

**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

«__» _____ 20__ 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: «Мобільний ультразвуковий товщиномір»

Виконав:

студент IV курсу, групи ПК-01

Власюк Данило Ігорович _____

Керівник:

Кандидат технічних наук, доцент

Петрик В. Ф. _____

Рецензент:

Кандидат технічних наук, доцент

Самарцев Ю.М. _____

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

Студент (-ка) _____

Київ – 2024 року

ВІДОМІСТЬ ДИПЛОМНОГО ПРОЄКТУ

№ з/п	Формат	Позначення	Найменування	Кількість листів	Примітка
1	A4		Завдання на дипломний проєкт	2	
2	A4	<i>ДП 1760 00.000.00 ПЗ</i>	Пояснювальна записка	66	
3	A1	<i>ДП 1760 00.000.00 E2</i>	Схема електрична функціональна	1	
4	A1	<i>ДП 1760 00.000.00 E3</i>	Схема електрична принципова	1	
5	A1	<i>ДП 1760 00.000.00 E1</i>	Схема електрична структурна	1	

				<i>ДП 1760 00.000.00 ПЗ</i>		
	ПІБ	Підп.	Дата	Мобільний ультразвуковий товщиномір	Лист	Листів
Розробн.	Власюк Д.І.				1	1
Керівн.	Петрик В.Ф.				КПІ ім. Ігоря Сікорського Каф. АСНК Гр. ПК-01	
Консульт.						
Н/контр.						
Зав.каф.	Киричук Ю. В.					

Пояснювальна записка
до дипломного проєкту
на тему: «Мобільний ультразвуковий товщиномір»

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

Власюку Данилу Ігоровичу

1. Тема проєкту «Мобільний ультразвуковий товщинмір», керівник проєкту Петрик В.Ф. асистент, затверджені наказом по університету від « 28 » __ 05 ____ 2024 р. № 2121-с

2. Термін подання студентом проєкту 04.06.2024 _____

3. Вихідні дані до проєкту : Розробити портативний ультразвуковий товщиномір на базі смартфона _____

4. Зміст пояснювальної записки: Вступ, аналітичний огляд, розробка та розрахунок вузлів функціональної схеми, підбір елементів системи, _____

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслеників, плакатів, презентацій тощо): схема функціональна, схема електрична принципова, структурна схема, 2 плакати А1

6. Дата видачі завдання 14.04

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проєкту	Термін виконання етапів проєкту	Примітка
1	Формулювання завдання проєкту	20.04.2024	виконано
2	Проведення аналітичного огляду	30.04.2024	виконано
3	Систематизація теоретичного матеріалу	05.05.2024	виконано
4	Розробка структурної схеми	15.05.2024	виконано
5	Підбір компонентів	20.05.2024	виконано
6	Розробка креслиників	25.05.2024	виконано
7	Формування загальних висновків	30.05.2024	виконано
8	Остаточне оформлення дипломного проєкту	02.06.2024	виконано

Студент

Власюк Данило

Керівник

Петрик В.Ф.

АНОТАЦІЯ

Цей дипломний проєкт спрямований на створення ультразвукової системи для вимірювання товщини, яка інтегрує функціональні можливості смартфонів. Це дозволяє розширити функції системи та знизити витрати на апаратну частину.

У першому розділі детально аналізуються різні методи ультразвукового вимірювання товщини матеріалів, їх особливості та порівняння.

Другий розділ присвячений огляду технологій бездротової передачі даних, з акцентом на їхні властивості та порівняльний аналіз.

У третьому розділі викладено процес вибору ключових компонентів для мобільного ультразвукового товщиноміру, заснованого на порівнянні з існуючими аналогами. Описано розробку функціональної та принципової схеми пристрою, створення базової електричної схеми та проведення розрахунків основних вузлів електричної цепі.

В останньому розділі представлено розрахунки надійності контрольних процедур, включаючи похибку, спричинену квантуванням, помилку оперативних підсилювачів та загальну оцінку ефективності контролю.

Обсяг роботи складається з 66 сторінок (без додатків), 4 розділів, загальних висновків, списку використаної літератури, містить 1 таблицю, 20 рисунків та 34 літературних джерела.

Ключові слова: ультразвукові товщиноміри, бездротові технології, автоматизація вимірювань, промислові технології.

ABSTRACT

This diploma project is aimed at creating an ultrasonic thickness measurement system that integrates the functionality of smartphones. This allows to expand the system's functions and reduce hardware costs.

The first chapter analyzes in detail the different methods of ultrasonic thickness measurement of materials, their features, and comparison.

The second section is devoted to an overview of wireless data transmission technologies, with an emphasis on their properties and comparative analysis.

The third chapter outlines the process of selecting key components for a mobile ultrasonic thickness gauge based on a comparison with existing analogs. The development of the functional and schematic diagrams of the device, the creation of a basic electrical circuit, and the calculation of the main components of the electrical circuit are described.

The last section presents calculations of the reliability of control procedures, including the error caused by quantization, the error of operational amplifiers, and an overall assessment of the control efficiency.

The work consists of 66 pages (without appendices), 4 chapters, general conclusions, references, contains 1 table, 20 figures and 34 references.

Keywords: ultrasonic thickness gauges, wireless technologies, measurement automation, industrial technologies.

ЗМІСТ

Перелік Скорочень	10
ВСТУП.....	11
РОЗДІЛ 1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД.....	13
1.1 Поняття ультразвуку та його застосування в товщинометрії.....	13
1.2 Аналіз товщиномірів.....	15
1.2.1 Механічні товщиноміри	15
1.2.2 Електромагнітні товщиноміри	16
1.2.3 Вихрострумові товщиноміри	18
1.2.4 Ультразвукові товщиноміри	20
1.2.5 Магнітні товщноміри	21
1.3 Методи ультразвукової товщинометрії	22
1.3.1 Ехо-метод з еталонуванням.....	23
1.3.2 Резонансний метод	25
1.3.3 Ехо-метод без еталонування	27
1.4 Висновок	29
РОЗДІЛ 2. БЕЗДРОТОВИЙ ЗВ'ЯЗОК МІЖ ПРИСТРОЯМИ.....	31
2.1 Загальна інформація.....	31
2.1.1 Wi-Fi	32
2.1.2 Bluetooth	34
2.1.3 GSM	35
2.2 Висновок	37
РОЗДІЛ 3. РОЗРАХУНОК МОБІЛЬНОГО УЛЬТРАЗВУКОВОГО ТОВЩИНОМІРУ	39
3.1 Структурна схема	39
3.2 Вибір п'єзоелектричного перетворювача.....	40
3.3 Розрахунок п'єзоелектричного перетворювача	44
3.4 Розрахунок товщини просвітлюючого шару.....	46
3.5 Вибір мікроконтролера.....	47
3.6 Вибір генератора ударного збудження	49
3.7 Вибір підсилювача	52
3.8 Вибір АЦП	55
3.9 Вибір Bluetooth модуля.....	57

					ПК01.241760.000 ПЗ				
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					
Розроб.	Власюк Д.І.				Мобільний ультразвуковий товщиномір		Лім.	Арк.	Акрушіє
Перевір.	Петрик В.Ф.						8	66	
Н. Контр.					ПБФ, ПК-01				
Затверд.									

РОЗДІЛ 4. РОЗРАХУНОК МОБІЛЬНОГО УЛЬТРАЗВУКОВОГО	
ТОВЩИНОМІРУ	60
4.1 Похибка зумовлена квантуванням АЦП.....	60
4.2 Похибка операційного підсилювача	60
4.3 Оцінка вірогідності контролю	61
Висновок	62
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	63

					<i>ПК01.241760.000 ПЗ</i>			
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>				
<i>Розроб.</i>		<i>Власюк Д.І.</i>			<i>Мобільний ультразвуковий товщиномір</i>	<i>Літ.</i>	<i>Арк.</i>	<i>Акрушіє</i>
<i>Перевір.</i>		<i>Петрик В.Ф.</i>					8	66
<i>Н. Контр.</i>					<i>ПБФ, ПК-01</i>			
<i>Затверд.</i>								

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

ОК – об'єкт контролю

ЕРС – електрорушійна сила

ВСП – вихрострумний перетворювач

УЗНК – ультразвуковий неруйнівний контроль

УЗ – ультразвук

ПЕП – п'єзо-електричний перетворювач

МК – мікроконтролер

АЦП – аналого-цифровий перетворювач

НК – неруйнівний контроль

					<i>ПК01.041760.000 ПЗ</i>	Арк.
						10
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

ВСТУП

На сьогоднішній день промисловий сектор продовжує розвиватися швидкими темпами, стикаючись із новими викликами та завданнями. Вирішення цих проблем вимагає застосування передових технологій. Із кожним днем зростає потреба у використанні високоефективних, за економічними та технологічними параметрами, пристроїв. Відтак, все більше людей переходять на сучасні технології, залишаючи застаріле обладнання [1, 2].

Прилади, створені за допомогою новітніх технологій, пропонують значні переваги порівняно зі старими моделями. Серед ключових переваг можна виділити легкість у використанні, зручність у перегляді інформації, простоту конструкції, компактні розміри та малу вагу, зручність обробки даних, можливості для автоматизації, а також стійкість до механічних пошкоджень.

Одним із найбільш розповсюджених методів вимірювання товщини об'єкта є ультразвуковий. Цей метод широко застосовується через свою простоту та швидкість. Також у такий спосіб досягається висока точність вимірювання за відносно малу вартість [3].

Наразі актуальними є завдання автоматизації та вдосконалення приладів і систем для товщинометрії. Одна з основних проблем полягає у необхідності інспектування об'єктів у місцях з обмеженим доступом. Вирішення цієї проблеми дозволить зменшити час, потрібний для квиміру важкодоступних об'єктів, скоротити кількість персоналу, необхідного для проведення перевірок, підвищити якість самого контролю та якість висновків.

У цій роботі розробляється ультразвуковий товщиномір, який не потребує з'єднувальних кабелів для передачі даних. Прилад з малими габаритними розмірами та вагою значно спростить роботу операторів. Отримані дані будуть передаватися бездротовим шляхом на смартфон або комп'ютер, що дозволить використовувати сучасніші методи обробки інформації. Оброблені дані можна буде з легкістю переглядати в зручному форматі, забезпечуючи більш точні та якісні аналітичні висновки. Бездротове передавання даних на комп'ютер або

					<i>ПК01.041760.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		11

смартфон дозволяє використовувати передові методи обробки інформації, сприяючи отриманню більш точних та якісних результатів. Дані, представлені у форматі, зручному для аналізу оператором, підвищують ефективність діагностики та точність виявлення дефектів. [4].

					<i>ПК01.041760.000 ПЗ</i>	Арк.
						12
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

РОЗДІЛ 1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД

1.1 Поняття ультразвуку та його застосування в товщинометрії

Звукова енергія виробляється у великому діапазоні частот, де видимі для вуха звуки відтворюються на нижніх частотах з максимальною межею приблизно двадцять тисяч циклів на секунду або 20 кілогерц (кГц). Із зростанням частоти звуку зростає і висота звучання, яке ми чуємо. Ультразвук представляє звукову енергію, що відбувається на частотах вище тих, що може сприймати людське вухо. Більшість застосувань ультразвуку відбувається в діапазоні від 500 кілогерц до 20 мегагерц (МГц, або мільйони циклів на секунду), хоча деяке спеціалізоване обладнання може знижувати частоту до 50 кГц або підвищувати до 100 МГц. Незалежно від частоти, звукова енергія складається з ряду організованих механічних коливань, які поширюються через середовища, такі як повітря чи сталь, згідно з основними принципами хвильової фізики.

Фізичні властивості ультразвуку:

Ультразвукові хвилі, подібно до інших звукових хвиль, можуть відбиватися, заломлюватися та розсіюватися. Вони можуть подорожувати через різні середовища, включаючи гази, рідини та тверді тіла, але їхня швидкість і здатність до проникнення варіюються залежно від щільності та еластичності середовища.

Переваги ультразвуку:

Безпечність: Ультразвук є нерадіаційним методом, що робить його безпечним для діагностики та частого використання.

Вартість: Вартість ультразвукового обладнання та процедур зазвичай нижча порівняно з іншими візуалізаційними технологіями, такими як МРТ або КТ.

Гнучкість: Ультразвук може використовуватися у багатьох областях і адаптуватися для різних задач.

					<i>ПК01.041760.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		13

Ультразвук є важливим інструментом у багатьох галузях завдяки його універсальності, безпечності та ефективності. Ці характеристики роблять ультразвук незамінним в сучасному технологічному світі.

Ультразвукові товщиноміри точно вимірюють товщину, розраховуючи час, необхідний звуковому імпульсу, створеному невеликим датчиком званим ультразвуковим перетворювачем, для проходження через об'єкт та відбиття від внутрішньої поверхні чи дальньої стіни. Вимірювання, як звукові хвилі відбиваються від границь між однорідними матеріалами, проводиться з одного боку в режимі "луна / імпульс".

Комерційні ультразвукові вимірювачі товщини зазвичай класифікуються на корозійні та прецизійні типи. Корозійні вимірювачі призначені для вимірювання товщини стінок, які втрачають свою масу через внутрішню корозію в таких об'єктах як металеві труби, резервуари, конструктивні елементи і судна, де зовнішні прояви корозії можуть бути непомітні. Вони застосовують спеціалізовані методи обробки сигналів та оптимізовані для точного вимірювання мінімальної товщини на шорстких, кородованих поверхнях з використанням двоелементних перетворювачів. Прецизійні вимірювачі, які застосовують одноелементні перетворювачі, є більш підходящими для некородуючих поверхонь, включно з гладкими металами. Завдяки широкому асортименту доступних перетворювачів, прецизійні вимірювачі є універсальними і можуть проводити вимірювання з вищою точністю порівняно з корозійними вимірювачами.

Застосування ультразвукової товщинометрії:

Перевірка трубопроводів та резервуарів: Ультразвукова товщинометрія використовується для визначення стану труб і резервуарів, особливо для виявлення зон з корозією або ерозією, які можуть призвести до витоків або інших небезпечних ситуацій.

Авіація та космічна промисловість: В авіаційній та космічній галузі, де безпека є критичною, товщинометрія використовується для перевірки інтегральності шкiрки літаків та інших критичних компонентів.

					<i>ПК01.041760.000 ПЗ</i>	Арк.
						14
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Автомобільна промисловість: Виробництво автомобілів включає використання товщинометрії для контролю якості компонентів, таких як панелі кузова та інші структурні елементи.

Контроль корозії та ерозії: Регулярне моніторинг товщини дозволяє промисловим підприємствам планувати технічне обслуговування і запобігати незапланованим зупинкам виробництва.

Контроль якості виробництва: У виробництві, де товщина матеріалів є критичним параметром, ультразвукові товщиноміри забезпечують швидку та точну перевірку.

1.2 Аналіз товщиномірів

Товщиноміри виділяються на кілька типів залежно від принципу їх роботи, сфери застосування та методу проведення вимірювань. Класифікація включає:

- Механічні;
- Електромагнітні;
- Вихрострумові;
- Ультразвукові;
- Магнітні.

1.2.1 Механічні товщиноміри

Товщиномір мокрого шару є інструментом, призначеним для вимірювання товщини неотверділих лакофарбових покриттів з нанесенням оцінки товщини сухої плівки після їх висихання. Ефективний контроль товщини нанесеного покриття допоможе уникнути численних проблем, пов'язаних з якістю покриття, його швидкістю висихання, зовнішнім виглядом, а також дозволяє запобігти перевитратам фарби.

Товщиноміри мокрого шару виготовляються з різних матеріалів, у тому числі пластмаси, алюмінію та нержавіючої сталі, і вони відповідають стандартам

					<i>ПК01.041760.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		15

сталі, таким як ISO 2808-2007, ASTM D 4414 (гребінка) та ГОСТ Р 51694-2000. Ці прилади вимірюють товщину за допомогою гребінки, яка вдавлюється в мокре покриття перпендикулярно до поверхні та притискається до основи. Після кількох секунд гребінку витягують і оцінюють товщину мокрого шару, яка створюється як інтервал між максимальним значенням «мокрого» зубця, що контактує з покриттям, та мінімальним значенням «сухого» зубця, що не контактує з покриттям.

Цей метод є дуже ефективним для контролю якості покриття на різних стадіях його нанесення та сушіння, забезпечуючи точність та надійність вимірювань.

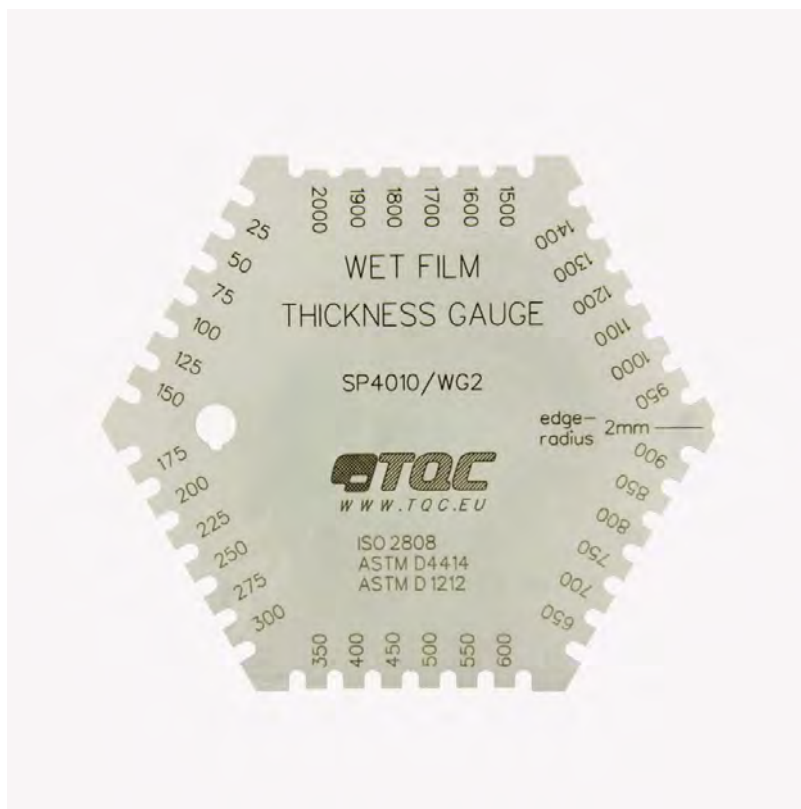


Рисунок 1.1 – Механічний товщиномір «Гребінка»

1.2.2 Електромагнітні товщиноміри

Прилади, які ви описали, потрібні комбіновані методи магнітної індукції та ефекту Холла для вимірювання товщини покриттів, а також для оцінки інших

					<i>ПК01.041760.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		16

параметрів матеріалів. Ці методи дозволяють виміряти щільність магнітного поля, яке змінюється в залежності від товщини покриття.

Створення магнітного поля відбувається за допомогою м'якого феромагнітного стрижня з котушкою, що генерує магнітне поле. **Другий стрижень з котушкою** використовується для виявлення змін у магнітному потоці, які вказують на товщину покриття. Це дозволяє точно оцінити товщину без фізичного контакту з об'єктом, з допустимою похибкою вимірювань приблизно $\pm 3\%$.

Ці прилади здатні вимірювати та контролювати різні типи результатів та матеріалів:

- Неферомагнітні діелектричні та електропровідні покриття (гальванічні, лакофарбові, порошкові, пластикові та інші) на металевих феромагнітних основах.

- Діелектричні покриття (лакофарбові, порошкові, анодно-оксидні та інші) на електропровідних неферомагнітних основах.

- Бітумні та інші спеціальні покриття товщиною до 120 мм на металевих виробках.

- Покриття з кольорових металів на виробках з кольорових металів.

- Захисні покриття в середині труб.

Контрольовані параметри включають:

- Шорсткість поверхні після піскострумінної обробки;

- Товщину бетону до арматури та контроль її розташування;

- Електропровідність неферомагнітних металів;

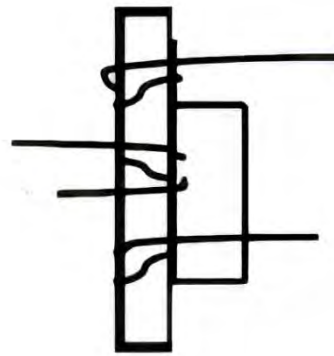
- Товщину металевих неферомагнітних листів.

Завдяки цим можливостям такі прилади є інструментами контролю якості під час виробництва та обслуговування в різних промислових сферах, забезпечуючи високу точність та надійність вимірювань.

					<i>ПК01.041760.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		17



а)



б)



Рисунок 1.2 – а)Електромагнітний товщиномір, б)Наконечник електромагнітного товщиноміру.

1.2.3 Вихрострумові товщиноміри

Вихрострумові товщиноміри використовують для вимірювання товщини непровідних покриттів на металевих основах без їх руйнування. Вони генерують змінне магнітне поле за допомогою струму, що проходить через котушку з тонкої середньої проволочки, з частотами від десятків кГц до одиниці МГц. При наближенні зонда до поверхні це поле індукує вихрові струми (струми Фуко) у матеріалі. Вихрові струми, у своєму випадку, генерують власні електромагнітні поля, які впливають на перше магнітне поле зонда та їх зміни можуть бути виміряні. [5].

Ці товщиноміри застосовуються для вимірювання товщини неметалічних покриттів, таких як фарби та лаки, на основі кольорових металів. Однак, на основах з чорних металів вони часто не застосовуються через велику похибку вимірювання, викликаного ненормованим опором цих матеріалів. Спільне застосування з магнітними товщиномірами дозволяє точніше розмістити товщину комбінованих покриттів, як-от оцинкована сталь з фарбою, де

									Арк.
									18
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	<i>ПК01.041760.000 ПЗ</i>				

магнітний товщиномір вимірює загальну товщину покриття, а вихрострумний — лише товщину верхнього шару фарби.

Обмеження вихрострумних товщиномірів включає мінімально можливий радіус основи, її шорсткість і товщину, подібно до магнітних товщиномірів, а також вплив на шкірний ефект, що впливає на глибину проникнення струмів Фуко. Висока робоча частота високострумного товщиноміру зменшує глибину проникнення, що може бути корисним для вимірювання тонких покриттів, але може ускладнити вимірювання на товстих або вкрай коротких матеріалах. Тому для різних завдань вибір частоти високострумного товщиноміру має велике значення, що дозволяє оптимізувати точність вимірювання в діапазоні від 1 до 1000 мкм.

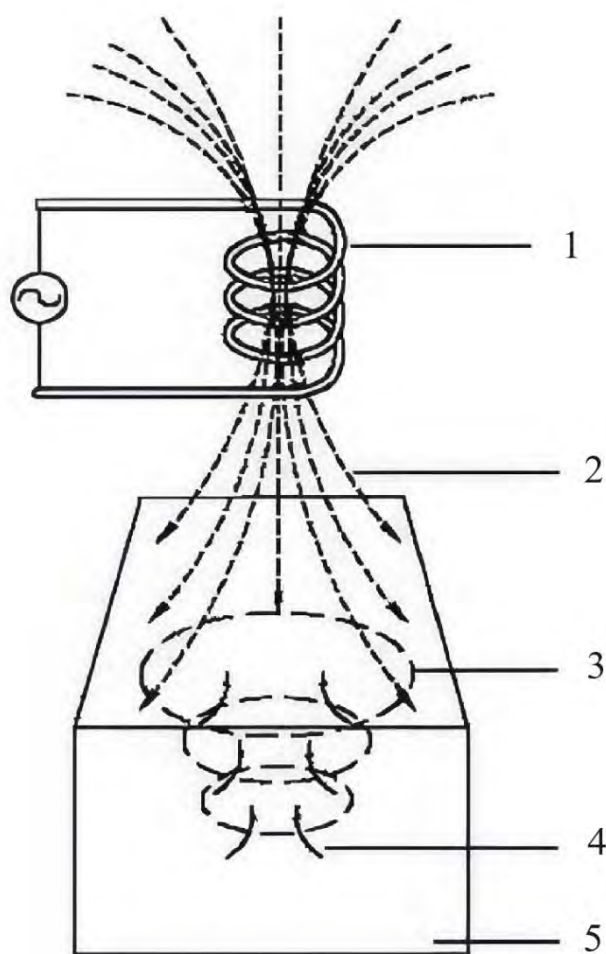


Рисунок 1.3 – Товщиномір вихрострумний 1- Котушка, 2- Первинне поле, 3- Вихровий струм, 4- Вторинне поле, 5- Металевий об'єкт контролю.

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ПК01.041760.000 ПЗ

Арк.

19

1.2.4 Ультразвукові товщиноміри

Ультразвуковий товщиномір – це ефективний інструмент для вимірювання товщини однорідних матеріалів, таких як метал, кераміка, пластмаса, скло та композити. Основною особливістю цього приладу є наявність ультразвукового датчика в зонді, який працює за принципом передачі ультразвукового імпульсу через матеріал. Імпульс відбивається від задньої сторони поверхні та повертається назад до датчика, де перетворюється на високочастотний сигнал. Цей ехо-сигнал аналізується для визначення товщини матеріалу з точністю до $\pm 3\%$.

Ультразвуковий товщиномір особливо корисний у ситуаціях, де є доступ лише до одного боку матеріалу, наприклад, при вимірюванні товщини трубопроводів або в місцях з обмеженим доступом. Цей метод вимірювання дозволяє застосувати товщину матеріалу без його розрізання або вирізання, забезпечуючи неруйнівний контроль якості.

Діапазон вимірювання товщини залежить від вибраного перетворювача та типу матеріалу і може варіюватися від 0,08 мм до 653 мм. Роздільна здатність вимірювань може досягати 0,001 мм, що забезпечує високу точність вимірювань. Вся інформація про вимірювання перетворюється в цифровий сигнал і відображається на дисплеї в реальному часі.

Ультразвуковий товщиномір має значні переваги з механічними та оптичними методами вимірювання, так як економічна ефективність, зручність використання та можливість неруйнівного контролю. Це робить ідеальним інструментом для його широкого спектру промислових програм, де важлива надійність та точність вимірювань, а також економічність на матеріалах та зусиллях при проведенні вимірювань.

					<i>ПК01.041760.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		20

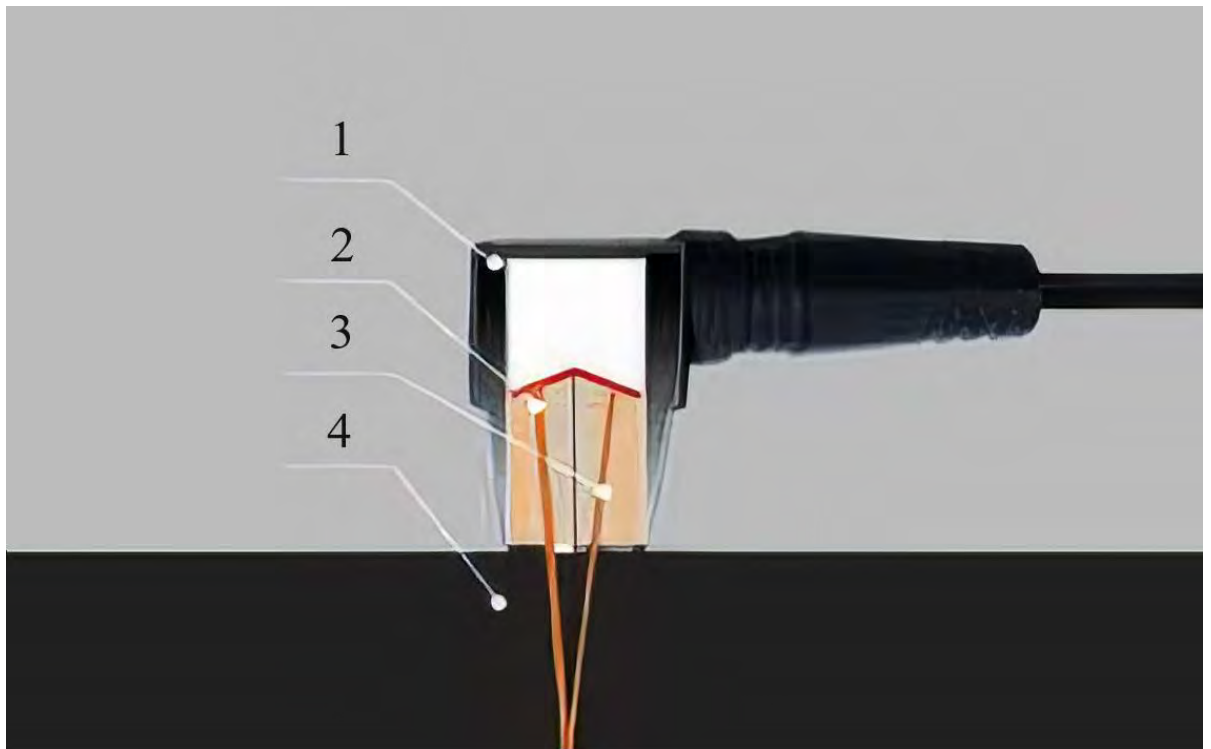


Рисунок 1.4 – Товщиномір ультразвуковий, 1- Зонд, 2-Випромінюваний імпульс, 3- Відбитий імпульс, 4- ОК

1.2.5 Магнітні товщоміри

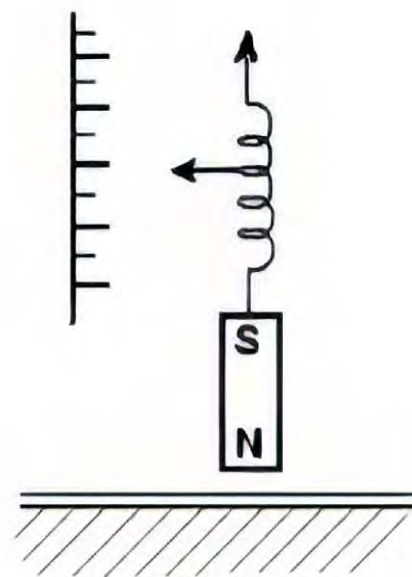
Магнітні товщоміри функціонують на основі використання властивостей постійних магнітів для вимірювання товщини немагнітних покриттів, нанесених на магнітні основи. Робота цих приладів заснована на оцінці сили взаємодії між магнітом товщоміру та магнітною основою, на яку нанесено покриття. Зміна товщини покриття відповідає на силу взаємодії, і ці зміни реєструються приладом, що дозволяє оцінити товщину покриття за допомогою спеціально відкаліброваної шкали.

Якщо точність вимірювань значною мірою залежить від магнітних властивостей основи матеріалу, необхідно провести калібрування приладу за допомогою робочих зразків, виготовлених із зі сталі, що й контрольовані деталі. Це калібрування необхідно виконати перед кожним використанням приладу для забезпечення достовірності результатів. [6].

Магнітні товщиноміри відрізняються своєю простотою у використанні, низькою вартістю та простою конструкцією. Вони ідеально підходять для оперативних перевірок в умовах, де потрібно швидке оцінювання покриття товщини без необхідності використання більш складних та дорогих ультразвукових чи електромагнітних товщиномірів. Однак важливо виконати, що точність магнітних товщиномірів може бути обмежена в умовах, де магнітні властивості матеріалу можуть суттєво варіювати.



а)



б)

Рисункок 1.5 – а)Товщиномір магнітній TG-3230, б) Принцип роботи магнітного товщиноміру.

1.3 Методи ультразвукової товщинометрії

Ультразвукові методи визначаються як техніки контролю, які використовують зміни у пружних хвилях і коливаннях у об'єкті, який перевіряється. Ці методи поділяються на дві основні категорії:

-Активні методи: ці методи базуються на випромінюванні акустичних хвиль та їх прийомі. Вони включають техніки, які використовують проникнення та відбиття ультразвукових хвиль (УЗХ), що дозволяє детально аналізувати властивості матеріалу. [7].

-Пасивні методи: засновані на сприйнятті існуючих акустичних коливань без додаткового випромінювання хвиль, що може бути корисним для виміру товщини за допомогою аналізу природних вібрацій матеріалу.

Таке розділення на активні та пасивні методи дозволяє більш точно вибрати підходи для конкретних умов та завдань контролю, забезпечуючи високу ефективність і точність вимірювань.

1.3.1 Ехо-метод з еталонуванням

Ехо-метод з еталонуванням — це варіант ультразвукового неруйнівного контролю, який використовується для вимірювання товщини матеріалів та виявлення дефектів у виробах за допомогою відбиття ультразвукових хвиль. Цей метод ідеально підходить для контролю різноманітних матеріалів, зокрема металів, пластиків та композитів.

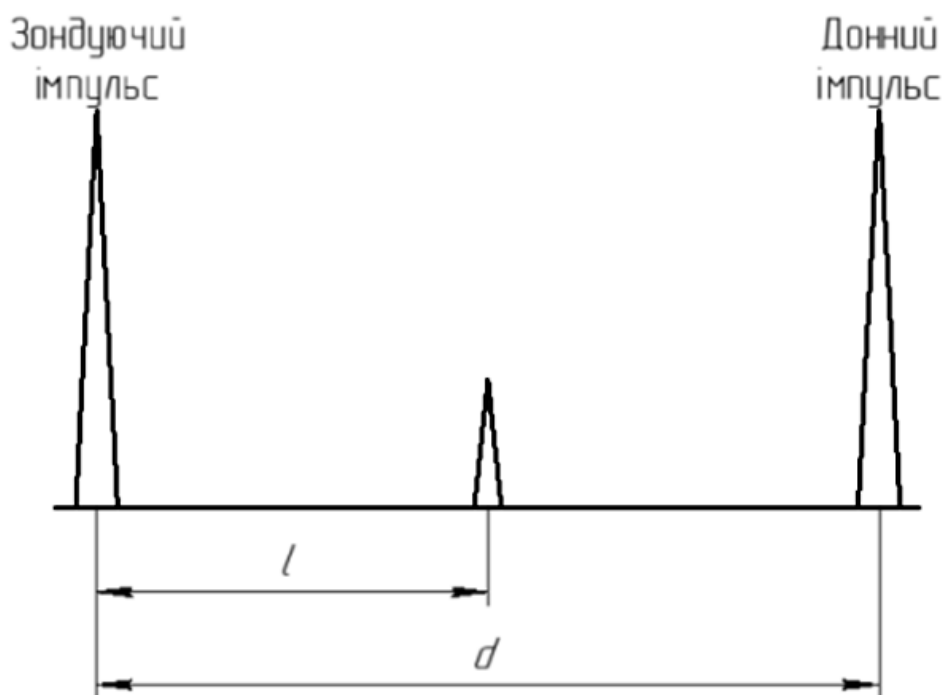


Рис. 1.6 – Сигнали ехо-методу

Ехо-метод заснований на принципі відбиття ультразвукових хвиль від внутрішніх структур або задньої поверхні випробуваного об'єкта.

					<i>ПК01.041760.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		23

Ультразвуковий імпульс посилається в матеріал, і відбиті хвилі повертаються назад до перетворювача, який аналізує їх для визначення властивостей або стану об'єкта.

Технічний процес

1. Збудження: П'єзоелектричний перетворювач (ПЕП) генерує ультразвукові імпульси, які проникають у матеріал.

2. Відбиття: Імпульси відбиваються від внутрішніх дефектів або задньої сторони виробу і повертаються до перетворювача.

3. Аналіз: Перетворювач реєструє час проходження хвиль до моменту їх повернення та амплітуду відбитих хвиль. За цими даними визначається товщина або глибина дефекту.

Еталонування:

Метод вимагає еталонування для точних вимірювань. Еталонування виконується шляхом порівняння вимірів з відомою товщиною еталонного зразка з того ж матеріалу. Це дозволяє налаштувати швидкість поширення ультразвукових хвиль у приладі, що є критичним для точного визначення товщини та розташування дефектів.

Товщина визначається за формулою:

$$h = C \cdot T / 2 \quad (1.1)$$

де C — швидкість поширення ультразвукових хвиль в матеріалі, а T — час, за який хвиля проходить шлях до об'єкта та назад.

Переваги:

- Висока точність визначення товщини та виявлення дефектів.
- Можливість застосування при односторонньому доступі до випробуваного об'єкта.
- Здатність працювати з широким спектром матеріалів.

Недоліки:

- Наявність "мертвої зони" біля поверхні перетворювача, що може ускладнити виявлення поверхневих дефектів.
- Вимагає ретельного калібрування для точності вимірювань.

					<i>ПК01.041760.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		24

- Чутливість до шорсткості та інших поверхневих характеристик об'єкта.

Застосування:

Ехо-метод з еталонуванням широко використовується в авіаційній, автомобільній промисловості та виробництві енергетичного обладнання для контролю якості критичних компонентів, забезпечуючи надійність і безпеку виробів.

1.3.2 Резонансний метод

Резонансний метод ультразвукового контролю використовується для вимірювання товщини, визначення дефектів та інших властивостей матеріалів шляхом виявлення резонансних частот у контрольованому об'єкті. Принцип роботи цього методу базується на збудженні ультразвукових коливань, які викликають резонанс у виробі, і на подальшому аналізі цих коливань.

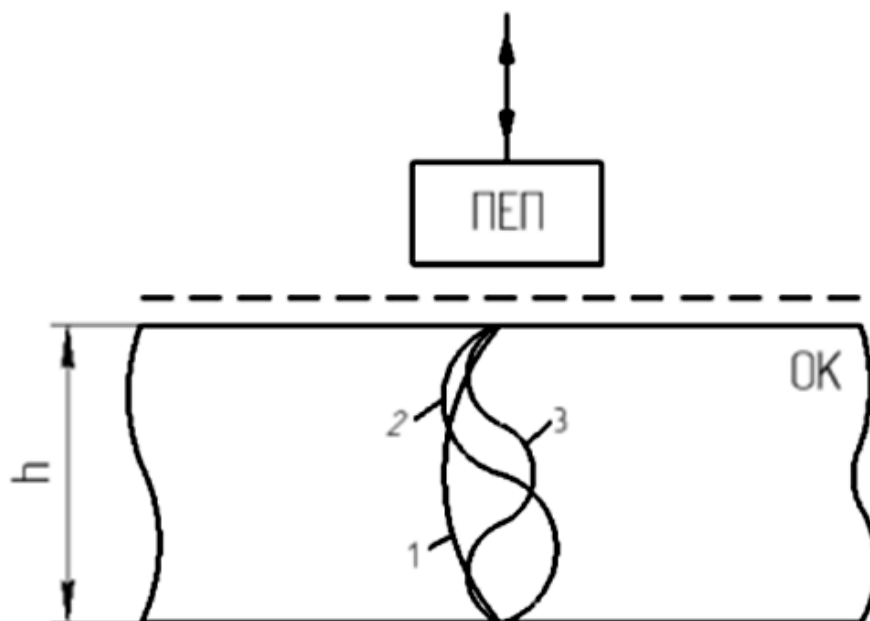


Рис. 1.7 – Сигнали резонансного методу

Резонанс виникає, коли частота зовнішнього збуджуючого сигналу збігається з однією з власних частот коливань об'єкта контролю. У результаті

цього збігу амплітуда коливань сильно зростає. Використання резонансу дозволяє точно вимірювати параметри матеріалів, зокрема, товщину деталей. [8].

Технічний процес:

1. Збудження: За допомогою п'єзоелектричного перетворювача, який працює під управлінням генератора змінної частоти, в об'єкті збуджуються ультразвукові коливання.

2. Резонанс: На певних частотах, які відповідають резонансу для даного виробу, у контрольованій деталі виникають стоячі хвилі, що спричиняє збільшення амплітуди коливань.

3. Вимірювання: За амплітудою коливань та її зміною на різних частотах можна визначити товщину виробу. Резонанс настає, коли товщина деталі відповідає цілому числу півхвиль відповідної пружної акустичної хвилі в матеріалі.

Розрахунки:

Товщина h виробу визначається за формулою:

$$h = n * \lambda n / 2 = (n * C) / (2 * f_n) \quad (1.2)$$

де n - порядок гармоніки коливання (ціле число), C - швидкість поширення ультразвуку в матеріалі, f_n - частота ультразвуку.

При складанні двох рівнянь товщини ОК через сусідні гармоніки отримаємо:

$$h = C / (2 * f_n) * n; h = C / (2 * f_{n+1}) * (n + 1) \quad (1.3)$$

При $\Delta f = f_{n+1} - f_n$, отримаємо:

$$h = C / (2 * \Delta f) \quad (1.4)$$

Шляхом визначення різниці між частотами коливань двох послідовних гармонік, яка викликає резонанс, та врахування відомої швидкості ультразвукових хвиль у матеріалі, можна використовувати це співвідношення для розрахунку товщини деталі.

Переваги:

- Висока точність вимірювань.

- Можливість визначення властивостей матеріалів на різних глибинах.

					<i>ПК01.041760.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		26

- Здатність виявляти дефекти, такі як розшарування.

Недоліки:

- Високе згасання ультразвуку в матеріалі може знижувати чіткість резонансу.

- Шорсткі та нерівні поверхні можуть згладжувати резонансні піки, ускладнюючи точне вимірювання.

- Вимагає точного калібрування та контролю параметрів генератора частоти.

Сучасне застосування:

Резонансний метод активно застосовується для контролю товщини та інтегритету виробів в таких галузях, як авіабудування, машинобудування та нафтохімічна промисловість. Сучасні прилади можуть автоматизувати більшість процесів вимірювань, значно підвищуючи продуктивність та точність інспекцій.

1.3.3 Ехо-метод без еталонування

Ехо-метод без еталонування є одним із способів ультразвукового неруйнівного контролю, який використовується для вимірювання товщини матеріалів та виявлення дефектів без потреби в порівнянні з відомими еталонними зразками. Цей метод забезпечує можливість вимірювання і аналізу, базуючись виключно на швидкості поширення ультразвукових хвиль у даному матеріалі, що є відомою з літератури або інших джерел.

					<i>ПК01.041760.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		27

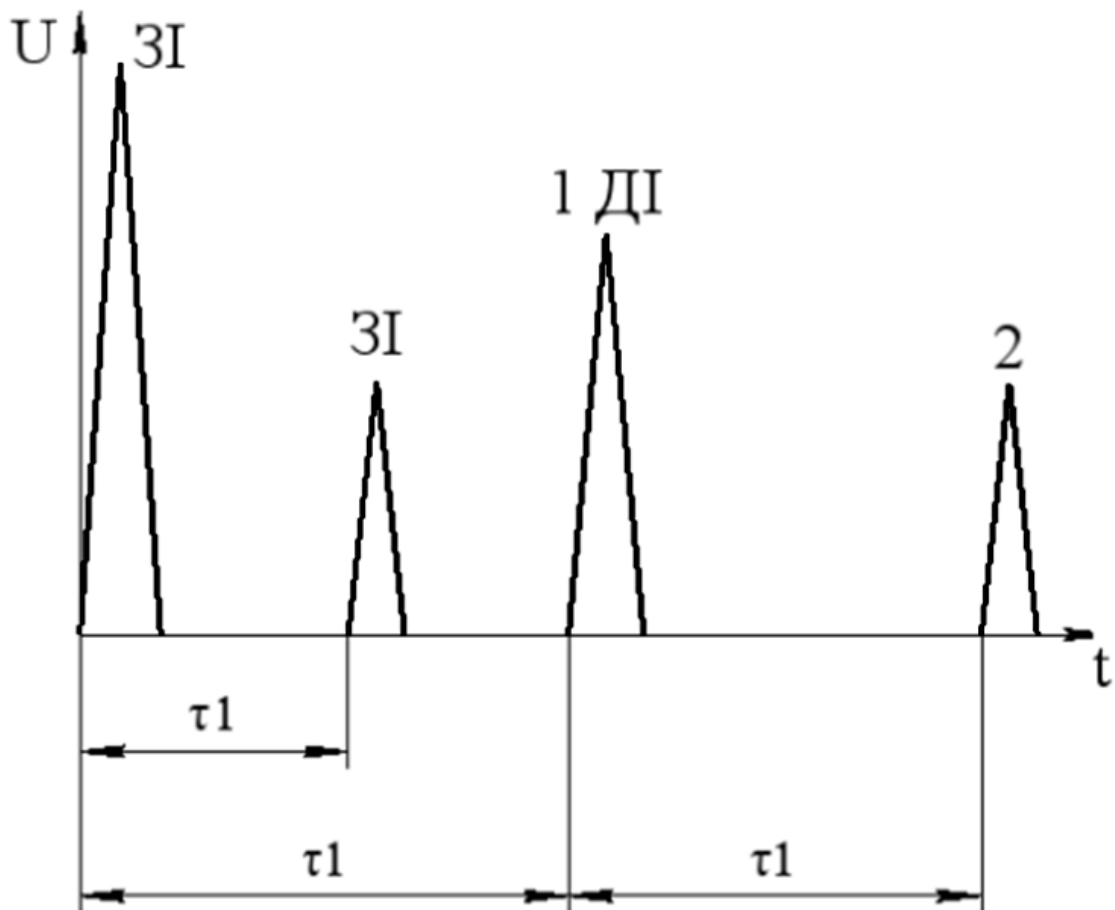


Рис. 1.8 – Ехо-метод без еталонування: 1 та 2 – донні сигнали

Ехо-метод без еталонування працює на принципі відбиття ультразвукових хвиль від внутрішніх структур або задньої поверхні об'єкта інспекції. Хвилі, що відбиваються, повертаються до перетворювача, який реєструє час їх повернення і амплітуду, використовуючи цю інформацію для аналізу структури або ідентифікації дефектів. [9].

Технічний процес

1. Збудження: П'єзoeлектричний перетворювач генерує ультразвукові імпульси, які проникають в об'єкт.

2. Відбиття: Імпульси відбиваються від дефектів або задньої поверхні об'єкта і повертаються до перетворювача.

3. Аналіз: Час, за який імпульси повертаються, і амплітуда відбитих хвиль аналізуються для визначення товщини або виявлення дефектів.

Товщина об'єкта визначається за формулою:

					<i>ПК01.041760.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		28

$$h = C \cdot T / 2 \quad (1.5)$$

де C — швидкість поширення ультразвукових хвиль в матеріалі, T — час проходження хвилі від перетворювача до поверхні відбиття і назад.

Переваги:

- Не потребує еталонних зразків для калібрування, зменшуючи підготовчі витрати та час.

- Можливість швидкої і ефективної оцінки стану об'єктів безпосередньо на місці.

- Здатність визначати властивості матеріалу або ідентифікувати дефекти без порівняння.

Недоліки:

- Вимагає точного знання швидкості поширення ультразвуку в контрольованому матеріалі, що може змінюватися залежно від його стану та умов.

- Менш точний у випадках, коли властивості матеріалу відхиляються від табличних значень.

- Чутливий до шорсткості поверхонь та інших факторів, які можуть впливати на відбиття ультразвукових хвиль.

Застосування:

Метод широко використовується в промисловості для контролю металів, композитів, пластиків і інших матеріалів у таких сферах, як авіабудування, кораблебудування, машинобудування, а також в області обслуговування та ремонту різних установок і обладнання. [10].

1.4 Висновок

Ультразвукова товщинометрія становить незамінний інструмент в сучасному технологічному та промисловому світі, надаючи можливість точно та ефективно вимірювати товщину різноманітних матеріалів без їхнього пошкодження. Ця методика дозволяє виконувати неруйнівні вимірювання в

					<i>ПК01.041760.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		29

режимі реального часу, що є критично важливим для забезпечення безпеки та дотримання стандартів якості в багатьох галузях, включаючи авіаційну, автомобільну промисловість, кораблебудування та нафтохімічну промисловість.

Значення ультразвукової товщинометрії полягає в її універсальності та можливості адаптації до різних середовищ та матеріалів, забезпечуючи високу точність вимірювань. Це робить метод ідеальним для контролю товщини структурних компонентів, визначення ступеню корозії або ерозії та виявлення внутрішніх дефектів, таких як тріщини або порожнини.

Іншою ключовою перевагою є те, що ультразвуковий метод дозволяє проводити вимірювання з одностороннім доступом до об'єкта, що є незамінним в умовах обмеженого простору або складних конструкцій. Оскільки метод заснований на відбитті звукових хвиль, він дозволяє отримувати точні дані про товщину і стан матеріалу, не залежно від його складних геометричних форм.

Також, важливим є те, що ультразвукова товщинометрія є економічно ефективним варіантом порівняно з іншими технологіями візуалізації, як МРТ або КТ. Це робить її доступною для широкого кола користувачів і застосувань, від великих промислових комплексів до малих виробничих ліній.

Врешті-решт, ультразвукова товщинометрія не тільки підвищує безпеку і продовжує термін служби обладнання через регулярний моніторинг і обслуговування, але й сприяє підвищенню ефективності виробництва та оптимізації ресурсів, що є ключовим аспектом у підтримці сталого розвитку і екологічної безпеки.

					<i>ПК01.041760.000 ПЗ</i>	Арк.
						30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 2. БЕЗДРОТОВИЙ ЗВ'ЯЗОК МІЖ ПРИСТРОЯМИ

2.1 Загальна інформація

Встановлення технічних параметрів великих і труднодоступних конструкцій є загальноприйнятим завданням у всьому світі. Ці конструкції, окрім своїх великих розмірів, часто відрізняються значною довжиною. До такого типу належать, наприклад, нафто- і газопроводи, тепло- і водопровідні системи, резервуари, канати тощо. Основним аспектом неруйнівних випробувань є забезпечення безпеки під час перевірки стану цих споруд. Для цього критично важливо ідентифікувати будь-які дефекти та в залежності від їх серйозності вжити заходів для їх усунення або мінімізації негативного впливу. З досвіду перевірки великих та малих об'єктів, очевидно, що значний обсяг підготовчих робіт необхідний. Такі підготовчі заходи можуть суттєво впливати на експлуатаційні витрати. Трубопроводи часто знаходяться під землею, під залізницями та іншими спорудами, деякі сегменти можуть бути занурені у воду. Усі ці чинники істотно впливають на інженерні завдання з управління та постачання. [11].

Одна з ключових проблем - це налагодження каналу передачі даних між управляючим об'єктом і блоком обробки даних. На створенні таких каналів акцентується увага, особливо в контексті автоматизованих систем збору та передачі інформації. Використання бездротової передачі даних, як сучасного підходу, дозволяє зменшити час, необхідний для огляду об'єкта, та кількість технічного персоналу, особливо для віддалених об'єктів, таких як трубопроводи, що розташовані далеко від операторів. Розвиток мініатюризації електроніки і інтеграції сенсорів сприяв створенню чутливих елементів з комунікаційними можливостями та бездротовим зберіганням даних. На основі цих елементів розробляються "розумні" пристрої, які координуються в інших датчиках для створення мереж передачі даних. Після розробки кабельних систем передачі, інженери стикались із викликами при адаптації цих систем до бездротових

					<i>ПК01.041760.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		31

форматів, що призвело до появи персональних бездротових мереж (WPAN), які тепер є стандартом у бездротовій передачі даних. WPAN - це системи з обмеженим радіусом дії (3-60 м) і працюють на частотах від 400 МГц до 2,4 ГГц, зокрема, 2,4 ГГц, яка є популярною для промислових, наукових, медичних застосувань і загальнодоступних бездротових рішень. Ці частоти не вимагають плати за користування та сертифіковані для місцевого зв'язку, зростає інтерес до застосувань, що потребують багатоадресної передачі.

Бездротові системи передачі даних, які включають канали GSM/GPRS (EDGE) та UMTS (3G, 4G), відіграють значну роль у віддаленому промисловому моніторингу, системах відновлення інформації та управлінських процесах, завдяки своїм перевагам перед кабельними з'єднаннями. Бездротові технології, особливо ефективні в контексті мобільності, дозволяють легко налаштовувати та оновлювати системи. Вони усувають необхідність встановлення інформаційного кабелю між перетворювачем і блоком обробки даних, що особливо корисно в умовах обмеженого доступу та складності автоматизації зберігання даних. Також застосування бездротових технологій дозволяє знизити витрати на доставку і експлуатацію обладнання. Завданням бездротових технологій є спрощення процесів прийому та передачі даних у неруйнівних тестових системах, гарантуючи високу надійність передачі даних через цифрову обробку і передачу інформації прямо від первинного перетворювача до блоку обробки даних, наприклад персонального комп'ютера для запису, аналізу отриманих даних і перевірки діагностичних процесів. [12].

2.1.1 Wi-Fi

Технологія Wi-Fi, розроблена у 1991 році, відома також як Wireless Fidelity, стала однією з найпопулярніших засобів організації бездротового доступу в домашніх та корпоративних мережах. Вона використовує радіочастотний спектр для з'єднання різноманітних пристроїв без необхідності використання проводів.

					<i>ПК01.041760.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		32

Система зазвичай включає два основних компоненти: точку доступу (Access Point, AP) та кінцеве обладнання користувача з Wi-Fi адаптерами.

Частотні діапазони і швидкість передачі даних:

Wi-Fi мережі можуть працювати на частотах 2.4 ГГц або 5 ГГц. Кожен діапазон має свої специфікації та можливості передачі даних:

802.11a працює на 5 ГГц з максимальною швидкістю 54 Мбіт/с.

802.11b та 802.11g працюють на 2.4 ГГц з максимальними швидкостями 11 Мбіт/с та 54 Мбіт/с відповідно.

802.11n, який може працювати як на 2.4, так і на 5 ГГц, підтримує швидкість до 600 Мбіт/с. [13].

Безпека та підключення:

Модерні стандарти бездротових мереж включають різні механізми для забезпечення безпеки, такі як аутентифікація користувачів і шифрування даних. Підключитися до мережі Wi-Fi можна за допомогою різноманітних пристроїв, які оснащені відповідним обладнанням, включаючи ноутбуки, смартфони та планшети. Для старіших ноутбуків без вбудованих Wi-Fi адаптерів можна використовувати зовнішні Wi-Fi пристрої, що підключаються через USB або PCMCIA слоти.

Переваги та недоліки:

Серед переваг Wi-Fi — простота установки та підключення, висока швидкість передачі даних та відсутність необхідності в додаткових проводах або модемах. Також система має гнучкі налаштування та легко масштабується. Однак, Wi-Fi має й недоліки, зокрема, відносно обмежений радіус дії та потенційні проблеми з безпекою через відкритий доступ до радіочастот. Крім того, частотний діапазон і правила використання частот можуть відрізнятися в різних країнах, що вимагає додаткового регулювання і налаштувань.

Застосування:

Wi-Fi активно використовується не тільки для підключення до Інтернету, а й для створення локальних мереж у офісах, громадських місцях (таких як кафе,

					<i>ПК01.041760.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		33

аеропорти, готелі), що забезпечує зручний доступ до мережевих ресурсів і сервісів. [14].

2.1.2 Bluetooth

Bluetooth — це технологія бездротового зв'язку, яка дозволяє обмінюватися даними на коротких відстанях, використовуючи радіохвилі високої частоти. Вперше введена в кінці 1990-х років, Bluetooth забезпечує з'єднання між мобільними телефонами, комп'ютерами, периферійними пристроями та іншими електронними пристроями без використання кабелів.

Технічні характеристики:

Bluetooth працює на частоті 2.4 ГГц, яка є загальнодоступною і не вимагає ліцензії в країні світу. Ця технологія може підтримувати одночасне підключення кількох пристроїв за допомогою використовуваної техніки "frequency-hopping spread spectrum", яка також забезпечує високий рівень безпеки передачі даних.

Стандарти та версії:

Bluetooth розвинувся через кілька версій, кожна з яких вносила покращення у швидкість передачі даних та енергоефективність:

Bluetooth v1.2 (базовий стандарт)

Bluetooth v2.0 + EDR (Enhanced Data Rate) збільшує швидкість передачі до 3 Мбіт/с.

Bluetooth v3.0 + HS (High Speed) використовує протокол 802.11 для досягнення швидкості передачі даних до 24 Мбіт/с.

Bluetooth v4.0 включає Bluetooth Low Energy (BLE), що забезпечує значно менше енергоспоживання для пристроїв, що постійно підключаються.

Bluetooth v5.0 підвищує здатність до великої відстані передачі, швидкість і можливість розширеного зв'язку.

Bluetooth має ряд переваг, які стали його популярними для використання в повсякденному житті:

					<i>ПК01.041760.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		34

Енергоефективність: Особливо з введенням BLE, Bluetooth став ідеальним вибором для пристроїв, що працюють на батарейках.

Універсальність: Можливість підключення до широкого спектру пристроїв.

Зручність: Легкість установки і автоматичного визначення пристроїв, які підтримують Bluetooth.

Однак у Bluetooth є деякі недоліки:

Обмежена дальність: зазвичай до 10 метрів, що обмежує його використання великими просторами.

Перешкоди: Можливі переривання сигналу через перешкоди або інші пристрої, які працюють на частоті 2,4 ГГц.

Безпека: небажано використовувати шифрування, старіші версії Bluetooth можуть бути невразливими до атаки.

Застосування:

Bluetooth використовується в багатьох пристроях, включаючи навушники, автомобільні системи, домашній автомат, ігрові приставки та пристрої для здоров'я/фітнесу. Це робить його ідеальним для сценаріїв, де потрібна проста і швидка бездротова передача даних. [15].

2.1.3 GSM

SM (Global System for Mobile Communications) є всесвітньо визнаним стандартом для мобільного зв'язку, який вперше був введений у 1991 році. Ця технологія спочатку розроблялася як стандарт для мобільних телефонів для передачі голосу та SMS, але з часом еволюціонувала для підтримки передачі даних через GPRS (General Packet Radio Services) та EDGE (Enhanced Data Rates for GSM Evolution).

Технічні характеристики:

					<i>ПК01.041760.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		35

GSM оперує в декількох частотних діапазонах, зокрема 900 МГц та 1800 МГц в Європі, та 850 МГц та 1900 МГц у Північній Америці. GSM використовує метод часового поділу каналів (TDMA), де кожен радіоканал розділений на часові слоти, призначені для різних користувачів. Це забезпечує високу ефективність використання доступних частотних ресурсів.

Ключові послуги, які надає GSM, включають:

Голосовий зв'язок: Цифрове кодування голосу забезпечує чистоту та ясність аудіосигналів.

SMS (Short Message Service): Передача текстових повідомлень.

GPRS (General Packet Radio Service): Підтримка "пакетної" передачі даних, яка дозволяє доступ до Інтернету.

EDGE (Enhanced Data Rates for GSM Evolution): Розширення GPRS, що забезпечує більш високі швидкості передачі даних.

GSM має декілька переваг, які сприяли його широкому розповсюдженню:

Міжнародне покриття: GSM є найбільш поширеним стандартом у світі, що сприяє легкому роумінгу та доступності послуг в різних країнах. [16].

Безпека: GSM використовує сучасні методи шифрування для захисту даних та голосових дзвінків.

Надійність: Стабільність та зрілість технології забезпечують високу якість зв'язку.

Попри численні переваги, GSM також має деякі недоліки:

Обмежена швидкість даних: Навіть з використанням EDGE, швидкості даних значно нижчі порівняно з новішими технологіями 3G та 4G.

Вразливість до перехоплення: Незважаючи на шифрування, були виявлені слабкі місця, які можуть бути використані для перехоплення зв'язку.

Застосування:

GSM продовжує використовуватися у всьому світі, особливо в регіонах, де більш нові технології мобільного зв'язку ще не стали настільки доступними або поширеними. Він вважається надійною базою для голосових викликів та

					<i>ПК01.041760.000 ПЗ</i>	Арк.
						36
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

основного текстового меседжингу, а також використовується в промисловості для забезпечення машин-до-машинного зв'язку (M2M). [17].

2.2 Висновок

У розділі було розглянуто ключові аспекти та технології бездротового зв'язку, які відіграють важливу роль у забезпеченні надійності та ефективності технічних перевірок великих і труднодоступних конструкцій. Зокрема, були детально описані такі технології, як Wi-Fi, Bluetooth і GSM, кожна з яких має свої унікальні характеристики та застосування.

Bluetooth, зокрема, виявився особливо корисним у контексті бездротового зв'язку між пристроями. Ця технологія, що забезпечує з'єднання на короткі відстані, вирізняється своєю енергоефективністю та універсальністю, роблячи її ідеальним вибором для з'єднання різноманітних пристроїв, таких як мобільні телефони, комп'ютери, периферійні пристрої та інші гаджети. Завдяки використанню техніки "frequency-hopping spread spectrum", Bluetooth не тільки забезпечує безпечну передачу даних, але й мінімізує ризики перешкод від інших пристроїв, що працюють на схожих частотах.

Переваги Bluetooth у бездротовій комунікації також включають легкість установки та використання, що є критично важливим у ситуаціях, де швидкість налаштування та гнучкість системи можуть значно вплинути на загальну ефективність проведення технічних обстежень. Його можливість швидкого підключення та автоматичного виявлення сумісних пристроїв дозволяє технічним фахівцям легко організувати робоче середовище без зайвих затримок.

Таким чином, Bluetooth відіграє ключову роль у бездротовій комунікації між пристроями, пропонуючи рішення, яке не тільки ефективно і зручно в експлуатації, але й сприяє підвищенню загальної продуктивності системи контролю та моніторингу великих інженерних конструкцій. Ця технологія дозволяє істотно спростити багато аспектів управління і контролю

					<i>ПК01.041760.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		37

важкодоступних об'єктів, що робить її незамінною у багатьох сферах застосування.

					<i>ПК01.041760.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		38

РОЗДІЛ 3. РОЗРАХУНОК МОБІЛЬНОГО УЛЬТРАЗВУКОВОГО ТОВЩИНОМІРУ

3.1 Структурна схема

Такий товщиномір складається з двох основних частин: аналогової та цифрової.(рис. 1.)

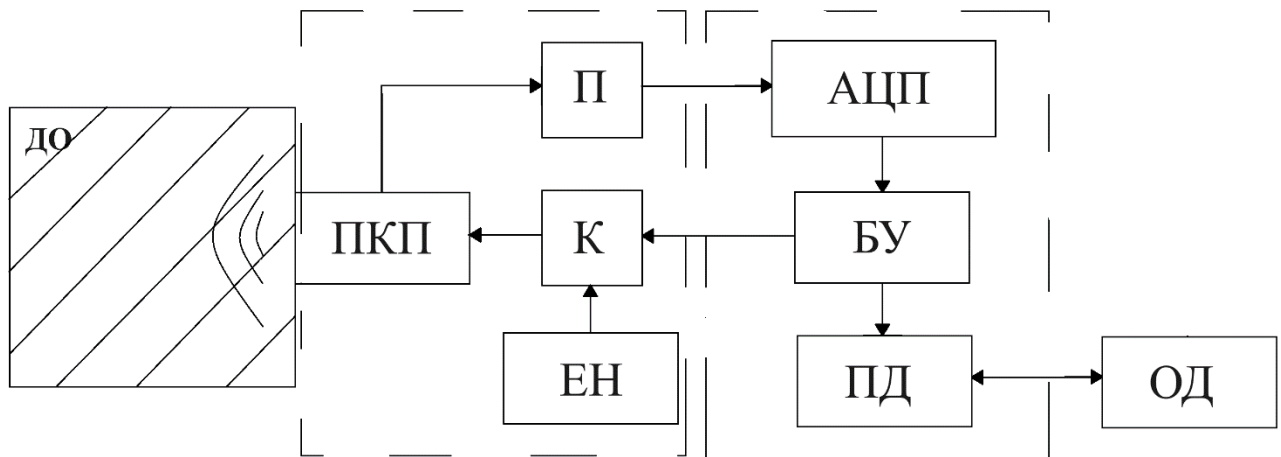


Рисунок 3.1. Структурна схема мобільного ультразвукового товщиноміра

ДО – досліджуваний об'єкт,

ЕН - еталонна напруга,

К - ключ,

ПКП - п'єзоелектричний перетворювач,

П - підсилювач,

АЦП - аналого-цифровий перетворювач,

БУ – блок управління,

ПД – передавач даних,

ОД – блок обробки даних.

Аналогова частина включає п'єзоелектричний перетворювач (ПКП), який живиться від еталонної напруги (ЕН) через ключ (К). Частота генерації імпульсів контролюється короткими імпульсами, які подаються з блоку управління (БУ).

Генерований імпульс поширюється у досліджуваному об'єкті (ДО), відбивається від донної поверхні і повертається до перетворювача як ехо-імпульс.

Цифрова частина відповідає за перетворення аналогового сигналу в цифровий формат за допомогою аналого-цифрового перетворювача (АЦП), а потім передає дані до блоку обробки даних (ОД) через блок передачі даних (ПД). Це дозволяє збільшити автоматизацію системи та відмовитися від фізичного з'єднання між різними частинами приладу. [18].

Товщиномір використовує сучасні технології, такі як Bluetooth для короткодистанційної передачі даних і GSM для довгодистанційної передачі, що дозволяє забезпечити гнучкість і мобільність у використанні. Це значно покращує ефективність у вимірюванні товщин, дозволяючи швидко обробляти та аналізувати дані на місці або надсилати їх на великі відстані для подальшого аналізу в умовах робочого процесу [19].

3.2 Вибір п'єзоелектричного перетворювача

П'єзоелектричні перетворювачі (ПЕП) використовуються у методах ультразвукового неруйнівного контролю (НК), де вони функціонують як випромінювачі та приймачі ультразвукових хвиль, оброблених ультразвуковим дефектоскопом. Основою їхньої роботи є п'єзоелектричний ефект, який полягає у виникненні електричної поляризації під впливом механічних напружень. [21].

УЗ ПЕП можна класифікувати за такими параметрами:

За кутом введення коливань:

-Прямі перетворювачі, що вводять і приймають коливання перпендикулярно до поверхні об'єкта контролю.

-Наклонні перетворювачі, що вводять і приймають коливання під кутом до нормалі об'єкта контролю.

За способом розміщення функцій випромінювання та прийому УЗ сигналу розрізняють:

					<i>ПК01.041760.000 ПЗ</i>	Арк.
						40
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

-Спільні ПЕП, де один і той же п'єзоелемент працює як в режимі випромінювання, так і в режимі прийому.

-Роздільно-спільні перетворювачі, де в одному корпусі розміщені два і більше п'єзоелементів, один з яких працює тільки в режимі випромінювання, а інші — в режимі прийому.

За частотою коливань:

-Високочастотні УЗ ПЕП, які зазвичай застосовують для контролю дрібнозернистих заготовок малої товщини (зазвичай менше 100 мм) та зварних з'єднань товщиною менше 20 мм.

-Середньочастотні УЗ ПЕП з діапазоном частот від 1,8 до 2,5 МГц, застосовуються для контролю виробів більшої товщини та з великим розміром частинок.

-Низькочастотні УЗ ПЕП з діапазоном частот від 0,5 до 1,8 МГц, використовуються для контролю заготовок з крупнозернистою структурою та високим коефіцієнтом затухання, наприклад, чавуну, бетону або пластику.

За способом акустичного контакту:

-Контактні ПЕП, де робоча поверхня знаходиться у безпосередньому контакті з поверхнею об'єкта контролю або знаходиться від неї на відстані менше половини довжини хвилі у контактній рідині.

-Імерсійні, які працюють при наявності між поверхнями перетворювача та об'єкта контролю шару рідини товщиною більше просторової протяжності акустичного імпульсу.

За типом хвилі, що збуджується в об'єкті контролю:

-Продольні хвилі, коливання яких відбувається вздовж осі поширення;

-Поперечні (зсувні) хвилі, коливання яких відбуваються перпендикулярно осі поширення;

-Поверхневі хвилі (хвилі Релея), які поширюються уздовж вільної (або слабонавантаженої) межі твердого тіла і швидко затухають з глибиною.

-Нормальні ультразвукові хвилі (хвилі Лемба), які поширюються в пластинах та стрижнях. Існують симетричні та антисиметричні хвилі.

					<i>ПК01.041760.000 ПЗ</i>	Арк.
						41
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

-Головні хвилі — це сукупність акустичних хвиль, збуджуваних при падінні пучка продольних хвиль на межу розділу двох твердих середовищ під першим критичним кутом. [22].

Вибір перетворювача залежить від параметрів контрольованого об'єкта, таких як матеріал, товщина, форма та орієнтація дефектів тощо. Вибір ПЕП за кутом введення (прямий чи наклонний) здійснюється на основі схеми прослуховування конкретного об'єкта. Схеми прослуховування містяться у державних та відомчих стандартах, а також технологічних картах контролю. Зазвичай кут введення обирають таким чином, щоб забезпечити перетин перевіряемого перерізу акустичною віссю перетворювача (прямим чи одноразово відбитим променем). Виявлення дефектів, що виходять на поверхню, найбільш ефективно забезпечується при падінні поперечної хвилі під кутом 45 ± 5 градусів до цієї поверхні.

Вибір ПЕП за схемою включення (спільний або роздільно-спільний) визначається залежно від товщини виробу або відстані зони контролю від поверхні введення. Прямі спільні ПЕП зазвичай використовують при контролі виробів товщиною понад 50 мм, а прямі роздільно-спільні ПЕП — для контролю виробів товщиною до 50 мм включно, або приповерхневого шару до 50 мм.

Наклонні роздільно-спільні ПЕП переважно застосовуються за схемою спільного включення. Наклонні роздільно-спільні ПЕП з поперечною хвилею використовуються переважно для контролю зварних з'єднань тонкостінних (до 9 мм) труб діаметром не більше 400 мм (хордові перетворювачі). Наклонні роздільно-спільні ПЕП з продольною хвилею використовують для контролю з'єднань з крупнозернистою структурою та високим рівнем шумів (аустенітні шви).

Вибір ПЕП за частотою коливань, в основному, базується на товщині контрольованого об'єкта та необхідній чутливості контролю. Завдяки коротшій хвилі, високочастотні перетворювачі дозволяють виявляти дефекти меншого розміру, тоді як УЗ хвилі низькочастотних ПЕП глибше проникають у матеріал, оскільки коефіцієнт затухання зменшується з частотою. Низькочастотні ПЕП

					<i>ПК01.041760.000 ПЗ</i>	Арк.
						42
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

використовуються при контролі крупнозернистих матеріалів і матеріалів із високим коефіцієнтом затухання. Збільшення частоти спричиняє: збільшення ближньої зони, зменшення "мертвої" зони, покращення лучевої та фронтальної роздільної здатності, звуження напрямленості характеристики, збільшення коефіцієнту затухання, що пов'язане з падінням чутливості на більших товщинах, підвищення рівня структурних шумів у крупнозернистому матеріалі, зниження рівня власних шумів ПЕП, пов'язане зі збільшенням затухання звукової хвилі в елементах ПЕП при зростанні частоти. [23].

У даній роботі я буду використовувати PZT-5A. Це (свинцево-цирконат-титанат) є одним із найбільш популярних п'єзоелектричних матеріалів, використовуваних у різних ультразвукових застосуваннях, включаючи ультразвукову товщиномірію. Ось кілька ключових переваг PZT-5A для цього застосування:

-Висока п'єзоелектрична активність: PZT-5A вирізняється високими п'єзоелектричними коефіцієнтами, що забезпечує чудову конверсію електричної енергії в механічну та навпаки. Це ідеально підходить для генерації та прийому ультразвукових хвиль в товщиномірах.

-Велика діелектрична проникність: Висока діелектрична проникність PZT-5A сприяє більшій здатності накопичувати електричний заряд, що корисно для підвищення чутливості ультразвукових датчиків.

-Міцність і довговічність: Матеріал є міцним та здатним витримувати значні навантаження та різні умови експлуатації, що робить його ідеальним для промислового застосування, де надійність є критично важливою.

-Широкий діапазон робочих температур: PZT-5A може ефективно працювати в широкому діапазоні температур, що забезпечує надійність вимірювань у різних середовищах.

-Гнучкість у формуванні і обробці: П'єзоелектричні властивості PZT-5A можуть бути оптимізовані шляхом модифікації його складу та процесу обробки, що дозволяє точно налаштувати матеріал під конкретні потреби додатку.

					<i>ПК01.041760.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		43

Ці властивості роблять PZT-5A одним з найкращих матеріалів для застосування в ультразвукових товщиномірах, де потрібна висока точність і надійність. [24].

3.3 Розрахунок п'єзоелектричного перетворювача

Обраний п'єзоелемент виготовлений з PZT-5A товщиною 0,4 мм, має такі акустичні характеристики (табл. 3.1).

Таблиця 3.1. Властивості PZT-5A

Швидкість звуку	C м/с	2820
Густина	$\rho * 10^{-3}$ кг/м ³	7500
Пьезокоефіцієнти	$d_{33} * 10^{12}$ Кл/Н	374
	$d_{31} * 10^{12}$ Кл/Н	171
	$d_{15} * 10^{12}$ Кл/Н	585
Відносна діелектрична проникність	$\epsilon^{T_{33}}/\epsilon_0$	1700
Модуль Юнга	$\gamma * 10^{10}$ Н/м ²	6.6
Механічна добротність		80
Коефіц. Електромех. зв'язку	k_p	0.6
Температура Кюрі	$T_c, ^\circ\text{C}$	365

Інші дані:

Обраний матеріал Титан, швидкість поширення ультразвуку в ньому 6100 м/с, густина – 4540 кг/м³.

Спершу розрахуємо робочу частоту перетворювача за формулою:

$$f = \frac{C_{pzt}}{2h}$$

$$f = \frac{2820}{2 * 400} = 3,525 \text{ МГц}$$

Маючи частоту, ми можемо визначити довжину хвилі за наступною формулою:

$$\lambda_{pzt} = \frac{c_t}{f}$$

$$\lambda_{pzt} = \frac{6100}{3,525 * 10^6} = 1,7 \text{ мм}$$

Тепер визначимо діаметр п'єзоелектричного перетворювача:

Співвідношення розміру до товщини п'єзоелементу рекомендовано аби мало значення наближене до 20.

$$\frac{2a}{h} \approx 20$$

$$2a = 20 * 0.4$$

$$2a = 8 \text{ мм}$$

Тож п'єзоелектричний перетворювач матиме такі характеристики:

$$f = 3,525 \text{ МГц}$$

$$2a = 8 \text{ мм}$$

$$h = 0,4 \text{ мм}$$

Тепер визначимо період одного коливання:

$$T = \frac{1}{f_p}$$

$$T = \frac{1}{3,525 * 10^6} = 0,28 * 10^{-6} (с)$$

Визначимо поздовжню роздільну здатність:

$$\Delta D = \frac{2820 * 1 * 10^{-6}}{2} = 1,4(\text{мм})$$

					<i>ПК01.041760.000 ПЗ</i>	Арк.
						45
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3.4 Розрахунок товщини просвітлюючого шару

Просвітлюючим шаром виступає протектор, завданням якого є захист п'єзоелектричного перетворювача від стирання.

Визначимо імпеданс PZT-5A:

$$Z_{pzt} = C_{pzt} * \rho_{pzt}$$

$$Z_{pzt} = 2820 * 7500 = 2,115 * 10^7 \text{ Па * с/м}$$

Для просвітлюючого шару:

$$Z = \sqrt{Z_{pzt} * Z_{ok}} = 7,9 * 10^6 \text{ Па * с/м}$$

Де Z_{ok} – імпеданс об'єкту контролю

Отриманий імпеданс просвітлюючого шару подібний за значенням до імпедансу магнію $8,35 * 10^6 \text{ Па * с/м}$.

Отже матеріалом просвітлюючого шару вибираю магній. Визначимо тепер з якою швидкістю у ньому проходить ультразвук:

$$C_{mg} = \frac{Z_{mg}}{\rho_{mg}}$$

$$C_{mg} = \frac{8,35 * 10^6}{1740} = 4800 \text{ м/с}$$

Визначимо довжину хвилі у просвітлюючому шарі:

$$\lambda = \frac{C_{mg}}{f}$$

$$\lambda = \frac{4800}{3,525 * 10^6} = 1,36 * 10^{-4}$$

Товщина просвітлюючого шару:

$$D = \frac{\lambda}{4}$$

$$D = \frac{1,36 * 10^{-4}}{4} = 0,034 \text{ мм}$$

					<i>ПК01.041760.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		46

3.5 Вибір мікроконтролера

Розроблюваний УЗ товщиномір буде керуватися мікроконтролером EFR32MG12.

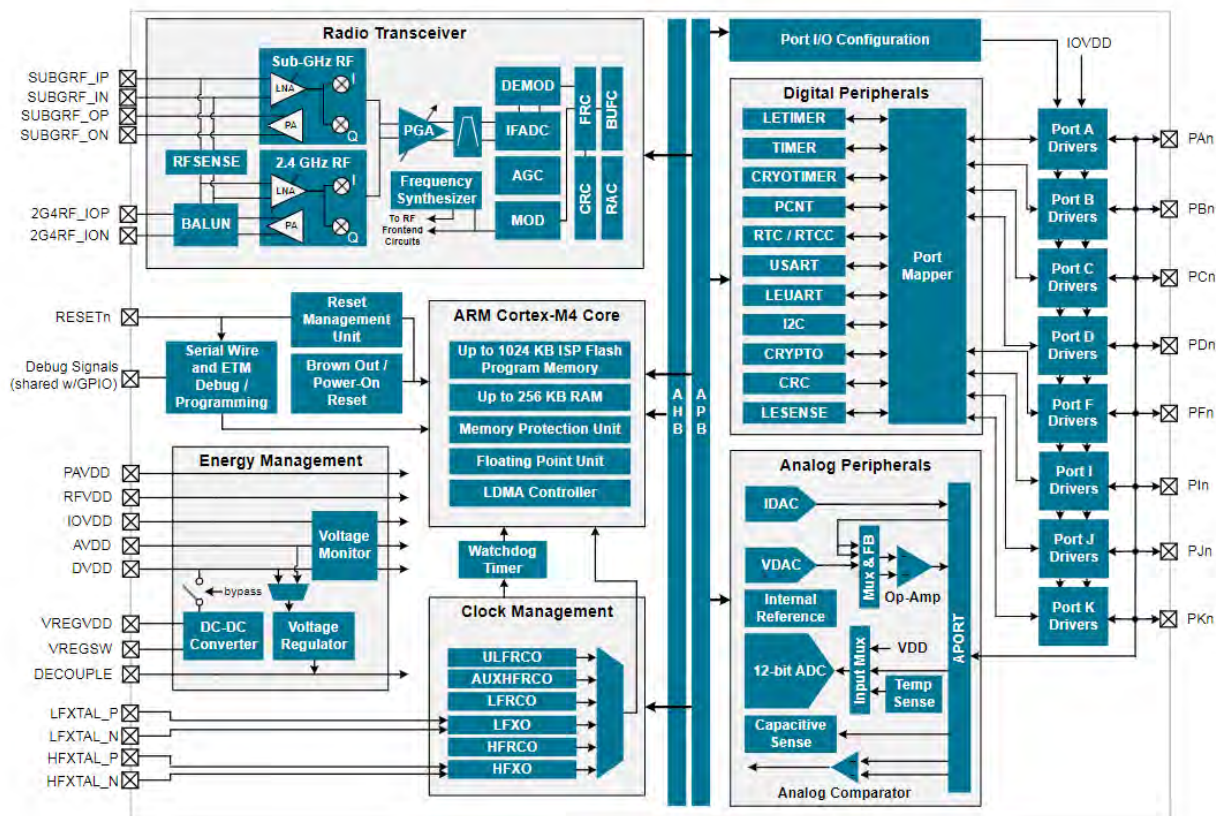


Рисунок 3.1 функціональна схема мікроконтролера

EFR32MG12 від Silicon Labs — це високопродуктивний, багатопроTOCOLьний бездротовий чіп, який ідеально підходить для широкого спектру застосувань Інтернету речей (IoT). Цей мікроконтролер поєднує в собі передові радіо-технології та потужні обчислювальні можливості, що робить його вибором багатьох розробників у сфері автоматизованих систем, носимої електроніки та смарт-пристроїв. [25].

Основні характеристики EFR32MG12:

БагатопроTOCOLьна підтримка: Підтримує Bluetooth Low Energy (BLE), Zigbee, Thread і протоколи пропрієтарного 2.4 GHz діапазону, що забезпечує гнучкість для інтеграції в різні мережеві конфігурації.

Енергоефективність: Один з найважливіших аспектів EFR32MG12 — його низьке споживання енергії, що критично для батарейних пристроїв і продовження терміну їх служби.

Велика обчислювальна потужність: Оснащений 32-бітним ARM Cortex-M4 процесором з частотою до 40 MHz, що забезпечує високу продуктивність і швидкість обробки даних.

Безпека: Містить передові можливості захисту даних, включаючи апаратне шифрування, відповідно до сучасних вимог безпеки.

Розширюваність: Підтримка широкого діапазону периферійних інтерфейсів, включаючи ADC, DAC, UART, SPI, I2C та багато іншого.

Переваги EFR32MG12:

Універсальність застосування: Завдяки багатопроTOCOLьній підтримці, EFR32MG12 може бути використаний в різноманітних пристроях та застосуваннях без потреби у додаткових компонентах для підтримки різних мережевих технологій.

Довготривале батарейне живлення: Його енергоефективність робить його ідеальним для портативних і носимих пристроїв, які потребують тривалої роботи від одного заряду батареї.

Висока продуктивність: Сильна обчислювальна база і швидкість передачі даних забезпечують високу швидкодію систем, що вимагають швидкої реакції і обробки даних.

Надійність і безпека: Розширені функції безпеки забезпечують захист переданих і збережених даних, що є особливо важливим у сучасному світі IoT.

EFR32MG12 є відмінним рішенням для розробників, які шукають потужний і гнучкий мікроконтролер для реалізації сучасних IoT застосувань, які вимагають не тільки функціональності, а й високого рівня безпеки та енергоефективності. [26].

					<i>ПК01.041760.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		48

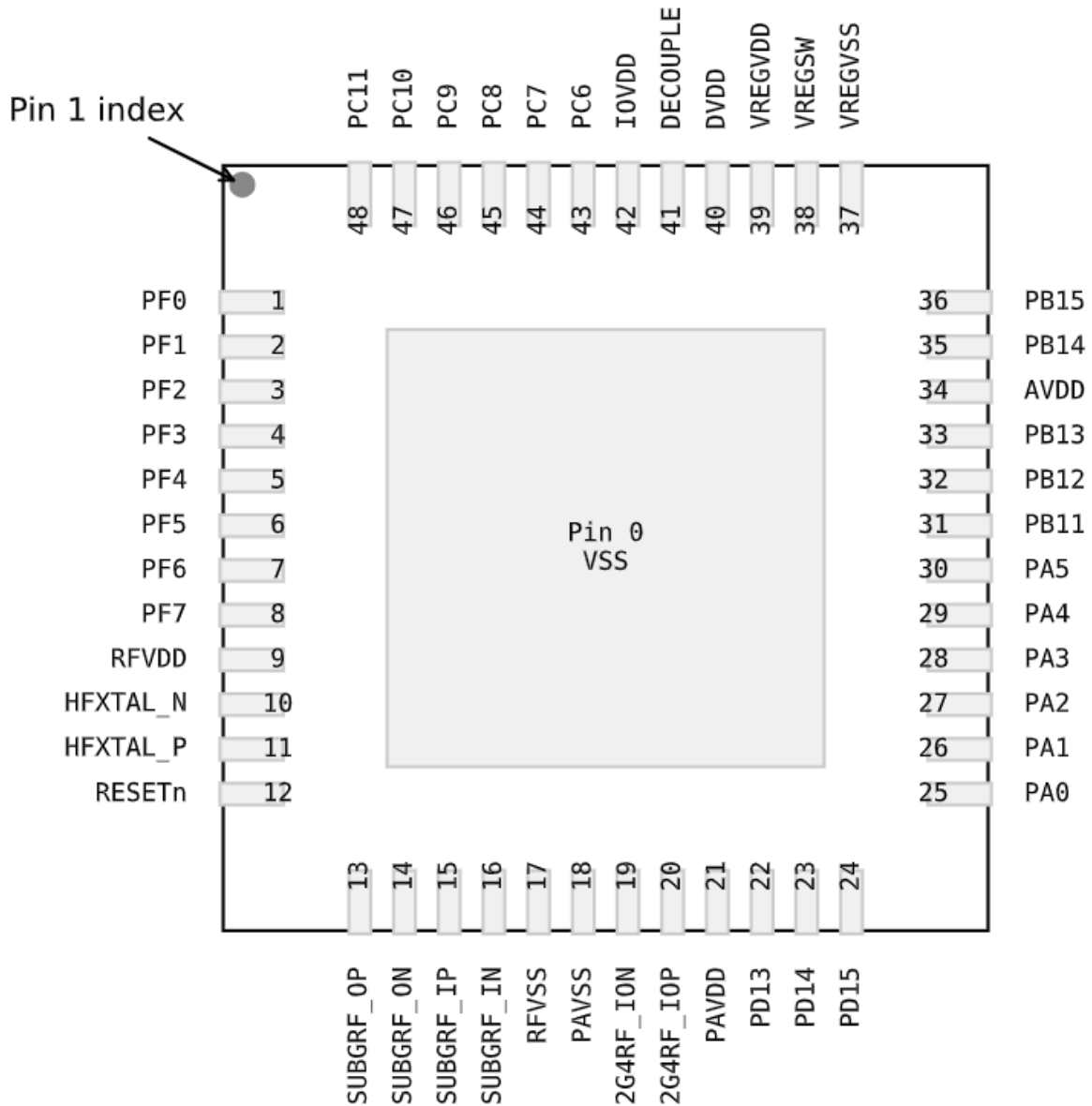


Рисунок 3.2 Схема виводів мікроконтролера ATmega 8

3.6 Вибір генератора ударного збудження

Генератор синхронізуючих імпульсів в ультразвуковому товщиномірі є ключовим компонентом, який керує часом випускання ультразвукових хвиль і реєстрації їх відлунь. Цей пристрій дозволяє точно вимірювати товщину матеріалів за допомогою ультразвуку.

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

Генерація імпульсів: Генератор синхронізуючих імпульсів створює точно таймовані електричні імпульси. Ці імпульси слугують для активації ультразвукового датчика або перетворювача в певні моменти часу.

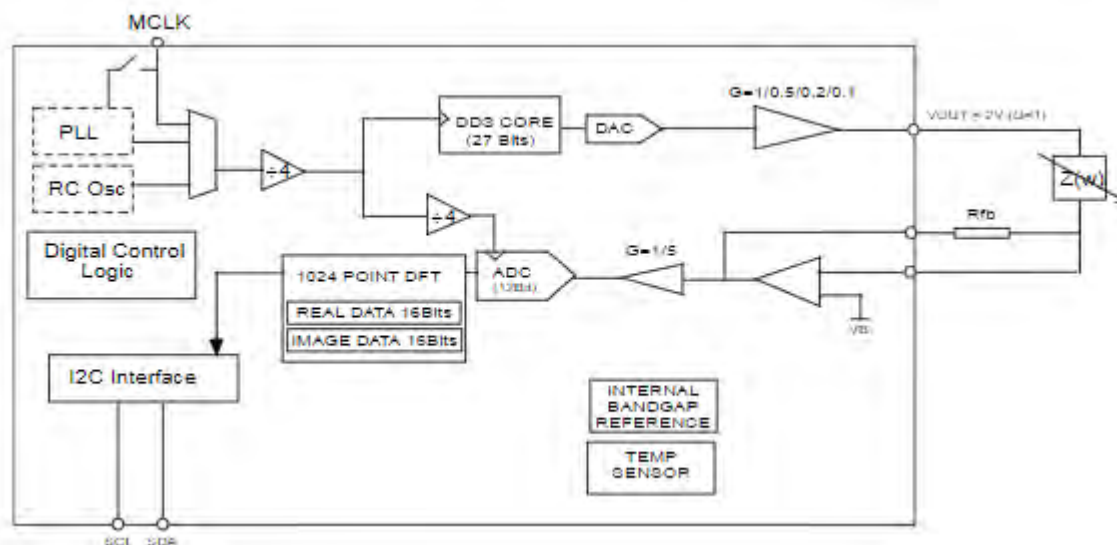


Рисунок 3.3 функціональна схема генератора

AD5933 від Analog Devices — це високоінтегрований чіп для вимірювання імпедансу, який може використовуватися в різноманітних застосуваннях, зокрема в медичному обладнанні, датчиках якості води, корозії металів та багатьох інших. Цей чіп забезпечує комплексне рішення для вимірювання імпедансу з автоматичним скануванням частот. [27].

Основні характеристики AD5933:

- Вбудований програмований генератор частоти: Може генерувати частоти з діапазону від 1kHz до 100kHz.
- 12-бітний АЦП: Забезпечує точне перетворення аналогового сигналу.
- Вбудована DSP обробка: Дозволяє вимірювати імпеданс та обчислювати фазу і амплітуду безпосередньо на чіпі.
- I2C інтерфейс: Для спілкування з мікроконтролерами та іншими системами.
- Внутрішній температурний сенсор: Для компенсації змін температури в електроніці.

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

-Мала величина споживання енергії: Ідеально підходить для портативних застосувань.

Переваги AD5933:

-Висока точність та надійність: Вбудовані функції генерації сигналу та обробки даних забезпечують високу точність вимірювань.

-Легкість інтеграції: Компактний розмір і мінімальна кількість зовнішніх компонентів роблять AD5933 легким для інтеграції у складні системи.

-Гнучкість застосування: Підтримка широкого діапазону частот і програмування через I2C дозволяють використовувати AD5933 в широкому спектрі застосувань, від медичних досліджень до промислового моніторингу.

-Автоматизація процесу вимірювання: Автоматичне сканування частот і обробка даних мінімізують потребу в ручному втручанні та складності програмування.

AD5933 є потужним рішенням для розробників, які потребують перетворювач імпедансу для точних і автоматизованих вимірювань в системах моніторингу стану, діагностики здоров'я, іншого обладнання, де критично важлива точність визначення імпедансу. [28].

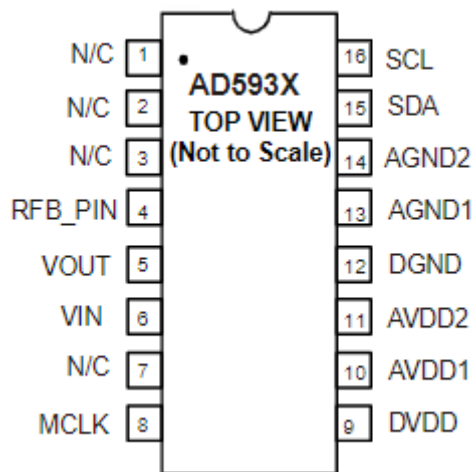


Рисунок 3.4 схема виводів генератора

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

3.7 Вибір підсилювача

У ультразвукових товщиномірах підсилювач відіграє критичну роль, адже це компонент, який забезпечує збільшення амплітуди відбитих ультразвукових хвиль до рівня, необхідного для ефективної обробки і аналізу. Це дозволяє точно визначити час прольоту хвилі і, відповідно, товщину матеріалу. Ось основні аспекти ролі підсилювача в ультразвуковому товщиномірі:

Посилення сигналу: Підсилювач збільшує амплітуду слабких ехо-сигналів, що повертаються від дна матеріалу, до рівня, який можна аналізувати. Відбиті ультразвукові хвилі часто є дуже слабкими через розсіювання, поглинання матеріалом або велику відстань.

Ключові характеристики

Чутливість: Підсилювач повинен бути достатньо чутливим, щоб виявляти надзвичайно слабкі сигнали.

Динамічний діапазон: Підсилювач має володіти широким динамічним діапазоном, щоб ефективно обробляти сигнали різної амплітуди без спотворень.

Посилення шуму: Ідеальний підсилювач повинен мінімізувати додавання шуму до сигналу, щоб не погіршувати якість отриманої інформації.

Типи підсилювачів

Аналогові підсилювачі: Традиційно використовуються в більшості ультразвукових систем. Вони можуть надавати високу точність і мінімальне введення шуму при правильному проектуванні.

Цифрові підсилювачі: Ці підсилювачі використовують цифрову обробку сигналів для посилення ультразвукових сигналів, що може включати фільтрацію, автоматичне регулювання посилення та інші функції. [29].

					<i>ПК01.041760.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		52

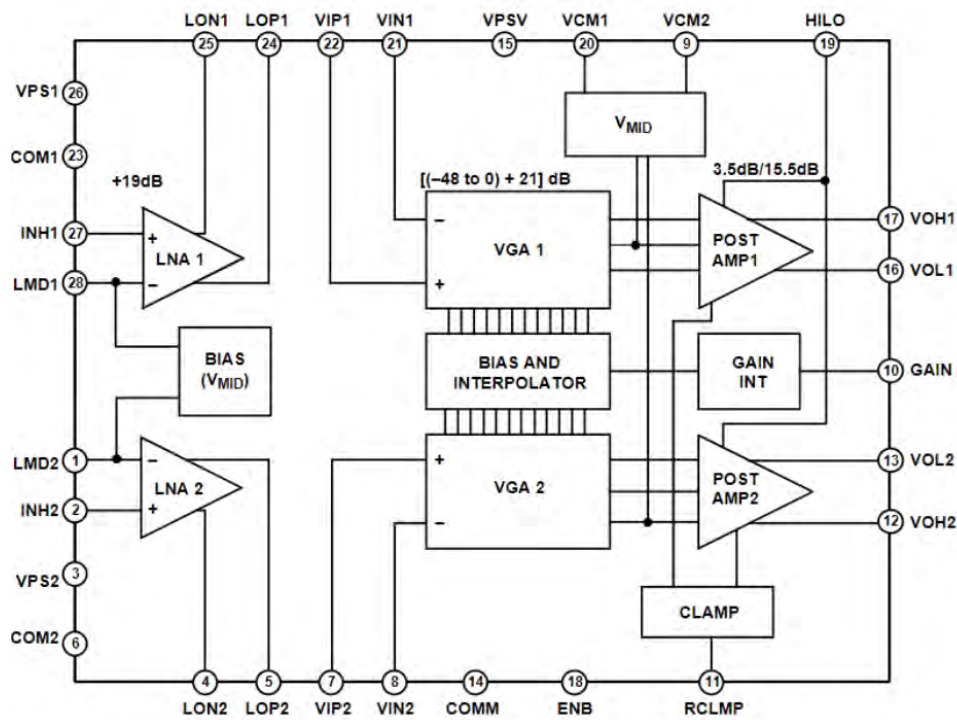


Рисунок 3.5 функціональна схема підсилювача

AD8031 від Analog Devices — це високопродуктивний оперативний підсилювач (операционный усилитель), який відомий своєю низькою вартістю та високою продуктивністю.

Основні характеристики:

-Широка смуга пропускання: AD8031 забезпечує смугу пропускання 80 МГц при зсуві настроювання $G = +1$, що робить його ідеальним для використання в швидкісних сигнальних застосуваннях.

-Швидкість наростання: 80 В/мкс, що дозволяє оперативному підсилювачу швидко реагувати на зміни вхідного сигналу.

-Низьке споживання енергії: AD8031 споживає всього 2.7 мА від джерела живлення ± 5 В, що робить його відмінним вибором для портативних застосувань.

-Робочий діапазон напруги: Підтримує широкий діапазон живлення від ± 2.5 В до ± 6 В, що забезпечує гнучкість в застосуваннях.

Висока вихідна струмова здатність: Може віддавати струм до ± 50 мА, що дозволяє керувати більшістю навантажень. [30].

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ПК01.041760.000 ПЗ

Арк.

53

-Мале вихідне зміщення: Забезпечує точне підсилення сигналів без значного зміщення.

Переваги:

-Висока продуктивність за низьку ціну: AD8031 пропонує високу швидкість та велику смугу пропускання за порівняно низьку ціну, що робить його доступним вибором для багатьох застосувань.

-Гнучкість застосування: Завдяки широкому діапазону напруги живлення та низькому споживанню енергії, AD8031 може використовуватися в різноманітних мобільних та стаціонарних застосуваннях.

-Низький рівень шуму: Його низький рівень шуму робить його підходящим для високоякісних аудіо застосувань та інших застосувань, де важлива чистота сигналу.

-Простота інтеграції: AD8031 має простий у використанні стандартний корпус, що полегшує його інтеграцію у більшість електронних систем.

AD8031 є ідеальним рішенням для розробників, які шукають потужний, але при цьому економічно вигідний оперативний підсилювач, що може бути застосований у великому спектрі електронних проектів.

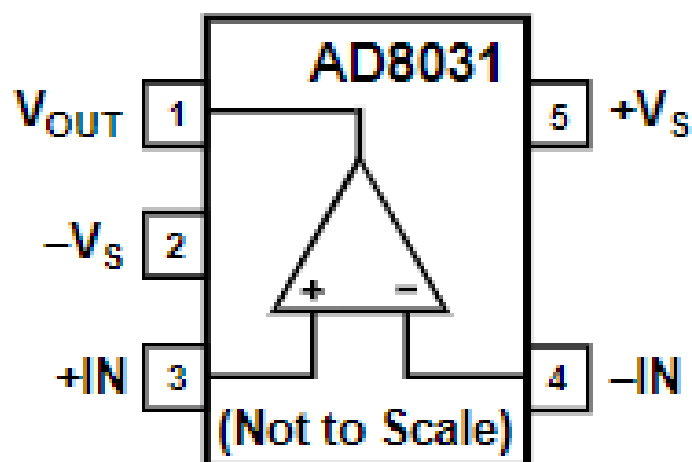


Рисунок 3.6 схема виводів підсилювача

3.8 Вибір АЦП

Аналого-цифровий перетворювач (АЦП) в ультразвуковому товщиномірі відіграє критичну роль у перетворенні аналогових ультразвукових сигналів, отриманих від датчиків, в цифрові дані для подальшої обробки та аналізу.

Основні функції АЦП:

Перетворення сигналу: АЦП перетворює аналогові сигнали, які відбиваються від внутрішніх структур об'єкта, на цифрові сигнали. Це перетворення необхідне, оскільки сучасні ультразвукові товщиноміри використовують цифрову обробку для аналізу сигналів.

Точність вимірювань: Висока роздільна здатність і швидкість перетворення АЦП дозволяють точно фіксувати моменти відбиття ультразвукових хвиль, що є ключем до точного вимірювання товщини.

Швидкість обробки: Швидкість, з якою АЦП може обробляти сигнали, критично важлива для реального часу вимірювань у промислових застосуваннях, де час реакції може впливати на контроль якості та виробничі процеси. [31].

Важливі характеристики АЦП:

Роздільна здатність: Це показує, наскільки дрібні зміни в аналоговому сигналі може розпізнати перетворювач. В ультразвукових товщиномірах зазвичай використовуються АЦП з роздільною здатністю від 8 до 16 біт, залежно від вимог до точності.

Швидкість дискретизації: Швидкість, з якою АЦП здатний вимірювати вхідний сигнал. Вища швидкість дискретизації краще для застосувань, де ультразвукові хвилі відбиваються від об'єкта дуже швидко.

Діапазон вхідних напруг: Важливо, щоб АЦП міг обробляти вхідний діапазон напруг, який очікується від ультразвукового датчика.

Сумісність з мікропроцесором: АЦП має бути сумісний з цифровою системою управління ультразвукового товщиноміра, включаючи простоту інтеграції та спілкування.

					<i>ПК01.041760.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		55

Застосування якісного АЦП є ключем до підвищення точності, ефективності та надійності ультразвукових товщиномірів, дозволяючи широко застосовувати ці технології в різних галузях промисловості.

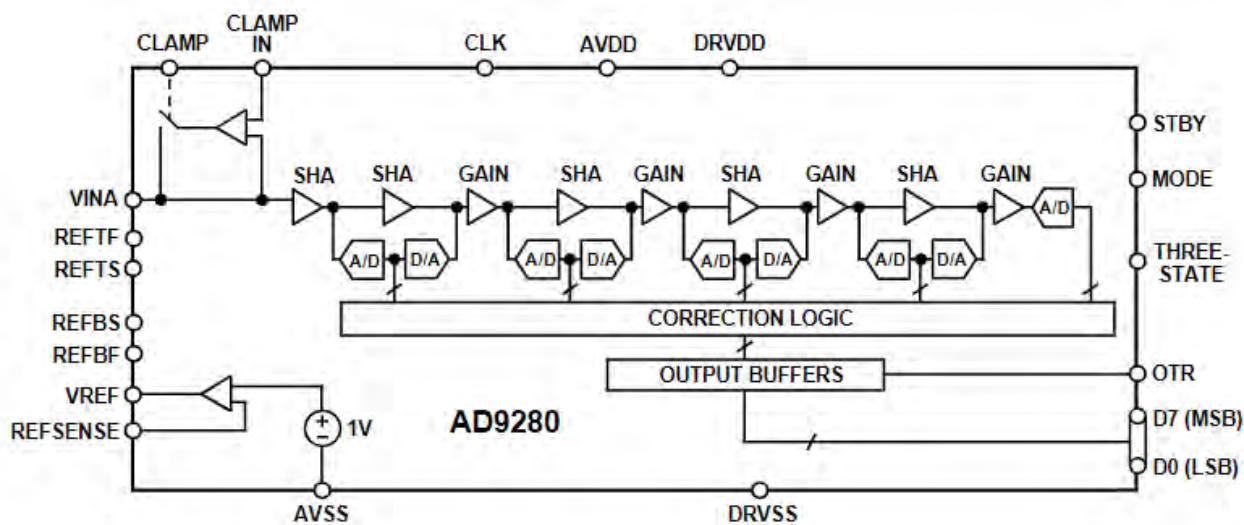


Рисунок 3.7 функціональна схема АЦП

AD9280 від Analog Devices є 8-бітним аналого-цифровим перетворювачем (АЦП) з високою швидкістю дискретизації, який широко застосовується у різноманітних системах обробки сигналів.

Основні характеристики AD9280:

Роздільна здатність: 8 біт, що забезпечує адекватну точність для багатьох застосувань в обробці відео та телекомунікаціях.

Швидкість дискретизації: Максимальна швидкість до 100 MSPS (мегавибірок за секунду), що дозволяє здійснювати швидку обробку високочастотних сигналів.

Вихідний інтерфейс: Паралельний вихід, який забезпечує швидку передачу даних до наступних стадій обробки.

Напруга живлення: 5 В, з типовим споживанням енергії 225 mW при повній швидкості, що є оптимальним для стаціонарних систем.

Переваги AD9280:

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

Висока продуктивність за помірну ціну: AD9280 пропонує добре співвідношення ціна/продуктивність, роблячи його доступним для широкого спектру промислових та комерційних застосувань.

Простота інтеграції: Паралельний інтерфейс спрощує інтеграцію цього АЦП з мікропроцесорами та FPGA, забезпечуючи гнучкість при проектуванні систем.

Надійність і стабільність: AD9280 забезпечує стабільну роботу і високу надійність, що є критично важливим для систем, що вимагають безперервної та безвідмовної роботи. [32].

Мінімізація шуму та спотворень: Низький рівень шуму і мінімізація спотворень при перетворенні забезпечують високу якість оброблених даних.

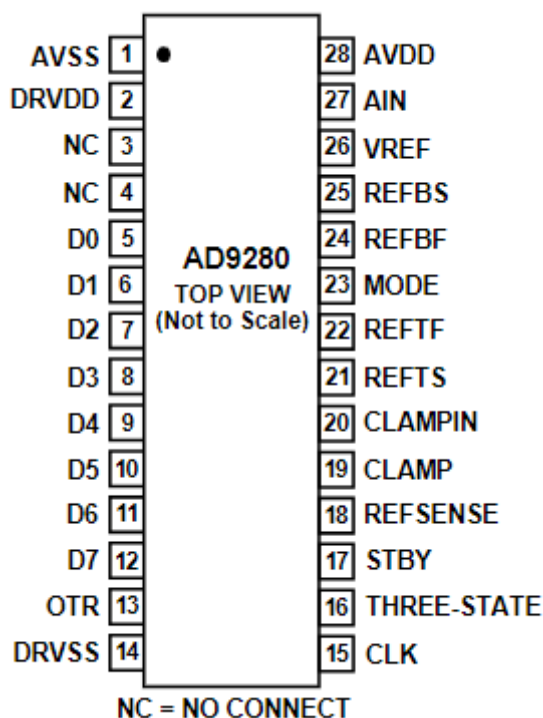


Рисунок 3.8 схема виводів АЦП

3.9 Вибір Bluetooth модуля

RN42 — це потужний Bluetooth модуль від Microchip, який забезпечує надійність, високу продуктивність та широкий спектр функціональності. Ось детальний огляд його основних характеристик і переваг:

Основні характеристики RN42:

Bluetooth версія: Підтримує Bluetooth 2.1 + EDR (Enhanced Data Rate), що забезпечує швидкість передачі даних до 3 Мбіт/с.

Профілі Bluetooth: Підтримує багато Bluetooth профілів, включаючи SPP (Serial Port Profile), HID (Human Interface Device) та інші, що робить його універсальним рішенням для різноманітних застосувань.

Підключення: Можливість одночасної підтримки до 7 одночасних з'єднань в режимі майстра, забезпечуючи зручність у використанні в багатозадачних додатках.

Модуляція: Підтримка модуляції FHSS (Frequency-Hopping Spread Spectrum), що покращує стабільність з'єднання і зменшує втручання.

Діапазон: Ефективний радіус дії до 100 метрів відкритим простором, що забезпечує велику гнучкість у розташуванні пристроїв.

Енергоспоживання: Низьке споживання енергії, з режимом сну для збереження батареї, коли з'єднання не активне. [33].



Рисунок 3.9 Бездротовий модуль передачі даних RN42

Переваги RN42:

Висока продуктивність і надійність: RN42 забезпечує стабільні, швидкі і надійні Bluetooth з'єднання, що є важливим для промислових застосувань і застосувань критичної місії.

Легкість інтеграції: Модуль легко інтегрувати у ваші проекти завдяки широкій підтримці профілів і стандартному інтерфейсу.

									Арк.
									58
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ПК01.041760.000 ПЗ				

Гнучкість у використанні: Підтримка численних Bluetooth профілів дозволяє використовувати модуль у широкому діапазоні застосувань, від простих серійних з'єднань до складніших інтерфейсів людсько-машинного взаємодії.

Простота програмування: Модуль можна програмувати та конфігурувати за допомогою простих AT-команд, що полегшує його налаштування і використання.

					<i>ПК01.041760.000 ПЗ</i>	Арк.
						59
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

РОЗДІЛ 4. РОЗРАХУНОК МОБІЛЬНОГО УЛЬТРАЗВУКОВОГО ТОВЩИНОМІРУ

4.1 Похибка зумовлена квантуванням АЦП

При обчисленні аналого-цифрового перетворювача (АЦП) головною помилкою є помилка квантування. Цифровий квантовий вимірювальний пристрій зазвичай використовує референсні значення, які або дорівнюють вимірюваному значенню, або належать до одного з можливих проміжних значень. Через порівняння рівнів квантування з введеним значенням і наступне кодування чисел, вихідний результат АЦП показує наближене значення для кожного заданого параметра вимірюваної величини.

Похибка роздільної здатності визначається як:

$$\Delta_{\text{квант}} = \frac{\Delta}{2}$$

Δ – Роздільна здатність АЦП

$$\Delta = \frac{1}{2^N} * 100\%$$

$$\Delta = \frac{1}{2^8} * 100\% = 0.4\%$$

$$\Delta_{\text{квант}} = \frac{0.4}{2} = 0.2\%$$

4.2 Похибка операційного підсилювача

Розрахунок відносної похибки операційного підсилювача виконується відповідно за наступною формулою:

$$\Delta_{\text{м}} = \frac{\Delta_{\text{к}}}{1 + K \frac{R_1}{R_1 + R_2}}$$

$\Delta_{\text{к}}$ - Мультиплікативна похибка, 0.1%

					<i>ПК01.041760.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		60

$$\Delta_M = \frac{0.1}{1 + 20 \frac{50}{50 + 1}} = 0.05\%$$

Загальна похибка вимірювання це добуток похибок підсилювача та АЦП:

$$\Delta_{\text{заг}} = \Delta_{\text{квант}} \cdot \Delta_{\text{підс}} = 0,2\% \cdot 0,05\% = 0,01\%$$

4.3 Оцінка вірогідності контролю

Оцінка ймовірності помилок є ключовим аспектом контрольних розрахунків. В процесі контролю можливі два види помилок. Перший тип помилки виникає, коли бездефектний зразок помилково класифікується як дефектний. Другий тип помилки стається, коли дефектний зразок оцінюється як бездефектний. Дані про наявність дефекту отримують з вихідного сигналу п'єзоелектричного перетворювача. При цьому використовують відхилення, яке встановлено на рівні 1% як критерій. Похибки обох типів мають однакову ймовірність виникнення і становлять по 1%. [34].

$$\alpha = 1\%, \beta = 1\%$$

Обрховуємо:

$$P = 1 - (\alpha + \beta) = 1 - (0,01 + 0,01) = 0,98 = 98\%$$

Отже вірогідність контролю дорівнює 98%.

					<i>ПК01.041760.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		61

ВИСНОВОК

Головною метою дипломного проекту була розробка мобільного ультразвукового товщиноміра, який повинен передавати виміряну інформацію на пристрої через bluetooth, забезпечуючи при цьому конкурентоспроможні технічні характеристики. Проектування приладу базувалося на луна-імпульсному методі товщиномірії, що дозволило ефективно використовувати ультразвукові хвилі для точного вимірювання товщини матеріалів.

Було проведено ретельний розрахунок перетворювача та товщини просвітлюючого шару, які стали основою для розробки структурної схеми та конструкції приладу. Структурна схема приладу була розроблена з урахуванням усіх технічних та функціональних вимог, забезпечуючи компактність, надійність і вартісну ефективність приладу.

Крім того, було розроблено функціональну схему та структу, що дозволяє передавати зібрані дані на мобільні пристрої для подальшого аналізу. Це забезпечило можливість швидкого та зручного доступу до результатів вимірювань, що є важливим аспектом в практичному застосуванні ультразвукового товщиноміра в різних галузях промисловості.

Таким чином, проект вдалося реалізувати з урахуванням всіх поставлених цілей і задач, демонструючи високий потенціал ультразвукової товщинометрії в модернізації контрольних та діагностичних процесів.

					<i>ПК01.041760.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		62

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- [1] Kren A.P., Delendyk M.N., Ivanov V.P. Industry 4.0: Transformations in Non-Destructive Testing. Science and innovation. 2019. No. 2 (192). P. 28–32.
- [2] Petryk, V. Ultrasound Flaw Detector Based on a Mobile Phone / Valentyn Petryk, Anatolii Protasov // CUTTING-EDGE SCIENCE – 2019 : materials of the International XV scientific and practical conference, Sheffield, April 30–May 7, 2019. – Sheffield : «Science and aducation» LTD, 2019. – Volume 14. – P. 64–66.
- [3] Галаган Р.М. Теоретичні основи ультразвукового неруйнівного контролю: підручник / Р. М. Галаган. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 263 с.
- [4] Петрик В.Ф. Використання серійних мобільних пристроїв при проектуванні портативних дефектоскопів / Петрик В.Ф., Протасов А.Г., Серый К.Н., Повшенко А.А. // Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: технічні науки. – 2019. - Том 30 (69), Ч. 2, № 6. - С.12-16.
- [5] Куц, Ю.В. Исследование импульсной вихретоковой системы контроля диэлектрических покрытий / Ю. В. Куц, В. Ф. Петрик, О. Л. Дугин, Ю. Ю. Лисенко // Журнал «Научни Известия НТСМ»: материалы международной конференции «Дни НК 2014», 09-18 червня, 2014 р. – Созополь, 2014. – № 150 – С. 28–30
- [6] Povshenko, O. Portable Ultrasound Flaw Detector / O. Povshenko, V. Petryk, A. Protasov // Неруйнівний контроль в контексті асоційованого членства України в Європейському Союзі : матеріали 2-гої науково-технічної конференції, Польща, м. Люблін, 15-19 жовтня 2018 року. - Люблін, Польща, 2018.- С. 34-36.
- [7] Барановський, Д. В. Бездротовий ультразвуковий дефектоскоп / Д. В. Барановський // XII Всеукраїнська науково-практична конференція студентів, аспірантів та молодих вчених «Погляд у майбутнє приладобудування», 15-16 травня 2019 р., м. Київ, Україна : збірник праць / КПІ ім. Ігоря Сікорського, ПБФ. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – С. 346–349.
- [8] Основи ультразвукового неруйнівного контролю: Підручник / В.К. Цапенко, Ю.В. Куц – К.: НТУУ «КПІ». – 2010. – 448 с.

					<i>ПК01.041760.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		63

- [9] Галаган Р.М. Комп'ютерне проектування електронних схем. Комп'ютерний практикум: навчальний посібник. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. – 419 с.
- [10] A.M. Robinson, B.W. Drinkwater, J. Allin. (2003) Dry-coupled low-frequency ultrasonic wheel probes: application to adhesive bond inspection. NDT&E International, 36, 27–36.
- [11] Миргородський, О. О. Бездротова передача даних в задачах неруйнівного контролю та автоматизації / О. О. Миргородський, В. Ф. Петрик // XI Науково-практична конференція студентів та аспірантів «Погляд у майбутнє приладобудування», 15-16 травня 2018 р., м. Київ, Україна : збірник статей / КПІ ім. Ігоря Сікорського, ПБФ. – Київ : Центр учбової літератури, 2018. – С. 438–440.
- [12] Топіха, Д. О. Мобільний ультразвуковий дефектоскоп / Д. О. Топіха, В. Ф. Петрик // IV науково-практична конференція студентів і молодих учених «Методи та засоби неруйнівного контролю промислового обладнання», м. Івано-Франківськ, 26-27 листопада 2013 р. – Івано-Франківськ : ІФНТУНГ, 2013. – С. 175-176.
- [13] Dual, Ultralow Noise Variable Gain Amplifier AD604. – Norwood, MA 02062-9106, U.S.A: Analog Devices, Inc, 2010. – 32с.
- [14] Voltage Output, 4-Quadrant Multiplier AD835. – Norwood, MA 02062-9106, U.S.A: Analog Devices, Inc, 2014. – 14с.
- [15] Petryk V.F.; Protasov, A.G.; Galagan, R.M.; Muraviov, A.V.; Lysenko, I.I. Smartphone-Based Automated Non-Destructive Testing Devices. Devices Methods Meas. 2020, 11, 272–278.
- [16] 10-Bit, 40 MSPS/60 MSPS A/D Converter AD9050. – Norwood, MA 02062-9106, U.S.A: Analog Devices, Inc, 1997. – 12с.
- [17] Ultralow Distortion, Wide Bandwidth Voltage Feedback Op Amps AD9631. – Norwood, MA 02062-9106, U.S.A: Analog Devices, Inc, 2014. – 20с.
- [18] FIFO IDT72225LB10J. – San Jose: Integrated Device Technology, Inc, 2013. – 16с.
- [19] ГОСТ 12503-75 Сталь. Методы УЗ контроля качества, 2018 г. – 4 с.
- [20] Харківський національний університет радіоелектроніки; Матеріали XXIV

										Арк.
										64
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	<i>ПК01.041760.000 ПЗ</i>					

Міжнародного Молодіжного Форуму «Радіоелектроніка Та Молодь У ХХІ Столітті», том 2 [редкол: І.Ш. Невлюдов та ін.]. – Харків:ХНУРЕ, 2020- Вип. 43 - 44 с.

- [21] Методичні вказівки до магістерської атестаційної роботи для студентів спеціальності 8.05090203 «Інтелектуальні технології мікросистемної радіоелектронної техніки» / Упоряд: І.Ш. Невлюдов, В.А. Палагін, Є.А. Разумов-Фризюк, І.В. Жарікова. - Харків: ХНУРЕ. - 2011. - 49 с.
- [22] ДСТУ 3008-15. документація. звіти у сфері науки і техніки. структура і правила оформлення – Введ. 2015-06-22. – К. Держстандарт України, 2017 – 29с.
- [23] Основи наукових досліджень: Навч. посібник / І.Ш. Невлюдов, Ю.М. Олександров, А.О. Андрусевич, О.О. Чала. – Кривий Ріг: Криворізький коледж НАУ, 2019. – 396 с.
- [24] Невлюдов І.Ш. Виробничі процеси та обладнання об'єктів автоматизації: Підручник. – Кривий Ріг: КК НАУ, 2017. – 444 с.
- [25] Техніко-економічне обґрунтування інженерних рішень в автоматизованому виробництві: Підручник / І.Ш. Невлюдов. – Кривий Ріг : Криворізький коледж НАУ, 2019 р. – 448 с
- [26] Білокур І. П. Акустичний контроль: Навчальний посібник. — К.: ІЗМН, 1999 г. – 244 с. 12. ГОСТ 20415-82 Контроль неразрушающий. Методы акустические. Общие положения, 2018 г. – 4 с.
- [27] Петрик, В. Ф. Метрологія, стандартизація та сертифікація в неруйнівному контролі: навчальний посібник з дисциплін «Метрологія» та «Сертифікація і стандартизація» / В. Ф. Петрик, А. Г. Протасов ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 3,04 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2015. – 266 с.
- [28] Куц, Ю. В. Новітні системи та технології. Частина І. Загальні питання побудови та опрацювання даних в комп'ютерно-інтегрованих системах НКТД [Електронний ресурс] / Ю. В. Куц, Ю. Ю. Лисенко, А. С. Момот ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 123 с

					<i>ПК01.041760.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		65

- [29] Єременко В.С. Шляхи мінімізації сумарної похибки вимірювання швидкості ультразвуку в матеріалах з неоднорідною структурою / В.С. Єременко, Р.М. Галаган // Електротехнічні та комп'ютерні системи. Науково-технічний журнал. – Одеса. – 2012. – № 06 (82). – С. 39-45.
- [30] В. Малько, Ю. Куц, Ю. Лисенко, і Л. Щербак, «Метод ультразвукової фазової двокоординатної реєстрації інформації для систем автоматизованого неруйнівного контролю», Bull. Kyiv Polytech. Inst. Ser. Instrum. Mak., вип. 65(1), с. 88–95.
- [31] 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.
- [32] 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.
- [33] Куц Ю.В. Застосування фазових характеристик сигналу в автоматизованій вихрострумовій дефектокопії / М.О. Редька, Ю.В. Куц, Є.В. Шаповалов, В.М. Учанін, Ю.Ю. Лисенко, О.Д. Близнюк // Технічна діагностика і неруйнівний контроль, 2022, №1, стор. 45-53.
- [34] 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.
- [35] - Куц Ю.В. Спосіб ультразвукового вимірювання товщини виробів / Ю.В. Куц, Лисенко Ю.Ю., Редька М.О. // Патент України на корисну модель № 136624. G01B17/00(2006.01). – u201902545; Заявлено 15.03.2019; Опубл.27.08.2019, Бюл. № 16. – 4с
- [36] Застосування кругових статистик для виявлення сигналу ультразвукового неруйнівного контролю / Ю.В. Куц, Ю.Ю. Лисенко, М.О. Редька, О.Д. Близнюк // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. — 2018. — № 2. — С. 32-36.

					<i>ПК01.041760.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		66