

**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

«___» _____ 2023 р.

Дипломний проект

на здобуття ступеня бакалавра

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

на тему: «Автоматизований портативний ультразвуковий товщиномір»

Виконав: студент IV курсу, групи ПК-91 Пітух Ілля Олександрович _____

Керівник: доцент, к.т.н. Богдан Галина Анатоліївна _____

Рецензент: _____

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

Студент _____
(підпис)

Київ – 2023 року

ВІДОМІСТЬ ДИПЛОМНОГО ПРОЕКТУ

№ з/п	Формат	Позначення	Найменування	Кількість листів	Примітка
1	A4	ПК 91.16.1760.000 ПЗ	Пояснювальна записка	60	
2	A1	ПК 91.16.1760.001 E1	Схема структурна	1	
3	A1	ПК 91.16.1760.002 E2	Схема функціональна	1	
4	A1	ПК 91.16.1760.003 СК	Складальний кресленик	1	
5	A1	ПК 91.16.1760.004	Схема акустичного тракту	1	
6	A1	ПК 91.16.1760.005	Алгоритм	1	

				ДП ПК91 00.000.00		
	ПІБ	Підп.	Дата			
Розробник	Пітух І. О.			Відомість дипломного проекту	Лист	Листів
Керівник	Богдан Г.А.				1	1
Консульт.					КПІ ім. Ігоря Сікорського Каф. АСНК Гр. ПК-91	
Н/контр.						
Зав. каф.	Киричук Ю.В.					

**Пояснювальна записка
до дипломного проєкту
на тему: «Автоматизований портативний
ультразвуковий товщиномір»**

Київ – 2023 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 «Роботизовані і автоматизовані системи неруйнівного контролю та діагностики»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Юрій КИРИЧУК

«__» _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ

на дипломний проєкт студенту

Пітух Ілля Олександрович

1. Тема роботи «Автоматизований портативний ультразвуковий товщиномір», керівник роботи Богдан Галина Анатоліївна, кандидат технічних наук, доцент, затверджені наказом по університету від «30» травня 2034 р. №2057-с
2. Термін подання студентом проєкту 16 червня 2023 року.
3. Вихідні дані до проєкту: ультразвуковий луна-імпульсний метод контролю; частота перетворювача – 2.5 МГц; тип перетворювача – прямий; діаметр перетворювача – 15мм; технологія бездротової передачі даних – Bluetooth.
4. Зміст пояснювальної записки

Вступ

1. Аналітичний огляд
2. Розрахунок акустичного тракту та перетворювача
3. Вибір та обґрунтування структурної схеми та підбір компонентів

Висновки

Список використаних джерел

5. Перелік ілюстративного матеріалу (із зазначенням плакатів, презентацій тощо) 3 креслиників 2 плакати

1 – Схема електрична структурна

2 – Схема електрична функціональна

3 – Складальний кресленик

4 – Структура акустичного тракту

5 - Алгоритм

7. Дата видачі завдання 01 березня 2023 року.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Формулювання завдання проекту	12.02.2023	
2	Проведення аналітичного огляду	18.05.2023	
3	Розрахунок акустичного тракту	21.05.2023	
4	Підбір компонентів	28.05.2023	
5	Розробка креслеників	01.06.2023	

Студент

Ілля ПІТУХ

Керівник

Галина БОГДАН

Анотація

В даному бакалаврському проєкті був спроектований ультразвуковий товщиномір, для контролю металевих виробів, головною особливістю якого є можливість синхронізації з мобільними пристроями на базі операційної системи Android.

Перший розділ присвячено було аналізу областей застосування ультразвукових товщиномірів та актуальність їх використання. Була зроблена порівняльна характеристика найпопулярніших в наш час товщиномірів за фізичним принципом вимірювання, а саме ультразвуковий та вихрострумний. Також розглянуті різні методи ультразвукової товщинометрії, їх аналіз дав можливість підібрати ультразвуковий метод вимірювання товщини для проєктованого приладу. Розглянуто технічні характеристики вже існуючих приладів із можливістю синхронізації, та обґрунтована її актуальність.

У другому розділі обґрунтована структура акустичного тракту для проєктованого приладу і його особливостей, після чого був розрахований коефіцієнт акустичного тракту. Розрахунки дозволили синтезувати структурну схему приладу, та виконати підбір його компонентів.

Ключові слова: ультразвукова товщинометрія, товщиномір, портативний прилад, синхронізація із мобільним пристроєм.

Annotation

In this bachelor's project, an ultrasonic thickness gauge was designed to control metal products, the main feature of which is the ability to synchronize with mobile devices based on the Android operating system.

The first section was devoted to the analysis of the areas of application of ultrasonic thickness gauges and the relevance of their use. A comparative description of the most popular thickness gauges in our time was made according to the physical principles of measurement, namely ultrasonic and eddy current. Different methods of ultrasonic thickness measurement are also considered, and their analysis made it possible to select an ultrasonic method of thickness measurement for the designed device. The technical characteristics of existing devices with the possibility of synchronization are considered, and their relevance is substantiated.

The second section substantiates the structure of the acoustic path for the designed device and its features, after which the acoustic path coefficient was calculated. The calculations made it possible to synthesize the structural diagram of the device and select its components.

Keywords: ultrasonic thickness measurement, thickness gauge, portable device, synchronisation with a mobile device.

Зміст	
ВСТУП	9
Перелік скорочень.....	10
РОЗДІЛ 1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД.....	11
1.1 Области застосування товщиномірів і актуальність їх використання	11
1.2 Порівняльна характеристика ефективності використання ультразвукових та вихроstromових товщиномірів при контролі товщини різних типів матеріалів:.....	13
1.3 Обґрунтування методу УЗК для контролю певних виробів.....	17
1.4 Методи ультразвукової товщинометрії.....	19
1.5 Методи вимірювання часової затримки	27
1.6 Обґрунтування методу ультразвукового контролю для визначення товщини металевих виробів.....	29
1.7 Аналіз існуючих технічних рішень.....	30
Висновки до розділу 1	36
РОЗДІЛ 2 РОЗРАХУНОК АКУСТИЧНОГО ТРАКТУ ТА ПЕРЕТВОРЮВАЧА ПРИЛАДУ.....	37
2.1 Обґрунтування структури акустичного тракту.....	37
2.2 Розрахунок перетворювача та коефіцієнта акустичного тракту	40
Висновки до розділу 2	43
РОЗДІЛ 3 ВИБІР ТА ОБҐРУНТУВАННЯ СТРУКТУРНОЇ СХЕМИ ТА ПІДБІР КОМПОНЕНТІВ	44
3.1 Структурна схема приладу	44
3.2 Алгоритм отримання, обробки та передачі даних на мобільний пристрій за допомогою технології Bluetooth	46
3.3 Підбір основних компонентів для портативного ультразвукового товщиноміру із можливістю синхронізації з пристроями на базі ОС Android.	48
Висновки	58
Список використаних джерел.....	59

					ПК 91.120000.000ПЗ			
<i>Змн.</i>	<i>Ар</i>	<i>№ до</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>				
<i>Розробив</i>	Пітух І.О				Автоматизований портативний ультразвуковий товщиномір	<i>Літ.</i>	<i>Арк.</i>	<i>Акрушів</i>
<i>Перевір.рев</i>	Богдан Г.А.						8	
<i>Реценз.</i>						ПБФ, ПК-91		
<i>Н. Контр.</i>								
<i>Затверд.</i>	Богдан Г.А.							

ВСТУП

На сьогодні товщинометрія є широко поширеним методом неруйнівного контролю (НК), який дозволяє виміряти товщину матеріалів без їх фізичного пошкодження. Часто товщина виробу чи матеріалу відіграє важливу роль у забезпеченні міцності та надійності об'єкта контролю (ОК).

Використання ультразвукового неруйнівного контролю (УЗК) в товщинометрії дало змогу вимірювати товщину обширної кількості матеріалів включаючи метали та неметали. Через, що УЗК використовується, як метод товщинометрії для виробів із різних галузей промисловості.

Методи ультразвукової товщинометрії дозволяють забезпечити високу точність та надійність результатів контролю, вони мають багато переваг в порівнянні з іншими методами НК, які застосовуються в товщинометрії.

В цілому виробники приладів НК, пропонують синхронізацію своїх приладів із мобільними пристроями на базі ОС Android, лише як додаткову функцію для своїх приладів, і як правило такі прилади коштують дорожче ніж традиційні. Дивлячись на те, що в наш час мобільні телефони знаходяться в кожного «під рукою», можна розглянути синхронізацію, не просто як додаткову функцію для приладів НК, а як їх повноцінну частину. Такий підхід дозволяє значно зменшити ціну приладу, адже ми можемо використовувати потужності телефону, а не мікроконтролер приладу, для обробки даних з датчику, так само можна спростити інтерфейс приладу, або взагалі його прибрати, що зробить прилад компактним та мобільним, та дозволить операторам НК простіше проводити вимірювання об'єктів складного профілю.

					ПК 91.120000.000ПЗ	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Перелік скорочень

НК – неруйнівний контроль

ОК – об'єкт контролю

УЗК – ультразвуковий контроль

ВП – випромінювач

ПЕП – п'єзоелектричний перетворювач

					ПК 91.120000.000ПЗ	Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД.

1.1 Области застосування товщиномірів і актуальність їх використання

На сьогодні товщинометрія – дуже поширений метод неруйнівного контролю (НК), який дозволяє виміряти товщину матеріалів без їх фізичного пошкодження, дуже часто товщина виробу чи матеріалу відіграє важливу роль для забезпечення міцності та надійності об'єкта контролю (ОК).

Використання товщинометрії в різних галузях промисловості

Безліч промислових галузей, таких як: металургія, машинобудування, авіаційна та космічна промисловість, енергетична промисловість, суднобудування, нафтогазова, хімічна та фармацевтична промисловість, виробництво пластмас та композитних матеріалів – потребують в неруйнівному контролі товщини матеріалів.

Відповідно, товщинометрія застосовується для контролю великої кількості різних типів матеріалів, таких як:

- Метали – алюміній, мідь, титан, сталі, чавун, сплави з легких металів та інші кольорові метали.
- Не метали – кераміка, скло, пластмаси, гума, бетон, скловолокно, композити, деревина, лакофарбове покриття та органічні тканини.

Види товщиномірів за фізичним принципом вимірювання

Прилад, який вимірює товщину матеріалів називається – товщиномір. Їх можна класифікувати за фізичним принципом вимірювання:

- Ультразвукові – їх робота основана на аналізі параметрів пружної хвилі, що взаємодіє з матеріалом ОК. Найпоширенішим методом ультразвукової товщинометрії є луна-імпульсний ультразвуковий метод. Визначення товщини здійснюється на основі результатів вимірювання інтервалу часу між зондувальним імпульсом та віддзеркаленим від задньої стінки виробу луно-сигналом.

					ПК 91.120000.000ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		11

- Вихрострумові – базуються на встановленні та аналізі взаємодії електромагнітного поля з електромагнітним полем вихрових струмів, що наводяться у матеріалі ОК, Їх використовують лише для контролю виробів з струмопровідних матеріалів.

- Магнітні – ґрунтуються на аналізі взаємодії магнітного поля з матеріалом ОК.

- Електромагнітні – базуються на принципі електромагнітної індукції

- Радіаційні – принцип їх дії оснований на частковому поглинанні променів при проходженні випромінювання через матеріал ОК.

Найпоширенішими методами неруйнівного контролю при побудові товщиномірів є ультразвуковий та вихрострумовий.

					ПК 91.120000.000ПЗ	Арк.
						12
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1.2 Порівняльна характеристика ефективності використання ультразвукових та вихрострумових товщиномірів при контролі товщини різних типів матеріалів:

Матеріал	Можливість контролю за допомогою товщиноміру	Допустима товщина контролю, мм	Точність вимірювання, мм
Алюміній	<i>Ультразвуковий</i> Ультразвуковий метод широко застосовується для контролю товщини алюмінію. Ультразвукові частоти від 7.5 до 10 МГц використовуються для алюмінієвих профілів діаметром до 75мм. Для більш товстих профілів, товщина яких сягає до 500мм, може використовуватись частота 5МГц.	0.2 - 500	0.01 – 0.1
	<i>Вихростумовий</i> Для контролю алюмінію цим методом зазвичай обирають частоту збудження струмів - 60кГц	0.1 - 100	0.01 – 0.1
Мідь	<i>Ультразвуковий</i> Зазвичай при контролі товщини міді за допомогою ультразвукових товщиномірів використовують частоти в діапазоні: 2-5МГц.	0.08 - 635	0.05 – 0.2
	<i>Вихрострумний</i> Вихрострумний метод контролю товщини є ефективним для контролю міді	0.1 - 300	0.01 – 0.1
Сталь	<i>Ультразвуковий</i> Так само як і для алюмінію ультразвуковий метод дослідження є популярним вибором для контролю товщини сталі. В залежності від стану поверхні,	0.1 - 635	0.05 – 0.1

	використовують частоти в діапазоні: 1 – 10МГц Частоти від 1 – 10 МГц		
	<i>Вихрострумовий</i> Сталь піддається вихрострумовому контролю товщини, зазвичай використовують частоту вихрострумової хвилі в 60КГц	До 50	Від 0.01
Титан	<i>Ультразвуковий</i> Титан часто застосовують в авіаційній техніці і підлягає контролю за допомогою ультразвуку. Зазвичай для контролю використовують частоту 5МГц, але в залежності від моделі товщиноміру цей діапазон може варіюватись в значеннях: 1 – 20МГц	0.15 - 635	0.05 – 1
	<i>Вихрострумовий</i> Зазвичай для контролю вихрострумового контролю товщини титану, використовують частоту вихрострумової хвилі від 50кГц	0.2 - 50	Від 0.01
Чавун	<i>Ультразвуковий</i> В залежності від типу чавуну (сірого, білого, ковкого та інш.) використовують частоти в діапазоні: 1-10МГц	0.15 - 600	0.01 – 0.1
	<i>Вихрострумовий</i> Як у випадку з титаном використовують частоту від 50КГц	0.1 - 150	Від 0.01
Кераміка	<i>Ультразвуковий</i> Кераміка, підлягає ультразвуковому контролю, але тільки якщо вона щільно випалена, тоді вона за	0.15 - 635	0.01 – 0.1

	<p>коефіцієнтом пропускання та акустичною швидкістю досягає близьких до сталі значень. Зазвичай використовують поздовжні хвилі, частотою 5МГц і вище.</p>		
	<p><i>Вихрострумний</i> Кераміка не є провідним матеріалом, тому вихрострумний метод не використовується для контролю кераміки.</p>	-	-
Скло	<p><i>Ультразвуковий</i> Контроль товщини скла може бути проведений за допомогою ультразвукового товщиноміру, допустима товщина контролю та точність вимірювань сильно залежать від конкретних властивостей скла та його структури. Скло має дуже малий коефіцієнт затухання та високу акустичну швидкість. Частоти ультразвукової хвилі використовують в залежності від товщини скла. Для тонких шарів скла використовують високочастотні хвилі в діапазоні: 7.5 – 10МГц. Для товстого скла: 1-5МГц.</p>	0.08 - 635	0.01
	<p><i>Вихрострумний</i> Скло є діелектриком, тому вихрострумний метод не використовується для контролю скла.</p>	-	-
Пластмаси	<p><i>Ультразвуковий</i> Ультразвуковий контроль пластмас ефективний тільки для твердих видів пластмас без</p>	0.1 - 500	0.05 – 0.1

	наповнювачів, таких як акрилові смоли, литі смоли, полістирол, тефлон та інш. Адже вони є дуже сильними звукопоглиначами навіть при низьких частотах.		
	<i>Вихрострумний</i> Пластмаса є діелектриком, тому вихрострумний метод не використовується для контролю пластмас.	-	-
Гума	<i>Ультразвуковий</i> Вулканізований натуральний каучук без наповнювачів можна контролювати за допомогою ультразвуку, в такому випадку можна проводити контроль до декількох сантиметрів на частотах до 2МГц, але зазвичай комерційні марки містять наповнювачі, такі як вуглець, які значно збільшують згасання, в такому випадку можна розглядати частоти в діапазоні: 100КГц – 1МГц.	1.2 – 200	0.05 – 0.1
	<i>Вихрострумний</i> Гума не є провідним матеріалом, тому вихрострумний метод не використовується для контролю гуми.	-	-

1.3 Обґрунтування методу УЗК для контролю певних виробів.

Ультразвукові хвилі поширюються у більшості металів, таких як: сталь, алюміній, мідь, титан, нікель та його сплави та інш., що дозволяє проводити ультразвуковий контроль великої кількості виробів з металу, в різних галузях промисловості [1].

Ультразвуковий контроль первинних прокатних виробів

Надійність готових компонентів залежить від надійності проміжних продуктів, тому неруйнівний контроль первинних прокатних виробів, таких як прутки, пластини, і труби, з яких виготовляються готові компоненти, є важливим завданням для забезпечення надійності продукції.

Ультразвуковий контроль є найбільш ефективним неруйнівним методом для контролю товщини та знаходження підповерхневих неоднорідностей, які зазвичай зустрічаються в прутках, пластинах і трубах, його застосовують для прокатних виробів зі сталі, нержавіючої сталі, нікелю, нікелевих сплавів, кобальту, та інших кольорових сплавів.

Ультразвуковий контроль трубопроводів

Для оцінки стану металевих труб широко застосовують ультразвукові методи неруйнівного контролю. За допомогою них можна визначити такі дефекти як корозія, тріщини, різноманітні включення, також ультразвукові методи використовують для визначення товщини стінки труби, це дозволяє вчасно виявити знос труб, та запобігти можливим аваріям. Те, що ультразвук поширюється у великій кількості металів робить його універсальним для контролю різних трубопроводів.

					ПК 91.120000.000ПЗ	Арк.
						17
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Ультразвуковий контроль рухомих елементів

Ультразвуковий контроль використовують для рухомих металевих частин таких як вали, шпинделя, зубчаті передачі. Окрім виявлення підповерхневих дефектів, ультразвук також використовують для виявлення втрати металу, або його нерівномірностей в процесі експлуатації. За допомогою ультразвуку можна вимірювати геометричні розміри, такі як діаметр, довжину, та інші важливі розміри рухомих металевих елементів для забезпечення точності механізмів де вони використовуються.

Ультразвуковий контроль виробів авіаційної та космічної промисловості

Під дією температур та фізичного навантаження у металевих компонентах авіаційної та космічної промисловості можуть виникати тріщини дуже малих розмірів, які ефективно можна виявити за допомогою ультразвукового методу. Виявлення корозії та оксидних відкладів на поверхні металевих виробів також проводиться використовуючи ультразвук. Окрім цього УЗК дозволяє оцінити структуру та властивості матеріалів, наприклад кристалічну ґратку, гомогенність та однорідність. УЗК також використовують для вимірювання товщини в корпусах двигунів, обшивки космічних апаратів та трубопроводах.

Ультразвуковий контроль каркасів мостів

Своєчасне проведення каркасів мостів дуже важливо для забезпечення безпеки інфраструктури. Вони постійно знаходяться під впливом фізичних навантажень через, що з часом в конструкціях утворюються тріщини, корозія, оксидні відкладення, та інші дефекти які впливають на міцність та надійність конструкції. За допомогою ультразвуку в каркасах мостів ефективно виявляються дефекти, вимірюється товщина елементів конструкції та проводиться оцінка структури і властивостей її матеріалів. Однією із переваг УЗК є можливість моніторингу зносу каркасу протягом всього його експлуатаційного життя.

					ПК 91.120000.000ПЗ	Арк.
						18
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Ультразвуковий контроль котлів та резервуарів

Контроль котлів та резервуарів які використовують в енергетиці та нафтогазовій промисловості проводять, для запобігання аварій та забезпечення тривалої експлуатації промислових об'єктів. Як і в минулих випадках УЗК використовують для вимірювань товщини стінок котлів та резервуарів, виявлення корозії, дефектів та оксидних відкладів, а також для оцінки структури та властивостей матеріалу.

Ультразвуковий контроль в автомобільній промисловості

Ультразвуковий метод НК в автомобільній промисловості використовують на всіх етапах виробництва, наприклад для вимірювання металевих листів кузова автомобіля, виявлення дефектів у литих деталях, оцінки та якості зварних з'єднань, для виявлення дефектів у важливих деталях двигуна.

Частота ультразвукової хвилі повинна бути якомога вищою. Зазвичай для контролю металевих виробів використовують частоти які варіюються від 1 до 10МГц. Частоту підбирають в залежності від критерій випробовування, та структури зерна металу.

1.4 Методи ультразвукової товщинометрії.

Луна-імпульсний метод з еталонуванням

Ультразвуковий імпульс посиляється в ОК він в ньому поширюється, доходить до межі цього об'єкту це може бути задня стінка об'єкту, на межі поділу двох середовищ, наприклад тверде тіло – повітря, вся акустична енергія віддзеркалюється від цієї межі і відповідно повертається назад до перетворювача, потрібно згадати, що вимірювання товщини за допомогою ультразвукового товщиноміру є непрямим вимірюванням, адже вимірювальним параметром в даному випадку є інтервал часу, за який ультразвуковий імпульс пройде шлях від перетворювача до межі поділу двох середовищ і повернеться

					ПК 91.120000.000ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		19

назад до приймача, а товщина вже потім розраховується, при цьому датчик може мати як суміщену конструкцію, так і роздільно-суміщену.

В цьому методі товщина визначається за формулою:

$$H = \frac{C \cdot T}{2}$$

Де C – швидкість поширення ультразвукових хвиль в матеріалі ОК, T – інтервал часу який проходить хвиля в прямому і зворотному напрямках.

В цьому методі прилад вимірює тільки проміжок часу T , тоді як швидкість поширення ультразвукових хвиль є відомою, її налаштовують по заготовленому зразку з того ж самого матеріалу, що і ОК, але з відомою товщиною, таким чином здійснюють калібрування приладу по еталону, тому метод і отримав таку назву.

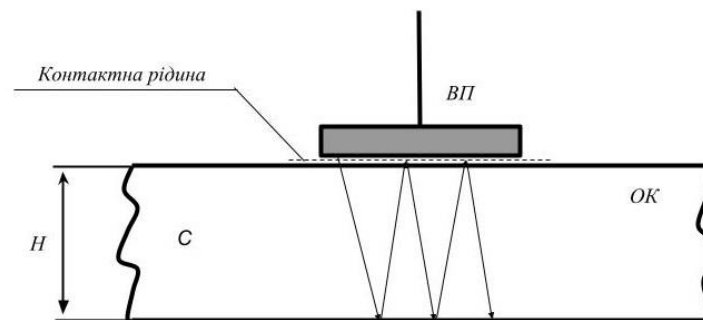


Рис. 1.1 Луна-імпульсний метод з еталонуванням.

					ПК 91.120000.000ПЗ	Арк.
						20
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

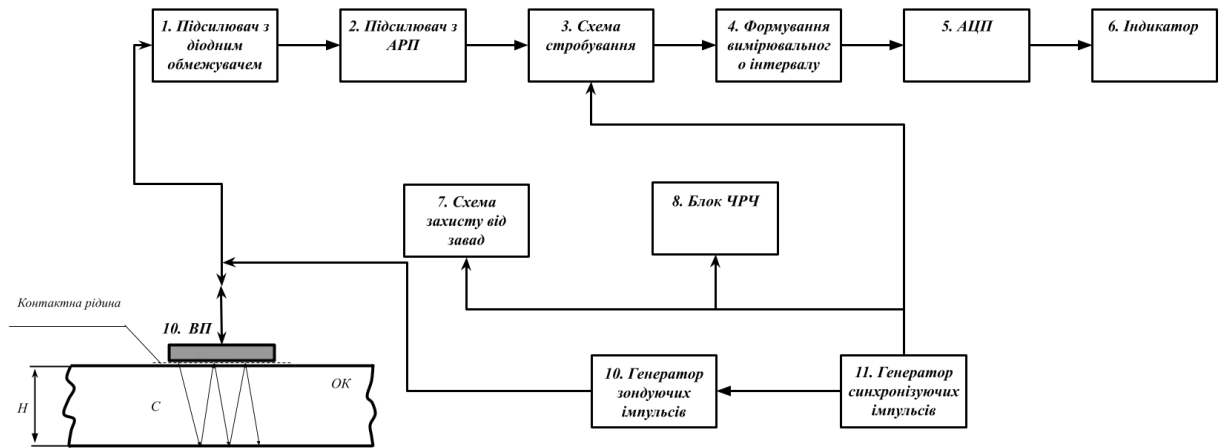


Рис. 1.2 Структурна схема контактної ультразвукової товщиноміра для луна-імпульсного методу

Опис структури та принципу роботи луна-імпульсного контактної товщиноміра з еталонуванням

Синхронізація роботи компонентів товщиноміра відбувається за допомогою генератора синхро-імпульсів – 12.

Збудження ультразвукових коливань в п'єзоелектричному перетворювачі (ПЕП) – 10, забезпечується генератором зонduючих імпульсів – 11. Як вже згадувалось раніше ПЕП може бути підключеним за допомогою суміщеної, або роздільно-суміщеної схеми.

Підсилювач з діодним обмежувачем на вході – 1 дозволяє ефективно передавати підсилені сигнали для подальшої обробки, діодний обмежувач обмежує амплітуду вхідного сигналу, він запобігає утворенню великих амплітудних сигналів, які можуть виникнути в результаті відбиття або розсіювання ультразвуку.

Для стабілізації амплітуди донного сигналу в схемі використовується підсилювач з автоматичним регулюванням підсилення – 2.

Для керування часом затримки та тривалістю ультразвукового сигналу (початкового і кінцевого) використана схема селекції (стробування) – 3. Блок формування вимірювального інтервалу – 4 генерує часовий інтервал протягом якого надходять аналогові сигнали для подальшої обробки. Цей інтервал може

бути як фіксованим так і програмованим, в залежності від потреби. Ще однією функцією цього блоку є перетворення цього інтервалу у форму зручну для АЦП. Для цього може бути використано операції підсилення аналогового сигналу, зсув нуля, фільтрація шумів, тощо. Ці операції забезпечують оптимальну роботу АЦП.

Аналого-цифровий перетворювач зображений на схемі під цифрою – 5, він перетворює вимірний інтервал в цифровий код.

Для виводу інформації на екран використаний індикатор – 6.

Фільтрацію та приглушення електричних завад виконує блок захисту від завад – 7. Для боротьби із завадами використовують різні методи наприклад:

- Фільтрація сигналу – блок використовує фільтри для приглушення шумів та непотрібних складових сигналу.
- Підсилення корисної частини сигналу для кращого співвідношення сигнал – шум.
- Синхронізація – в даній схемі блок синхронізований з генератором синхро-імпульсів, для забезпечення синхронізованої та безперервної роботи приладу, а також для уникнення впливу зовнішніх завад на результати вимірювань.

Стабілізація амплітуди віддзеркаленого сигналу виконується за допомогою блоку часового регулювання чутливості (ЧРЧ) - 8, він керує коефіцієнтом підсилення підсилювача – 1.

Луна-імпульсний метод без еталонування

Різниця із луна-імпульсним методом без еталонування полягає в тому, що не потрібно проводити калібрування приладу під час вимірювання для різних типів матеріалів.

Відсутність потреби в калібруванні полягає в тому, що у виріб випромінюється не тільки повздовжня хвиля, а одночасно із нею ще і головна хвиля, яка розповсюджується по поверхні ОК.

					ПК 91.120000.000ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		22

В даному методі використовують два п'єзоелемента, які розташовані на фіксованій відстані L один з них приймає сигнал головної хвилі. Для роботи методу швидкості повздожньої та головної хвилі мають бути майже однакові, це дає змогу створити систему рівнянь для вимірювання товщини:

$$H = \frac{C_n \cdot T_1}{2},$$

$$L = C_2 \cdot T_2,$$

$$C_2 = C_n$$

Де T_1 та T_2 – інтервали часу між зондуючими і донними сигналами за головною та повздожньою хвилею.

В результаті для обрахунку товщини одержуємо формулу:

$$H = \frac{L}{2} \cdot \frac{T_1}{T_2}$$

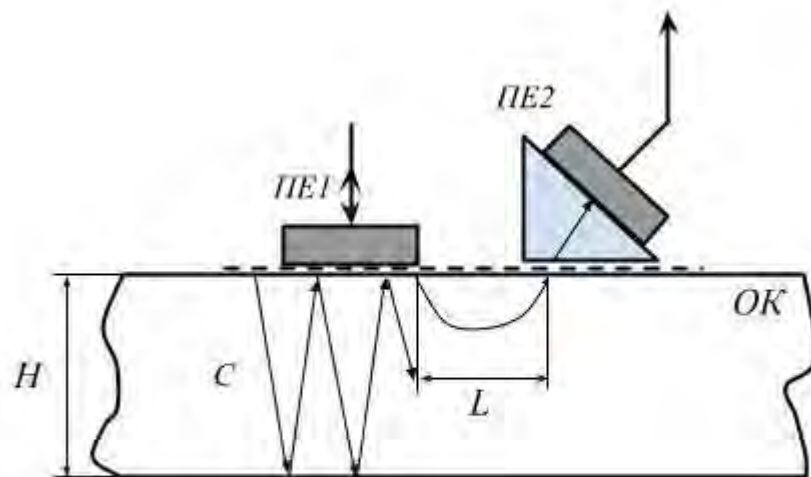


Рис. 1.3 Луна-імпульсний метод без еталонування

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

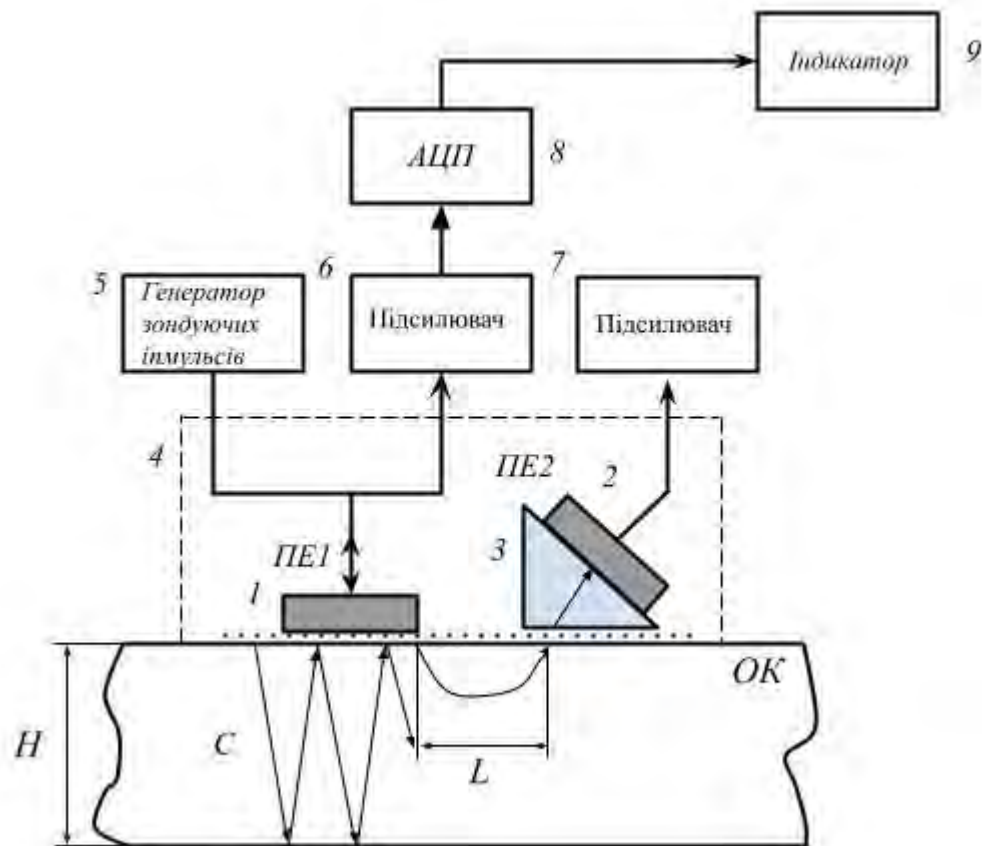


Рис. 1.4 Спрощена структурна схема товщиноміра для безеталонного луна-імпульсного методу

1 - Перетворювач, який одночасно є випромінювачем і приймачем поперечної хвилі.

2 – Перетворювач, який є приймачем головної хвилі.

3 – Призма із оргскла.

4 – Корпус.

5 – Генератор зондуючих імпульсів.

6, 7 – Підсилювачі відбитих сигналів.

8 – Аналогово-цифровий перетворювач.

9 – Цифровий індикатор.

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

Резонансний метод

Робота методу полягає в тому, що під час вимірювання проводяться послідовні зміни частоти ультразвукових коливань, яка збуджує в стінці ОК, поки не буде досягнутий резонансний ефект, коли сигнал відзеркалених хвиль досягає максимального значення. Частота на якій відбувся резонанс, пов'язана з товщиною матеріалу за формулою:

$$H = \frac{C}{2 \cdot \Delta f}$$

Де Δf - різниця частот двох сусідніх гармонік, C – швидкість поширення ультразвукових хвиль в матеріалі ОК.

Не дивлячись на те, що резонансний метод забезпечує високу точність вимірювання, при підборі правильної частоти резонансу та може застосовуватись для широкого спектру матеріалів, він має свої недоліки:

- Метод потребує калібрування
- Сильний вплив на результати вимірювань шорсткості матеріалу
- Обмежена роздільна здатність – оскільки метод потребує резонансного ефекту, він обмежений для вимірювання дуже тонких, або дуже товстих матеріалів.

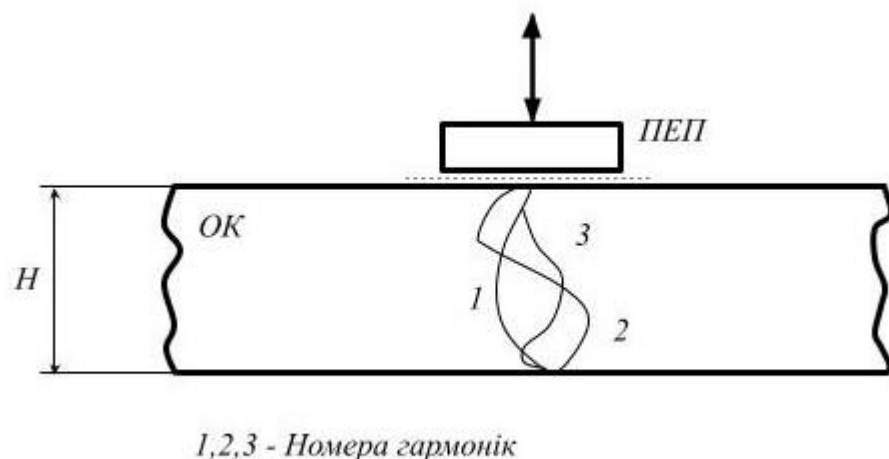


Рис. 1.5 Резонансний ультразвуковий метод

					ПК 91.120000.000ПЗ	Арк.
						25
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

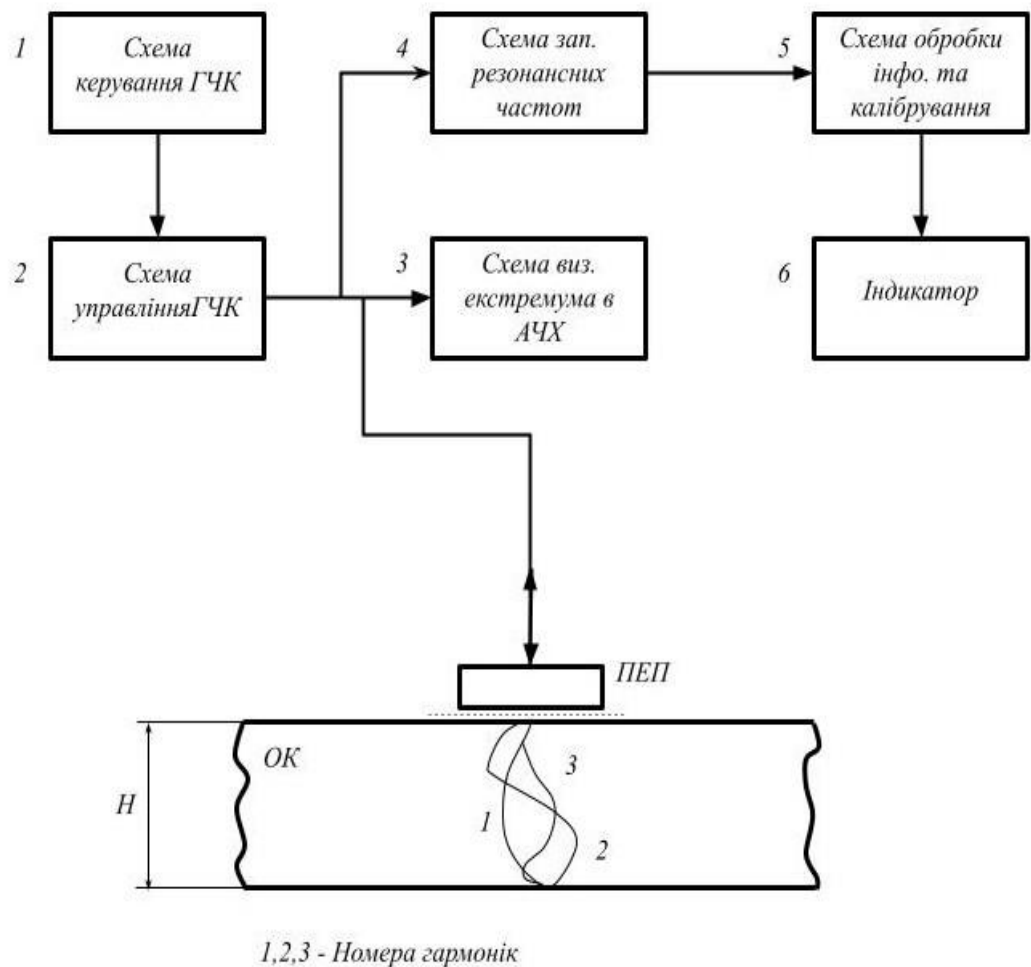


Рис. 1.6 Спрощена структурна схема товщиноміра для резонансного методу.

Принцип роботи резонансного ультразвукового товщиноміра

1 – Генератор гармонійного сигналу з качанням частоти (ГЧК) – дозволяє змінювати частоту сигналі в межах резонансної, ГЧК допомагає виявити точку з максимальною амплітудою сигналу.

2 – Схема управління ГЧК, забезпечує стабільність частоти генератора. Вона реагує на зміни у відгуку від матеріалу та автоматично налаштовує частоту генератора в межах 2-3 октав, іноді такі схеми використовують для того, щоб знизити вплив шумів, фільтруючи їх та забезпечує стабільний сигнал резонансу.

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

3 – Схема визначення екстремуму в амплітудо-частотній характеристиці (АЧХ), скануючи діапазон частот автоматично визначає резонансну частоту, коли амплітуда сигналу досягає максимуму.

4 – Схема запам'ятовування резонансних частот – запам'ятовує резонансні частоти двох сусідніх гармонік. Також вона може зберегти в пам'яті кілька значень резонансних частот для різних матеріалів чи товщин, що дозволяє не вводити частоту вручну кожного разу.

Вся інформація знаходить на схему обробки і калібрування приладу – 5 та після обробки відображається на цифровому індикаторі – 6. [2]

1.5 Методи вимірювання часової затримки

Так як в ультразвуковій товщинометрії вимірювальним параметром є саме часова затримка між зондуючим та відбитим імпульсами, існують різні методи її вимірювання, кожен з яких має свої особливості та характерну йому граничну похибку

Метод порогового рівня

В даному методі для вимірювання часової затримки проміжок часу реєструється не в момент приходу імпульсів, а в момент перетину ними заданого порогового рівня по амплітуді. Пороговий рівень має встановлюватися вище максимальної амплітуди шуму, та для того, щоб уникнути великих похибок вимірювання проводять за першим періодом відзеркаленого імпульсу. Для зменшення похибок саме у формуванні інтервалу, під час вимірювання пороговий рівень має спрацьовувати на однакових фазах всіх імпульсів.

В даному методі існує один недолік, який полягає в тому, що імпульси більшої амплітуди перетинають пороговий рівень раніше, через що виникає похибка у вимірюванні часового інтервалу, адже вимірювання імпульсів відбувається на різних періодах імпульсів. Для того, щоб уникнути цієї похибки, у схемах ультразвукових товщиномірів встановлюють блок автоматичного

					ПК 91.120000.000ПЗ	Арк.
						27
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

регулювання підсилення, який виводить амплітуди сигналів на однаковий рівень.

Метод перетину нуля (zero-crossing method)

Суть методу полягає в тому, що під час аналізу ультразвукового сигналу, в схемі товщиноміра використовується аналоговий компаратор, який виставляє пороговий рівень, але як тільки сигнал перетинає рівень встановлений компаратором, товщиномір реагує на нього, але вимірювання часової затримки відбувається тільки після того як сигнал пройде через нульове значення після моменту виявлення.

Головною перевагою цього методу є те, що вимірювання часової затримки не залежить від амплітуди сигналу. Але є і недолік, який полягає в тому, що робота метода сильно залежить від форми ультразвукового сигналу, зростання переднього фронту має відбуватися дуже швидко, в іншому випадку реєстрація сигналу може відбуватись на другому або третьому періоді коливань через наявність шумів. [3]

Переваги методу zero-crossing:

- Простота реалізації – прості алгоритми обробки сигналу.
- Вимірювання часової затримки не залежить від амплітуди сигналу
- Метод може бути застосований як для прямих так і відзеркалених сигналів.

Недоліки методу zero – crossing:

- Шуми можуть призвести до некоректності моменту перетину нуля, що впливає на точність вимірювань
- Обмежена роздільна здатність до вимірювань малих товщин матеріалів, на точність визначення перетину нуля, впливає обмежена кількість коливань сигналу.

					ПК 91.120000.000ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		28

Метод центру тяжіння

Так само як і для попереднього методу використовують пороговий рівень, але часову затримку визначають по середньому значенню між моментами проходження імпульсів через поріг, в обидві полярності сигналу, цей спосіб також майже не залежить від різниці амплітуд між сигналами. [4] Еле даний метод так само як і метод перетину нуля, може бути застосований в більшості випадків для великої вимірювальної апаратури, яка може забезпечити точне регулювання амплітуди, так щоб вимірювання відбувалось на однакових періодах сигналу.

Метод слідкуючого порогу

Сутність методу полягає в тому, що поріг за яким відбувається реєстрація сигналу є змінним, адже він формується відносно певного відсотка амплітуди відносно її максимального значення. Даний метод також не залежить від різниці амплітуд сигналів, та дозволяє розрізнити передій і задній фронт сигналу.

1.6 Обґрунтування методу ультразвукового контролю для визначення товщини металевих виробів.

В ультразвуковій товщинометрії найчастіше застосовують луна-імпульсний та резонансний методи для вимірювання товщини. В наш час резонансний метод не витримав конкуренції в порівнянні з луна-імпульсним методом з декількох причин:

- Луна – імпульсний метод є більш універсальним і може бути використаний для контролю товщини обширної кількості матеріалів, включаючи не метали, адже він не обмежений резонансними властивостями матеріалів.
- На точність вимірювання товщини за допомогою луна-імпульсного методу менше впливають зовнішні фактори, такі як: стан поверхні виробів, його шорсткість, наявність лакофарбових покриттів.
- Не вимагає складних схем для керування та вимірювання резонансних частот.

					ПК 91.120000.000ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		29

Переваги ультразвукового неруйнівного контролю

- Велика роздільна здатність – за допомогою ультразвукового неруйнівного контролю можна проводити вимірювання товщини від десятків міліметрів до кількох метрів.
- Ультразвуковий контроль має високу чутливість до змін у товщині матеріалів, він здатний виявляти мінімальні відхилення у товщині об'єкту контролю
- Може бути застосований для контролю грубих та нерівних поверхонь.
- Висока частота вимірювання
- Можливість вимірювання товщин різних типів матеріалів, включаючи метали та неметали.
- Компактність приладів – апаратну частину для ультразвукового контролю можна помістити в корпус невеликих розмірів, що зробить прилад компактним та портативним.
- Можливість вимірювання товщини при наявності лакофарбових покриттів без необхідності їх видалення
- Для проведення контролю достатньо одностороннього доступу до об'єкта контролю
- Деякі методи ультразвукового контролю дозволяють здійснювати контроль без прямого контакту з ОК.
- Ультразвукові методи товщинометрії забезпечують високу точність контролю. [5]

1.7 Аналіз існуючих технічних рішень

На ринку ультразвукових товщиномірів, все частіше з'являються прилади з можливістю синхронізації з пристроями на базі операційної системи (ОС) Android. На даний момент виробники використовують синхронізацію для своїх приладів як блок для обробки та зберігання даних вимірювань [6], автоматичного створення звітів, та передачі даних в хмарні сховища. Далі буде

					ПК 91.120000.000ПЗ	Арк.
						30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

проведено аналіз найпопулярніших моделей таких приладів, та їх технічних характеристик.

Ультразвуковий товщиномір PosiTector UTG

Моделі цієї серії товщиномірів здатні вимірювати товщину стінок таких матеріалів як сталь, пластик та інші. Вони ідеально підходять для вимірювання впливу ерозії та корозії на труби, резервуари та інші конструкції які мають доступ тільки з одної сторони. [7]

Технічні характеристики

- В даних приладах використовується двохелементний перетворювач з частотою ультразвукової хвилі 5МГц.
- Роздільна здатність вимірювань: 1 – 125 мм.
- Точність вимірювань - ± 0.03 мм



Рис. 1.7 Ультразвукові товщиноміри PosiTector модельного ряду UTG

					ПК 91.120000.000ПЗ	Арк.
						31
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Переваги які надає синхронізація з пристроєм на базі ОС Android:

- Автоматичне створення звітів по даними вимірювань у форматах PDF та CSV.
- Зберігання даних у хмарних сервісах, що дає доступ до них з будь якої точки світу.
- Синхронізація та можливість передачі даних на персональні комп'ютери для подальшої обробки.
- Прикріплення зображень, та заміток для серій вимірювань.

Ультразвуковий товщиномір Cygnus 4+ General Purpose

Даний товщиномір використовується для вимірювання товщини металів без потреби видалення захисних покриттів. Має дисплей з функцією Live A-scan. Вимірювання за допомогою високотемпературного перетворювача дозволяє вимірювати товщину стінок сильно нагрітих об'єктів, або виробів, що знаходяться в експлуатації без потреби їх відключення чи ізоляції. [8] Має можливість регулювати роздільну здатність, та функцію Deep Coat, яка ігнорує покриття товщиною до 20 мм.



Рис 1.8. Ультразвуковий товщиномір Cygnus 4+

					ПК 91.120000.000ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		32

Технічні характеристики

Роздільна здатність для вимірювань товщини сталі: 0.8 – 250 мм.

Точність вимірювань - ± 0.05 мм.

Переваги які надає синхронізація з пристроєм на базі ОС Android:

- Віддалена реєстрація та перегляд А-сканів.
- Створення звітів у форматі PDF.
- Автоматизований графічний аналіз даних та статистичні розрахунки.

Вихрострумовий товщиномір Elcometer 456

Моделі цього модельного ряду, можуть вимірювати товщину лакофарбованих покриттів як на феромагнітних так і на немагнітних металевих підкладках. Калібрування приладу може відбуватись по одній точці, двом точкам та із зсувом нуля. Він здатен вимірювати поверхні з радіусом кривизни від 3мм. [9]

Технічні характеристики:

- Роздільна здатність вимірювання: 0 – 30 мм.
- Точність вимірювань: $\pm 1\%$ від товщини.



Рис. 1.9 Вихрострумовий товщиномір Elcometer 456

					ПК 91.120000.000ПЗ	Арк.
						33
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Переваги які надає синхронізація з пристроєм на базі ОС Android:

- Зберігання даних вимірювань безпосередньо на мобільному пристрої, та зберігання їх окремими серіями разом із GPS – координатами.
- Додавання фото поверхні об'єкта контролю.
- Нанесення показань на мапу, фотографію, або діаграму.
- Передача даних на персональні комп'ютери для їх подальшої обробки.

Переваги та недоліки синхронізації ультразвукових товщиномірів з пристроями на базі ОС Android.

Перевагами які надає синхронізація є:

- Автоматизація процесу збору та обробки даних;
- Автоматична побудова звітів в різних форматах;
- Зменшення трудомісткості процесу вимірювань;
- Можливість представлення отриманих даних у вигляді графіків та гістограм в реальному часі;
- Можливість передачі та збереження даних у хмарних сервісах;
- Доступ до вимірюваних даних з будь якої точки світу;
- Можливість передачі даних на комп'ютер для подальшої їх обробки;
- Відсутність людського фактору у формуванні звітів;
- Налаштування приладу прямо в мобільному додатку;
- Можливість довгостроково зберігати великі об'єми даних;
- Автоматичний аналіз даних в режимі реального часу;

До недоліків можна віднести:

- потреба в додатковому захисті даних вимірювань;
- якість синхронізації може залежати від технічних показників мобільного пристрою, а також від якості підключення до Інтернету або мобільної мережі.

					ПК 91.120000.000ПЗ	Арк.
						34
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Формування технічних характеристик ультразвукового товщиноміра з можливістю синхронізації з пристроями на базі ОС Android.

Для того, щоб товщиномір був конкурентноспроможний на ринку, він має володіти такими технічними характеристиками:

- Ультразвуковий метод вимірювання: луна-імпульсний, з використанням способу слідкуючого порогу для визначення часової затримки.
- Роздільна здатність вимірювання товщини : 1 – 125 мм.
- Точність вимірювань: ± 0.05 мм.
- Мінімальна зміна товщини яку пристрій може виявити: 0.01мм
- Частота ультразвукових хвиль: 2.5МГц
- Можливість синхронізації та обміну даними між ультразвуковим товщиноміром та мобільними пристроями на базі ОС Android, за допомогою технології Bluetooth.
- Матеріали: здатність вимірювання товщини металевих виробів, в яких поширюються ультразвукові хвилі
- Ергономічний дизайн: прилад має бути компактним та зручним у використанні
- Надійність: корпус приладу має бути захищеним від фізичних пошкоджень, надмірних температур, та вологості.

					ПК 91.120000.000ПЗ	Арк.
						35
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Висновки до розділу 1

В даному розділі було розглянуто актуальність використання ультразвукових товщиномірів, та була зроблена порівняльна характеристика двох найпопулярніших типів товщиномірів за фізичним принципом вимірювання, які застосовують НК.

Я дійшов висновку, що ультразвукові товщиноміри можна застосовувати до більшої кількості матеріалів та здатні проводити контроль об'єктів з великою товщиною.

Розглянувши методи ультразвукової товщинометрії, я дійшов висновку, що луна-імпульсний метод є найефективнішим методом для вимірювання товщини, тому саме цей метод покладений в основі роботи приладу.

Проаналізувавши вже існуючі портативні ультразвукові товщиноміри з можливістю синхронізації з пристроями на базі ОС Android, я зміг сформулювати технічні характеристики для свого товщиноміру.

Хоча на даний момент виробники приладів НК пропонують синхронізацію своїх приладів із пристроями на базі ОС Android лише як додаткову функцію, головною метою якої є автоматизація процесу збору та обробки даних, такі прилади мають багато переваг в порівнянні із традиційними приладами НК та вже показали свою ефективність і практичність.

Використання потужностей мобільного пристрою, та розробка власного мобільного додатку, дають виробникам можливість простіше втілювати нові ідеї в розробку приладів НК.

Провівши аналіз переваг та недоліків такого підходу, можна дійти висновку, що переваг в синхронізації ультразвукових товщиномірів з пристроями на базі ОС Android, набагато більше ніж недоліків, та вона є перспективною для використання у неруйнівному контролі.

					ПК 91.120000.000ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		36

РОЗДІЛ 2 РОЗРАХУНОК АКУСТИЧНОГО ТРАКТУ ТА ПЕРЕТВОРЮВАЧА ПРИЛАДУ

2.1 Обґрунтування структури акустичного тракту

Акустичний тракт – це виключно механічний тракт, який являє собою шлях який пройшла ультразвукова хвиля від випромінювача, до відбивача, яким може бути дефект всередині ОК, або його донна поверхня і назад до приймача коливань.

У випадку ультразвукової товщинометрії, найпростіший акустичний тракт, проходить такий шлях: випромінювач – протектор – контактна рідина – об'єкт контролю – донна поверхня ОК – об'єкт контролю – контактна рідина – протектор – приймач.

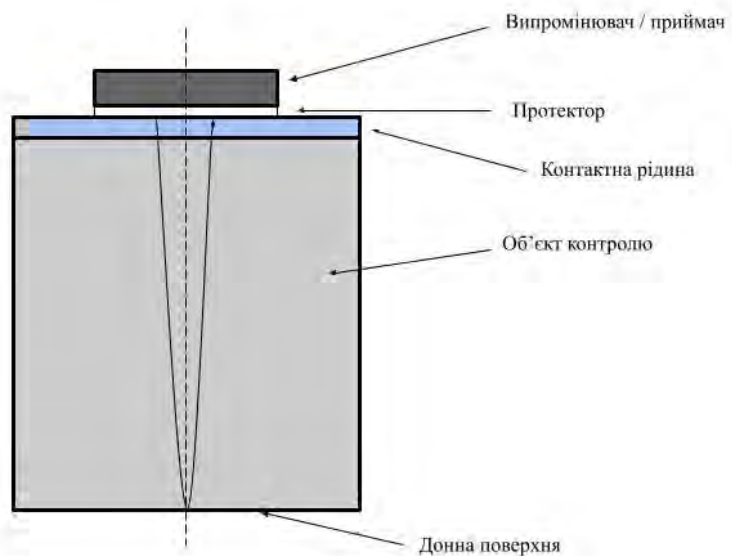


Рис. 2.1 Акустичний тракт прямого перетворювача для ультразвукової товщинометрії

Вихідною величиною при розрахунку акустичного тракту є коефіцієнт акустичного тракту:

					ПК 91.120000.000ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		37

$$K_{a.m.} = \frac{P_{\Pi}}{P_B}$$

Де P_{Π} і P_B - акустичні тиски у приймаючому та випромінюючому перетворювачах.

Коефіцієнт акустичного тракту це ключова величина за допомогою якої проектують або підбирають електронні вузли товщиноміру або дефектоскопу.

Розрахунок акустичного тракту являє собою визначення амплітуди корисного сигналу, залежно від розміру перетворювача, глибини залягання відбивача, його форми та розмірів та частоти коливань.

Так як вивести формулу акустичного тракту для природніх дефектів неможливо, адже наперед не відома форма і розміри дефекту, тому формули виводять для моделей дефектів у вигляді порожніх відбивачів простої форми, у випадку вимірювання товщини матеріалу відбивачем є донна поверхня, то модель дефекту матиме форму звичайної площини.

Формула розрахунку акустичного тракту у загальному випадку має вигляд:

$$K_{a.m.} = K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot K_4$$

Де K_1 - коефіцієнт який враховує в якій зоні акустичного поля знаходиться відбивач та геометричні характеристики випромінювача.

K_2 - враховує геометричні властивості та форму відбивача.

K_3 - враховує віддзеркалення хвилі та її проходження через межу поділу середовищ.

K_4 - враховує згасання ультразвукової хвилі.

					ПК 91.120000.000ПЗ	Арк.
						38
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

У випадку коли відбивачем є донна поверхня, яка за площею значно більше ніж випромінювач, моделі віддзеркалення акустичних трактів матимуть вигляд:

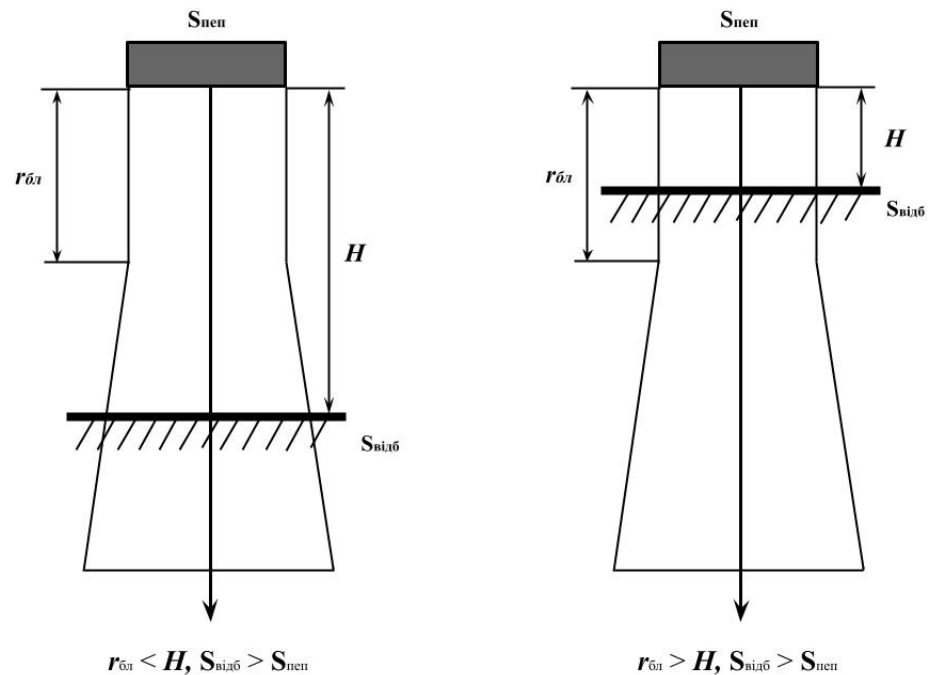


Рис 2.2 Модель акустичного тракту методу віддзеркалення для прямого перетворювача, для дальньої та ближньої зони відбивачем якого є донна поверхня.

Формула розрахунку акустичного тракту для дальньої зони:

$$K_{a.m.} = \frac{S_{ПЕП}}{2 \cdot \lambda \cdot H} \cdot T_1 \cdot R_p \cdot e^{-2 \cdot H \cdot \delta_p}$$

Формула розрахунку акустичного тракту для ближньої зони:

$$K_{a.m.} = 0,8 \cdot T_1 \cdot R_p \cdot e^{-2 \cdot H \cdot \delta_p}$$

Де $S_{ПЕП}$ - площа перетворювача, H - відстань від поверхні ПЕП до донної поверхні ОК, λ - довжина хвилі, T_1 - коефіцієнт проходження ультразвукового променя по інтенсивності через межу ПЕП-ОК, R_p - коефіцієнт відбиття по

акустичному тиску променю від донної поверхні, δ_p - коефіцієнт згасання повздовжньої хвилі в матеріалі ОК.

2.2 Розрахунок перетворювача та коефіцієнта акустичного тракту

Розрахуємо параметри перетворювача та визначимо коефіцієнт акустичного тракту для луна-імпульсного методу товщинометрії ОК, виготовленого зі сталі, використовуючи дисковий перетворювач з ЦТС-19 з товщиною п'єзопластини 0,66мм та діаметром 15мм.

Вхідні дані:

- Відбивач: донна поверхня ОК
- Матеріал ОК: сталь
- Діаметр перетворювача: $d = 15\text{мм}$
- Товщина п'єзопластини: $h = 0,66\text{мм}$
- Відстань по акустичній осі від поверхні ПЕП до донної поверхні ОК:
 $H = 125\text{мм}$
- Швидкість ультразвуку в сталі: $C_{ст} = 6000 \frac{\text{м}}{\text{с}}$
- Швидкість ультразвуку в матеріалі перетворювача: $C_{цтс} = 3300 \frac{\text{м}}{\text{с}}$
- Густина сталі: $\rho_{ст} = 8000 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$
- Густина матеріалу перетворювача: $\rho_{цтс} = 7000 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$
- Коефіцієнт згасання ультразвуку на робочій частоті перетворювача:
$$\delta_p = 1 \frac{Hn}{m}$$

Для того, щоб вибрати формулу для розрахунку коефіцієнта акустичного тракту, потрібно визначити в якій зоні акустичного поля перетворювача залягає дефект.

					ПК 91.120000.000ПЗ	Арк.
						40
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Розрахунок робочої частоти перетворювача виконаємо за формулою 2.1:

$$f = \frac{C_{умс}}{2 \cdot h} = \frac{3300 \frac{м}{с}}{2 \cdot 0,66 \cdot 10^3 м} = 2,5 МГц \quad (2.1)$$

Розрахунок довжини хвилі в матеріалі ОК виконаємо за формулою 2.2:

$$\lambda_{см} = \frac{C_{см}}{f} = \frac{6000 \frac{м}{с}}{2,5 \cdot 10^6 Гц} = 2,4 мм \quad (2.2)$$

Розрахунок ближньої зони акустичного поля перетворювача відповідно до формули (2.3):

$$r_{\text{бли}} = \frac{R^2}{\lambda_{см}} = \frac{7,5 мм^2}{2,4 мм} = 23,45 мм \quad (2.3)$$

Розрахунок площі перетворювача за формулою 2.4:

$$S_{ПЕП} = \pi \cdot R^2 = \pi \cdot 7,5 мм^2 = 176,7 мм^2 \quad (2.4)$$

Так як $H > 3r_{\text{бли}}$, можна дійти висновку, що донна поверхня ОК, знаходиться в дальній зоні акустичного поля перетворювача. В такому випадку формула для розрахунку коефіцієнта акустичного тракту 2.5 матиме вигляд:

$$K_{a.m.} = \frac{S_{ПЕП}}{2 \cdot \lambda \cdot H} \cdot T_1 \cdot R_p \cdot e^{-2 \cdot H \cdot \delta_p} \quad (2.5)$$

Коефіцієнт проходження ультразвукового променю по інтенсивності через межу ПЕП-ОК, розраховується за формулою 2.6:

$$T_1 = \frac{4 \cdot z_{см} \cdot z_{умс}}{(z_{см} + z_{умс})^2} \quad (2.6)$$

Імпеданс між ОК та перетворювачем визначаються за формулою 2.7:

$$Z = \rho \cdot C \quad (2.7)$$

$$z_{cm} = \rho_{cm} \cdot C_{cm} = 8000 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \cdot 6000 \frac{\text{м}}{\text{с}} = 4,8 \cdot 10^7$$

$$z_{цмс} = \rho_{цмс} \cdot C_{цмс} = 7000 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \cdot 3300 \frac{\text{м}}{\text{с}} = 2,31 \cdot 10^7$$

$$\text{Тоді: } T_1 = \frac{4 \cdot 4,8 \cdot 10^7 \cdot 2,31 \cdot 10^7}{(4,8 \cdot 10^7 + 2,31 \cdot 10^7)^2} = 0,87$$

Розрахунок коефіцієнта акустичного тракту виконаємо за формулою 2.8:

$$K_{a.m.} = \frac{S_{ПЕП}}{2 \cdot \lambda \cdot H} \cdot T_1 \cdot R_p \cdot e^{-2 \cdot H \cdot \delta_p} = \frac{176,7 \text{ мм}^2}{2 \cdot 2,4 \text{ мм} \cdot 125 \text{ мм}} \cdot 0,87 \cdot 1 \cdot e^{-2 \cdot 125 \text{ мм} \cdot 0,001 \frac{\text{Гц}}{\text{м}}} = 0.201 \quad (2.8)$$

Напруга прийнятого сигналу визначається за формулою 2.9:

$$U_n = \frac{U_n}{U_{зав}} \cdot U_{зав} \quad (2.9)$$

Нехай $U_{зав} \approx 1 \text{ мВ}$, тоді співвідношення сигналу до шуму можна взяти

$$\frac{U_n}{U_{зав}} = 40 \text{ дБ}$$

Перетворення дБ в рази виконаємо за співвідношенням 2.10:

$$\begin{aligned} 20 \log_{10} \left(\frac{U_n}{U_z} \right) &= 40 \text{ дБ}; \\ 20 \log_{10} &= 40 \text{ дБ}; \\ 10^{\frac{40}{20}} &= 100 \end{aligned} \quad (2.10)$$

Визначимо напругу прийнятого сигналу:

$$U_n = \frac{U_n}{U_{зав}} \cdot U_{зав} = 100 \cdot 1 \cdot 10^{-3} \text{ В} = 0,1 \text{ В}$$

					ПК 91.120000.000ПЗ	Арк.
						42
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Визначимо напругу випроміненого сигналу для товщини ОК, за формулою 2.11:

$$U_e = \frac{U_n}{K_{a.m} \cdot K_m} = \frac{0,1B}{0,201 \cdot 0,15} = 3.3B \quad (2.11)$$

Висновки до розділу 2

В даному розділі було проведено обґрунтування структури акустичного тракту для портативного ультразвукового товщиноміра виробів з металів, розрахунок був проведений з міркувань того, що шар контактної рідини має дуже малий вплив на розрахунок акустичного тракту, тому ним можна знехтувати.

Окрім того було проведено розрахунок параметрів перетворювача, та коефіцієнта акустичного тракту, який дозволив розрахувати напругу випроміненого сигналу.

					ПК 91.120000.000ПЗ	Арк.
						43
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 3 ВИБІР ТА ОБҐРУНТУВАННЯ СТРУКТУРНОЇ СХЕМИ ТА ПІДБІР КОМПОНЕНТІВ

3.1 Структурна схема приладу

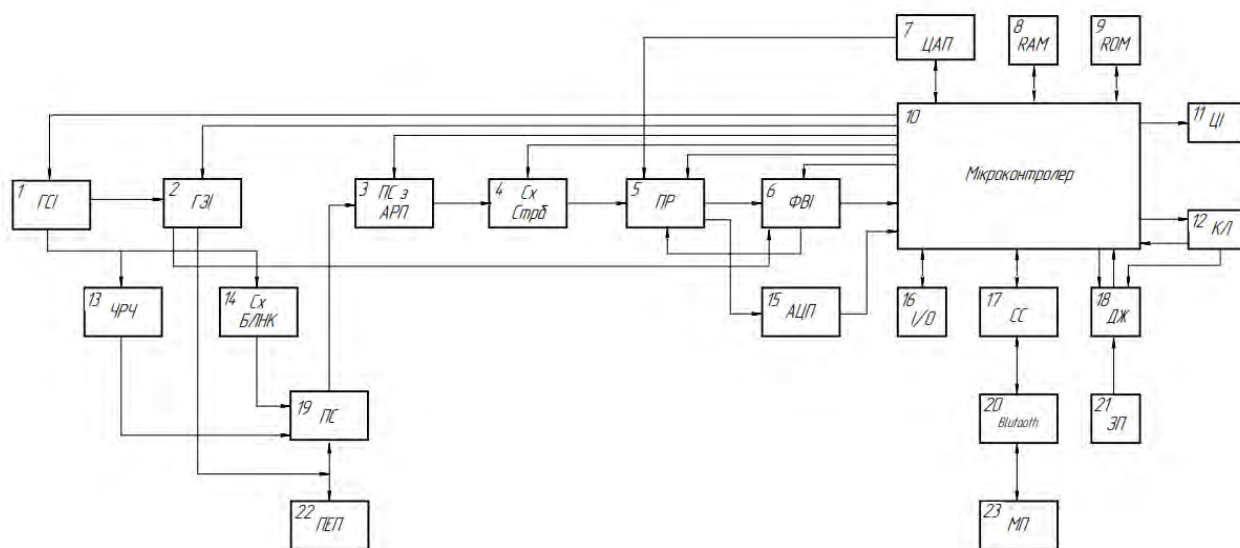


Рис 3.1 Структурна схема

Синхронізація роботи компонентів товщиноміра відбувається за допомогою генератора синхро-імпульсів - 12. Імпульсний генератор - 11 під керуванням мікропроцесора - 10 подає імпульс прямокутної напруги на перетворювач - 22, генеруючи вихідну ультразвукову хвилю. Підсилювач з діодним обмежувачем - 19 на вході ефективно передає підсилені сигнали для подальшої обробки, діодний обмежувач обмежує амплітуду вхідного сигналу, він запобігає утворенню великих амплітудних сигналів, які можуть виникнути в результаті відбиття або розсіювання ультразвуку.

Для керування часом затримки та тривалістю ультразвукового сигналу використана схема селекції - 4. Блок формування вимірювального інтервалу - 6 генерує часовий інтервал протягом якого надходять аналогові сигнали для подальшої обробки. Ще однією функцією цього блоку є перетворення цього інтервалу у форму зручну для АЦП.

Аналого-цифровий перетворювач - 15 перетворює виміряний інтервал в цифровий код. Для виводу інформації на екран використаний індикатор - 11.

Фільтрацію та приглушення електричних завад виконує блок захисту від завад - 14.

Ехосигнали, що повертаються від досліджуваного зразка, приймаються датчиком і перетворюються назад в електричні сигнали, які, в свою чергу, подаються на підсилювач приймача і потім оцифровуються. Мікропроцесорна логіка управління і синхронізації синхронізує імпульс і вибирає відповідні ехосигнали [10], які будуть використовуватися для вимірювання часового інтервалу.

Стабілізація амплітуди віддзеркаленого сигналу виконується за допомогою блоку часового регулювання чутливості - 19.

Синхронізація з пристроєм на базі операційної системи Android відбувається за допомогою Bluetooth - 20 та системи синхронізації - 17.

					ПК 91.120000.000ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		45

3.2 Алгоритм отримання, обробки та передачі даних на мобільний пристрій за допомогою технології Bluetooth

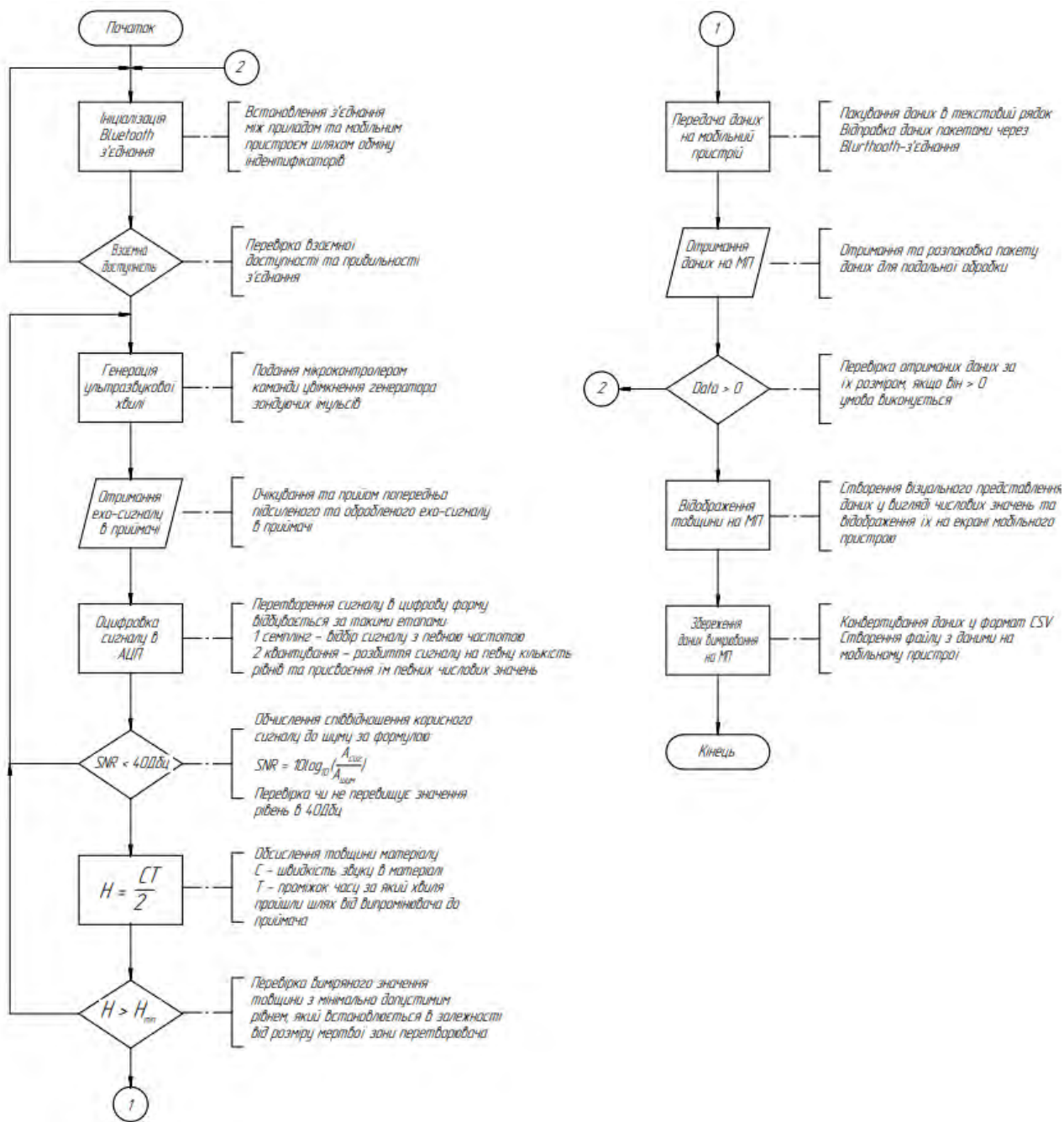


Рис. 3.2 Ідея алгоритму отримання, обробки та передачі даних

Початковим етапом алгоритму є ініціалізація Bluetooth-з'єднання між портативним ультразвуковим товщиноміром та мобільним пристроєм на базі ОС Android. Якщо розглянути цей процес детально, то спочатку потрібно увімкнути модуль бездротового зв'язку в приладі та на мобільному пристрої,

після чого на телефоні запускається процес пошуку доступних пристроїв. Сам зв'язок встановлюється шляхом обміну ідентифікаторами між приладом та мобільним пристроєм.

Наступний етап це перевірка взаємної сумісності і правильності з'єднання, якщо ця умова не виконується, то процес ініціалізації запускається повторно.

Далі мікроконтролер подає сигнал на генератор зондуючих імпульсів та інших блоків приладу які відповідають за генерацію ультразвукової хвилі. Після чого сигнал проходить підсилення та попередню обробку та потрапляє на приймач і відразу перетворюється в цифрову форму в АЦП.

Потім сигнал надходить до мікроконтролера де відбувається перевірка сигналу на співвідношення сигналу до шуму, якщо сигнал не проходить перевірку, обрахунок товщини не починається.

Якщо сигнал пройшов перевірку то наступним етап є обчислення товщини вимірювального зразка за відповідною формулою, після чого значення товщини порівнюється із мінімально допустимим рівнем, який обумовлений мертвою зоною перетворювача, у випадку коли сигнал не пройшов перевірку, обраховане значення товщини не передається на мобільний пристрій.

При проходженні перевірки дані передаються на мобільний пристрій за допомогою Bluetooth-з'єднання, попередньо дані пакуються у формат текстового рядку в мікроконтролері та передаються у вигляді пакетів даних.

Після чого дані розпаковуються на мобільному пристрої для подальшої обробки. Далі йде перевірка на те чи вага отриманого пакету даних більше нуля, адже в такому випадку, можемо стверджувати, що дані прийшли на мобільний пристрій не коректно.

Наступним етапом на мобільному пристрої відбувається візуалізація даних у вигляді числових значень на екрані.

Останнім етапом є збереження даних у пам'яті мобільного пристрою.

					ПК 91.120000.000ПЗ	Арк.
						47
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3.3 Підбір основних компонентів для портативного ультразвукового товщиноміру із можливістю синхронізації з пристроями на базі ОС Android.

Підбір генератора синхронізуючих імпульсів

В якості генератора синхронізуючих імпульсів використано CD4047, який складається з астабільного мультивібратора зі стобуючим ключем і логічними схемами, вони дозволяють запускати моностабільний мультивібратор з позитивним або негативним фронтом імпульсу ти надають можливість повторного запуску із використанням зовнішнього лічильника. [11]

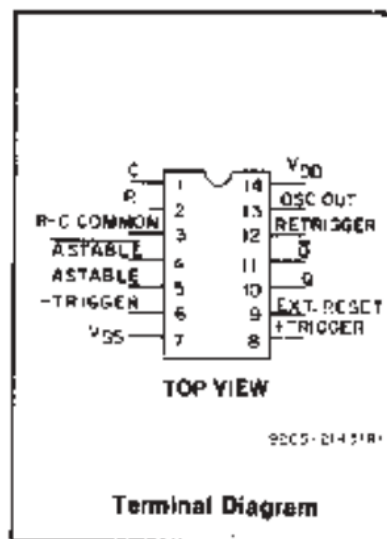


Рис.12 Схема генератора синхронізуючих імпульсів CD4047

Астабільний режим роботи (free-running) генерує періодичні імпульси із заданою частотою, яку можна налаштувати за допомогою вибору певних зворотніх зв'язів та ємнісних компонентів.

CD4047 має низьку енергозатратність та підходить для портативних приладів. Ще одним плюсом є стійкість до шуму і завад, що дозволяє забезпечити стабільну та надійну роботу генератора.

Підбір генератора зондуєчих імпульсів

Було вирішено в використати генератор зондуєчих імпульсів на базі інтегральної мікросхеми LM555 – вона є контролером з високою стабільністю,

який здатний випускати точні часові імпульси. Якщо взяти моностабільний режим роботи, то часова затримка контролюється за допомогою одного зовнішнього резистора і конденсатора. У випадку астабільного режиму роботи частота і робочий цикл контролюється двома зовнішніми резисторами і одним конденсатором. [12]

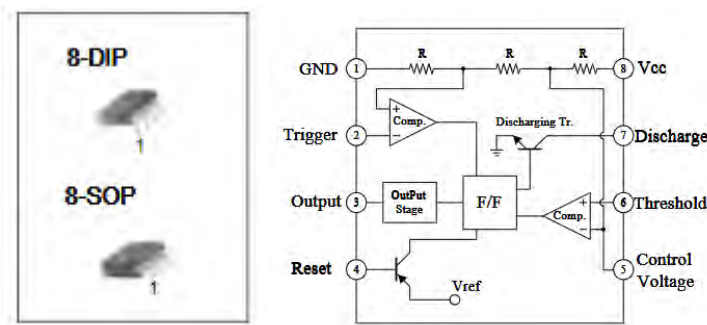


Рис.13 Інтегральна мікросхема LM555

Контролюючи тривалість зондуючих сигналів з легкістю можна підібрати потрібну зондуючу потужність. Також потрібно зауважити, що схема може працювати в широкому діапазоні робочих напруг, в такому випадку можна обрати різні варіанти джерел живлення. Сам мікроконтролер має низьку споживану потужність та низьку внутрішню шумову фільтрацію.

Підбір підсилювача з автоматичним регулюванням чутливості

Підсилювач з автоматичним регулюванням чутливості AD603.

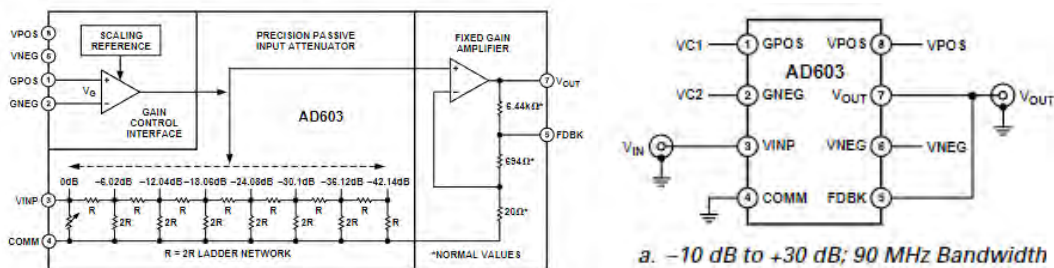


Рис. 14 Схема підсилювача з автоматичним регулюванням чутливості AD603

Він має вбудовану функцію автоматичного регулювання чутливості, яка дозволяє підсилювачу адаптуватися до різних рівнів вхідного сигналу та забезпечувати його стабільну амплітуду незалежно від змін вхідної потужності, що є вкрай необхідним для приладу, адже зондуєчий сигнал може змінюватись в залежності від товщини матеріалу. [13]

Діапазон підсилення сягає в діапазоні від десятків до сотні разів, що дозволяє ефективно налаштувати потрібний рівень підсилення для вимірювальної товщини матеріалу.

Ще одним плюсом цієї схеми є висока точність підсилення та низькі рівні спотворень сигналу, що дозволяє отримувати точний та вірогідний вихідний сигнал, вона також може працювати у широкому діапазоні частот.

Підбір приймача

У ролі приймача вирішено взяти спеціально розроблений для вимірювання амплітуди, а також фази сигналів з високою частотою AD3802. Його схема не вимагає великої кількості зовнішніх компонентів, та може працювати від єдиного джерела живлення 2.7-5.5В. [14]

Виходи схеми забезпечують вимірювання коефіцієнта підсилення, втрати та фази з високою точністю. AD8302 можна використовувати для визначення абсолютного рівня сигналу, подаючи невідомий сигнал на один вхід і калібрований опорний сигнал змінного струму на інший.

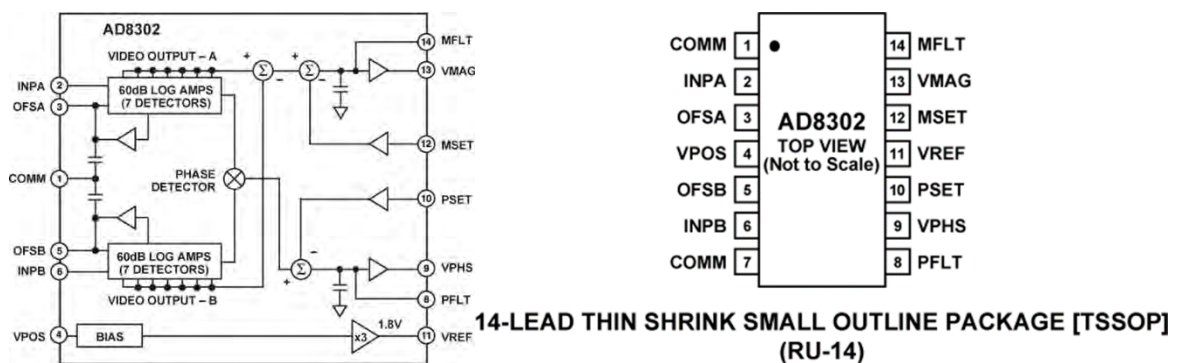


Рис.15 Схема приймача AD3802

Взаємодія з мікроконтролером відбувається за допомогою спеціального інтерфейсу SPI (Serial Peripheral Interface), що значно спрощує процес передачі даних.

Мікроконтролер

Мікроконтролером в схемі слугує STM32F103C8T6 – він побудований на базі ядра ARM, який містить 32-бітний арифметико-логічний пристрій (АЛП). [15] В архітектурі ARM працює лише з даними які зберігаються в регістрах, яких зазвичай до 18-ти, де 16 із них це регістри даних. Дані до регістрів надходять за допомогою шини даних, а команди по шині команд, далі дані проходять через дешифратор, який повідомляє АЛП команди, і до регістрів. Результат роботи АЛП також записується до регістрів звідки зчитується логікою управління. Окрім ядра в мікроконтролері є багато інтерфейсів для роботи з пам'яттю та периферійними пристроями, а також з АЦП, ЦАП та таймерами.

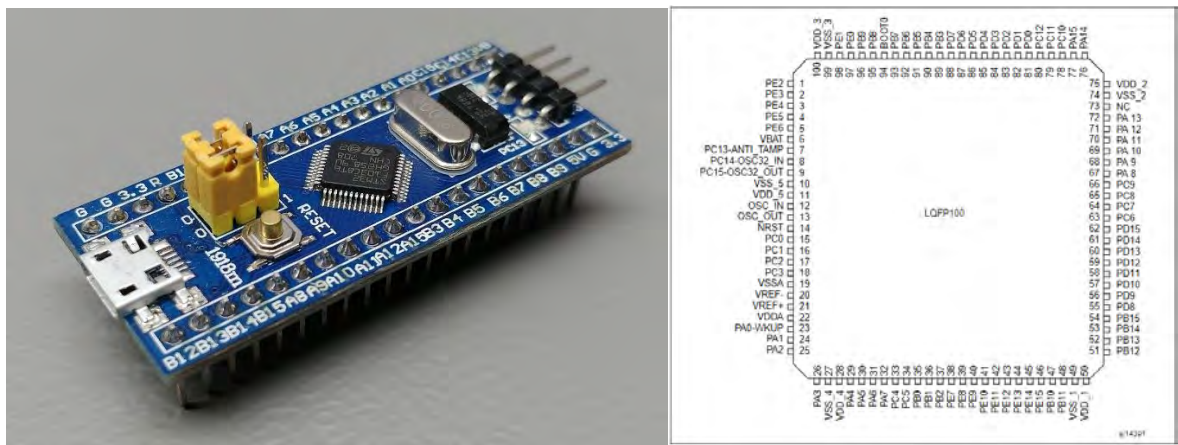


Рис. 16 Мікроконтролер STM32F103C8T6 та його схема виводів

Основні технічні характеристики:

- 32-х бітний мікроконтролер на базі ядра ARM Cortex-M3.
- робоча частота 72 МГц.

- 64 Кб flash-пам'яті.
- 20 Кб оперативної пам'яті.
- 32 виводи портів загального призначення.
- 12-бітний АЦП на 10 аналогових входів.
- 16-бітний ШІМ з 15 виходами.
- 3 UART канали, 2 I2C шини, 2 SPI шини.
- можливість налагодження за послідовним інтерфейсом.
- напруга живлення від 3.3 В.
- деякі виводи толерантні до напруги 5 В.

Цифро-аналоговий перетворювач (ЦАП).

Так як мікроконтролер не має вбудованого ЦАП, будемо використовувати зовнішній модуль, в якості якого було обрано MCP4725. [16]

Він є 12-розрядним буферним ЦАП із низькою енергозатратністю, одним каналом. Програмування вхідних та конфігураційних даних відбувається в енергозалежній пам'яті (EEPROM), за допомогою інтерфейсу I2C. Ще однією особливістю енергозалежної пам'яті є можливість ЦАП зберігати вхідний код під час вимкнення живлення, тоді як вихід ЦАП доступний одразу після увімкнення живлення.

					ПК 91.120000.000ПЗ	Арк.
						52
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

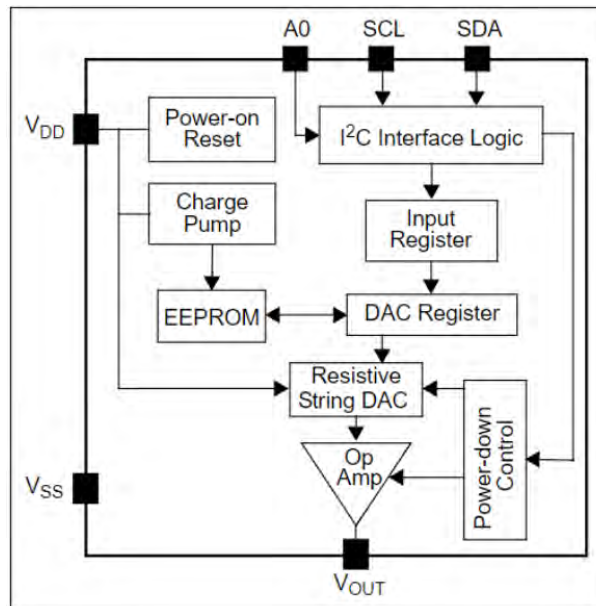


Рис.17 Структурна схема ЦАП MCP4725

Так як для приладу простота конструкції, невеликі розміри та низьке енергоспоживання є дуже важливими факторами, цей модуль ЦАП ідеально підходить під наші потреби.

Схема селекції

В якості схеми селекції, можна використати мультиплексор, наприклад CD4051B, який є 8-канальним мультиплексором із трьома двійковими керуючими входами. [17]

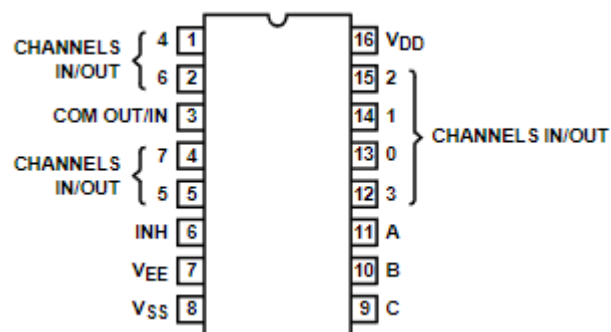


Рис. 18 Схема виводів мультиплексора CD4051B

Блок бездротового зв'язку Bluetooth

Синхронізація приладу із мобільними пристроями на базі ОС Android буде відбуватись за допомогою технології Bluetooth, в якості модуля можна використати HC-05 – це доволі простий у використанні модуль, який призначений для налаштування бездротового з'єднання. [18]



Рис. 19 Бездротовий модуль передачі даних HC-05

Основні технічні характеристики:

- Чутливість: 80 дБм.
- Потужність радіопередачі: +4дБм.
- Напруга живлення: 1.8 – 3.6 В.
- Інтерфейс UART з можливістю програмування швидкості передачі даних.

Клавіатура

Для вводу інформації, та керування товщиною використовується матрична клавіатура 3x4. Вона складається із 12 кнопок, та має компактні розміри. Так як клавіші з'єднані в матрицю, то для її підключення потрібно лише 7 контактів мікроконтролера.

					ПК 91.120000.000ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		54



Рис.20 Матрична клавіатура 3x4

Цифровий індикатор

Для виведення інформації про товщину вимірювання обрано дисплей LCD 1602.



Рис. 21 Дисплей LCD 1602

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ПК 91.120000.000ПЗ

Арк.

55

Основні технічні характеристики:

- 5x8 точок з курсором.
- Вбудований контролер (KS 006 або еквівалентний).
- Напруга живлення +5В або +3В.
- LED керується за допомогою PIN1, PIN2, або PIN15, PIN16.
- Інтерфейс: 6800, на вибір SPI/I2C (RW1063 IC). [19-26]

Інші компоненти товщиноміру

Блок формування вимірювального інтервалу

В якості блоку формування вимірювального інтервалу доцільно використати програмні засоби мікроконтролера. Враховуючи те, що не доведеться використовувати зовнішні компоненти, це зробить прилад більш бюджетним, що є однією із цілей нашого проекту. Реалізація такого блоку можлива за допомогою використання вбудованих таймерів, та режиму переривань, який дозволяє виконувати декілька процесів «паралельно».

Налаштувати блок формування вимірювального інтервалу можна за таким алгоритмом:

1. Потрібно налаштувати таймер на режим рахунку вгору та задати певну частоту переривань.
2. Встановити тривалість вимірювального інтервалу за допомогою встановлення певних значень реєстрів таймера.
3. Використовуючи функцію переривань мікроконтролера програмуємо функції збереження результатів вимірювання.

Аналогово-цифровий перетворювач (АЦП).

Так як мікроконтролер має вбудований АЦП, використовувати зовнішній модуль немає сенсу, з тієї ж причини, що і у попередньому випадку. Вбудований АЦП працює за принципом коли перетворення виконується в кілька кроків,

					ПК 91.120000.000ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		56

кількість яких залежить від розрядності АЦП. Керування кожним кроком відбувається за допомогою тактового генератора. Сама конструкція АЦП базується на методі перемикання конденсаторів.

АЦП має роздільну здатність 12-біт, та 10 каналів, тобто 10 виводів, за допомогою яких можна вимірювати аналогову напругу.

Блок захисту від завад

Цей блок також можна реалізувати за допомогою програмних засобів мікроконтролера, а нашому випадку можна написати програмний алгоритм для обробки сигналів, їх фільтрації та обробки даних. Крім того мікроконтролер має вбудовані аналогові фільтри, які можуть знизити вплив шумів та завад на аналогові сигнали. Також в мікроконтролері працюють вбудовані програмні алгоритми фільтрації та обробки сигналу. До того він має високий рівень електромагнітної сумісності для зниження впливу різних електромагнітних завад, які можуть впливати на роботу приладу.

					ПК 91.120000.000ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		57

Висновки

Головним заданням дипломного проекту була розробка портативного ультразвукового товщиноміру з можливістю синхронізації з пристроями на базі ОС Android, та конкурентно спроможними технічними характеристиками.

Під час проектування приладу було вирішено покласти в основу роботи приладу луна-імпульсний метод товщинометрії.

Був проведений розрахунок перетворювача та коефіцієнта акустичного тракту, отримані значення яких використовувалися для розробки структурної схеми приладу та його конструкції.

Структурна схема приладу була розроблена із врахуванням всіх вимог поставленої задачі. Підбір компонентів здійснювався з міркувань того, що прилад має бути компактним, надійним, та мав відносно невелику вартість.

Окрім того була розроблена функціональна схема приладу та алгоритм обробки та передачі даних на мобільні пристрої для подальшої їх обробки.

					ПК 91.120000.000ПЗ	Арк.
						58
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

Список використаних джерел

1. Галаган Р.М. Теоретичні основи ультразвукового неруйнівного контролю: підручник / Р.М. Галаган. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 263 с
2. Petryk V.F., Protasov A.G., Galagan R.M., Muraviov A.V., Lysenko I.I. Smartphone-Based Automated Non-Destructive Testing Devices. Devices and Methods of Measurements. 2020; Vol. 11(4): pp. 272-278.
3. «Основи ультразвукового неруйнівного контролю: Підручник» авторів В.К. Цапенка та Ю.В. Куца
4. Ultrasonic Testing of Materials" by Josef Krautkrämer and Herbert Krautkrämer
5. Nondestructive Testing Handbook, Third Edition: Volume 6, Electromagnetic Testing.
6. Nondestructive Testing Handbook, Third Edition: Volume 7, Ultrasonic Testing
7. DeFelsko Inspection Instruments [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://www.defelsko.com/positector-utg>.
8. Cygnus 4+ General Purpose Brochure [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://cygnus-instruments.com/wp-content/uploads/2023/03/Cygnus-4-High-Temp-Probe.pdf>
9. User Guide Elcometer 456 Coating Thickness Gauge [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: https://downloads.elcometer.com/PDFs/InstructionManuals/MultiLingual/456_user_guide.pdf.
10. Theory and Application of Precision Ultrasonic Thickness Gaging by Kenneth A. Fowler, Gerry M. Elfbaum, and Thomas J. Nelligan
11. CD4047 Datasheet [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/26874/TI/CD4047.html>

					ПК 91.120000.000ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		59

12. LM555 Datasheet [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу:
<https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/53587/FAIRCHILD/LM555.html>
13. AD8302 Datasheet [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу:
<https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/48435/AD/AD8302.html>
14. AD603 Datasheet [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу:
<https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/48080/AD/AD603.html>
15. Mainstream Performance line, Arm Cortex-M3 MCU with 64 Kbytes of Flash memory, 72 MHz CPU, motor control, USB and CAN [Електронний ресурс] – режим доступу до ресурсу:
<https://www.st.com/en/microcontrollers-microprocessors/stm32f103c8.html>
<https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/26874/TI/CD4047.html>
16. MCP4725 Datasheet [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/233449/MICROCHIP/MCP4725.html>
17. CD4051B Datasheet [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу:
<https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/26876/TI/CD4051B.html>
18. HC-05 Datasheet [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу:
https://components101.com/sites/default/files/component_datasheet/HC-05%20Datasheet.pdf
19. LCD 1602 Datasheet [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу:
https://www.waveshare.com/datasheet/LCD_en_PDF/LCD1602.pdf
20. 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.
21. 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.

					ПК 91.120000.000ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		60

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. I. Lysenko, V. Uchanin, V. Petryk, Y. Kuts, A. Protasov and A. Alexiev, "Intelligent Automated Eddy Current System for Monitoring the Aircraft Structure Condition," 2022 IEEE 3rd International Conference on System Analysis & Intelligent Computing (SAIC), Kyiv, Ukraine, 2022, pp. 1-5, doi: 10.1109/SAIC57818.2022.9922968.
24. Мікропроцесорна техніка: лабораторний практикум. Частина 1. [Електронний ресурс] / А. С. Момот; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. – 113 с.
25. Мікропроцесорна техніка: лабораторний практикум. Частина 2. [Електронний ресурс] / А. С. Момот; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 76 с.
26. Протасов, А. Г. Технології теплового неруйнівного контролю / А. Г. Протасов, Ю. Ю. Лисенко; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 133 с.

					ПК 91.120000.000ПЗ	Арк.
						61
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		