

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»
Приладобудівний факультет
Кафедра приладів та систем неруйнівного контролю**

До захисту допущено:
Завідувач кафедри
_____Анатолій ПРОТАСОВ
«__»_____2021 р.

**Дипломний проєкт
на здобуття ступеня бакалавра
за освітньо-професійною програмою «Комп'ютерно-інтегровані системи та
технології неруйнівного контролю і діагностики»
спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»
на тему: «Ультразвуковий дефектоскоп на базі смартфона»**

Виконав:
Студент IV курсу, групи ПК-71
Стешенко Ярослав Віталійович _____

Керівник:
К.т.н., доцент
Петрик Валентин Федорович _____

Консультант з графічного розділу:
Старший викладач, к.т.н.,
Богдан Галина Анатоліївна _____

Консультант з розробки електричної системи:
Доцент, к.т.н.,
Баженов Віктор Григорович _____

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

Засвідчую, що у цьому дипломному
проєкті немає запозичень з праць інших
авторів без відповідних посилань.
Студент (-ка) _____

Київ – 2021 року

ВІДОМІСТЬ ДИПЛОМНОГО ПРОЄКТУ

№ з/п	Формат	Позначення	Найменування	Кількість листів	Примітка
1	A4		Завдання на дипломний проєкт	3	
2	A4	ДП 71.15.0000.000 ПЗ	Пояснювальна записка	60	
3	A1	ДП ПК71.15.00.001 СК	Складальне креслення	1	
4	A3	ДП ПК71.15.00.002 СК	Корпус	1	
5	A4	ДП ПК71.15.00.003 СК	Кришка	1	
6	A4	ДП ПК71.15.00.004 СК	Втулка акумулятора	1	
7	A1	ДП ПК71.150000 ЕЗ	Схема електрична принципова	1	
8	A4	ДП ПК71.150000 Е1	Схема електрична структурна	1	
9	A1	ДП ПК71.150000 Е2	Схема електрична функціональна	1	

				ДП ПК71 15.000.00	
	ПІБ	Підп.	Дата		
Розробн.	Стешенко Я.В.			Лист	Листів
Керівн.	Петрик В.Ф.			1	1
Консульт.				Відомість дипломного проєкту КПІ ім. Ігоря Сікорського Каф. ПСНК Гр. ПК-71	
Н/контр.					
Зав.каф.	Протасов А.Г.				

**Пояснювальна записка
до дипломного проєкту на тему: Ультразвуковий
дефектоскоп на базі смартфона**

Київ – 2021 року

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

Кафедра приладів та систем неруйнівного контролю

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

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

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

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____Анатолій ПРОТАСОВ

«__» _____ 2021 р.

ЗАВДАННЯ

на дипломний проєкт студенту

Стешенко Ярослав Віталійович

1. Тема проєкту «Ультразвуковий дефектоскоп на базі смартфона», керівник проєкту Петрик Валентин Федорович, к.т.н., доцент, затверджені наказом по університету від «26» травня 2021 р. №1347-с

2. Термін подання студентом проєкту 11.06.2021

3. Вихідні дані до проєкту: Розробити портативний ультразвуковий дефектоскоп на базі смартфона для контролю прокатно-листового металу.

4. Зміст пояснювальної записки:

Вступ

1. Аналітичний огляд

2. Розрахункова частина

3. Конструкторсько-технологічна частина

4. Розробка принципової схеми

5. Похибки

Висновок

Список використаних джерел

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

1 – Схема електрична принципова

2 – Схема електрична функціональна

3 – Схема електрична структурна

4 – Складальне креслення

5 – Корпус

6 – Кришка

7 – Втулка акумулятора

6. Консультанти розділів проекту*

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

7. Дата видачі завдання 11.03.2021

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проекту	Термін виконання етапів проекту	Примітка
1	Формулювання завдання проекту	12.03.2021	
2	Проведення аналітичного огляду	18.04.2021	
3	Розрахунок компонентів	05.05.2021	
4	Оформлення пояснювальної записки	13.05.2021	
5	Розробка креслеників	27.06.2021	

Студент

Ярослав СТЕШЕНКО

Керівник

Валентин ПЕТРИК

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

Анотація

Метою даного дипломного проєкту є розробка ультразвукової системи неруйнівного контролю, яка використовує передові функції смартфона, для збільшення можливостей системи та зменшення апаратних витрат.

У першому розділі розповідається про ультразвукові хвилі та їх характеристики, про ультразвуковий контроль, п'єзоелектричні перетворювачі, методи ультразвукового контролю та датчики.

У другому розділі цього дипломного проєкту, для найкращого виконання задач, вибрано та розраховано п'єзоелектричний перетворювач. Для складових частин п'єзо-перетворювача було визначено габаритні розміри. Також розповідається про бездротові технології передачі даних.

У проектно-технологічному розділі розроблена конструкція п'єзо-датчика, його креслення створюється відповідно до розрахованих раніше габаритних розмірів елементів пристрою.

На основі існуючих аналогів дефектоскопа зроблена функціональна та принципова схема пристрою. Розроблено електричну базову схему та проведено розрахунок головних вузлів в електричному ланцюзі. Проведено розрахунок ударного збудження та підсилювача. Підібрано АЦП, ЦАП та мікроконтроллер.

В останньому розділі приведений розрахунок вірогідності контролю. Пораховано похибку зумовлену квантуванням, похибку операційних підсилювачів та оцінку можливості контролю.

Annotation

The purpose of this diploma project is to develop an ultrasonic system of non-destructive testing, which uses the advanced functions of a smartphone to increase the capabilities of the system and reduce hardware costs.

The first section discusses ultrasonic waves and their characteristics, ultrasonic control, piezoelectric transducers, ultrasonic control methods and sensors.

In the second section of this dissertation, a piezoelectric transducer is selected and calculated for the best performance. The overall dimensions of the piezoelectric transducer components have been determined. It also talks about wireless data transmission technologies.

In the design and technological section the design of the piezo-sensor is developed, its drawing is created according to the dimensions of the device elements calculated earlier.

Based on the existing analogues of the flaw detector, a functional and schematic diagram of the device is made. The electric basic scheme is developed and the calculation of the main knots in an electric circuit is carried out. The calculation of shock excitation and amplifier is performed. ADC, DAC and microcontroller are selected.

The last section calculates the probability of control. The error due to quantization, the error of operational amplifiers and the assessment of controllability are calculated.

ЗМІСТ

ВСТУП	11
РОЗДІЛ 1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД	13
1.1. Ультразвуковий контроль	13
1.2. Природа ультразвукових хвиль	14
1.3. Характеристики поширення хвилі	17
1.3.1. Частота	17
1.3.2. Довжина хвилі	17
1.3.3. Швидкість	17
1.3.4. Ультразвукові хвилі	17
1.3.5. Акустичний імпеданс	18
1.3.6. Акустичний тиск та інтенсивність	18
1.3.7. Види ультразвукових хвиль	19
1.3.8. Поведінка ультразвукових хвиль	19
1.4. П'єзоелектричні та сегнетоелектричні перетворювачі	19
1.4.1. П'єзоелектричний ефект	19
1.4.2. Типи п'єзоелектричних перетворювачів	20
1.4.3. П'єзоелектричні кришталеві перетворювачі	21
1.4.4. Поляризовані керамічні перетворювачі	22
1.5. Характеристики ультразвукового променя	23
1.5.1. Ультразвуковий промінь	23
1.5.2. Поширення променя	24

					<i>ПК71.150000.000 ПЗ</i>					
					<i>Ультразвуковий дефектоскоп на базі смартфону</i>					
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>				<i>Літ.</i>	<i>Арк.</i>	<i>Акрушів</i>
<i>Розроб.</i>		<i>Стешенко Я.В.</i>							8	60
<i>Перевір.</i>		<i>Петрик В.Ф.</i>						<i>ПБФ, ПК-71</i>		
<i>Н. Контр.</i>										
<i>Затверд.</i>		<i>Петрик В.Ф.</i>								

1.6.	Ослаблення ультразвукового променю	24
1.6.1.	Розсіювання ультразвукових хвиль	24
1.6.2.	Поглинання ультразвукових хвиль	25
1.7.	Дифракція	25
1.8.	Ультразвукові методи, датчики та техніка	26
1.8.1.	Основні ультразвукові методи контролю.....	26
1.8.2.	Метод передачі.....	27
1.8.3.	Метод імпульсного відлуння	27
1.8.4.	Резонансний метод.....	28
1.9.	Датчики	29
1.9.1.	Підкладковий матеріал.....	29
1.10.	Луноімпульсний метод контролю	30
РОЗДІЛ 2. РОЗРАХУНКОВА ЧАСТИНА.....		32
2.1.	Обґрунтування вибору перетворювача.....	32
2.2.	Вибір робочої частоти датчика	33
2.3.	Розрахунок п'єзоелемента.....	33
2.4.	Розрахунок товщини просвітлюючого шару.....	35
2.5.	Портативність дефектоскопу	36
2.6.	Огляд технологій бездротової передачі даних.....	37
2.7.1.	Технологія бездротової передачі даних WI-FI.....	37
2.7.2.	Бездротова технологія BLUETOOTH	39
2.7.3.	Технологія GSM.....	40
2.7.4.	Обґрунтування вибору Bluetooth технології для сполучення сенсора зі смартфоном.....	40
РОЗДІЛ 3. КОНСТРУКТОРСЬКО-ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА.....		41

3.1.	Розробка конструкції п'єзодатчика	41
3.2.	Опис функціональної схеми	41
РОЗДІЛ 4. РОЗРОБКА ПРИНЦИПОВОЇ СХЕМИ.....		43
4.1.	Розрахунок ударного збудження	43
4.2.	Розрахунок підсилювача	45
4.3.	Підбір АЦП.....	48
4.4.	Підбір ЦАП.....	49
4.5.	Підбір мікроконтролера	50
4.6.	Опис роботи розробленої електричної плати сенсора	52
РОЗДІЛ 5. ПОХИБКИ		54
5.1.	Похибка зумовлена квантуванням АЦП.....	54
5.2.	Похибка операційних підсилювачів.....	54
5.3.	Оцінка вірогідності контролю	55
ВИСНОВОК.....		56
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....		58

ВСТУП

Значну групу великих інженерних конструкцій складають зварні металеві деталі, нові композиційні зразки, такі як армовані волокнами металеві ламінати, стільникові стільники, вуглецеві та армовані скловолокном пластмаси. Інженерні споруди під час експлуатації при нестаціонарних навантаженнях, постійному впливі вібрацій та складних умовах навколишнього середовища вимагають періодичного контролю, щоб уникнути появи та еволюції дефектів, таких як корозія, розриви, розшарування, поломка волокон тощо. Усі вони мають одну спільну особливість - великі площі, що підлягають контролю, та складна геометрія.

Неруйнівний контроль (НК) - це техніка контролю без руйнування виробів або конструкцій матеріалу, що піддається обробці. Це забезпечить докази якості матеріалу, але не змінить і не пошкодить матеріал, що контролюється. Матеріали та вироблені вироби часто контролюються перед тим, як забезпечити кінцевого споживача якісною та очікуваною продукцією, що вимагаються замовниками. Найважливіше, що будь-який контроль, який проводиться на продукті, призначеному для майбутнього використання, жодним чином не загрожує його властивостям та характеристикам.

Існує багато методів НК, і ультразвуковий контроль (УК) - один із них. Однак очевидно, що ультразвуковий метод є більш універсальним, ніж інші методи. У більшості випадків УК використовується як основний або додатковий метод перевірки [1]. Можна перерахувати деякі важливі переваги техніки УК, такі як проста у використанні, нешкідлива для здоров'я людей та навколишнього середовища та має високу точність [2]. Незважаючи на те, що УК - популярний метод, ціни на пристрої дуже дорогі.

Смартфони мають безліч вдосконалених функцій, а їх потужна можливість обробки даних робить їх технологіями, які швидко розвиваються. У наш час ця технологія стала незамінною частиною нашого життя [3]. Інтеграція

					<i>ПК71.150000.000 ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		<i>11</i>

інтелектуальних пристроїв у програму УК включає багато корисних переваг. Наприклад, розроблена система УК може бути надзвичайно дешевою порівняно з ринковою.

Важливою частиною ультразвукового дефектоскопу є ультразвукова карта. Основною функцією такої карти є генерація електричних імпульсів високої напруги та високої частоти, оцифровка вхідного ультразвукового відлуння та зв'язок зі смартфоном через Bluetooth. Додаток для смартфонів може інтерпретувати та оцінювати ультразвукові дані, записані платою УК.

Пристрій, який розробляється в цій роботі, використовує ультразвукові методи для пошуку дефектів та не потребує прямого з'єднання з комп'ютером, так як передає дані через Bluetooth [4].

Такий прилад дуже спрощує роботу оператора, так як має невелику вагу та малі розміри. Оператор може здійснювати управління не використовуючи обидві руки. Бездротовий спосіб передачі даних на комп'ютер, або смартфон, дозволить користуватися кращими та сучаснішими методами інформаційної обробки. Таким чином можна зробити якісніші та точніші висновки, переглядаючи оброблені дані в досить зручному форматі для оператора [5].

					<i>ПК71.150000.000 ПЗ</i>	Арк.
						12
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД

1.1. Ультразвуковий контроль

Ультразвуковий контроль - це неруйнівний метод, при якому звукові хвилі високої частоти вводяться в матеріал, що перевіряється. Більшість ультразвукових перевірок проводиться на частотах від 0,5 до 25 МГц - значно вище діапазону людського слуху, який становить приблизно від 20 Га до 20 КГц. Звукові хвилі рухаються крізь матеріал з деякими супутніми втратами енергії (загасання) внаслідок проходження через матеріал, характеристики якого можуть бути різними, та вимірюються після відбиття на межі розділу (луноімпульс), або якщо є дефекти, то вимірюються на протилежній поверхні (передача імпульсу).

Відбитий промінь виявляється та аналізується для визначення наявності та місця недоліків. Ступінь відбиття значною мірою залежить від фізичного стану речовини на протилежній стороні межі розділу, і в меншій мірі від конкретних фізичних властивостей цієї речовини, наприклад, звукові хвилі майже повністю відображаються на межі розділу металу і газу. Також є елементи часткового відбиття на інтерфейсах металу-рідини або металу-твердого тіла.

Ультразвуковий контроль має чудову проникаючу здатність для рентгенографії і може виявити дефекти глибоко в досліджуваному зразку (скажімо, приблизно від 6 до 7 метрів сталі). Він досить чутливий до дрібних вад і дозволяє точно визначити місце розташування та розмір вад. Основний принцип ультразвукового контролю проілюстрований на рис. 1.1. [6].

					<i>ПК71.150000.000 ПЗ</i>	Арк.
						13
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

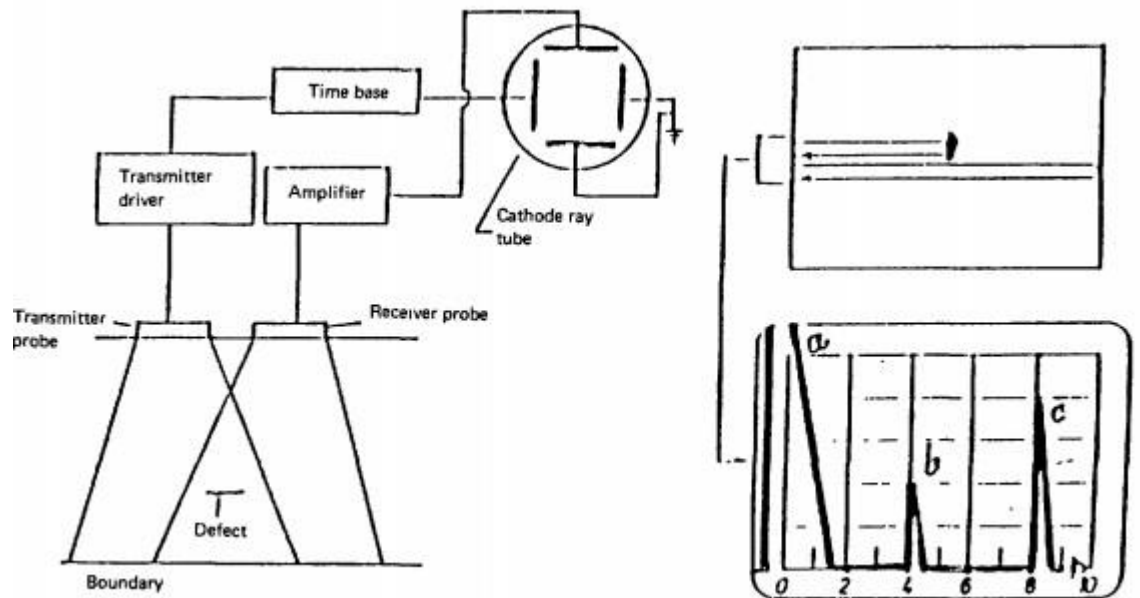


Рисунок 1.1. Основні компоненти ультразвукового дефектоскопа.

1.2. Природа ультразвукових хвиль

Щоб зрозуміти, як ультразвуковий рух хвиль відбувається в середовищі, необхідно зрозуміти механізм, який передає енергію між двома точками середовища. Це можна зрозуміти, вивчивши вібрацію гирі, прикріпленої до пружини. Рис. 1.2

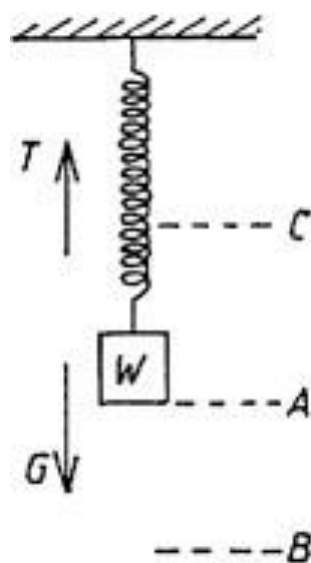


Рисунок 1.2. Гиря, прикріплена до пружини.

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

Дві сили, що діють на W , поки він знаходиться в стані спокою, - це сила тяжіння G і напруга T . Тепер, якщо W переміщено зі свого положення рівноваги A у положення B , напруга T зростає. Якщо його тепер відпустити в положенні B , W би прискорився до положення A під впливом цього збільшення напруги.

При A сила тяжіння G і напруга T знову будуть однаковими, але, оскільки зараз W рухається з певною швидкістю, вона перевищить A . Під час руху до положення C напруга T зменшується, а відносно збільшення сили тяжіння G має тенденцію до уповільнення W поки він не витратить всю свою кінетичну енергію і не зупиниться на C . При C , G більше, ніж T , і тому W знову падає до A . При A він володіє кінетичною енергією і ще раз перевищує T . Коли W рухається між A і B , T поступово збільшується і уповільнює W , поки не зупиниться на B . У B , T більше, ніж G , і все починається спочатку.

Послідовність переміщень W з положення A в B , B в A , A в C і C в A називається циклом. Кількість таких циклів у секунду визначається як частота вібрації. Час, необхідний для завершення одного циклу, відомий як часовий період T вібрації, де $T = 1/f$.

Максимальний зсув W від A до B або A до C називається амплітудою вібрації. Уся ця концепція проілюстрована на рис. 1.3.

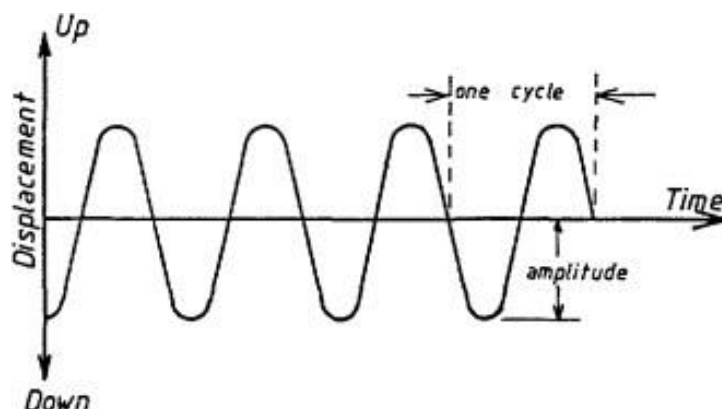


Рисунок 1.3. Ділянка переміщення W з часом відновлення роботи положення A .

									ПК71.150000.000 ПЗ	Арк.
										15
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата						

Всі матеріали виготовлені з атомів (або молекул), які з'єднані між собою міжатомними силами. Ці атомні сили є пружними, тобто атоми можна вважати такими, що вони з'єднані між собою як би за допомогою пружин. Спрощена модель такого матеріалу показана на малюнку 1.4.

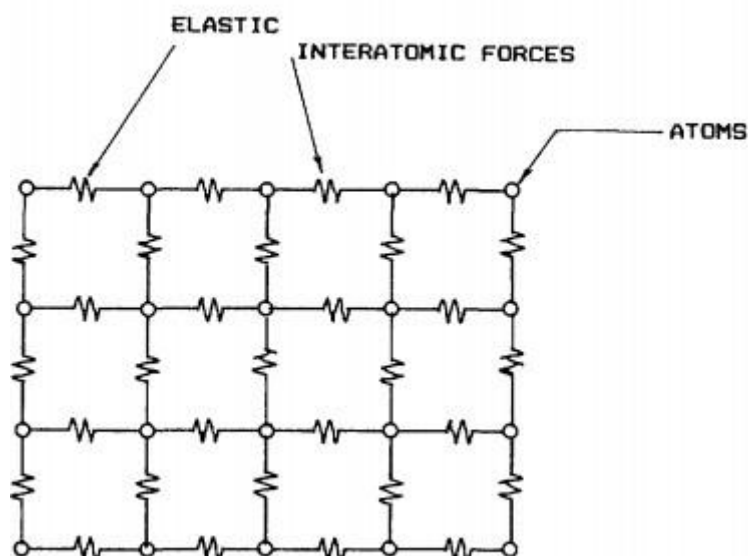


Рисунок 1.4. Модель пружного тіла.

Тепер, якщо атом матеріалу зміститься з початкового положення внаслідок будь-якого прикладеного напруження, він почне вібрувати, як вага W на рисунку 1.2. Через міжатомну зв'язок вібрація цього атома також призведе до вібрації сусідніх атомів. Коли сусідні атоми починають вібрувати, вібраційний рух передається сусіднім атомам тощо. Якби всі атоми були зв'язані між собою жорстко, всі вони розпочали б свій рух одночасно і постійно залишалися б у тому самому стані руху, тобто в одній і тій же фазі. Але оскільки атоми матеріалу натомість пов'язані між собою за допомогою пружних сил, вібрація вимагає певного часу для передачі, а атоми, досягнуті пізніше, відстають у фазі від тих, що збуджуються першими [6-7].

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

1.3. Характеристики поширення хвилі

1.3.1. Частота

Частота хвилі така ж, як і вібрація або коливання атомів середовища, в якому хвиля рухається. Зазвичай її позначають буквою f і до недавнього часу виражали як кількість циклів в секунду. Міжнародний термін для циклу в секунду названий на честь фізика Г. Герц і скорочено називається Гц [6-8].

1.3.2. Довжина хвилі

За час вібрації T хвиля проходить певну відстань у середовищі. Ця відстань визначається як довжина хвилі і позначається грецькою буквою λ . Атоми в середовищі, розділені відстанню, будуть перебувати в однаковому стані руху (тобто в одній і тій же фазі), коли хвиля проходить через середовище [6-8].

1.3.3. Швидкість

Швидкість, з якою енергія переміщується між двома точками в середовищі рухом хвиль, відома як швидкість хвилі. Зазвичай її позначають літерою V . [6-8]

1.3.4. Ультразвукові хвилі

Звукові хвилі - це коливання частинок газів, твердих речовин або рідин. Діапазон звукових частот, як правило, приймається від 20 Гц до 20 кГц. Звукові хвилі з частотами вище 20 кГц відомі як ультразвукові хвилі. Загалом для контролю матеріалів використовують ультразвукові хвилі з діапазоном частот від 0,5 МГц до 20 МГц. Найбільш поширений діапазон для випробування металів - від 2 МГц до 5 МГц [6-8].

					<i>ПК71.150000.000 ПЗ</i>	Арк.
						17
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1.3.5. Акустичний імпеданс

Опір, який заважає поширенню ультразвукової хвилі в матеріалі, відомий як акустичний імпеданс. Він позначається літерою Z і визначається множенням щільності ρ матеріалу на швидкість V ультразвукової хвилі в матеріалі [6-8].

1.3.6. Акустичний тиск та інтенсивність

Акустичний тиск - це термін, який найчастіше використовується для позначення амплітуди змінних напружень в матеріалі, що поширюється ультразвуковою хвилею.

Передача механічної енергії ультразвуковими хвилями через одиничну площу перерізу, яка перпендикулярна напрямку розповсюдження хвиль, називається інтенсивністю ультразвукових хвиль. Інтенсивність ультразвукових хвиль зазвичай позначається літерою I [6-8].

Material	Density kg/m ³	c trans m/s	c trans m/s	Z 10 ³ Pa s/m
aluminium	2700	3130	6320	17 064
aluminium oxide	3600	5500	9000	32 400
bismuth	9800	1100	2180	21 364
brass	8100	2120	4430	35 883
cadmium	8600	1500	2780	23 908
cast iron	6900	2200	5300	24 150
concrete	2000	-	4600	9 200
copper	8900	2260	4700	41 830
glass	3600	2560	4260	15 336
glycerine	1300	-	1920	2 496
gold	19300	1200	3240	62 532
grey casting	7200	2650	4600	33 120
hard metal	11000	4000	6800	74 800
lead	11400	700	2160	24 624
magnesium	1700	3050	5770	9 809
motor oil	870	-	1740	1 514
nickel	8800	2960	5630	49 544
perspex	1180	1430	2730	3 221
platinum	21400	1670	3960	84 744
polyamide (nylon)	1100	1080	2620	2 882
polyethylene	940	925	2340	2 200
polystyrol	1060	1150	2380	2 523
polyvinylchloride (PVC hard)	1400	1060	2395	3 353
porcellaine	2400	3500	5600	13 440
quartz	2650	-	5760	15 264
quartz glass	2600	3515	5570	14 482
silver	10500	1590	3600	37 800
steel (low alloy)	7850	3250	5940	46 629
steel (calibration block)	7850	3250	5920	46 472
tin	7300	1670	3320	24 236
titanium	4540	3180	6230	28 284
tungsten	19100	2620	5460	104 286
uranium o	18700	-	3200	59 840
water (20 C)	1000	-	1480	1 480
zinc	7100	2410	4170	29 607

Рисунок 1.5. Щільність, швидкість звуку та акустичний опір деяких загальних матеріалів.

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ПК71.150000.000 ПЗ

Арк.

18

1.3.7. Види ультразвукових хвиль

Ультразвукові хвилі класифікуються на основі режиму вібрації частинок середовища щодо напрямку розповсюдження хвиль, а саме: поздовжні, поперечні, поверхневі та хвилі Лемба [6-8].

1.3.8. Поведінка ультразвукових хвиль

Коли ультразвукові хвилі падають під прямим кутом до межі двох середовищ з різними акустичними імпедансами, тоді частина хвиль відбивається, а частина передається через межу. Кількість ультразвукової енергії, яка відбивається або передається, залежить від різниці між акустичними імпедансами двох середовищ. Якщо ця різниця велика, тоді більша частина енергії відбивається, і лише невелика частина передається через межу. Хоча при невеликій різниці в акустичних імпедансах більша частина ультразвукової енергії передається, і лише мала частина відбивається назад.

Загальний закон, який для певної падаючої ультразвукової хвилі на межі визначає напрямки відбитих і заломлених хвиль, відомий як закон Снелла. Відповідно до цього закону відношення синуса кута падіння до синуса кута відбиття або заломлення дорівнює відношенню відповідних швидкостей падаючої та відбитої або заломленої хвиль [6-8].

1.4. П'єзоелектричні та сегнетоелектричні перетворювачі

1.4.1. П'єзоелектричний ефект

Перетворювач - це пристрій, який перетворює одну форму енергії в іншу. Ультразвукові перетворювачі перетворюють електричну енергію в ультразвукову енергію і навпаки, використовуючи явище, відоме як п'єзоелектричний ефект. Матеріали, що проявляють цю властивість, відомі як п'єзоелектричні матеріали.

					<i>ПК71.150000.000 ПЗ</i>	Арк.
						19
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

За прямого п'єзоелектричного ефекту, вперше виявленого братами Кюрі в 1880 році, п'єзоелектричний матеріал під впливом механічного тиску розвиватиме через нього електричний потенціал (рис. 1.6). При зворотному п'єзоелектричному ефекті, вперше передбаченому Ліппманом у 1881 р., а згодом експериментально підтвердженому братами Кюрі в тому ж році, механічна деформація і, отже, вібрація в п'єзоелектричних матеріалах створюються щоразу, коли до них застосовується електричний потенціал (рис. 1.7). Прямий п'єзоелектричний ефект використовується при виявленні, а зворотний п'єзоелектричний ефект при генерації ультразвукових хвиль [6-7].

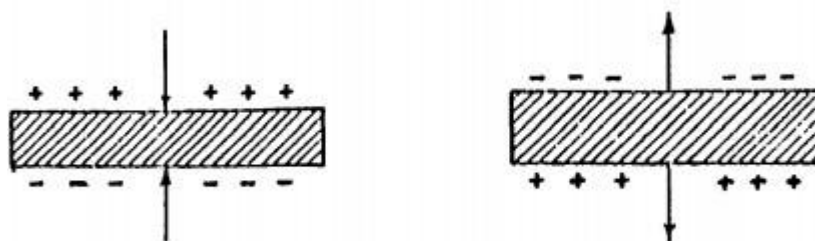


Рисунок 1.6. Прямий п'єзоелектричний ефект

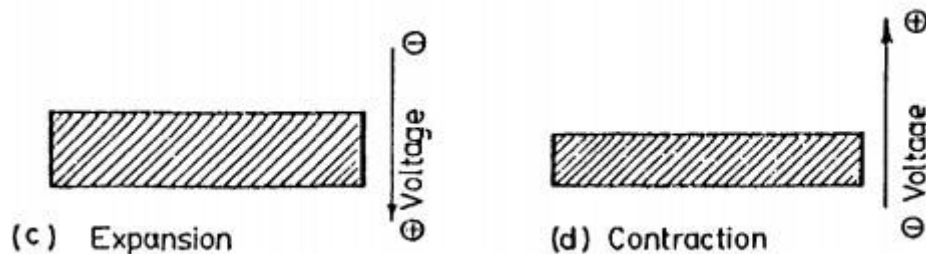


Рисунок 1.7. Зворотний п'єзоелектричний ефект

1.4.2. Типи п'єзоелектричних перетворювачів

П'єзоелектричні перетворювачі можна класифікувати за двома групами. Класифікація проводиться на основі типу п'єзоелектричного матеріалу, який використовується у виробництві перетворювача. Якщо перетворювачі виготовлені з монокристалічних матеріалів, в яких п'єзоелектричний ефект відбувається природним чином, вони класифікуються як п'єзоелектричні перетворювачі кристалів. З іншого боку, перетворювачі, виготовлені з

						<i>ПК71.150000.000 ПЗ</i>	Арк.
							20
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			

полікристалічних матеріалів, в яких п'єзоелектричний ефект повинен викликатися поляризацією, називаються поляризованими керамічними перетворювачами [6-7].

1.4.3. П'єзоелектричні кришталеві перетворювачі

Деякі з монокристалічних матеріалів, в яких п'єзоелектричний ефект відбувається природним чином, - це кварц, турмалін, сульфат літію, сульфід кадмію та оксид цинку. Серед них кварц та сульфат літію є найбільш часто використовуваними у виробництві ультразвукових перетворювачів.

Природно або штучно вирощені кристали кварцу мають певну форму, яка описується кристалографічними осями, що складаються з осей X-, Y- та Z.

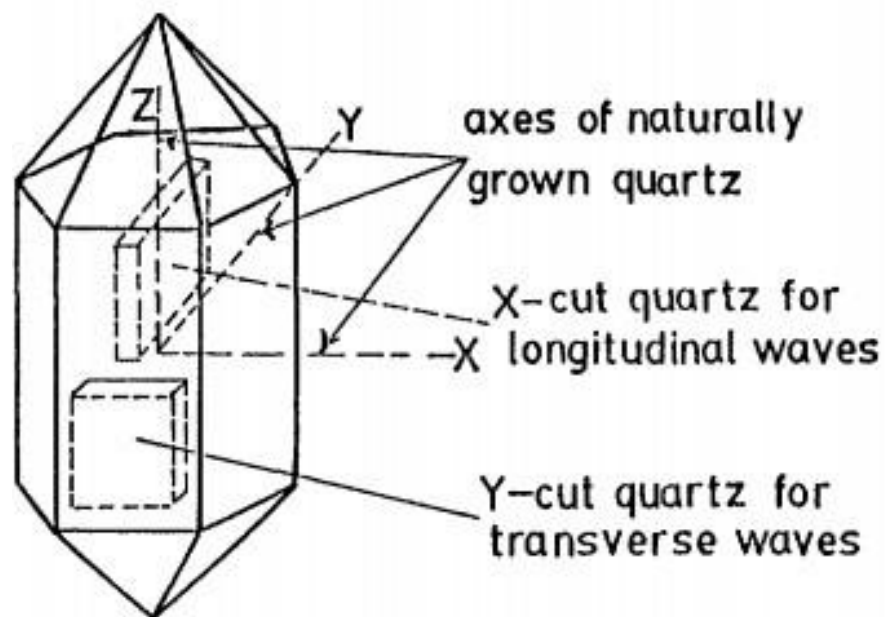


Рисунок 1.8. Системні координати в кристалі кварцу (спрощені).

П'єзоелектричний ефект у квартах може бути досягнутий лише тоді, коли з кристалу кварцу вирізані невеликі пластинки, перпендикулярні до осі X або осі Y-. Вони називаються кварцовими кристалами або перетворювачами з X-різанням або Y-різом. Вирізані кристали X використовують для виробництва та виявлення поздовжніх ультразвукових хвиль, а кристали Y-вирізу - для генерації

та прийому поперечних ультразвукових хвиль. Поперечні та поверхневі хвилі можуть бути отримані з кристала з X-вирізом, використовуючи перевагу перетворення, яке відбувається на межі розділу двох середовищ з різними акустичними імпедансами, коли поздовжня ультразвукова хвиля вражає поверхню розділу під кутом [6-7].

1.4.4. Поляризовані керамічні перетворювачі

Поляризовані керамічні перетворювачі майже повністю замінили кварц і перебувають на шляху заміни штучно вирощених кристалів як елементів перетворювачів. Поляризовані керамічні перетворювачі мають сегнетоелектричний характер. Сегнетоелектричні матеріали складаються з безлічі "доменів", кожен з яких включає велику кількість молекул, і кожен з яких має чистий електричний заряд. Коли в матеріалі не існує градієнта напруги, ці області довільно орієнтовані (рис. 1.9). Якщо подається напруга, домени, як правило, вишикуються в напрямку поля. Оскільки форма домену довша за напрямком поляризації, ніж за товщиною, матеріал в цілому розширюється. Якщо напруга змінюється в напрямку, домени також змінюють напрямок, і матеріал знову розширюється. Це на відміну від п'єзоелектричних кристалічних матеріалів, які стискаються до напруги в одному напрямку і розширюються до напруги в протилежному напрямку.

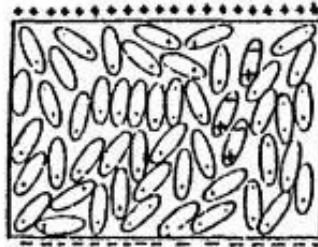
Сегнетоелектричний режим (тобто розширення як для позитивної, так і для негативної напруги) можна легко змінити на п'єзоелектричний, нагріваючи сегнетоелектричний матеріал до точки Кюрі (температура, вище якої сегнетоелектричний матеріал втрачає свої сегнетоелектричні властивості), а потім охолоджуючи, під впливом напруги зміщення приблизно 1000 В на мм товщини.

Таким чином, сегнетоелектричні домени ефективно заморожуються в їх орієнтаціях поля зміщення, і поляризований матеріал може потім розглядатися як п'єзоелектричний.

					<i>ПК71.150000.000 ПЗ</i>	Арк.
						22
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



No potential applied



Potential applied

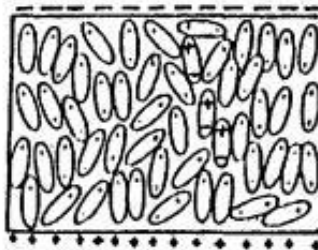


Рисунок 1.9. Домени в сегнетоелектричному матеріалі.

Поляризовані керамічні перетворювачі, як впливає з назви, виробляються як керамічний посуд тощо. Вони виготовляються з порошків, змішаних між собою, а потім обпалюваних або нагрітих до твердої речовини. Характерні властивості, необхідні датчику для певних застосувань, контролюються додаванням різних хімічних сполук у різних пропорціях [6-7].

1.5. Характеристики ультразвукового променя

1.5.1. Ультразвуковий промінь

Область, в якій поширюються ультразвукові хвилі від ультразвукового перетворювача, відома як ультразвуковий промінь. Для цілей ультразвукового контролю матеріалів значно спрощена форма ультразвукового променя для кругового перетворювача така, як показано на рисунку 1.10. Існують дві окремі області пучка, які класифікуються як область ближнього та далекого поля [6-8].

					<i>ПК71.150000.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		23

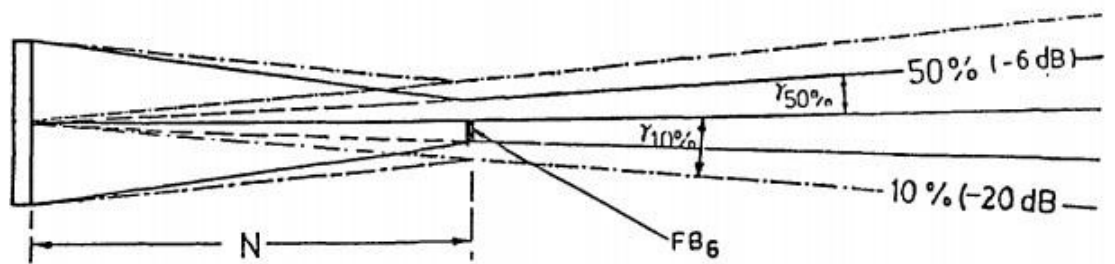


Рисунок 1.10. Форма ультразвукового променя.

1.5.2. Поширення променя

Завжди спостерігається деяке розповсюдження ультразвукового променя в дальньому полі, коли хвилі рухаються від датчика. Інтенсивність променя максимальна на центральній осі і зменшується пропорційно відстані від перетворювача [6-8].

1.6. Ослаблення ультразвукового променя

Інтенсивність ультразвукового променя, що сприймається приймаючим датчиком, значно менша, ніж інтенсивність початкової передачі. Фактори, які головним чином відповідають за втрату інтенсивності пучка, обговорюються нижче [6].

1.6.1. Розсіювання ультразвукових хвиль

Розсіювання ультразвукових хвиль пов'язано з тим, що матеріал, в якому рухається ультразвукова хвиля, не є абсолютно однорідним. Неоднорідностями може бути будь-що, що буде містити межу між двома матеріалами з різним акустичним імпедансом, такими як включення або пори, і, можливо, межі зерен, що містять забруднення. Деякі матеріали за своєю суттю неоднорідні, такі як чавун, який складається з матриці зерен та графітових частинок, які сильно відрізняються за щільністю та еластичністю. Кожне зерно в агломерації має кардинально різний акустичний опір і, отже, виробляє сильне розсіювання.

					<i>ПК71.150000.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		24

Можна зустріти розсіювання в матеріалі лише одного типу кристала, якщо кристали мають швидкості різних значень, вимірювані вздовж осей в різних напрямках. Матеріалом цього типу називають анізотропію. Якщо окремі зерна хаотично орієнтовані по всьому матеріалу, розсіювання відбуватиметься так, ніби матеріал складається з різних типів кристалів або фаз. Матеріали, що виявляють ці якості, не тільки зменшують повернутий ультразвуковий сигнал через розсіювання, але також часто видають численні невеликі відлуння, які можуть ховати або "маскувати" реальні ознаки [6].

1.6.2. Поглинання ультразвукових хвиль

Поглинання ультразвукових хвиль є результатом перетворення частини звукової енергії в тепло. У будь-якому матеріалі, що не має абсолютної нульової температури, частинки перебувають у випадковому русі в результаті вмісту тепла в матеріалі. Зі збільшенням температури відбуватиметься збільшення активності частинок. Коли ультразвукова хвиля поширюється крізь матеріал, вона збуджує частинки. Коли ці частинки стикаються з незбудженими частинками, передається енергія, змушуючи їх коливатися швидше і на більші відстані. Цей рух зберігається після проходження звукової хвилі, тому енергія проходить хвилі перетворюється в тепло в матеріалі [6].

1.7. Дифракція

Важливою властивістю ультразвукових хвиль є здатність або тенденція "нахилятися" та пропускати перешкоди, які за розміром можна порівняти з довжиною хвилі. Ця хвильова інтерференція або дифракція виникає, якщо хвиля стикається з невеликим включенням або порою в металі. Частина енергії вигинається навколо дефекту і відбиття значно зменшується (рис. 1.11). Другим прикладом цього явища є вигин ультразвукових хвиль біля краю зразка (рис. 1.12). Цей вигин може відвернути ультразвукову хвилю з того місця, де він зазвичай приймається, в якусь іншу точку [6-8].

					<i>ПК71.150000.000 ПЗ</i>	Арк.
						25
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

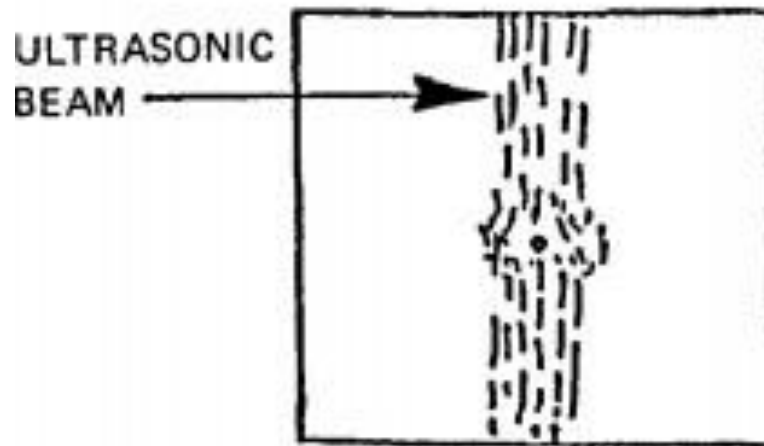


Рисунок 1.11. Навколо дефекту.

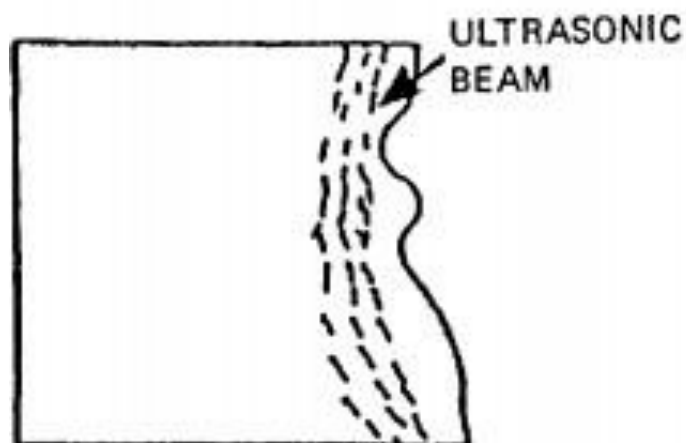


Рисунок 1.12. Біля неправильного краю.

1.8. Ультразвукові методи, датчики та техніка

1.8.1. Основні ультразвукові методи контролю

Ультразвукові хвилі, що надходять на межу між двома середовищами, частково відбиваються в середовищі, з якого вони падають, і частково передаються в інше середовище. Метод ультразвукового контролю, який використовує передану частину ультразвукових хвиль, є методом наскрізної передачі, тоді як той, що використовує відбиту частину хвиль, класифікується як

										Арк.
										26
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата						

метод луноімпульсного контролю. Іншим методом, який використовується для ультразвукового випробування матеріалів, є резонансний метод [6-8].

1.8.2. Метод передачі

У цьому методі використовуються два ультразвукові зонди. Один - зонд передавача, а інший - зонд приймача. Ці зонди розташовані на протилежній стороні зразка, як показано на рисунку 1.13.

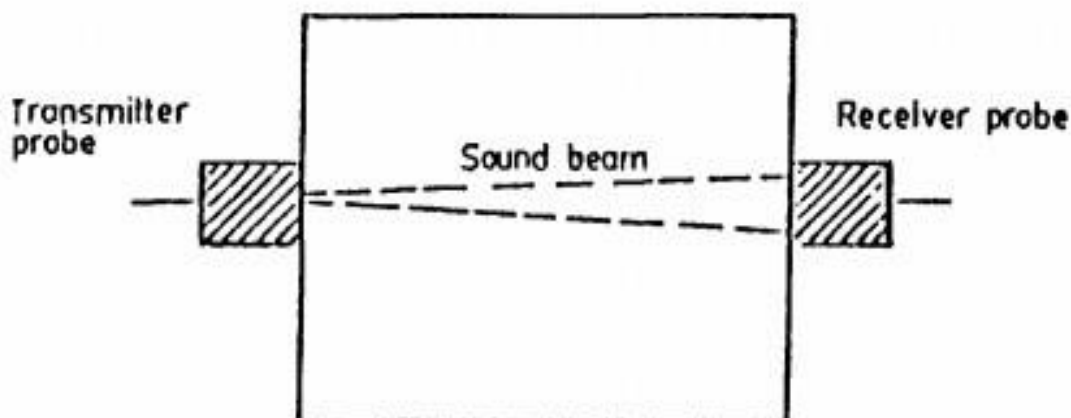


Рисунок 1.13. Положення зондів передавача та приймача у методі наскрізної передачі ультразвукового контролю.

У цьому методі наявність внутрішнього дефекту вказується зменшенням амплітуди сигналу, або у випадку грубих дефектів, повною втратою переданого сигналу.

Цей метод застосовується для перевірки великих злитків та виливків, особливо коли затухання велике та є грубі дефекти. Метод не дає розміру та місця дефекту. Крім того, важливим є хороше механічне зчеплення та суміщення двох щупів [6-8].

1.8.3. Метод імпульсного відлуння

Цей метод найчастіше застосовується при ультразвуковому контролі матеріалів. Зонди передавача та приймача знаходяться на одній стороні зразка, і

					ПК71.150000.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		27

наявність дефекту вказується прийомом луно-сигналу перед луно-сигналом задньої стінки. Екран відкалібрований, щоб показати поділ на відстані між часом надходження відлуння дефекту проти відлуння задньої стінки зразка, отже, місце дефекту можна точно оцінити. Принцип методу імпульсного луно-сигналу проілюстрований на рисунку 1.14 (а), (б) і (в) [6,8].

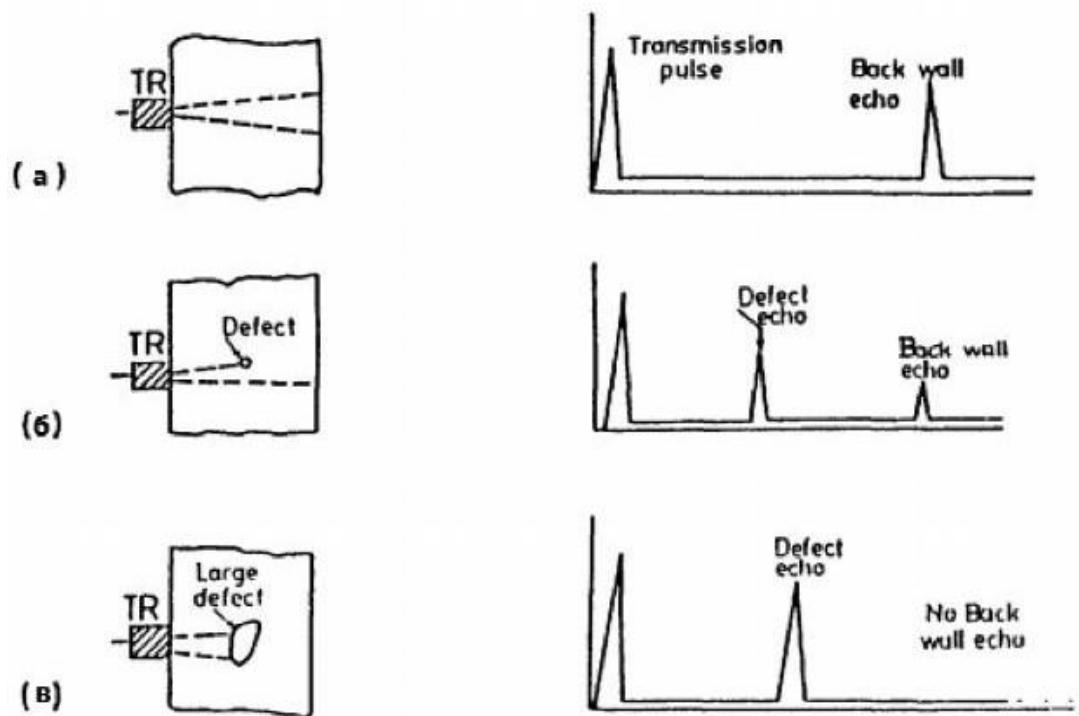


Рисунок 1.14. Принцип методу імпульсного луно-сигналу ультразвукового контролю. Бездефектний зразок (а), зразок з невеликим дефектом (б) і зразок з великим дефектом (в).

1.8.4. Резонансний метод

Умова резонансу існує, коли товщина матеріалу дорівнює половині довжини хвилі звуку або будь-якому кратному йому в цьому матеріалі. Контроль довжини хвилі в ультразвуці досягається контролем частоти. Якщо у нас є передавач з регульованою частотою, він може бути налаштований для створення умови резонансу для товщини випробовуваної пластини. Цей стан резонансу легко розпізнати за збільшенням амплітуди отриманого імпульсу.

Оскільки важко розпізнати основний режим вібрації, основна частота зазвичай обчислюється з різниці двох сусідніх гармонік, які зображені двома сусідніми підняттями амплітуди імпульсу.

Резонансний метод ультразвуку свого часу був спеціально придатний для вимірювання товщини тонких зразків, таких як облицювальні труби для реакторних паливних елементів. Цей метод в основному витіснився методом імпульсного луно-сигналу завдяки вдосконаленій конструкції перетворювача [6,8].

1.9. Датчики

1.9.1. Підкладковий матеріал

Основний матеріал зонда використовується для контролю двох основних характеристик зонда - роздільної здатності та чутливості.

Роздільна здатність зонда - це його здатність відокремлювати відлуння від двох вад, що знаходяться близько одна до одної по глибині.

Чутливість зонда визначається як зонд для виявлення відлуння від невеликих вад.

Щоб мати зонд з високою роздільною здатністю, вібрацію датчика зонда слід гасити якомога швидше. Але щоб мати зонд з високою чутливістю, гасіння вібрації датчика має бути якомога меншим. Ці дві вимоги суперечать одна одній, і тому слід знаходити компроміс.

Максимальне гасіння коливань датчика досягається, коли матеріал підкладки має такий самий акустичний імпеданс, як і датчик. Такий збіг акустичних імпедансів перетворювача та підкладкового матеріалу дозволяє ультразвуку легко переходити від перетворювача в підкладковий матеріал. Підкладковий матеріал також повинен забезпечувати високий ступінь ослаблення та поглинання для розсіювання переданого ультразвуку, щоб він не

					<i>ПК71.150000.000 ПЗ</i>	Арк.
						29
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

відбивався від тильної сторони підкладкового матеріалу для створення фальшивих сигналів. Щоб мати достатню чутливість з високою роздільною здатністю, невідповідність акустичних імпедансів перетворювача та підкладкового матеріалу зазвичай становить приблизно 5 до 1 для перетворювачів кварту і 1,1 до 1 для перетворювачів сульфату літію. Основні матеріали для імпульсних луно-зондів часто виготовляються з волокнистої пластмаси або металевих порошоків у поєднанні з різними пластичними матеріалами. Зниження можна контролювати розміром зерен порошку та імпедансом пропорціями металевого порошку та пластику [6-7].

1.10. Луноімпульсний метод контролю

Цей метод дуже добре підходить для реалізації поставлених цілей проєкту, тому його потрібно дослідити краще за інші. У звичайній техніці ультразвуковий промінь проєктується перпендикулярно до зразка. У цій техніці можуть застосовуватися як одинарні, подвійні, так і зонди із звичайним променем. З одним зондом перетворювач зонда діє як передавач і приймач. У цій техніці імпульс ультразвукового пучка проєктується в зразку і отримує відлуння від вад всередині зразка і від задньої стінки зразка (рис. 1.15). Виникнення великого імпульсу передачі при використанні одиночних датчиків робить техніку одиночного зонда ефективною для виявлення недоліків біля поверхні та для вимірювання товщини тонкої стінки.

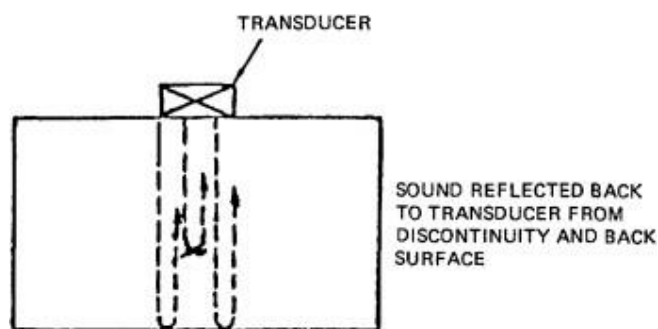


Рисунок 1.15. Техніка луноімпульсного сигналу одного перетворювача.

					<i>ПК71.150000.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		30

Методи подвійного нормального пучка корисні, коли форма зразка неправильна, а задня поверхня не паралельна передній поверхні. Один зонд передає ультразвуковий промінь до зразка, а другий приймає відлуння від дефектів і задньої стінки (рис. 1.16).

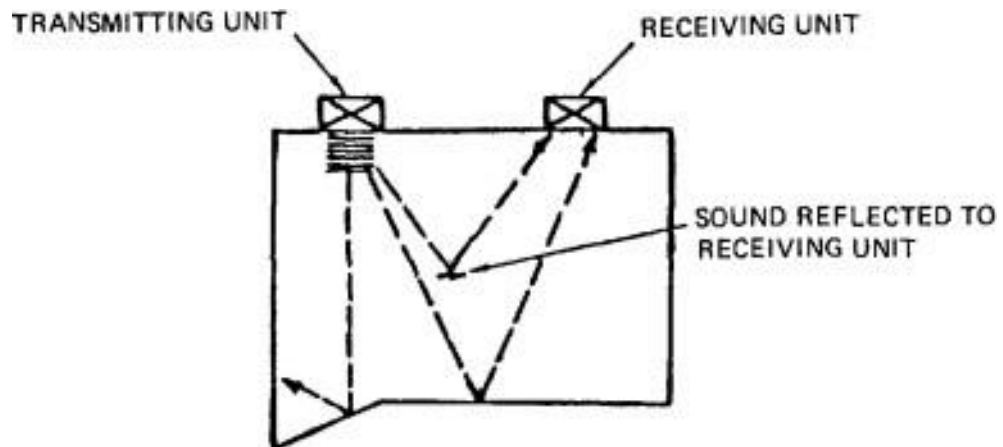


Рисунок 1.16. Техніка подвійного луноімпульсного перетворювача.

У звичайних методах вимірювання два перетворювачі знаходяться в одному положенні з іншим із перетворювачів, який виконує роль передавача, а інший - як приймач. За допомогою цих методів можливі вимірювання товщини тонких стінок та виявлення дефектів біля поверхні завдяки усуненню імпульсу передачі [6-8,9].

РОЗДІЛ 2. РОЗРАХУНКОВА ЧАСТИНА

Після аналітичного огляду, проаналізувавши добре усі існуючі методи дефектоскопії, було вирішено, що луноімпульсний метод найкраще підходить для цілей даного проєкту. Головною його перевагою є те, що цей метод надзвичайно простий. Для контролю потрібен лише один п'єзоелектричний перетворювач, який дозволяє здійснювати ручне управління без необхідності точного позиціонування датчика. Луноімпульсний метод допомагає чітко визначити місце дефекту, глибину, на якій лежить дефект, а також його координати в об'єкті огляду.

2.1. Обґрунтування вибору перетворювача

На сьогоднішній день доступний досить широкий спектр п'єзоелектричних перетворювачів з різною формою, різним призначенням, та різними резонансними частотами. Багато людей знає, що для проведення контролю у кожного матеріалу є свої вимоги.

Найважливішим елементом для перетворювачів є п'єзоелектричні елементи. Якщо відомі вимоги до використання перетворювача, вибирають форму та розмір п'єзоелемента.

$$h = \frac{\lambda_{\text{ПЕ}}}{2} = \frac{C_{\text{ПЕ}}}{2 \times f} \quad (2.1)$$

Для визначення характеристик напрямку випромінювання (зона опромінення, роздільна здатність, чутливість, діаграма випромінювання) необхідно виходити з поперечних розмірів інвертора.

Рекомендується контролювати співвідношення: поперечний розмір, поділений на товщину, повинен бути приблизно 20. Тоді величина збудження пластини буде більш ефективною [8].

$$\frac{2a}{h} \approx 20 \quad (2.2)$$

					<i>ПК71.150000.000 ПЗ</i>	Арк.
						32
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

У цій роботі вирішив використовувати прямий перетворювач, щоб виконати всі потрібні вимоги для забезпечення контролю та простоти параметрів конструкції.

2.2. Вибір робочої частоти датчика

Робочу частоту беру таку, як зазначено в технічному завданні: $f_p = 1.25$ МГц. В об'єкті контролю довжина хвилі визначається за формулою:

$$\lambda_{ок} = \frac{C_{ок}}{f_p} \quad (2.3)$$

де $C_{ок} = 5100$ м/с – швидкість поширення ультразвукової хвилі у матеріалі (сталь). Можемо знайти довжину хвилі:

$$\lambda_{ок} = \frac{5.1 \cdot 10^6}{1.25 \cdot 10^6} = 4.08(\text{мм}) \quad (2.4)$$

2.3. Розрахунок п'єзоелемента

П'єзоелементом обираємо ЦТС-19, який має такі акустичні характеристики (табл. 2.1).

Таблиця 2.1. Параметри ЦТС-19

Матеріал	Швидкість звуку C , 10^3 м/с	Густина ρ , 10^3 кг/м ³	Характеристичний імпеданс Z , 10^6 Па·с/м	Відносна діелектрична проникність, ϵ	Електрична міцність E_{max} , 10^3 В/мм	П'єзомодуль d_{33} , 10^{-12} Кл/Н	Коефіцієнт електро механічного зв'язку, K_p	Температура Кюрі, °С	Механічна добротність, Q
П'єзокераміка вітчизняного (або країн ближнього зарубіжжя) виробництва									
ЦТС-19	3,3±0,3	7,4-7,5	22-27	1750±200	3,0	330-350	0,45-0,6	>290	80

Розрахуємо довжину хвилі для п'єзоперетворювача:

$$\lambda_{пе} = \frac{C_{цтс}}{f_p} \quad (2.5)$$

де $C_{цтс}$ – швидкість поширення ультразвуку в ЦТС-19

					<i>ПК71.150000.000 ПЗ</i>	Арк.
						33
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$\lambda_{\text{пе}} = \frac{3150}{1.25 \cdot 10^6} = 2.88(\text{мм}) \quad (2.6)$$

Розрахуємо розміри п'єзоелементу, для цього використаємо формулу (2.1):

$$h = \frac{3150}{2 \cdot 1.25 \cdot 10^6} = 1.44 \cdot 10^{-3}(\text{м}) = 1.44(\text{мм}) \quad (2.7)$$

Також розрахуємо поперечний розмір перетворювача за формулою (2.2):

$$\frac{2a}{1.44} \approx 20; 2a \approx 20 \cdot 1.44; 2a \approx 29(\text{мм}) \quad (2.8)$$

Аналізуючи вираховані величини, можна зробити висновок, що геометричний розмір п'єзоелемента такий:

$$h = 1.44 (\text{мм})$$

$$2a = 29 (\text{мм})$$

Знаючи частоту, можемо знайти період коливання:

$$T = \frac{1}{f_p} = \frac{1}{1.25 \cdot 10^6} = 0.8 \cdot 10^{-6} (\text{с}) \quad (2.9)$$

Загальний час зондувального імпульсу τ_i можна вибрати з таких меж:

$$\tau_i = (3 \div 5)T \quad (2.10)$$

Беремо $\tau_i = 4 \cdot T$, тоді:

$$\tau_i = 4 \cdot 0.8 \cdot 10^{-6} = 3.2 (\text{мкс}) \quad (2.11)$$

Отже повздовжня роздільна здатність буде:

$$\delta_D = \frac{1568 \cdot 3.2 \cdot 10^{-6}}{2} = 2.509 (\text{мм}) \quad (2.12)$$

Компаунд найкраще підійде для матеріала демпфера, тому обираємо його[8,10].

										ПК71.150000.000 ПЗ	Арк.
											34
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата							

2.4. Розрахунок товщини просвітлюючого шару

Для п'єзоелектричного перетворювача досить важливим є просвітлюючий шар, який захищає п'єзоелемент від пошкоджень (рис. 2.3), а також захищає пластину від стирання.

$$z_{\text{цтс}} = C_{\text{цтс}} \cdot \rho_{\text{цтс}}$$

С_{цтс} і ρ_{цтс} – значення беремо с табл. 2.1

$$z_{\text{цтс}} = 3.6 \cdot 10^3 \cdot 7.5 \cdot 10^3 = 27 \cdot 10^6 \text{ (Па} \cdot \text{с/м)} \quad (2.13)$$

де $z_{\text{цтс}}$ – імпеданс ЦТС-19 [Па·с/м], $z_{\text{ок}}$ – імпеданс ОК [Па·с/м].

Таблиця 2.2. Акустичні властивості металів та їх сплавів

Речовина	C_L , 10 ³ м/с	C_T , 10 ³ м/с	ρ , 10 ³ кг/м ³	z , 10 ⁶ кг·м ⁻² ·с ⁻¹	Коефіцієнт Пуассона, ν	f , 10 ⁶ Гц	α , Нп/м
Метали							
Алюміній	6,24	3,1	2,7	17,2	0,34	2,5	0,1...1,0
Бронза	3,5...3,8	2,3...2,5	8,0...9,0	30,0...34,0	0,33...0,38	–	–
Вольфрам	5,32	2,6	19,3	102,7	0,35	–	–
Дюралюміній	6,2...6,4	3,0...3,2	2,7...2,8	19,0...20,0	0,34	2,5	0,1...1,0
Залізо	5,93	3,23	7,8	46,3	0,29	2,5	0,2...5,0
Латунь	4,3...4,7	3,1...3,5	8,4...8,5	36,0...40,0	0,35	–	–
Магній	5,74	3,05	1,74	9,98	0,33	2,5	0,1...2,0
Мідь	4,72	2,3	8,9	42,0	0,35	2,5	2,5...5,0
Нікель	5,7	3,0	8,9	50,7	0,31	–	–
Олово	3,32	1,67	7,3	24,2	0,39	–	–
Свинець	2,16	0,8	11,4	24,6	0,42...0,44	–	–
Срібло	3,65	1,65	10,5	38,3	0,37	–	–
Сталь вуглецева	5,9...5,94	3,22...3,25	7,7...7,9	45,9...46,3	0,24...0,28	2,5	0,1...10
Сталь аустенітна	5,7...6,14	3,20...3,31	7,6...8,0	44,0...48,0	–	2,5	0,3...40
Титанові сплави	6,05...6,3	3,1...3,3	4,5...4,7	27,0...29,0	–	–	–
Цинк	4,17	2,41	7,1	29,6	0,25...0,27	–	–
Чавун	3,5...5,8	2,2...3,2	7,0...7,5	26,0...42,0	0,22...0,27	2,5	0,3...50

Імпеданс латуні є найближчим до знайденого імпедансу [8] (Слат = 4.5 · 10³ м/с, ρ_{лат} = 8.5 · 10³ кг/м³).

$$z_{\text{лат}} = \rho_{\text{лат}} \cdot \text{Слат} = 8.5 \cdot 10^3 \cdot 4.5 \cdot 10^3 = 38.25 \text{ (Па} \cdot \text{с/м)} \quad (2.15)$$

де $Z_{\text{лат}}$ – імпеданс латуні, Па·с/м

Так як латунь обирається просвітлюючим шаром, то можна зробити такий

висновок: $S_{\text{пш}} = \frac{z_{\text{лат}}}{\rho_{\text{лат}}}$

$$\lambda_{\text{пш}} = \frac{C_{\text{пш}}}{f} = \frac{4500}{1.25 \cdot 10^6} = 3.6 \text{ (мм)} \quad (2.16)$$

Розрахуємо товщину просвітлюючого шару:

$$D_{\text{пш}} = n \frac{1}{4} \lambda_{\text{пш}} = \frac{3.6 \cdot 10^{-3}}{4} = 0.9 \text{ (мм)} \quad (2.17)$$

З конструктивних міркувань та вирахуваних значень величини просвітлюючого шару будуть такі (Рис.2.1) [8,10].

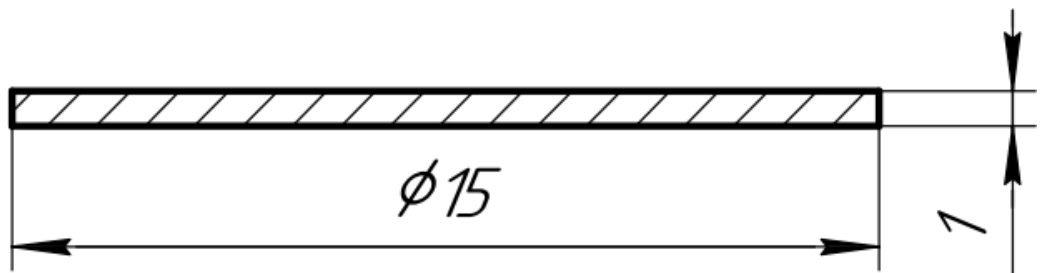


Рисунок 2.1. Просвітлюючий шар (протектор)

2.5. Портативність дефектоскопу

Портативність ультразвукового дефектоскопа, про який йдеться в цій роботі, має низку переваг перед існуючими пристроями. Дослідження базується на ультразвуковому методі виявлення дефектів, що робить процес управління не тільки безпечним, але і достатньо точним для однозначного встановлення стану об'єкта дослідження. Завдяки аналізу сучасних електронних елементів споживання енергії було мінімізовано, що, в свою чергу, збільшило час роботи пристрою, з однаковими параметрами джерела живлення. Беручи до уваги джерело живлення, варто зазначити, що використовуються Li-pol акумулятори, які при невеликих розмірах можуть зберігати великі обсяги заряду. Застосування технології бездротової передачі даних дозволяє використовувати пристрій в автоматизованих системах для перевірки зварних швів листового матеріалу, склеювання, пайки тощо на наявність різних дефектів. Можливість використання радіохвиль передачі інформації дозволяє використовувати більш досконалі системи обробки даних на значній відстані від ІО [11].

										Арк.
										36
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ПК71.150000.000 ПЗ					

Для інженера є важливим завданням проектування обладнання та систем, які мають високу автоматизацію та можуть конкурувати з існуючим обладнанням. Параметрами, що впливають на конкурентоспроможність існуючого обладнання, є розрахунок вартості, пристосованість, загальні розміри та простота використання.

2.6. Огляд технологій бездротової передачі даних

Використання бездротових технологій стає все більш поширеним, в той час як кабельні технології йдуть у минуле. Використання таких технологій безпечніше і має більшу гнучкість у використанні. Розглядаються 3 найпоширеніші технології передачі даних не використовуючи провід: GSM, BLUETOOTH, WI-FI. Усі ці технології використовуються у смартфоні, тому вони і були обрані [11].

2.7.1. Технологія бездротової передачі даних WI-FI

Технологія Wi-Fi бере свій початок у постанові Федеральної комісії зв'язку США, яка випустила діапазони радіочастот на частотах 900 мегагерц (МГц), 2,4 гігагерц (ГГц) та 5,8 ГГц для неліцензійного використання. Технологічні фірми почали будувати бездротові мережі та пристрої, щоб скористатися перевагами нещодавно доступного радіочастотного спектру, але без єдиного бездротового стандарту рух залишався фрагментованим, оскільки пристрої різних виробників були рідко сумісними. Врешті-решт комітет лідерів галузі випустив загальний стандарт під назвою 802.11, який був затверджений Інститутом інженерів електротехніки та електроніки (IEEE) у 1997 р. Через два роки група основних компаній створила Альянс сумісності бездротового Ethernet (WECA) , тепер Wi-Fi Alliance), глобальна некомерційна організація, створена для просування нового бездротового стандарту. WECA назвала нову технологію Wi-Fi. Подальші стандарти IEEE для Wi-Fi були введені, щоб забезпечити більшу пропускну здатність. Початковий стандарт 802.11 допускав максимальну

					<i>ПК71.150000.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		37

швидкість передачі даних лише 2 мегабіт в секунду (Мбіт / с); 802.11n, представлений в 2007 році, має максимальну швидкість 600 Мбіт / с.

Згідно зі стандартами IEEE Wi-Fi, доступні смуги частот поділяються на кілька окремих каналів. Ці канали перекриваються за частотою, і тому Wi-Fi використовує канали, які знаходяться далеко один від одного. У кожному з цих каналів Wi-Fi використовує техніку «розширеного спектру», при якій сигнал розбивається на частини та передається на декількох частотах. Розширений спектр дозволяє передавати сигнал з меншою потужністю на частоту, а також дозволяє декільком пристроям використовувати один і той же передавач Wi-Fi. Оскільки сигнали Wi-Fi часто передаються на невеликі відстані (як правило, менше 100 метрів) у приміщеннях, сигнал може відбиватися від стін, меблів та інших перешкод, таким чином надходить з різними інтервалами часу і викликає проблему, яка називається багатопроменеві перешкоди. Wi-Fi зменшує багатопроменеві перешкоди, поєднуючи три різні способи передачі сигналу (у методі, розробленому австралійським інженером Джоном О'Салліваном та його співавторами).

Популярність Wi-Fi стабільно зростала. Wi-Fi дозволяє локальним мережам (LAN) працювати без кабелів та проводки, що робить його популярним вибором для домашніх та ділових мереж. Wi-Fi також може бути використаний для забезпечення бездротового широкосмугового доступу до Інтернету для багатьох сучасних пристроїв, таких як ноутбуки, смартфони, планшетні комп'ютери та електронні ігрові приставки. Пристрої з підтримкою Wi-Fi можуть підключатися до Інтернету, коли вони знаходяться поблизу областей, що мають доступ до Wi-Fi, які називаються "гарячими точками". Гарячі точки стали звичними, і багато громадських місць, таких як аеропорти, готелі, книжкові магазини та кав'ярні, пропонують бездротовий доступ до Інтернету. Деякі міста побудували безкоштовні загальноміські мережі Wi-Fi. Версія Wi-Fi, яка називається Wi-Fi Direct, дозволяє підключатися між пристроями без локальної мережі [12].

					<i>ПК71.150000.000 ПЗ</i>	Арк.
						38
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2.7.2. Бездротова технологія BLUETOOTH

Бездротова технологія Bluetooth (BWT) була розроблена в 1994 році в компанії Ericsson у Швеції. Початковою метою BWT було усунення потреби у власних кабельних з'єднаннях між такими пристроями, як КПК та ноутбуки. Хоча інфрачервоний зв'язок існував на той час, він вимагав прямого нагляду. Тому Ericsson вирішив використовувати недорогий радіоприймач із низьким енергоспоживанням, вбудований у кожен пристрій, що дозволяє без дротів підключати пристрої через стіни та інші неметалічні матеріали. Після того, як Ericsson розпочав роботу над BWT, концепція перетворилася на радіотехніку, яка одночасно підключає кілька пристроїв до бездротової персональної мережі (WPAN).

Через необмежений потенціал BWT, у 1998 році була створена Група спеціальних інтересів Bluetooth (SIG) 1 для розробки специфікації Bluetooth IEEE 802.15. Специфікація стандартизувала розробку пристроїв із підтримкою BWT, щоб пристрої різних виробників могли працювати разом. Що це означає для вас? За допомогою BWT ви можете запускати презентацію на проекторі з підтримкою BWT клієнта без кабельного з'єднання. Якщо ви залишаєте файл на настільному ПК у своєму офісі, не турбуйтеся. Використовуйте PDA або ноутбук із підтримкою BWT для підключення до офісної локальної мережі через мобільний телефон із підтримкою BWT - не виймаючи телефон з портфеля. Обмінюйтеся електронними візитними картками з усіма в кімнаті, незалежно від того, де вони сидять, кількома натисканнями на КПК. Потім PDA економить ваш час, автоматично синхронізуючи їх контактну інформацію з електронною поштою на вашому ноутбуці. Ці продукти з підтримкою BWT доступні сьогодні. Цей документ містить огляд BWT, описує вимоги до встановлення з'єднання BWT та інформацію про продукти HP, що містять BWT [13].

					<i>ПК71.150000.000 ПЗ</i>	Арк.
						39
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2.7.3. Технологія GSM

GSM означає Глобальну систему мобільного зв'язку. GSM, як правило, використовується на мобільних системах листування на планеті. Структура GSM була створена як вдосконалений фреймворк, що використовує метод множинного доступу з розподілом часу (TDMA) з причин листування. У цій роботі ми представили короткий огляд системи GSM. GSM влаштовує інакше звану мережу 2G. Можливість GSM була створена в лабораторіях Bell в 1970 році. Вона, як правило, використовується на портативній системі листування на планеті. GSM є відкритою та вдосконаленою інновацією стільникового зв'язку, що використовується для передачі універсальної голосової та інформаційної служби, яка працює на частотах 850 МГц, 900 МГц, 1800 МГц та 1900 МГц [14].

2.7.4. Обґрунтування вибору Bluetooth технології для сполучення сенсора зі смартфоном

Важлива концепція створення бездротового каналу для передачі інформації, для неруйнівного контролю, а також при розробці автоматизованої системи збору та передачі даних. Бездротова передача даних дозволяє скоротити час на огляд будівлі та мінімізувати кількість працівників. Оскільки технологія BLUETOOTH є енергоефективною і доступною на всіх смартфонах, було вирішено використовувати її для підключення датчика до телефону. Досить зручно вести обробку сигналу у смартфоні, маючи можливість відправки результатів контролю на сервер [15,24].

					<i>ПК71.150000.000 ПЗ</i>	Арк.
						40
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 3. КОНСТРУКТОРСЬКО-ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА

3.1. Розробка конструкції п'єзодатчика

Датчик має просту конструкцію, але повинен складатися з таких елементів: п'єзоелектричний елемент, заслінка, основа, корпус, гвинт і кришка. Отже, процес створення такого перетворювача включає процес отримання кожного окремого елемента та їх комбінування між собою.

Корпус виконує роль захисної частини конструкції. Збираючи пристрій, припаяйте дроти до п'єзоелемента, а потім приклейте п'єзоелемент до демпфера та протектора. Приклейте сенсорний елемент до фюзеляжу, а потім залийте 2/3 об'ємної епоксидної смоли у будівельний простір. Провід, що з'єднується з п'єзоелементом, проходить через зазор у корпусі. Потім отвір накривають горішками на кришці. Останнім кроком у збірці є закручування гвинта до п'єзоелемента.

3.2. Опис функціональної схеми

На функціональній схемі яку, зображено на рисунку 3.1 головним є блок керування, він же мікроконтроллер. Він керує транзисторним ключем і коли генерується імпульс, ключ відкривається(на 10-15нс) і відбувається ударне збудження. На п'єзоелектричний перетворювач(ПЕП) подається високовольтний імпульс. Коли імпульс згенеровано, ключ закривається, а контролер переходить до режиму очікування вхідного сигналу. На ПЕП приходить імпульс і передається до підсилювача, який підсилює імпульс до потрібного нам рівня. Коефіцієнт підсилення контролюється мікроконтролером, який посиляє сигнал до цифро-аналогового перетворювача, а той вже дає сигнал підсилювачу. В результаті ми отримуємо сигнал, який надходить до аналогово-цифрового перетворювача, на виході якого ми отримуємо потік чисел амплітуди через фіксований проміжок часу. І по цим даним вже можна будувати графік сигналу, який ми отримали [16].

					<i>ПК71.150000.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		41

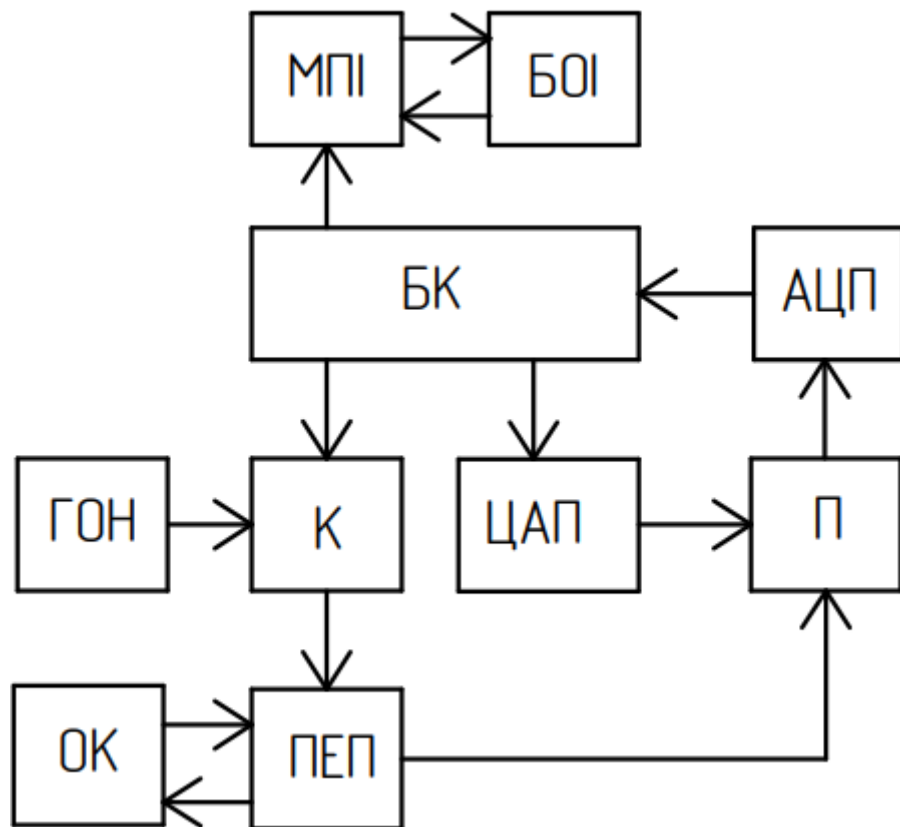


Рисунок 3.1. Функціональна схема ультразвукового дефектоскопу

БОІ – блок обробки інформації, МПІ - модуль передачі інформації, БК - блок керування, АЦП - аналого-цифровий перетворювач, П – підсилювач, ЦАП - цифро-аналоговий перетворювач, К – ключ, ГОН - генератор опорної напруги, ПЕП - п'єзоелектричний перетворювач, ОК - об'єкт контролю

РОЗДІЛ 4. РОЗРОБКА ПРИНЦИПОВОЇ СХЕМИ

4.1. Розрахунок ударного збудження

Щоб створити ударне збудження в порядку, повинен згенеруватися короткий імпульс тривалістю 0,25 довжини хвилі. Коли на п'єзоелектричному перетворювачі з'являються імпульси, утворюється ультразвукове коливання, яке потрапляє в об'єкт управління.

Блок, який генерує ударні збудження, працює наступним чином (рис. 4.1): спочатку конденсатор С1 накопичує енергію, рівну напрузі живлення. У даній ситуації джерелом напруги є імпульсний перетворювач постійної напруги, який спочатку має низьку напругу, а потім перетворює його на високочастотний імпульс. Потім транзисторний перемикач VT1 відкривається і ПЕП розряджається після того, як мікроконтролер згенерував короткий імпульс. Після чого одразу відбувається закриття VT1, і цикл починається знову. Таким чином, на виході системи отримуються короткі імпульси [17].

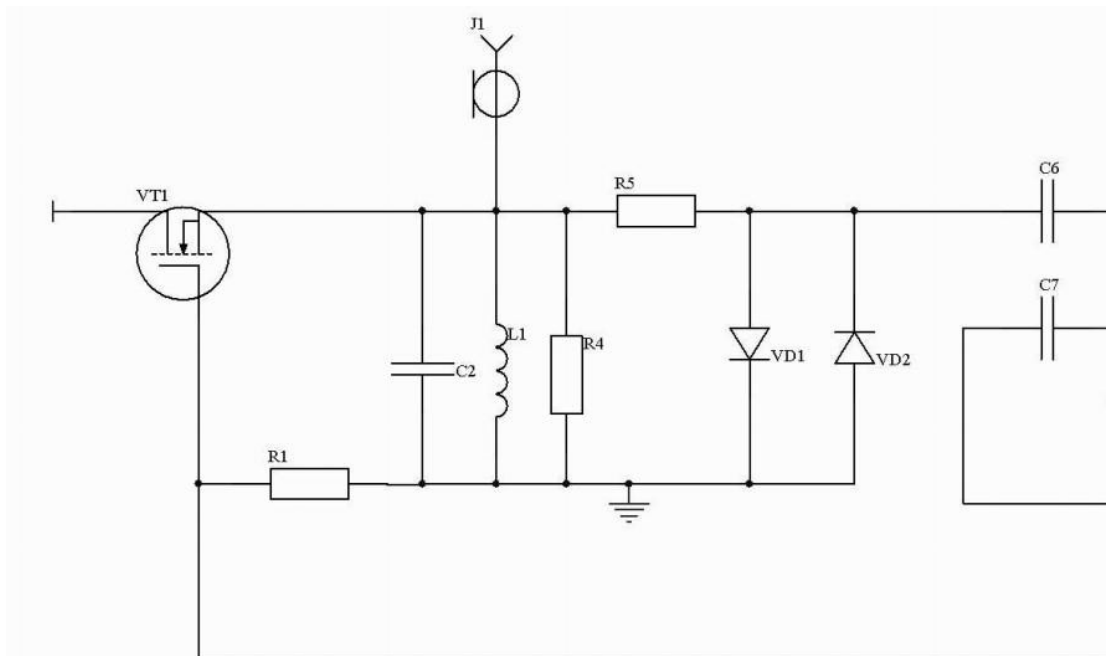


Рисунок 4.1. Схема генератора ударного збудження

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ПК71.150000.000 ПЗ

Арк.

43

Експериментальним шляхом визначили, що напруга для зондувальних імпульсів повинна бути рівною 10 В.

Вирахувана напруга живлення E дорівнює:

$$U_{\max} = 0.4E \quad (5.1)$$
$$E = \frac{U_{\max}}{0.4} = 25 \text{ В}$$

Завдяки новішим схемам живлення, стало можливішим підвищення напруги до 30V. Візьмемо $E = 30 \text{ В}$.

Для мінімізування енергоємності в контурі ($W = \frac{C_1 \cdot E^2}{2}$), візьмемо ємність $C_1 = 2,2 \text{ мкФ}$.

Оскільки ми використовуємо велику частину ємності в цій схемі, ми використовуємо генератор для ударного збудження ланцюга, в якому ємність є п'єзоелектричним перетворювачем для збудження ультразвукових коливань.

Генератор працює за таким принципом: після того, як підключити сталу напругу E , C_1 буде підзаряджатися до певного рівня напруги U_0 , яка буде дорівнювати як постійна часу ланцюга заряду $\tau_{\text{зар}}$.

$$\tau_{\text{зар}} = R_1 \cdot C_1 = 1 \text{ мкс} \quad (5.2)$$

То

$$R_1 = \frac{\tau_{\text{зар}}}{C_1} = 46.15 \text{ Ом} \quad (5.3)$$

Візьмемо $R_1 = 50 \text{ Ом}$, то $\tau_{\text{зар}} = 1 \text{ мкс}$

Для спрощення схеми, треба підібрати такий транзистор, в якому рівень напруги буде низьким, для відкриття транзистора. Саме тому, обрали резистор IRLML0100TRPbF, так як він дуже добре підходить для таких цілей.

Коли виникає замикання транзистора VT1 п'єзоелемент розряджається на контур через його внутрішній опір.

					<i>ПК71.150000.000 ПЗ</i>	Арк.
						44
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Формула сталої часу розрядження

$$\tau_{\text{роз}} = \frac{C_1 \cdot C_{\text{пеп}}}{C_1 + C_{\text{пеп}}} \cdot R_{\text{ПЕП}} \quad (5.4)$$

$$R_{\text{ПЕП}} = 0.5 \div 1 \text{ Ом}$$

$$C_{\text{ПЕ}} = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon \cdot \frac{S}{d} \quad (5.5)$$

де $\varepsilon_0 = 8.854 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – електрична стала ; ε - відносна діелектрична стала (для ЦТС-19 $\varepsilon = 1200$)

$$S = \pi a^2 = 3.1415 \cdot 14.5^2 = 660.52 \text{ (мм}^2\text{)} \quad (5.6)$$

$$D = H = 1.44 \text{ мм} - \text{товщина ПЕП}$$

$$C_{\text{пеп}} = 8.854 \cdot 10^{-12} \cdot 1200 \cdot \frac{660.52 \cdot 10^{-6}}{1.44 \cdot 10^{-3}} = 4.874 \text{ пФ} \quad (5.7)$$

То:

$$\tau_{\text{роз}} = \frac{2.2 \cdot 10^{-6} \cdot 4.874 \cdot 10^{-12}}{2.2 \cdot 10^{-6} + 4.874 \cdot 10^{-12}} \cdot 50 \cong 243 \text{ нс} \quad (5.8)$$

Має бути справедливою умова:

$$\tau_{\text{роз}} \ll \tau_{\text{зар}} (243 \text{ нс} \ll 10 \text{ мкс})$$

4.2. Розрахунок підсилювача

Щоб обробити отримані сигнали, їх спочатку потрібно підсилити до певного рівня, а саме - 1 В.

Для цього обраний операційний підсилювач серії AD605:

					<i>ПК71.150000.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		45

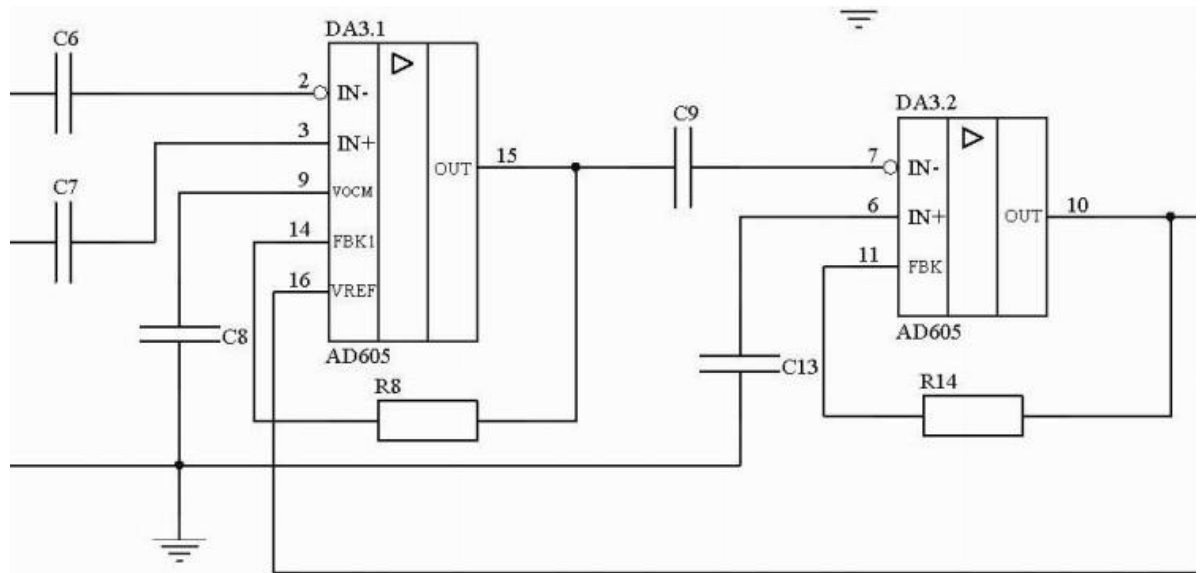


Рисунок 4.2. Підсилювач AD605

AD605 - це низькошумний, точний, двоканальний підсилювач коефіцієнта підсилення з лінійним зміщенням в дБ, який оптимізований для будь-яких додатків, що вимагають високопродуктивного широкосмугового регулювання коефіцієнта підсилення. Працюючи від одного джерела живлення 5 В, AD605 забезпечує диференціальні входи та однополярний контроль коефіцієнта підсилення для зручності використання. Додана гнучкість досягається за рахунок заданого користувачем діапазону коефіцієнта підсилення та зовнішнього контрольного входу, який забезпечує масштабування повернення (дБ / В).

Високопродуктивна лінійна характеристика в дБ AD605 досягається завдяки архітектурі диференціального входу, одиничного живлення та підсилювача експоненції (DSX-AMP). Кожен з DSX-AMP складає змінний аттенюатор від 0 дБ до -48,4 дБ з подальшим високошвидкісним підсилювачем з фіксованим підсиленням. Атенюатор заснований на 7-ступінчастій драбинковій мережі R-1,5R. Послаблення між точками перетину становить 6.908 дБ і 48.360 дБ для всієї східчної мережі. Архітектура DSX-AMP дає вхідну шумову спектральну щільність $1,8 \text{ нВ} / \sqrt{\text{Гц}}$ і приймає вхідний сигнал $\pm 2,0 \text{ В}$, коли VOCM зміщений на $V_P / 2$.

									Арк.
									46
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ПК71.150000.000 ПЗ				

Кожен незалежний канал AD605 забезпечує коефіцієнт підсилення 48 дБ, який можна оптимізувати для програми. Діапазони посилення від -14 дБ до +34 дБ та від 0 дБ до +48 дБ можуть бути обрані одним резистором між виводами FBK та OUT. Нижній і верхній діапазони коефіцієнта підсилення визначаються шляхом короткого замикання pin FBK на OUT або залишення щиря FBK без зв'язку, відповідно. Два канали AD605 можуть бути каскадними, щоб забезпечити 96 дБ дуже точного діапазону коефіцієнта посилення в монолітному пакеті.

Інтерфейс управління підсиленням забезпечує вхідний опір приблизно 2 МОм і масштабні коефіцієнти від 20 дБ / В до 30 дБ / В для вхідної напруги а VREF 2,5 В до 1,67 В, відповідно. Зауважте, що масштабні коефіцієнти до 40 дБ / В досяжні при зниженій точності для шкал вище 30 дБ / В. Коефіцієнт підсилення лінійно масштабується в дБ з керуючою напругою (VGN) від 0,4 В до 2,4 В для шкали 20 дБ / В та від 0,20 до 1,20 В для шкали 40 дБ / В. Коли VGNis <50 мВ, підсилювач вимикається, щоб отримати 1,9 мА. За нормальної роботи струм спокою каналу підсилювача становить лише 18 мА.

AD605 доступний у 16-відвідних PDIP та SOIC і гарантований для роботи в діапазоні температур від -40 ° С до + 85 ° С. [18].

Рівень вхідної напруги: $U_{вх}=50 \text{ mV}$

Знайдемо коефіцієнт підсилення використавши таку формулу:

$$K_u = \frac{U_{\text{вих}}}{U_{\text{вх}}} = \frac{R_2}{R_1} \quad (5.9)$$

$$K_u = \frac{1}{50 \cdot 10^{-3}} = 20$$

Якщо взяти $R_1 = 2,2\text{кОм}$, то $R_2 = R_1 \cdot 20 = 44\text{кОм}$

					<i>ПК71.150000.000 ПЗ</i>	Арк.
						47
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

4.3. Підбір АЦП

В ролі АЦП вибрано мікросхему AD7470ARUZ. Мікросхема є 10-ти розрядною, тобто може забезпечувати 1024-рівневе квантування основних рівнів сигналів.

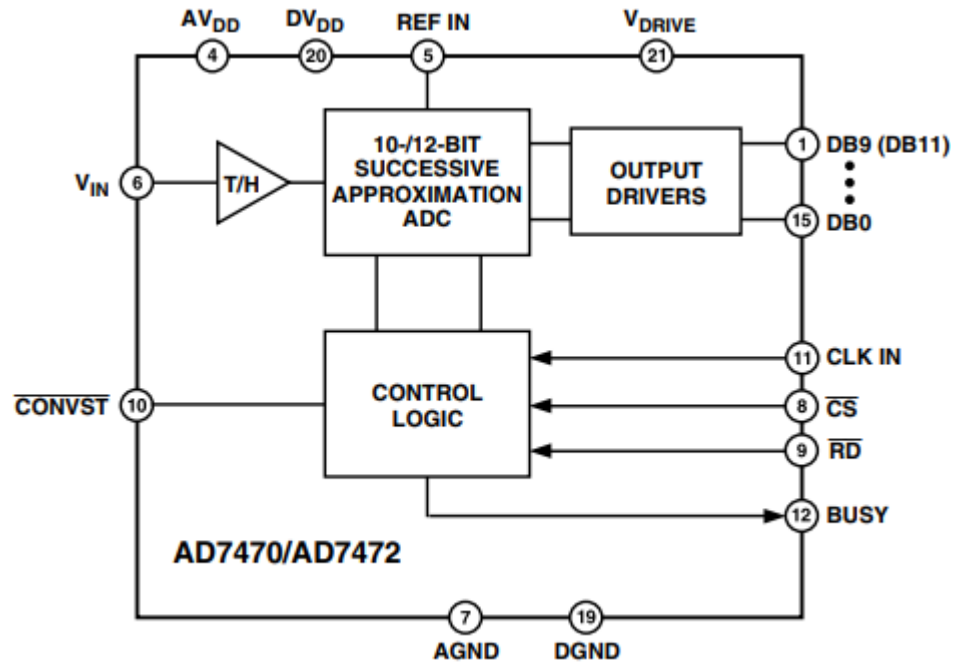


Рисунок 4.3. Блок-діаграма AD7470ARUZ.

AD7470 / AD7472 - це 10-бітні / 12-бітні високошвидкісні АСУ з послідовним наближенням. Деталі працюють від одного джерела живлення від 2,7 В до 5,25 В і забезпечують швидкість пропускання до 1,5 MSPS для 12-бітного AD7472 і до 1,75 MSPS для 10-бітного AD7470. Деталі містять підсилювач з відстеженням і утриманням з широкою смугою пропускання, який може обробляти входні частоти понад 1 МГц. Процес перетворення та збір даних контролюються за допомогою стандартних входів управління, що дозволяє легко взаємодіяти з мікропроцесорами або цифровими процесорами. Вхідний сигнал відбирається на нижньому фронті CONVST, і перетворення також ініціюється в цей момент. BUSY на початку перетворення перевищує рівень і падає на 531,66 нс після зниження краю CONVST (AD7472 з тактовою частотою 26 МГц), щоб вказати, що перетворення завершено. Немає затримок трубопроводу, пов'язаних

з частинами. Результат перетворення доступний через стандартні сигнали CS та RD через високошвидкісний паралельний інтерфейс. AD7470 / AD7472 використовують передові технології проектування для досягнення дуже низького розсіювання потужності при високій швидкості пропускання. З джерелом живлення 3 В і пропускну здатністю 1,5 MSPS AD7470 зазвичай споживає в середньому лише 1,1 мА. При напрузі 5 В та 1,75 MSPS середнє споживання струму зазвичай становить 1,6 мА. Ця частина також пропонує гнучке управління потужністю / пропускну здатністю. Експлуатація AD7470 з джерелами живлення 3 В та пропускну здатністю 500 кСПС зменшує споживання струму до 713 мкА. При напрузі 5 В і 500 кПС / с деталь споживає 944 мкА [19].

4.4. Підбір ЦАП

В ролі ЦАП вибрано мікросхему AD7391ARUZ. Мікросхема є 10-ти розрядною, тобто, як і АЦП, може забезпечувати 1024-рівневе квантування основних рівнів сигналів.

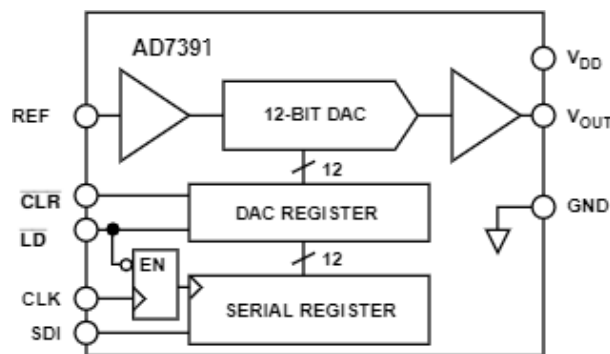


Рисунок 4.4. Блок-діаграма AD7391ARUZ.

Сімейство 10-бітових і 12-бітових цифро-аналогових перетворювачів AD7390 / AD7391 розроблено для роботи від одного джерела живлення 13 В. Побудовані з використанням процесу СВCMOS, ці монолітні ЦАП пропонують користувачеві низьку вартість та простоту у використанні в системах з одним джерелом живлення на 13 В. Робота гарантується в діапазоні напруги живлення

					<i>ПК71.150000.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		49

від 12,7 В до 15,5 В, що споживає менше 100 мкА, що робить цей пристрій ідеальним для батарейок. Перехід від REFIN до DACOUT дозволяє отримати повномасштабну напругу, що дорівнює позитивній напрузі VDD або будь-якому значенню між ними [20].

4.5. Підбір мікроконтролера

Для виконання поставлених задач було вирішено взяти мікроконтролер STM32WB50CG з такими характеристиками: двоядерний Arm Cortex-M4 MCU на 64 МГц, Cortex-M0 32 МГц з 1 Мбайт флеш-пам'яті, Bluetooth LE 5.2, 802.15.4, Zigbee, Thread, AES 256.

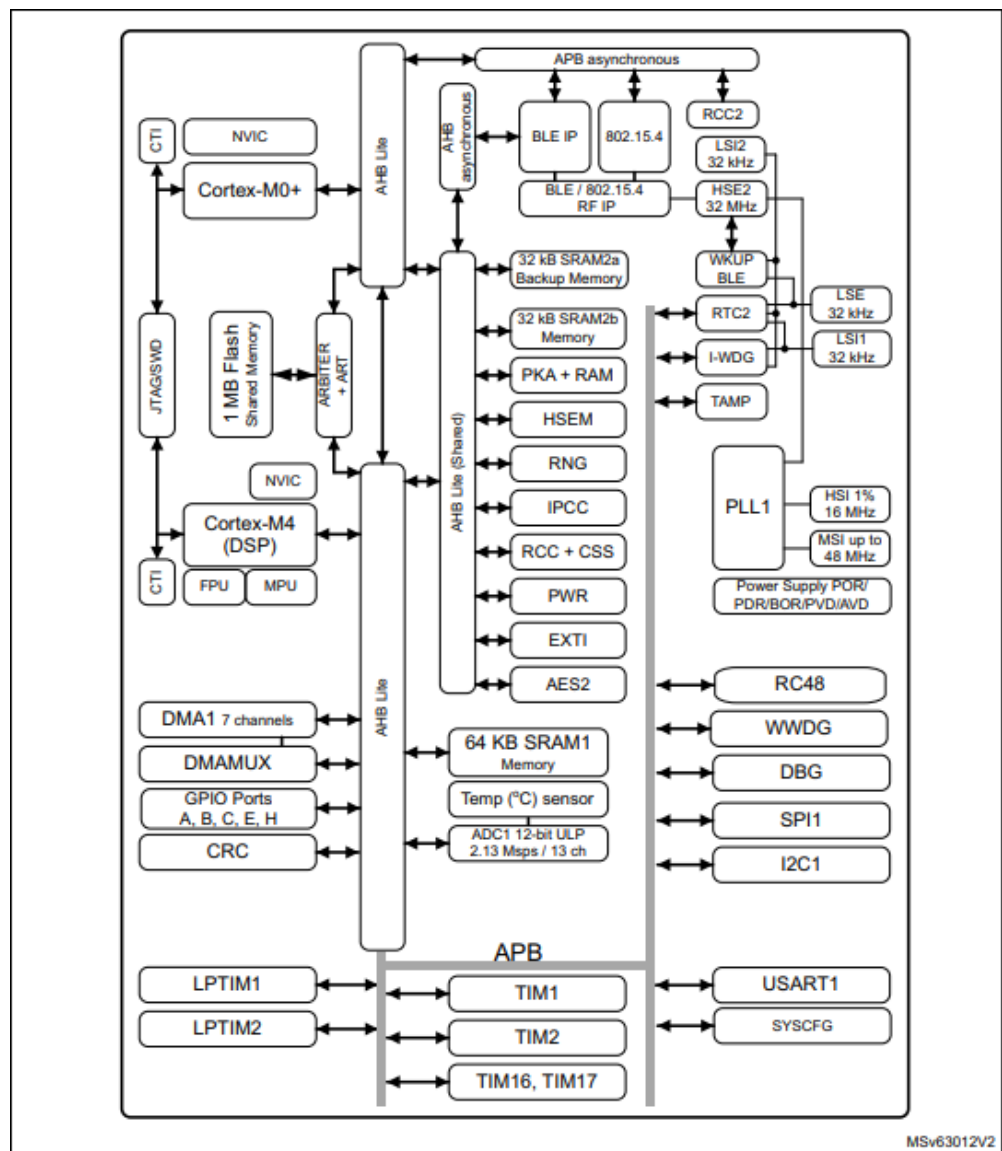


Рисунок 4.5. Блок-діаграма STM32WB50CG.

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

Багатопротокольний бездротовий пристрій STM32WB50CG та STM32WB30CE наднизького енергоспоживання містить потужний радіоприймач із наднизькою потужністю, сумісний із специфікацією Bluetooth® Low Energy SIG 5.2 або IEEE 802.15.4-2011 [21].

Він містить спеціальний Arm® Cortex®-M0 + для виконання всіх операцій низького шару в режимі реального часу.

Пристрої розроблені для надзвичайно низьких потужностей і базуються на високопродуктивному 32-бітному ядрі RISC Arm® Cortex®-M4, що працює на частоті до 64 МГц. Це ядро має одиничну точність одиниці з плаваючою точкою (FPU), яка підтримує всі інструкції та типи обробки даних з однією точністю Arm®. Він також реалізує повний набір інструкцій DSP та блок захисту пам'яті (MPU), що підвищує безпеку додатків.

Посилений міжпроцесорний зв'язок забезпечує МГЕЗК із шести двонаправлених каналів. HSEM забезпечує апаратні семафори, що використовуються для спільного використання спільних ресурсів між двома процесорами.

У пристрої вбудовані високошвидкісні пам'яті (1 Мбайт флеш-пам'яті для STM32WB50xx, 512 Кбайт для STM32WB30xx, 128 Кбайт SRAM для STM32WB50xx, 96 Кбайт для STM32WB30xx) та широкий діапазон вдосконалених входів / виходів та периферійних пристроїв.

Пряма передача даних між пам'яттю та периферійними пристроями, а також з пам'яті в пам'ять підтримується сімома каналами DMA з повною гнучкою картографічною системою периферійних пристроїв DMAMUX.

Пристрої мають кілька механізмів для вбудованої флеш-пам'яті та SRAM: захист від зчитування, захист від запису та захист від зчитування власного коду. Частина пам'яті можна захистити для ексклюзивного доступу Cortex® -M0 +.

					<i>ПК71.150000.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		51

Механізм шифрування AES, PKA та RNG забезпечують криптографію MAC нижнього рівня та верхнього рівня. Функція зберігання ключів клієнта може використовуватися для збереження ключів прихованими.

Ці пристрої мають вбудований малопотужний RTC, один вдосконалений 16-розрядний таймер, один загальноприйнятий 32-розрядний таймер, два загальних 16-розрядних таймери та два 16-розрядних таймери низької потужності.

STM32WB50CG та STM32WB30CE також мають стандартні та вдосконалені комунікаційні інтерфейси, а саме один USART (ISO 7816, IrDA, Modbus та режим Smartcard), один I2C (SMBus / PMBus), один SPI до 32 МГц

STM32WB50CG і STM32WB30CE працюють в діапазоні температур від -10 до +85 ° C (перехід +105 ° C) від 2,0 до 3,6 В. Широкий набір режимів енергозбереження дозволяє розробляти програми з низьким енергоспоживанням.

Спеціальне джерело живлення VBAT дозволяє пристрою створювати резервні копії генератора LSE 32,768 кГц, RTC та регістрів резервного копіювання, завдяки чому STM32WB50CG та STM32WB30CE забезпечують ці функції, навіть якщо основний VDD відсутній через батарею, подібну до CR2032, Supercap або невеликий акумулятор [22].

4.6. Опис роботи розробленої електричної плати сенсора

В даному дипломному проєкті розроблена друкована плата сенсора, модель якої наведена на рис. 4.6. У додатку Б описано повний алгоритм дій, виконаних під час розробки цієї плати.

Створена плата передає вимірювальну інформацію через Bluetooth до смартфона, на якому завантажена програма для обробки даних «ДЕФЕКТОСКОП». Передача даних можлива завдяки антені частотою 2.4 МГц, яка інтегрована в STM32.

					<i>ПК71.150000.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		52

Ця плата може використовувати ультразвуковий датчик з різними резонансними частотами завдяки динамічним змінам АЦП. Є багато варіантів зміни програмного забезпечення мікроконтролера та шість виводів, які можна запрограмувати на різні завдання: індикація, динамічне налаштування окремих величин пристрою, підключення інших датчиків [16,23].

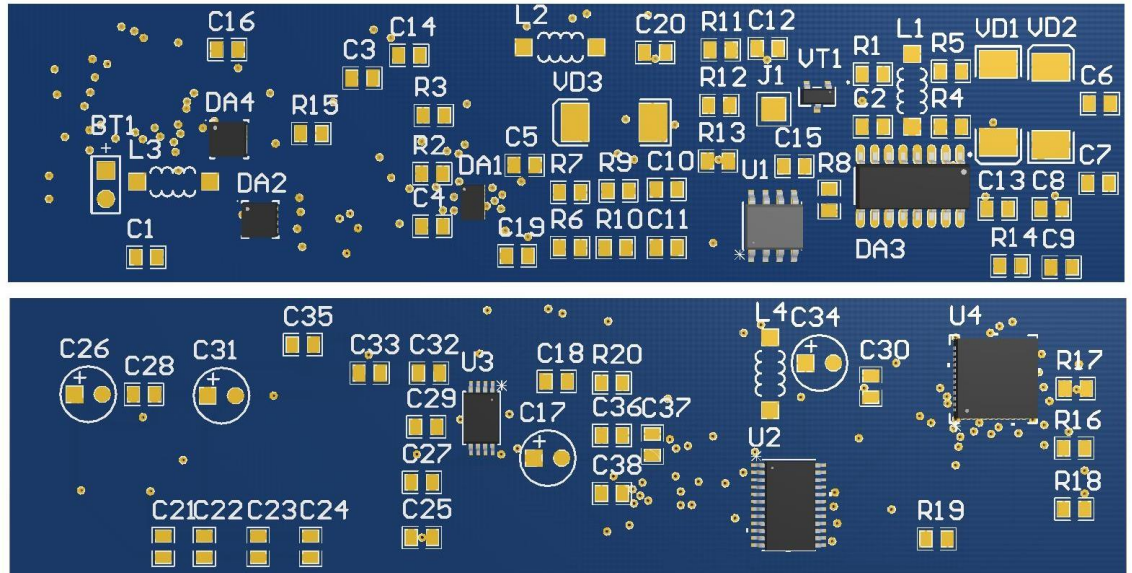


Рисунок 4.6. Вигляд макетної плати

Пристрій базується на мікроконтролері STM - STM32WB50CGU5 з 32-бітовим ядром ARM Cortex-M0. З цією архітектурою можна використовувати вторинні модулі. У цій роботі використано наступне. Модуль Bluetooth LE 5.2, 802.15.4 за стандартом Bluetooth 5.2, який має дві вбудовані радіосистеми: одна дозволяє передавати дані зі швидкістю 4 Мбіт /с; другий - подібний до стандарту 802.11 і забезпечує швидкість передачі даних до 30 Мбіт/с.

Отримані результати можна обробляти на пристроях, у яких є хоча б Bluetooth. Недоліком такого методу є те, що якість зображення та швидкість обробки даних напряму залежить від характеристик пристрою. Щоб побачити двовимірне зображення зміни амплітуди з часом, було створено мобільний додаток «ДЕФЕКТОСКОП», на якому отримані сигнали візуалізуються у вигляді А-скану [24,25].

РОЗДІЛ 5. ПОХИБКИ

У цьому розділі розглядаються основні фактори помилок та їх вплив на рівень початкових показників. Досліджувані фактори помилок: спричинені роздільною здатністю АЦП, проходженням луно-імпульсу через нестабільний акустичний контакт, операційними підсилювачами [9].

5.1. Похибка зумовлена квантуванням АЦП

При розрахунку АЦП основною похибкою є похибка рівня квантування. Цифровий пристрій вимірювання квантування, як правило, має таке ж еталонне значення, як виміряне значення, або є з одним із проміжних значень. Завдяки порівнянню значень рівня квантування із введеним значенням та подальшого кодування чисел, на виході АЦП представлено близькіше значення для кожного заданого розміру вимірюваної величини [9,22].

Похибка роздільної здатності дорівнює:

$$\Delta_{\text{квант.}} = \frac{\Delta}{2} \quad (5.1)$$

Роздільну здатність АЦП можна знайти за такою формулою:

$$\Delta = \frac{1}{2^N} \cdot 100\% \quad (5.2)$$

Знайдемо похибку квантування:

$$\Delta = \frac{1}{2^{10}} \cdot 100\% = 0.098\%$$

$$\Delta_{\text{квант.}} = \frac{0.098}{2} = 0.049\%$$

5.2. Похибка операційних підсилювачів

Відносна похибка підсилювачів шукається за такою формулою:

					<i>ПК71.150000.000 ПЗ</i>	Арк.
						54
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$\delta_m = \frac{\delta_k}{1 + K \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2}} \quad (5.3)$$

δ_k - мультиплікативна похибка (0,1%)

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

Загальна похибка є добутком похибок АЦП та підсилювача:

$$\Delta_{\text{заг}} = \Delta_{\text{квант}} \cdot \Delta_{\text{чрч}} \cdot \Delta_{\text{підс.}} \quad \Delta_{\text{заг}} = 0.049 \cdot 0.05 = 0.00245\%$$

5.3. Оцінка вірогідності контролю

Оцінка ймовірності контролю являється найважливішим розрахунком у цьому розділі. Під час перевірки на предмет дефектів у предмета перевірки існує помилка типу 1, яка виникає, коли неправильно оцінюють, що предмет перевірки без дефектів визнаний як дефектний. В іншому випадку з'являються альтернативні помилки, де дефектний матеріал може визначатися як бездефектний, це помилка типу 2. Інформацію про несправність можна знайти у вихідному сигналі п'єзоелектричного перетворювача.

Відхилення, на підставі якого береться граничний сигнал з відхиленням 1%. Помилки типу 1 і типу 2 рівні між собою, вони приймаються рівними 1% [9].

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

Знайдемо імовірність контролю без похибки:

$$P = 1 - (\alpha + \beta) = 1 - (0.01 + 0.01) = 0.98$$

Вірогідність контролю дорівнює $P = 98\%$, отже похибка дорівнює 2%.

ВИСНОВОК

Розробка ультразвукового дефектоскопу на базі смартфона, є основною метою та завданням даної дипломної роботи. Щоб вирішити всі проблеми, які можуть виникнути, був проведений ретельний аналіз існуючих методів ультразвукового виявлення дефектів та сучасного обладнання на їх основі. Був обраний луноімпульсний метод контролю, так як він є найоптимальнішим. Проведено розрахунки, моделювання плати та її компонентів, розроблені креслення приладу дефектоскопа.

Дуже добре проаналізована та описана теоритечна частина ультрзвукових хвиль, датчиків, п'єзоелементів та інших важливих речей без яких була б неможлива робота даного приладу.

Були розглянуті найсучасніші ультразвукові дефектоскопи та принцип їх роботи. Крім луноімпульсного методу також було розглянуто багато інших, таких як резонансний метод, дзеркальний, ревербераційний та інші. Розраховуються основні геометричні розміри найважливіших елементів датчика: п'єзоелектрична пластина, заслінка, демпфер та просвітлювальний шар.

Після отримання параметрів п'єзоелектричного перетворювача розраховував акустичну траєкторію та визначив ступінь ослаблення сигналу після проходження через досліджуваний об'єкт.

Ще однією частиною проекту була проектно-технологічна, в якій конструкція п'єзоелектричного датчика із заданими параметрами була розроблена і зроблена на основі вже відомих аналогів пристрою.

На основі розробленої структурної схеми, з урахуванням вже наданих параметрів схеми, було обрано основу елементів та розроблено функціональну схему. Остання частина проекту - це розрахунок похибок контролю цим пристроєм.

Фіналом проекту була розробка друкована плати сенсора в Altium, модель

					<i>ПК71.150000.000 ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		56

якої наведена на рис. 4.6. Вона передає вимірювальну інформацію через Bluetooth до смартфона, на якому завантажена програма для обробки даних «ДЕФЕКТОСКОП».

Значні переваги включають невеликі розміри, пристосованість до умов контролю та низьке споживання енергії, що надає пристрою універсальність для використання в місцях, де доступ ускладнений. Для передачі даних можна використовувати не тільки Bluetooth, а ще й WI-FI та GSM. Цей прилад можна використовувати де завгодно, та передавати зібрані дані в будь-яку частину світу швидко та надійно.

					<i>ПК71.150000.000 ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		57

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. M. V. Brook, Ultrasonic Inspection Technology Development and Search Unit Design: Examples of Practical Applications. IEEE press, 2012. Small Inspection Vehicles for Non-Destructive Testing Applications / M. Friedrich, L. Gatzoulis, G. Hayward, G. Galbraith. // Springer-Verlag Berlin Heidelberg. – 2006. – pp. 927–934.
2. Балдев Р. Применения ультразвука / Р. Балдев, В. Раджендран, П. Паланичами. – М. : Техносфера, 2006. – 576 с.
3. A.T. Özdemir, A. Orman, “Developing an iPhone smartphone based fall detection algorithm”, Proc. 23rd Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU), pp. 2456-9, Malatya, Turkey, 16-19 May, 2015.
4. 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;11(4):272-278. <https://doi.org/10.21122/2220-9506-2020-11-4-272-278>
5. Акустика в задачах. Учеб. рук-во: для вузов / А. Н. Бархатов, Н. В. Горская, А. А. Горюнов и др.; под ред. С. Н. Гурбатова, О. В. Руденко. – М. : Наука. Физматлит, 1996. – 336 с.
6. Ultrasonic testing of materials at level 2 – Vienna: IAEA, 1988. – 278 с. – (The International Atomic Energy Agency).
7. Основи ультразвукового неруйнівного контролю: Підручник/ В.К. Цапенко, Ю.В. Куц – К.: НТУУ «КПІ», 2010 – 448 с.
8. Галаган Р. М. Теоретичні основи ультразвукового неруйнівного контролю: підручник / Р. М. Галаган. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 263 с.
9. Петрик, В. Ф. Метрологія, стандартизація та сертифікація в неруйнівному контролі [Електронний ресурс]: навчальний посібник з дисциплін «Метрологія» та «Сертифікація і стандартизація» / В. Ф. Петрик, А. Г. Протасов ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 3,04 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2015. – 266 с.

					<i>ПК71.150000.000 ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>	58	

- 10.Алешкевич В. А. Колебания и волны. Лекции / В. А. Алешкевич, Л. Г. Деденко, В. А. Караваяев. – М. : Физический факультет МГУ, 2001. – 144 с.
- 11.Petrik, V. Using wireless data transmission in eddy current nondestructive testing / Valentin Petrik, Anatoliy Protasov, Kostiantyn Syeryu, Iuliia Lysenko // Приборостроение - 2017 : материалы 10-й Международной научно - технической конференции, 1-3 ноября 2017 года, Минск, Республика Беларусь / Белорусский национальный технический университет; редкол.: О. К. Гусев [и др.]. - Минск : БИТУ, 2017. - С. 74- 76.
- 12.Зацепин А. Ф. Акустический контроль: учеб. пособие / А. Ф. Зацепин; под ред. чл.-кор. РАН, проф., д-ра техн. наук В. Е. Щербинина. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2016. – 211 с.
- 13.Пафос С. К., Гурвич А. К. Ультразвуковая дефектоскопия: вчера, сегодня, завтра //В мире неразрушающего контроля. — 2002. — №. 4. — С. 18.
- 14.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.
- 15.Кустовський, О. Л. Бездротовий акустичний дефектоскоп / О. Л. Кустовський, В. Ф. Петрик, Р. С. Савченко // Методи та засоби неруйнівного контролю промислового обладнання : матеріали II науково-практичної конференції, м. Івано-Франківськ, 25–26 листопада 2009 року. – Івано-Франківськ : ІФНТУНГ, 2009. – С. 79.
- 16.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.
- 17.Бергман Л. Ультразвук и его применение в науке и технике / Л. Бергман. – М. : Иностр. лит., 1957. – 726 с.

18. Вайншток И. С. Ультразвук и его применение в машиностроении / И. С. Вайншток. – М. : ГНТИМЛ, 1958. – 140 с.
19. Гурвич А. К., Ермолов И. Н. Ультразвуковая дефектоскопия сварных швов — Киев: Техника, 1972, 460 с.
20. Дугін, О. Л. Мобільний вихрострумовий дефектоскоп / О. Л. Дугін, О. Л. Кустовський, В. Ф. Петрик // XX-та Міжнародна конференція та виставка «Сучасні методи та засоби неруйнівного контролю та технічної діагностики», м. Гурзуф, 01 - 05 жовтня 2012 р. – Гурзуф : УІЦ «Наука. Техніка. Технологія», 2012.
21. Горелик Г. С. Колебания и волны. Введение в акустику, радиофизику и оптику / Г. С. Горелик; под ред. С. М. Рытова. – 3-е изд. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2007. – 656 с.
22. Грінченко В. Т. Основы акустики: навч. посіб. / В. Т. Грінченко, І. В. Вовк, В. Т. Маципура. – Київ : Наук. думка, 2007. – 640 с.
23. Ультразвуковой контроль сварных соединений / В.А. Троицкий, В.Ю. Попов. — К.: Феникс, 2010. — 224 с. ISBN 978-966-651-804-3.
24. Ермолов И. Н. Теория и практика ультразвукового контроля / И. Н. Ермолов. – М. : Машиностроение, 1981. – 240 с
25. ГОСТ 26266-90 «Преобразователи ультразвуковые. Общие технические требования». – Взамен ГОСТ 26266-84; введ. 01.01.91. – М. : Стандартиформ, 2010. – 18 с.
26. Шаповалов Е.В. Современные методы и средства неразрушающего контроля сварного соединения, выполненного контактной точечной сваркой (Обзор) / Е.В. Шаповалов, Р.М. Галаган, Ф.С. Клишар, В.И. Запара // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – Київ. – 2013. – № 1. – С. 10-22.
27. Momot, A. Influence of architecture and training dataset parameters on the neural networks efficiency in thermal nondestructive testing / A. Momot, R. Galagan // Sciences of Europe. – 2019. – Vol. 1, No 44. – Pp. 20–25.

					<i>ПК71.150000.000 ПЗ</i>	Арк.
						60
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Додатки

Технічне завдання

1. Найменування дипломного проекту

„Ультразвуковий дефектоскоп на базі смартфона”.

2. Мета виконання дипломного проекту та призначення виробу

2.1. Мета виконання дипломного проекту – розробити новий прилад, щоб була можливість на поверхнях або елементах конструкції, при наявності в них дефектів, забезпечити проведення контролю, з яким не впораються інші прилади, особливо у місцях з обмеженим доступом.

2.2. Призначення приладу.

Ультразвуковий дефектоскоп на базі смартфона, призначений для знаходження дефектів з використанням розумних пристроїв, таких як телефон або планшет, а також для зручної та швидкої передачі інформації.

3. Передумови для розробки приладу

Дана розробка виконується відповідно до тематики дипломного проектування, затвердженої кафедрою приладів і систем неруйнівного контролю приладобудівного факультету НТУУ „КПІ ім. Ігоря Сікорського”.

4. Вимоги до технічних характеристик.

Основні параметри:

- об’єкт контролю – сталевий виріб з товщиною до 12 см.
- дефекти розміром до 3.5 міліметрів квадратних
- Границя допустимої основної похибки – не більше 1%;

5. Робочі умови експлуатації приладу.

Номінальні значення кліматичних факторів відповідно до ДСТУ 12.005-88:

- температура навколишнього середовища $-15...65^{\circ}\text{C}$;
- відносна вологість 80% при температурі навколишнього середовища $25\pm 5^{\circ}\text{C}$;
- атмосферний тиск 755 ± 30 мм.рт.ст.

6. Вимоги до конструкції приладу.

Працездатність та параметри системи повинні відповідати ДСТУ 17516-72.

6.1. До вузлів, блоків, та всіх елементів, яким при експлуатації потрібна заміна, повинен забезпечуватись зручний доступ спеціальною конструкцією.

6.2. Органи регулювання, управління та керування повинні бути у мінімальній необхідній кількості у системі.

6.3. Використані придбані матеріали та вироби під час тестування системи повинні мати ресурс, який не використали, термін зберігання та служби якого більше терміну служби та ресурсу цієї системи.

7. Техніко-економічні вимоги.

7.1. Планується виготовлення одного прототипу приладу.

7.2. Орієнтовну ціну прототипу системи необхідно розрахувати перед початком робіт.

8. Вимоги до упаковки.

8.1. Транспортна тара повинна забезпечувати безпеку пристрою під час транспортування та зберігання.

8.2. Коробку з пристроєм розміщується в транспортному ящику:

Для збереження цілісності пристрою коробка заповнюється спеціальним матеріалом для амортизації.

9. Стандартизація та уніфікація.

До системи повинна бути прикладена експлуатаційна документація відповідно ДСТУ 25565-94.

10. Вимоги до техніки безпеки.

10.1. Вимоги до безпеки конструкції, електробезпеки керування та обслуговування системи повинні відповідати ДСТ 122007-75 та ДСТУ 123019-80.

10.2. Середній час без відмовлень роботи системи, повинен бути не менше 800 год.

11. Строк зберігання, служби та технічний ресурс.

11.1. Прилад повинен витримувати зберігання протягом 4 років.

11.2. Строк служби 6 років.

11.3. Технічний ресурс 1800 год.

Робота в Altium Designer

Перш за все, щоб змоделювати плату сенсора ультразвукового дефектоскопу в Altium, було створено бібліотеку всіх елементів, які будуть використовуватися на принциповій схемі. На рисунку 1 показано створене умовно графічне зображення(УГП) операційного підсилювача.

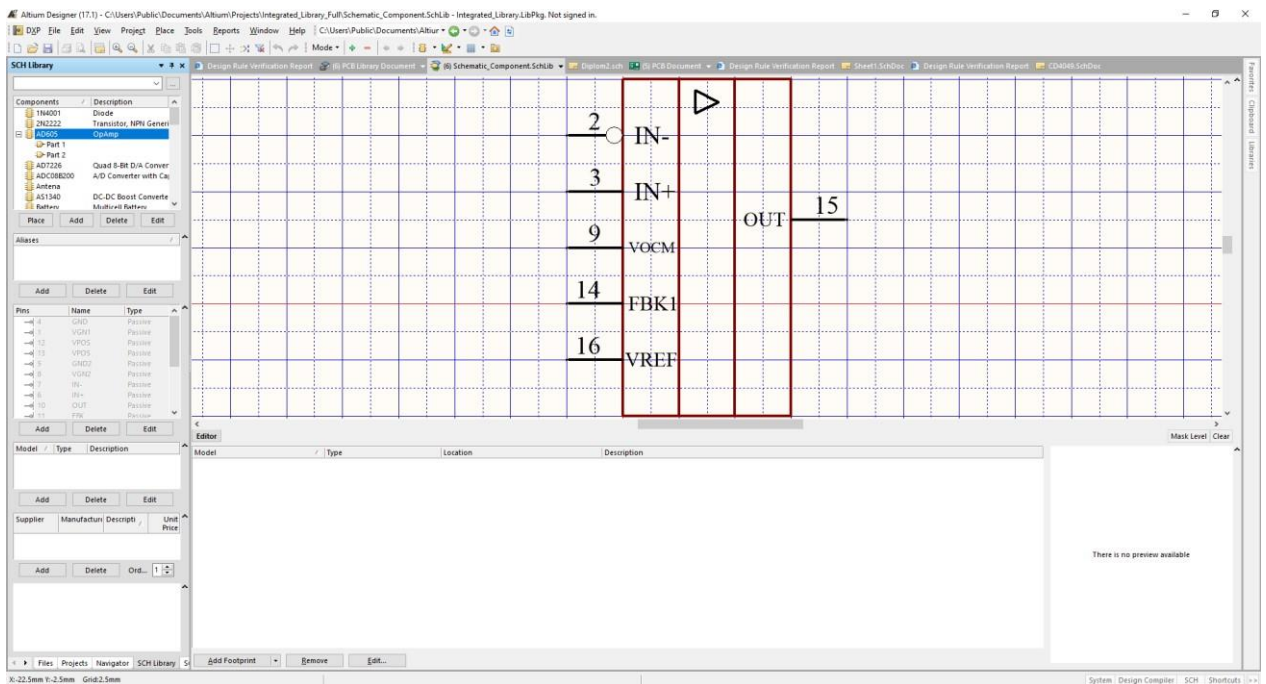


Рисунок 1. УГП операційного підсилювача.

Далі були зроблені посадкові місця для всіх елементів, які будуть розташовуватися на платі. На рисунку 2 зображено посадкове місце для операційного підсилювача, яке було створене за допомогою інструменту IPC Compliant Footprint Wizard.

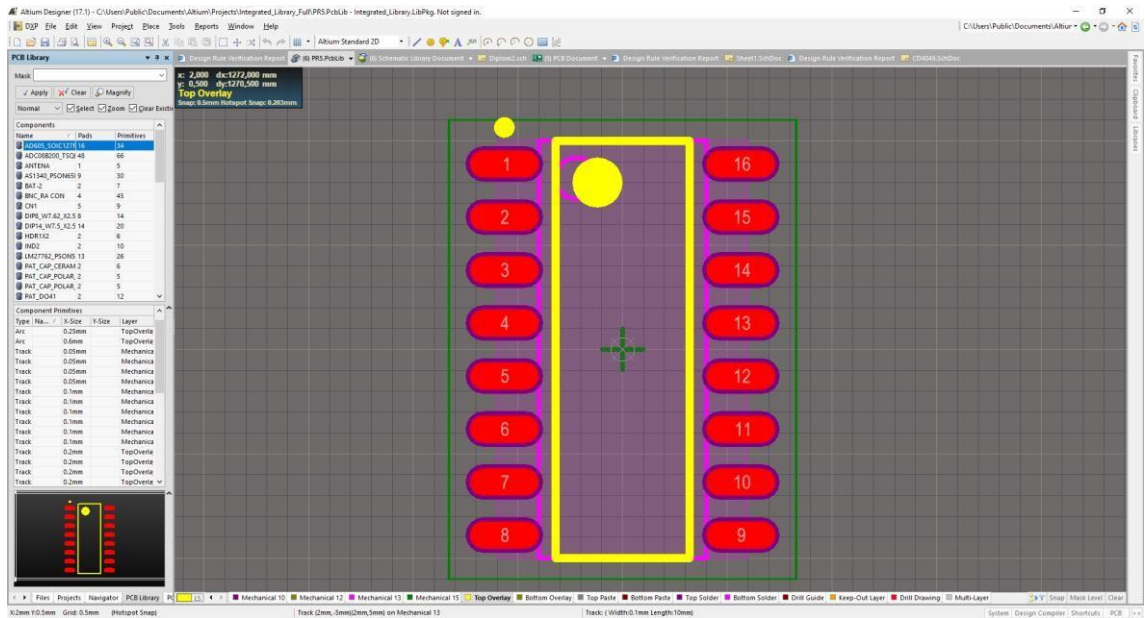


Рисунок 2. Створене посадкове місце для операційного підсилювача.

Також була створена 3D модель мікросхеми, як показано на рисунку 3. Робиться це також за допомогою інструменту IPC Compliant Footprint Wizard. Потрібно обрати вид корпусу та задати всі необхідні розміри для побудови 3D моделі. Головною перевагою використання цього інструменту є те, що він автоматично створює посадкове місце для мікросхеми.

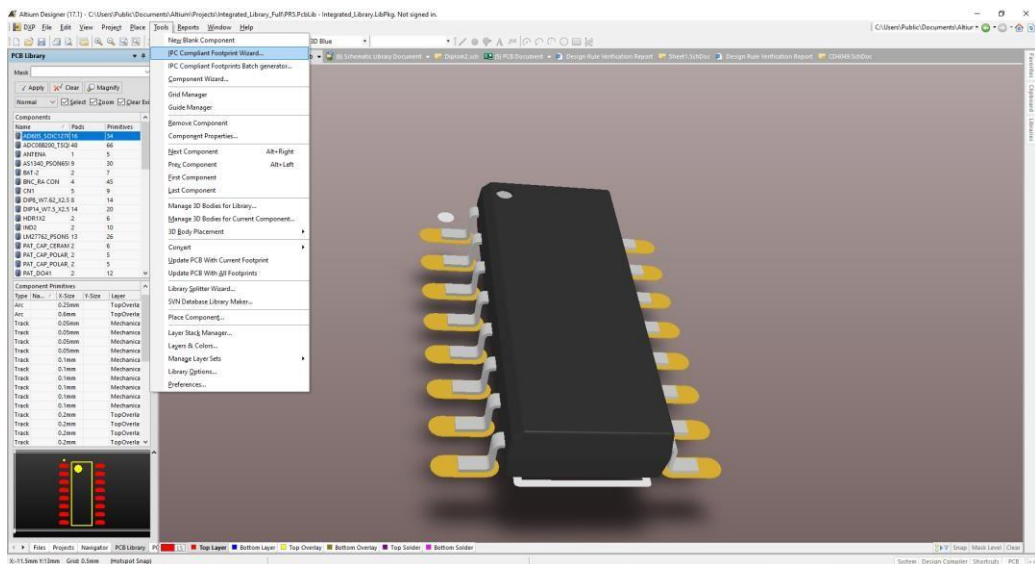


Рисунок 3. Створена 3D модель мікросхеми AD605.

Коли для всіх елементів були створені УГП та посадкові місця, можна було починати роботу над принциповою схемою. Зі створеної бібліотеки беруться всі необхідні компоненти, з'єднуються та розміщуються так, щоб схема була

читабельною. А далі, за допомогою спеціального інструменту Annotate Schematics - нумеруються.

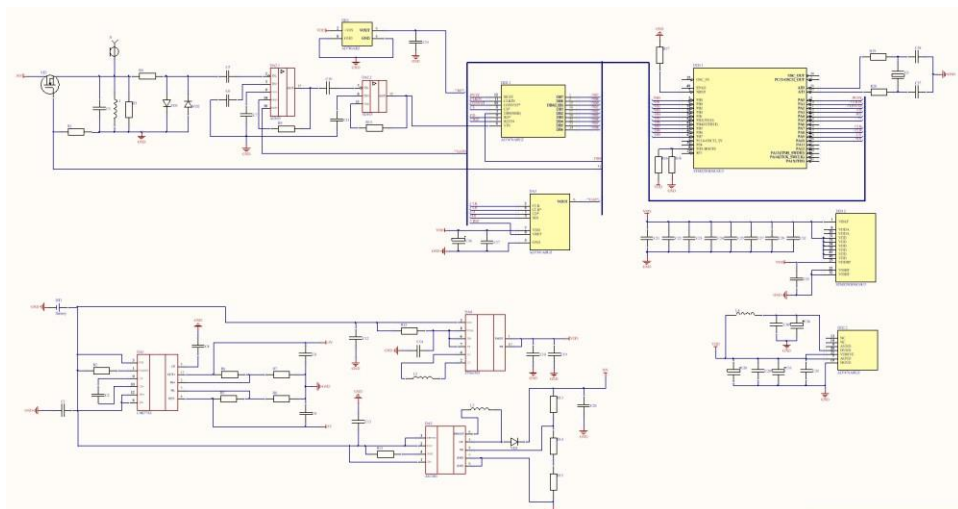


Рисунок 4. Принципова схема зроблена в Altium.

Натиснувши Compile Document, у функціях схеми, почнеться перевірка на помилки. Впевнившись, що помилок немає, можна переходити до створення плати.

Інструмент PCB Board Wizard зробить плату потрібних розмірів та зі всіма необхідними налаштуваннями, які обере користувач. Далі на цю плату було перенесено елементи з принципової схеми та розташовано їх максимально компактно, не забуваючи про правила розміщення. Можна змінити деякі правила, які є в Altium. Далі, за допомогою Auto Route, компоненти з'днуються між собою. На рисунку 5 можна подивитися результат роботи цієї функції. І в кінці зробив перевірку на наявність помилок, таким чином завершивши плату.

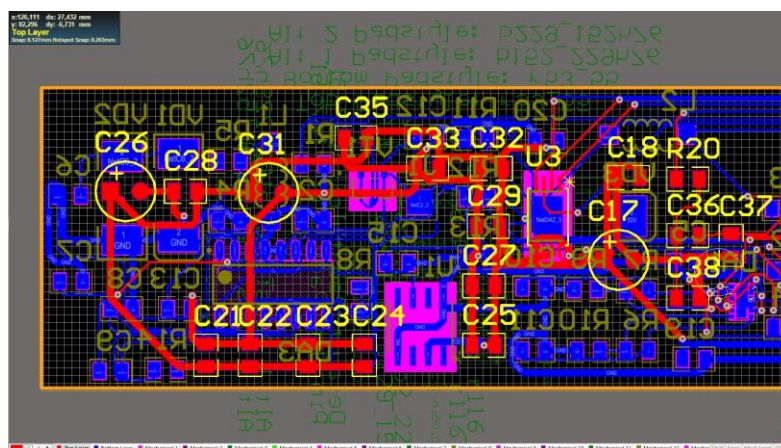


Рисунок 5. Результат виконання функції Auto Route.

