. Филиппова, Лабораторный стенд для высокоточных измерений скорости распространения ультразвуковых волн, Вчені записки таврійського національного університету імені В.І. Вернадського Серія: Технічні наук, Т. 30 (69), № 2, pp 1-5, 2019.
4. Kleesattel C, Gladwell G, The contact-impedance meter-1. 1986.
[https://patents.google.com/scholar/552764267948132678?q=\(ultrasonic+hardness+gauge\)&oq=ultrasonic+hardness+gauge&page=2](https://patents.google.com/scholar/552764267948132678?q=(ultrasonic+hardness+gauge)&oq=ultrasonic+hardness+gauge&page=2)
5. Aoyagi R, Yoshida T, Frequency equations of an ultrasonic vibrator for the elastic sensor using a contact impedance method. 2004.
[https://patents.google.com/patent/JP4287200B2/en?q=\(ultrasonic+hardness+gauge\)&oq=ultrasonic+hardness+gauge&page=2](https://patents.google.com/patent/JP4287200B2/en?q=(ultrasonic+hardness+gauge)&oq=ultrasonic+hardness+gauge&page=2)
6. <https://www.screeningeagle.com/ru/products/equotip-550-uci>
7. https://www.instrumart.com/assets/MIC_10-manual.pdf
8. http://www.devicesgroup.com.ua/index.php?option=com_content&task=view&id=351&Itemid=65
9. https://atta.szlcsc.com/upload/public/pdf/source/20201118/C578925_C62A38ED7A5C813266BD0C66C350E50B.pdf
10. <https://atta.szlcsc.com/upload/public/pdf/source/20210601/5432F19F1D5A2A3CB39F31675BD897C7.pdf>
11. <https://www.ti.com/cn/lit/ds/symlink/sn74lvc1g3157.pdf?ts=1717513119091>
12. https://atta.szlcsc.com/upload/public/pdf/source/20200415/C514236_278B77BA01C5A0962BAD4D4122CEDDDA.pdf

					ПК 01.180000.000ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		57

13. https://atta.szlcsc.com/upload/public/pdf/source/20200901/C653879_C7354661FE492369EE1E91E5EF14B86B.pdf
14. https://atta.szlcsc.com/upload/public/pdf/source/20200819/C652593_01E3192A460419522581FB9BA6393FA8.pdf
15. <https://www.ti.com/cn/lit/ds/symlink/lmh6702.pdf?ts=1717513526882>
16. Nondestructive Testing Handbook, Third Edition: Volume 7, Ultrasonic Testing.
17. Nondestructive Testing Handbook, Third Edition: Volume 6, Electromagnetic Testing.
18. "Ultrasonic Testing of Materials" by Josef Krautkrämer and Herbert Krautkrämer.
19. Olympus NDT (2007) Introduction to Phased Array Ultrasonic Technology Applications: R/D Tech Guideline. – USA: Waltham, Olympus NDT.
20. J. C. Drury (2004) Ultrasonic Flaw Detection for Technicians, 3rd ed. – Wales: Llandarcy Neath, Imex Group Limited.
21. Automated Precision Amplitudes and Phases Measurement of Polyharmonic Eddy Current Signals of Non-destructive Testing. Bazhenov V. G., Kalenychenko Yu. O., Ratsebarskiy S. S., Gloinik K. A.
22. Статистичні методи визначення залежностей між випадковими величинами: навчальний посібник / Ю. В. Куц, Ю. Ю. Лисенко; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. – 115 с.
23. Куц Ю.В. Спеціальні розділи математики. Курс лекцій: навчальний посібник / Ю. В. Куц, Ю. Ю. Лисенко; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 180 с.
24. Баженов В.Г. Електроніка. Лабораторний практикум: навчальний посібник / В. Г. Баженов, Є. Ф. Суслов, Ю. Ю. Лисенко, А.С. Момот; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 70 с.

					ПК 01.180000.000ПЗ	Арк.
						58
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		