

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

Приладобудівний факультет

Кафедра приладів та систем неруйнівного контролю

До захисту допущено:

Завідувач кафедри

_____ Анатолій ПРОТАСОВ

«__» _____ 20__ р.

Дипломний 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 товщиномір»

Виконав:

студент ІV курсу, групи ПК-61 Полянський Сергій Валерійович _____

Керівник:

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

Консультант з графічного розділу:

ст.вик., к.т.н. Богдан Галина Анатоліївна _____

Консультант з розробки ел. схеми:

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

Рецензент: _____

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

Студент _____

Київ – 2020 року

ВІДОМІСТЬ ДИПЛОМНОГО ПРОЄКТУ

№ з/п	Формат	Позначення	Найменування	Кількість листів	Примітка
1	A4		Завдання на дипломний проєкт	2	
2	A4	ДП 61.16. 00.000 ПЗ	Пояснювальна записка	53	
3	A4	ДП 61.16. 00.001	Демпфер	1	
4	A3	ДП 61.16. 00.002	Корпус	1	
5	A4	ДП 61.16. 00.003	Кришка	1	
6	A2	ДП 61.16. 00.004	ПЕП	1	
7	A1	ДП 61.16. 00.005 СК	Прилад	1	
8	A1	ДП 61.16. 00.000 ЕЗ	Принципова	1	
9	A3	ДП 61.16. 00.000 ФЗ	Функціональна	1	

				ДП 61.16 00.000.00		
	ПБ	Підп.	Дата			
Розробн.	Полянський С.В			Відомість дипломного проєкту	Лист	Листів
Керівн.	Баженов В.Г				1	1
Консульт.					КП ім. Ігоря Сікорського Каф. ПСНК Гр. ПК-61	
Н/контр.						
Зав.каф.	Протасов А.Г					

**Пояснювальна записка
до дипломного проєкту
на тему: «Ультразвуковий товщиномір»**

Київ – 2020 року

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

Кафедра приладів та систем неруйнівного контролю

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

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

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

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Анатолій ПРОТАСОВ

«__» _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ

на дипломний проєкт студенту

Полянський Сергій Валерійович

1. Тема проєкту «Ультразвуковий товщиномір», керівник проєкту Баженов Віктор Григорович, кандидат технічних наук, доцент, затверджені наказом по університету від «25» травня 2020 р. № 1180-с

2. Термін подання студентом проєкту 16 червня 2020 року

3. Вихідні дані до проєкту: метод контролю ультразвук; частота перетворювача – 2.5 МГц; тип перетворювача – прямий; діаметр перетворювача – 14 мм

4. Зміст пояснювальної записки

Вступ

1. Обґрунтування ультразвукового методу товщинометрії

2. Розрахунок акустичного тракту, та вибір елементів схем товщиноміра

3. Вибір та розрахунок електричних схем дефектоскопу

Висновки

Список використаних джерел

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслеників, плакатів, презентацій тощо) 7 креслеників

1 – Схема електрична принципова

2 – Схема електрична функціональна

3 – П'єзоелектричний перетворювач

4 – Демпфер

5 – Корпус

6 – Кришка

6. Консультанти розділів проєкту*

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

7. Дата видачі завдання _____

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проєкту	Термін виконання етапів проєкту	Примітка
1	Формулювання завдання проєкту	24.02.2020	
2	Обговорення змісту ПЗ	10.03.2020	
3	Розрахунок компонентів	06.04.2020	
4	Оформлення пояснювальної записки	25.05.2020	
5	Розробка креслеників	02.06.2020	

Студент

Сергій ПОЛЯНСЬКИЙ

Керівник

Віктор БАЖЕНОВ

Анотація

У даній роботі був спроектований ультразвуковий товщиномір. У вступі обґрунтовується актуальність і необхідність розробки.

У першому розділі проведено аналітичний огляд, в якому були розглянуті основні методи товщинометрії та принцип роботи цих методів: ехо-метод, імпедансний метод, метод вільних коливань, акустичної емісії, також розглядались і інші методи товщинометрії. Крім того, було проведено загальний огляд та нормативно-технічну базу вихрострумового контролю та наявні прилади за темою проекту.

У другому розділі було проведено розрахунки. Результати обчислення дали можливість визначитись із структурою схеми та конструкцією перетворювача, а також підібрати необхідні елементи з яких потім був зіставлений прилад, підібрано АЦП, пам'ять, дисплей. Був підібраний мікроконтроллер з можливістю управління МК в реальному часі і високою продуктивністю обробки сигналів, і власними сигнальними процесорами. Також дисплей і клавіатура.

Annotation

In this work, an ultrasonic thickness gauge was designed. The introduction substantiates the relevance and necessity of development.

In the first section, an analytical review was conducted, which considered the main methods of thickness measurement and the principle of operation of these methods: echo method, impedance method, free oscillation method, acoustic emission, and other methods of thickness measurement. In addition, a general review and regulatory framework for eddy current control and available devices on the project topic were conducted.

In the second section, calculations were performed. The results of the calculation made it possible to determine the structure of the circuit and the design of the converter, as well as to select the necessary elements from which the device was then compared, selected ADC, memory, display. A microcontroller with the ability to control the MK in real time and high signal processing performance, and its own signal processors was selected. Also display and keyboard

Contents

Вступ.....	9
1. Аналітичний огляд	10
1.1. Поняття ультразвуку та його застосування.....	10
1.2. Ультразвукові методи неруйнівного контролю:	14
1.2.1 Ехо-метод або луна-імпульсний метод	15
1.2.2 Імпедансний метод	21
1.2.3. Метод вільних коливань	24
1.2.4 Метод акустичної емісії.....	26
1.3 Товщинометрія	28
1.3.3 Вихростумовий метод	28
1.3.1. Ультразвукова товщинометрія	30
1.3.2 Магнітний метод.....	35
1.4 Аналіз методів товщинометрії.....	37
Розділ 2 проектування приладу.....	38
2.1 Розрахунок акустичного тракту	38
2.2 Розрахунок АЦП	42
2.3 Підбір смугового фільтра	44
2.4 Підбір пам'яті FIFO	45
2.5 Генератор тактованих імпульсів.....	46
2.6 Підбір перемикача	46
2.7 Підбір мікроконтролера.....	47
2.8 Підбір клавіатури	49
2.9 Підбір дисплея	50
2.10 Опис роботи приладу	51
Висновок:	51

					<i>ПК 61.160000.000073</i>			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.		Полянський С.В.			Ультразвуковий товщиномір	Літ.	Арк.	Акрушіє
Перевір.		Баженов В.Г.						
Н. Контр.						<i>ПБФ, ПК-61</i>		
Затверд.		Баженов В.Г.						

Вступ

Одним з акустичних методів неруйнівного контролю є ультразвукова товщинометрія. Можливості ультразвукового методу дозволяють з високою точністю виміряти товщину об'єкта без будь-яких руйнувань. При використанні цього методу виключаються традиційні похибки, а також похибки, обумовлені об'ємним розподілом електромагнітних-динамічних сил в поверхневому шарі об'єкту контролю. Своєчасне і планове усунення руйнівних ділянок трубопроводів дозволить заощадити на ремонті в надзвичайних обставинах.

Ультразвукові товщиноміри вимірюють час проходження ультразвукового імпульсу від випромінювача до протилежної поверхні об'єкта контролю та назад до перетворювача. Для проведення таких вимірювань доступ до протилежної поверхні об'єкта контролю не потрібно. Завдяки цьому, якщо протилежна поверхню об'єкта контролю є важкодоступною або повністю недоступною, необхідність розрізати об'єкт контролю (що необхідна для використання мікрометра або штангенциркуля) відсутня. Багато сучасних ультразвукових товщиномірів оснащені складними системами реєстрації та передачі даних, що забезпечують сполучення товщиномірів з комп'ютерними базами даних.

За допомогою ультразвукових товщиномірів може бути виміряна товщина виробів з більшості конструкційних матеріалів, таких як метали, пластики, кераміка, композити.

					НАЗВА ДОКУМЕНТУ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1. Аналітичний огляд

1.1. Поняття ультразвуку та його застосування

Ультразвуком називають пружні хвилі (хвилі, що поширюються в рідких, твердих і газоподібних середовищах за рахунок дії пружних сил), частота яких лежить за межами чутного для людини діапазону - приблизно від 20 кГц і вище.

Корисні особливості ультразвукових хвиль

І хоча фізично ультразвук має ту ж природу, що звук, який сприймає людське вухо, відрізняється лише умовно (більш високою частотою), саме завдяки більш високій частоті ультразвук вмає застосування до ряду корисних напрямків. Так, при вимірюванні швидкості ультразвуку в твердій, рідкій або газоподібній речовині, отримують дуже незначні похибки при моніторингу швидкотечних процесів, при визначенні питомої теплоємності (газу), при вимірі пружних постійних твердих тіл.

Висока частота при малих амплітудах дає можливість досягати підвищеної щільності потоків енергії, бо енергія пружної хвилі пропорційна квадрату її частоти. Крім того ультразвукові хвилі, які використовуються правильним чином дозволяють отримати ряд абсолютно особливих акустичних ефектів і явищ.

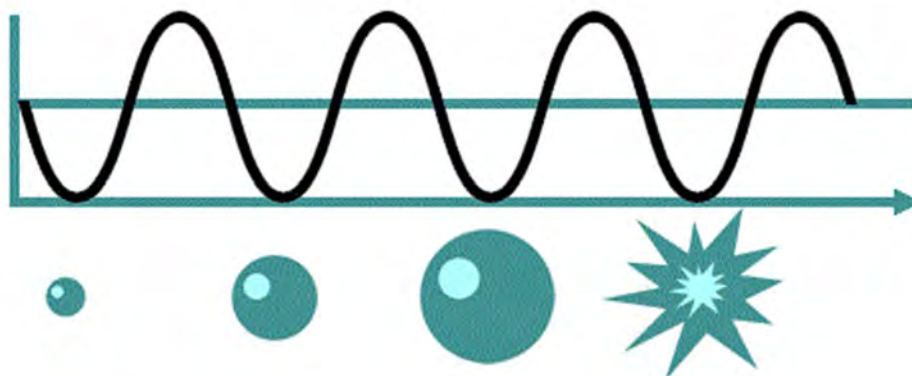


Рис.1.1

Одне з таких незвичайних явищ - акустична кавітація, що виникає при направленні потужної ультразвукової хвилі в рідину. У рідині, в поле дії

					НАЗВА ДОКУМЕНТУ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ультразвуку, крихітні бульбашки пару або газу (Субмікроскопічному розміру) починають рости до частки міліметра в діаметрі, при цьому пульсуючи з частотою хвилі і сплющуючись в позитивній фазі тиску.

Захлопувальна бульбашка породжує локально високий імпульс тиску, вимірюваний тисячами атмосфер, стаючи джерелом ударних сферичних хвиль. Акустичні мікропотоки, що утворюються біля таких пульсуючих бульбашок, отримали корисне застосування для отримання емульсій, очищення деталей і т. д.

Фокусуючи ультразвук, отримують звукові зображення в акустичної голографії і в системах звуковидення, концентрують звукову енергію з метою формування спрямованих випромінювань з заданими і керованими характеристиками спрямованості.

Використовуючи ультразвукову хвилю в якості дифракційної решітки для світла, можна для тих чи інших цілей змінювати показники заломлення світла, оскільки щільність в ультразвукової хвилі, як і в пружної хвилі, періодично змінюється.

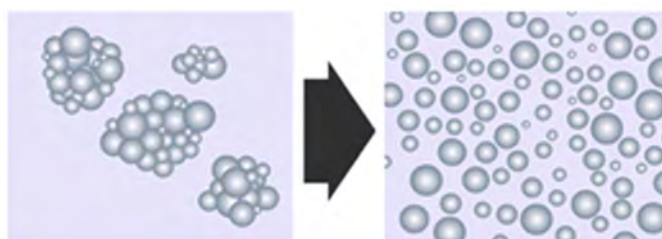


Рис. 1.2

Нарешті, особливості, пов'язані зі швидкістю поширення ультразвуку. У неорганічних середовищах ультразвук поширюється зі швидкістю, яка залежить від пружності і щільності середовища.

Що стосується середовищ органічних, то тут на швидкість впливають межі і їх характер, тобто фазова швидкість залежить від частоти (дисперсія).

Ультразвук загасає з віддаленням фронту хвилі від джерела – фронт

					НАЗВА ДОКУМЕНТУ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

розходитьса, ультразвук розсіюється, поглинається.

Внутрішнє тертя середовища (зсувна в'язкість) призводить до класичного поглинання ультразвуку, крім того релаксаційні поглинання для ультразвуку перевершує класичне. У газі ультразвук згасає сильніше, в твердих і в рідких тілах - набагато слабкіше. У воді, наприклад, загасає в 1000 разів повільніше ніж в повітрі. Так, промислові області застосування ультразвуку майже цілком пов'язані з твердими і рідкими тілами.

Ультразвук в ехолокації і гідролокації (харчова, оборонна, видобувна промисловості)

Перший прообраз гідролокатора був створений для запобігання зіткнень суден із крижинами і айсбергами, російським інженером Шиловським разом з французьким фізиком Ланжевенем в далекому 1912 році.

Прилад використовував принцип відображення і прийому звукової хвилі. Сигнал прямував в певну точку, а по затримці відповідного сигналу (луна), знаючи швидкість звуку, можна було судити про відстань до перешкоди, що відбила звукову хвилю.

Шиловський та Ланжевен стали глибоко досліджувати гідроакустику, і незабаром створили прилад, здатний виявляти ворожі підводні човни в Середземному морі на відстані до 2 кілометрів. Всі сучасні гідролокатори, в тому числі військові, - нащадки того самого приладу.

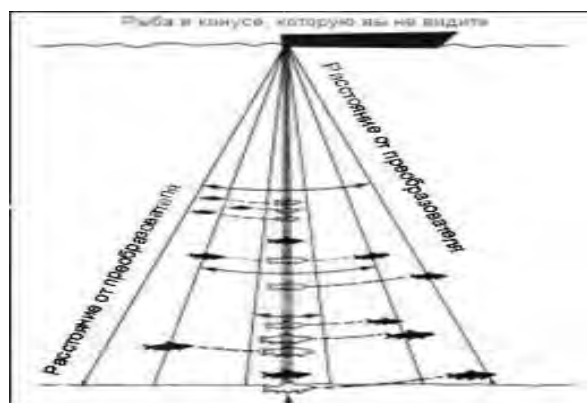


Рис. 1.3

					НАЗВА ДОКУМЕНТУ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Сучасні ехолоти для дослідження рельєфу дна складаються з чотирьох блоків: передавача, приймача, перетворювача і екрану. Функція передавача - відправляти вглиб води ультразвукові імпульси (50 кГц, 192 кГц або 200 кГц), які поширюються в воді зі швидкістю 1,5 км / с, де відбиваються від риб, каменів, інших предметів і дна, потім луна досягає приймача, обробляється перетворювачем і результат відображається на дисплеї в зручній для зорового сприйняття формі

Радіоелектроніка та ультразвук.

Для затримки одного електричного сигналу щодо іншого корисні ультразвукові лінії затримки. Електричний імпульс перетворюється в імпульсне механічне коливання ультразвукової частоти, яке поширюється в декілька разів повільніше електромагнітного імпульсу; потім механічне коливання назад перетворюється в електричний імпульс, і виходить сигнал, затриманий щодо сигналу, який подається спочатку.

Для такого перетворення зазвичай застосовують п'єзоелектричні або магнітострикційні перетворювачі, тому і лінії затримки називаються п'єзоелектричними або магнітострикційними.

У п'єзоелектричній лінії затримки електричний сигнал подається на кварцову пластинку (п'єзоелектричний перетворювач), з'єднану жорстко з металевим стрижнем.

До іншого кінця стержня приєднаний другий п'єзоелектричний перетворювач. Вхідний перетворювач приймає сигнал, створює механічні коливання, що поширюються по стрижню, і коли коливання досягають через стрижень другого перетворювача, знову виходить електричний сигнал.

Швидкість поширення коливань по стрижні сильно менше ніж просто у електричного сигналу, тому сигнал, що пройшов через стрижень затримується щодо подається на величину, пов'язану з різницею швидкостей електромагнітних і ультразвукових коливань.

					НАЗВА ДОКУМЕНТУ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Магнітострикційна лінія затримки стримує вхідний перетворювач, магніти, звукопровід, вихідний перетворювач, а також поглиначі. Вхідний сигнал подається на першу котушку, в стержневому звукопроводі з магнітострикційного матеріалу починаються коливання ультразвукової частоти - механічні коливання - магніт створює тут постійне підмагнічування в зоні перетворення і початкову магнітну індукцію.

У стрижні коливання поширюються зі швидкістю 5000 м / с, і наприклад на довжині стрижня в 40 см затримка складе 80 мкс. Поглиначі з двох кінців стрижня запобігають паразитні відображення сигналу. Магнітострикційні обурення викликають зміни індукції і в другій котушці (вихідного перетворювача) ЕРС.

1.2. Ультразвукові методи неруйнівного контролю:

Ультразвукові методи неруйнівного контролю поділяють на активні і пасивні. В свою чергу активні методи поділяються на методи власних коливань, імпедансні, відзеркалення, проходження та комбіновані.

Метод власних коливань:

- Вимушені коливання
 - Інтегральний
 - Локальний
 - Акустико-графічний
- Вільні коливання
 - Інтегральний
 - Локальний

Імпедансний метод:

- Згинні хвилі
- Повздовжні хвилі
- Контактний імпеданс

Відзеркалення:

- Луно-метод
- Луно-дзеркальний

					НАЗВА ДОКУМЕНТУ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- Дельта-метод
- Дифракційно-часовий (TOFD)
- Ревербераційний
- Ультразвукова мікроскопія

Проходження:

- Амплітудно-тіньовий
- Часо-тіньовий
- Багатократною тіні
- Велосиметричний

Комбіновані

- Дзеркально-тіньовий
- Луно-тіньовий
- Луно-наскрізний
- Ревербераційно-наскрізний

Пасивні методи поділяються на:

- Акустична емісія
- Вібродіагностика
- Шумодіагностика

1.2.1 Ехо-метод або луна-імпульсний метод

сутність контролю луна-імпульсним методом (рис. 1.2.1.) полягає в тому, що в деталь посилають короткі імпульси (тривалістю 1-3 мкс) ультразвукових коливань з інтервалом 1-5 мс.

					НАЗВА ДОКУМЕНТУ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

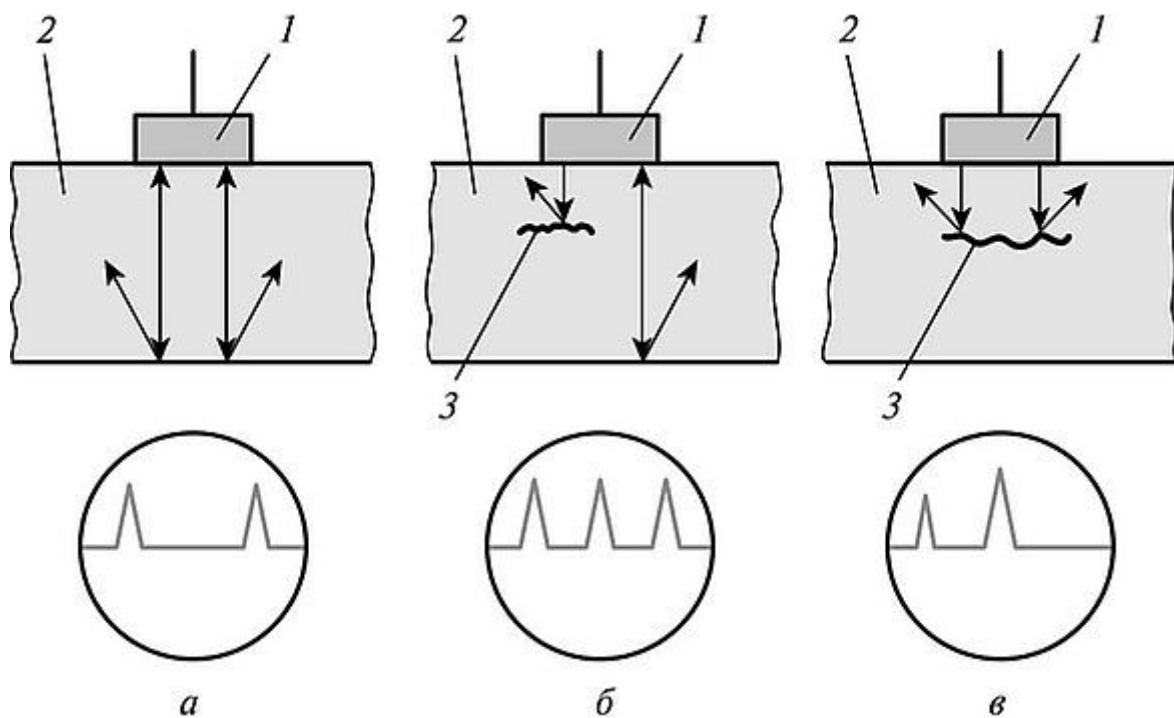


Рис. 1.4 Схема луна-іпульсному методу

Випромінюючий перетворювач можна одночасно використовувати в якості приймача. В момент посилення імпульсу на екрані приладу виникає миттєве підвищення. Ультразвуковий імпульс проходить через деталь 2 і, відбиваючись від її протилежного боку, повертається до випромінювача. Прихід відбитого сигналу також реєструється приладом (рис. 1.4, а). Якщо на шляху ультразвуку в деталі є дефект 3, то на екрані приладу з'явиться новий додатковий сигнал (рис. 1.4, б). Якщо дефект повністю перекриває ультразвукову пучку, то на екрані приладу миттєве підвищення від відбитого імпульсу буде відсутній (рис. 1.4, в). Величина цього сигналу дає уявлення про розміри дефекту, а інтервал між введенням в виріб початкового імпульсу і прийомом відбитого сигналу дозволяє визначити глибину його залягання. Реєстрація ехосигналів здійснюється шляхом перетворення в електричні імпульси відбитих хвиль, посилення і реєстрації на екрані електронно-променевої трубки дефектоскопа. Причому посилення сигналу відбувається нелінійно, тобто більш потужний сигнал посилюється в меншій мірі, ніж

						НАЗВА ДОКУМЕНТУ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			

слабший. Також в підсилювачах передбачена поправка на глибину залягання дефекту: чим довше запізнення луна-сигналу, тим більше його посилення.

В даний час цей метод набув найбільшого поширення. З його допомогою перевіряються лопатки роторів турбін і компресорів авіаційних двигунів, контролюються стержнів осьових шарнірів втулок вертольотів, циліндри двигунів внутрішнього згоряння, барабани коліс, відповідальні кріпильні деталі. Метод також застосовується для визначення товщини стінок деталей, структури матеріалу при односторонньому доступі до перевіряється виробу. Для отримання надійних результатів контролю дефектоскоп налаштовують по еталонній деталі з відомим дефектом.

На рис. 1.5 приведена принципова схема імпульсного ультразвукового дефектоскопа. Генератор радіоімпульсів 3 збуджує п'єзопластини передавальної запобігливо головки 1. Ультразвукові коливання поширюються в контрольованій деталі, відбиваються від її протилежної стінки (донний сигнал) і потрапляють на п'єзопластини приймальні запобігливо головки 2. Відображені ультразвукові коливання збуджують коливання п'єзопластини приймальні запобігливо головки 2. При цьому на гранях п'єзопластини виникає змінна напруга, яке детектується і посилюється в підсилювачі 4, а потім надходить на вертикальні відхиляють електронно-променевої трубки (ЕПТ) 5 осцилографа. Одночасно генератор горизон-

					НАЗВА ДОКУМЕНТУ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

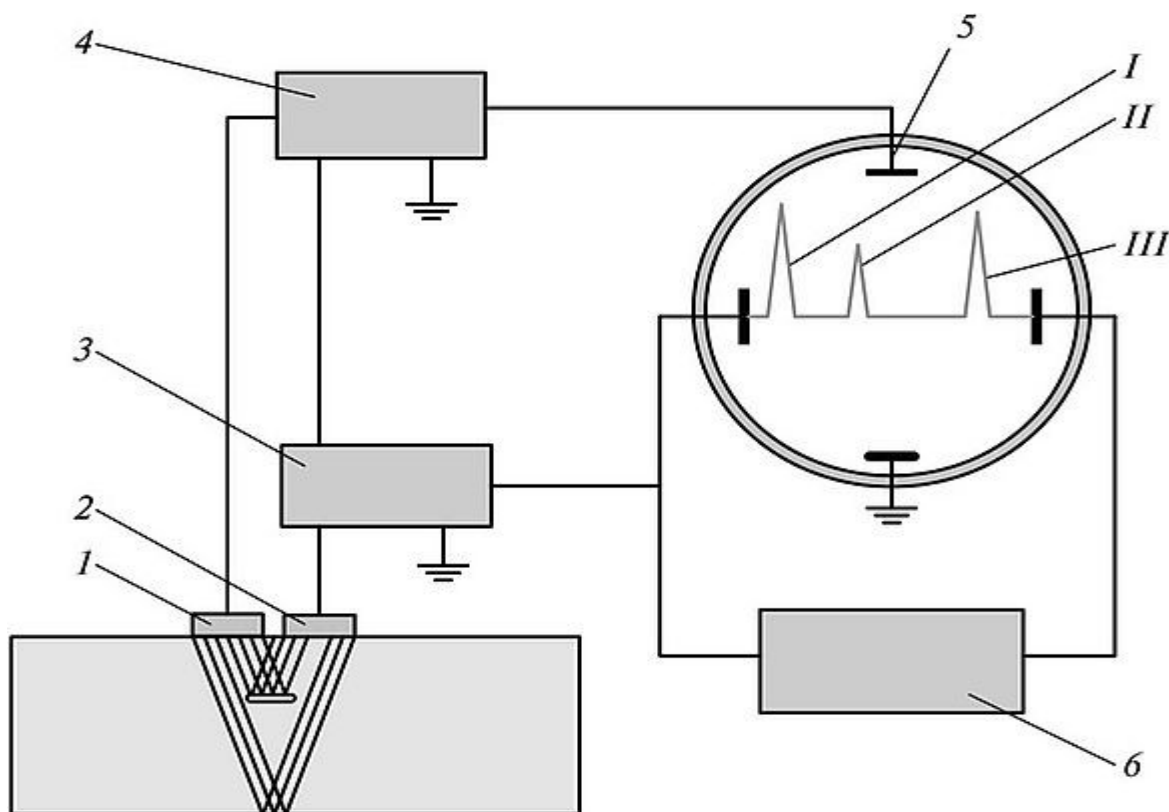


Рис. 1.5 Блок-схема імпульсного ультразвукового дефектоскопа

тальної розгортки 6 подає пилкоподібна напруга на горизонтальні відхиляють ЕПТ 5.

Генератор радіоімпульсів 3 збуджує п'єзопластини передавальної запобігливо головки / короткими імпульсами, між якими виходять тривалі паузи. Це дозволяє чітко розрізнити на екрані ЕПТ 5 сигнал початкового (зондуючого) імпульсу I, сигнал від дефекту III і донний сигнал II.

При відсутності дефекту в контрольованій ділянці деталі на екрані осцилографа імпульс III буде відсутній. Переміщаючи передавальну і приймальню вишукувальні головки по поверхні контрольованої деталі, виявляють дефекти і визначають їх місце розташування.

Одна з особливостей даного методу полягає в тому, що певну ділянку деталі не піддається контролю. Наприклад, при контролі лопаток турбін запобігливо головка прикладається до кінця кромки лопатки так, щоб УЗК були

					НАЗВА ДОКУМЕНТУ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

направлені до іншого кінця лопатки (рис. 1.6). УЗК через контактну головку і шар масла входять в кромку лопатки, в результаті чого на екрані буде зафіксований початковий імпульс а. При відсутності дефекту ультразвукові хвилі доходять до кінця лопатки і повертаються до вишукувальних голівці - на екрані буде зафіксований імпульс б.

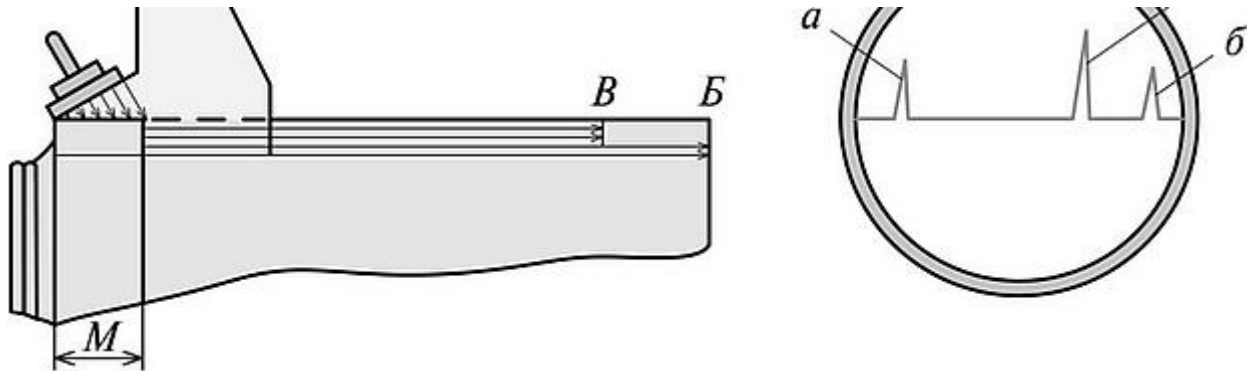


Рис. 1.6. Схема перевірки кромки лопатки ультразвуковим дефектоскопом

Якщо кромка має дефект В – то частина ультразвукових коливань відіб'ється у цьому місці і, повернувшись, зафіксується у вигляді імпульсу в, розташованого на екрані між початковим і кінцевим імпульсами. Ділянка лопатки завдовжки М при цьому контролю не піддається. Щоб перевірити цю ділянку лопатки запобігливо головку слід встановити повторно з кінця Б лопатки.

Інша особливість полягає в тому, що при великому дефекті все ультразвукові коливання позначаться в місці його розташування, і на екрані будуть всього два імпульсу - початковий і відбитий від дефекту. Кінцевого імпульсу не буде. Це може дезорієнтувати контролера в тому випадку, якщо великий дефект розташований поблизу кінця лопатки. Тоді імпульс від дефекту може бути сприйнятий як кінцевий, і дефект може бути пропущений. Щоб уникнути таких помилок, відбитий сигнал стробіруючих, тобто виділяють його на ЕПТ за допомогою електронних маркерів, які автоматично налаштовують вимірювальну систему дефектоскопа на даний сигнал (рис. 1.7).

					НАЗВА ДОКУМЕНТУ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

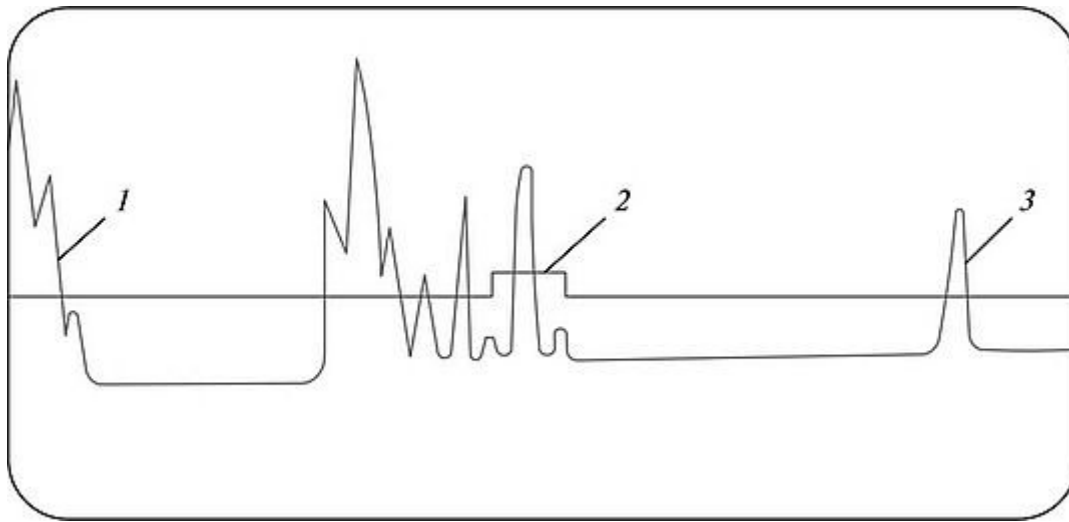


Рис. 1.7. Стробування при УЗ-контролі

1 - зондуєчий імпульс; 2 - область стробування; 3 - донний імпульс

Вплив форми імпульсу і його частоти на розподіл відбитої або розсіяної від дефекту енергії носить складний характер. Однак для отримання достатнього за амплітудою відбиття від дефекту коливання повинні мати довжину хвилі, по крайній мірі, одного порядку із розмірами дефекту. Отже, для виявлення невеликих дефектів частоту УЗК слід збільшувати. Глибину і орієнтацію дефектів визначають за допомогою похилих перетворювачів (кут введення УЗК 30- 60 °). Координати h (глибина) і L (протяжність) обчислюють за відомими значеннями часу t і поширення УЗ-хвилі до дефекту і назад, а також кута введення α : $h = 0,5 C, t \cos \alpha$; $L = 0,5 C, t \sin \alpha$, де C , - швидкість зсувної хвилі.

Зазначені параметри автоматично розраховуються в електронній частини дефектоскопа і видаються на блок цифрового відліку. Для того щоб показання були достовірними, його попередньо налаштовують на стандартних зразках.

При реалізації луна-методів використовуються імпульсні дефектоскопи. Схема типового імпульсного дефектоскопа представлена на рис. 1.8 і включає: генератор зондуєчих імпульсів; електроакустичний перетворювач; підсилювач; систему тимчасового регулювання чутливості, пов'язану з

					НАЗВА ДОКУМЕНТУ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

підсилювачем; індикатор; автоматичний реєстратор дефектів. Синхронізатор забезпечує необхідну тимчасову послідовність роботи всіх вузлів дефектоскопа.

Дефектоскоп забезпечений пристроєм для вимірювання амплітуди і часу проходження відбитого сигналу.

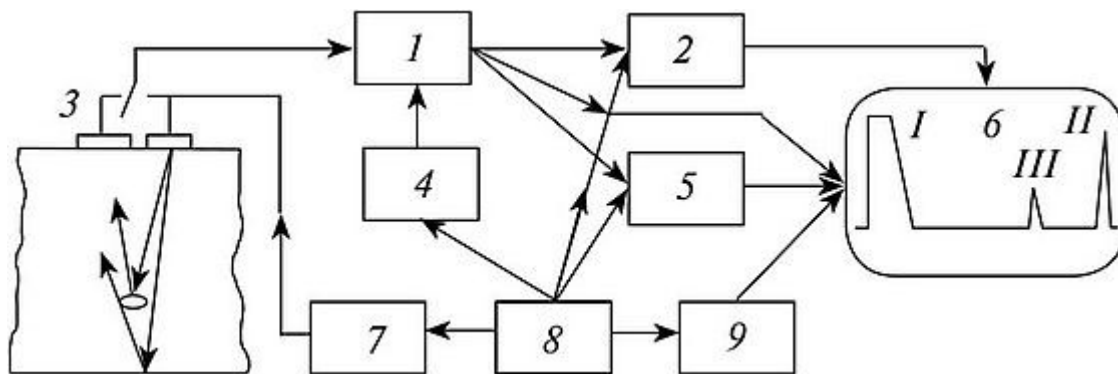


Рис. 1.8. Структура імпульсного ультразвукового дефектоскопа (показані випромінюючий та приймаючий тракти):

I — підсилювач; 2 — реєстратор дефектів; 3 — перетворювач-приймач; 4 — часовий регулятор частоти; 5 — вимірювач амплітуди відбитого сигналу; 6 — індикатор; 7 — генератор; 8 — синхронізатор; 9 — прилад сполучення; / — зондуючий імпульс; *II* — донний сигнал; *III* — ехо-сигнал від дефекту

1.2.2 Імпедансний метод

Імпедансний метод заснований на використанні залежності повного механічного опору (імпедансу) контрольованого виробу від якості з'єднання його окремих елементів між собою. Механічним імпедансом T називають відношення вимушених коливань Γ до швидкості V частинок середовища в точці прикладання сили: $Z = T^2 / V$.

Метод застосовується для контролю з'єднань, що мають кілька шарів: виявлення несумісності клейових і паяних з'єднань, контролю якості посадки шпильок, штифтів, осей та інших деталей, встановлених з натягом. Найбільшого поширення набув контроль клейового з'єднання обшивки з

										Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	НАЗВА ДОКУМЕНТУ					

стільниковим заповнювачем. Імпедансні дефектоскопи типів ІАД-2 і ІАД-3 забезпечують надійний контроль дво- і тришарових конструкцій. При цьому контролі не потрібно двостороннього доступу до виробу і нанесення контактної рідини на його поверхню. Датчиком в цих дефектоскопах є стрижень, який здійснює поздовжні коливання. Якщо випромінювач знаходиться над ділянкою обшивки з цільним клейовим з'єднанням, то конструкція коливається як єдине ціле і сила реакції виробу на стрижень випромінювача досягає великого значення (механічний імпеданс має максимальне значення, так як визначається жорсткістю всієї конструкції)(рис.1.9 при знаходженні

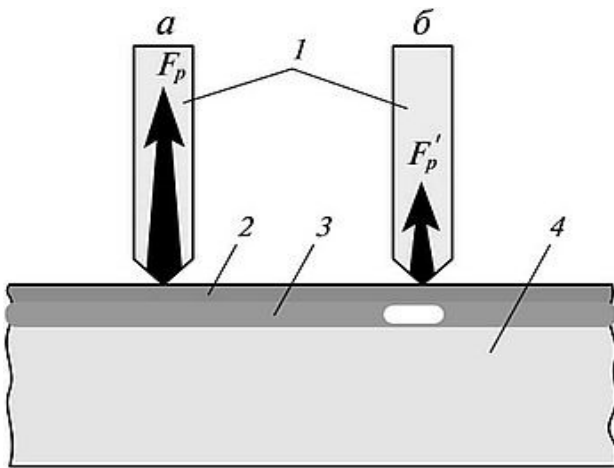


Рис. 1.9 Контроль якості склейки імпедансним способом

a — на ділянках з гарною склейкою; *б* — в зоні непроклею; 7 — датчики; 2 — зовнішній лист (обшивка); 3 — шар клею; 4 — внутрішній лист (прокладка); G_p — сила реакції випромінювача над непроклеєною зоною ділянки обшивки коливається незалежно від внутрішнього листа-підкладки, і сила реакції різко зменшується, оскільки жорсткість обшивки на цій ділянці буде значно менше. Зміна сили реакції фіксується за допомогою п'єзоелемента, який міститься на кінці датчика (рис. 1.10). Зміна механічного імпедансу контрольованого виробу може бути виявлено по зміні фази сили реакції (прилад ІАД-3), що надається на випромінювач порушуваними у виробі пружними коливаннями, або по зміні її амплітуди.

					НАЗВА ДОКУМЕНТУ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Техніка контролю імпедансним акустичним приладом відносно проста і полягає в тому, що попередньо налаштований датчик переміщається по контрольованій поверхні. У процесі контролю необхідно стежити, щоб вісь датчика не відхилялася від перпендикулярного положення більш ніж на 10° . Зміна сили реакції фіксується загорянням лампочки або стрілочним індикатором.

Режим роботи вибирають в залежності від властивостей контрольованих матеріалів і особливостей конструкції. Чутливість імпедансного методу залежить від конкретних умов його застосування. Для успішного застосування методу необхідно, щоб відношення імпедансу всієї конструкції до імпедансу обшивки було досить великим. При склеюванні двох шарів з однакового матеріалу контроль можливий тільки в тому випадку, якщо ці шари мають різну товщину і перевірка виконується з боку більш тонкого шару. Контроль з'єднань однорідних шарів однакової товщини імпедансним методом зазвичай неможливий. Для вибору оптимальних режимів контролю і визначення чутливості методу необхідні контрольні зразки зі штучними дефектами різних розмірів. Ці зразки повинні мати ті ж основні параметри (товщину і матеріал обшивки і з'єднаних з нею елементів, розмір стільникового осередку і т.д.), що і контрольований виріб. Довжина і ширина зразків можуть бути менші, ніж відповідні розміри виробів.

Імпедансний метод може бути використаний в тих випадках, коли модуль пружності матеріалу того шару, з боку якого проводиться контроль, досить великий (метали, текстоліт). Контроль з боку матеріалів з низьким модулем пружності (м'яка гума, пінопласт) практично неможливий. Зі зменшенням модуля пружності чутливість методу падає. Найбільша чутливість досягається на гладких поверхнях контрольованого виробу, шорстка поверхня знижує чутливість методу. Сучасний імпедансний дефектоскоп реалізує імпедансний, вихрострумівий і резонансний методи контролю.

					НАЗВА ДОКУМЕНТУ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

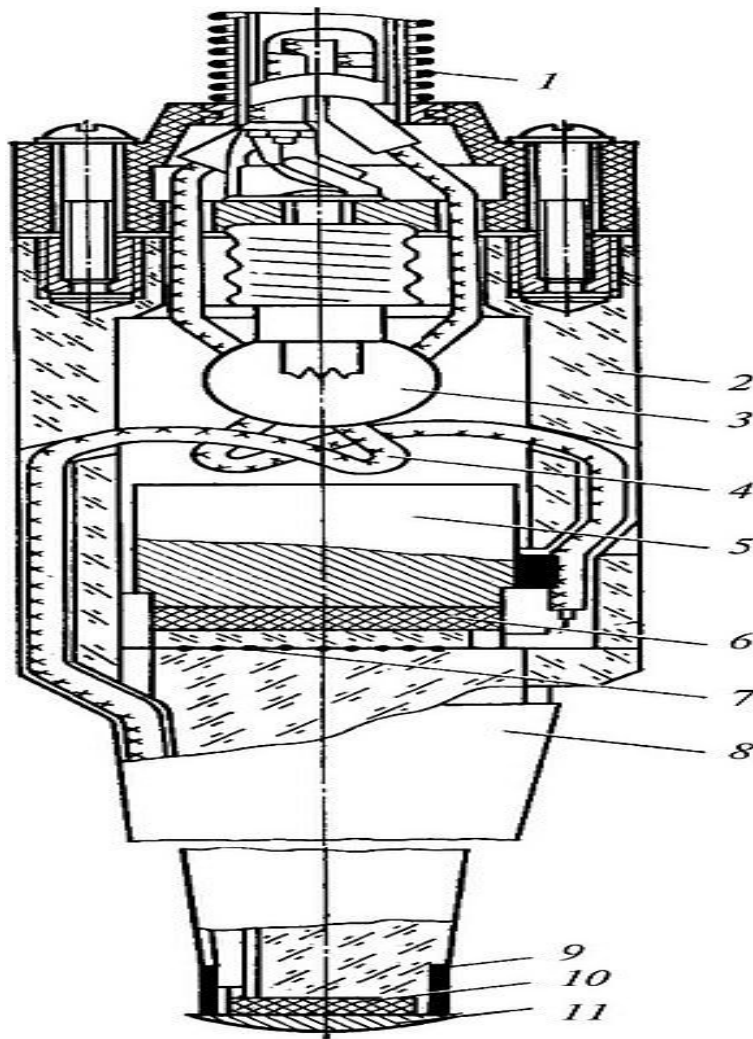


Рис. 1.10. Схема датчика імпедансного дефектоскопа

1 - пружина; 2 - корпус; 3 - сигнальна лампочка; 4 - екранований провід; 5 - сталевий циліндр; 6 - випромінює п'єзоелемент; 7 - екран; 8 - звукопровідний стрижень; 9 - екрануюче кільце; 10 - вимірювальний п'єзоелемент; 11 - контактний наконечник

1.2.3. Метод вільних коливань

Метод вільних коливань заснований на використанні пружних властивостей коливальних систем, що здійснюють вільні коливання. Контроль полягає в порушенні пружних коливань в контрольованому об'єкті і аналізі характеристик власних коливань об'єкта. Метод застосовується для виявлення внутрішніх дефектів, що залягають на глибині декількох сантиметрів в масивних деталях, виготовлених з матеріалів з високим

					НАЗВА ДОКУМЕНТУ		Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			

коефіцієнтом загасання пружних коливань. Метод вільних коливань є одним з найдавніших акустичних методів.

Як відомо, тільки початкова амплітуда цих коливань визначається обурюючою силою, інші ж характеристики - період і частота коливань, коефіцієнт загасання - цілком залежать від параметрів самої системи: маси гнучкості, механічного опору. Виріб, що не має дефектів у вигляді тріщин, може розглядатися як коливальна система з певними параметрами (частотою, коефіцієнтом загасання). Ці параметри змінюються, якщо у виробі є неоднорідності (тріщини, розшарування, раковини). З давніх-давен оглядачі вагонів, простукуючи молотком осі коліс, по дзвону металу визначали наявність в ньому тріщин.

Більш об'єктивний контроль здійснюється за допомогою ударника електромагнітного вібратора, що порушує вільні коливання. Весь спектр частот цих коливань реєструється п'єзоелементом приймача, перетворюється в електричний сигнал і після підсилення подається на фільтр, що пропускає лише спектр коливань дефектної ділянки. Потім ці коливання посилюються і подаються на індикатор. Прилад, що працює на такому принципі, успішно застосовується для перевірки якості склеювання між собою і з металевою обшивкою матеріалів з високими значеннями коефіцієнта загасання пружних коливань (текстоліт, фанера тощо).

Високочастотна ультразвукова томографія є порівняно новим напрямком у вирішенні завдань традиційного дефектоскопічного контролю авіаційної техніки, а також в дослідженні мікроструктури і фізико-механічних властивостей матеріалів. Такі системи в даний час широко застосовуються в практичному матеріалознавстві. Сутність візуалізації дефектів матеріалу полягає в скануванні досліджуваної області об'єкта ультразвуковим фокусованим пучком, реєстрації амплітуд відбитих хвиль і, в кінцевому рахунку, перетворенню їх в акустичне зображення на екрані. Високі технічні можливості високочастотного ультразвукового томографа по виявленню і

					НАЗВА ДОКУМЕНТУ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

візуалізації різних дефектів дозволяють вважати цей метод досить перспективним для контролю об'єктів авіаційної техніки.

1.2.4 Метод акустичної емісії

Останнім часом набуває поширення метод акустичної емісії. Акустична емісія - це явище поширення в твердому тілі хвиль пружної деформації внаслідок звільнення енергії при пластичній деформації або руйнування (зламі) локального обсягу. Акустична емісія в металі це хвилі пружної деформації невеликої амплітуди, створювані дискретними (розривними, переривчастими) рухами, які супроводжуються непружною деформацією і розвитку тріщини. Хвилі пружної деформації, які є результатом деформації або розвитку джерел руйнування, виявляються як невеликі зсуви на поверхні контрольованого об'єкта. Виявлення хвиль акустичної емісії здійснюється безпосередньо шляхом приєднання пасивних п'єзоелектричних датчиків до поверхні, перетворення і зчитування швидких електричних імпульсів, викликаних зсувом чутливого елемента датчика у вигляді ряду одиночних імпульсів або кількості енергії. Прийняті імпульси або сигнали мають порівняно високу частоту - 100 кГц - 1 МГц і більше.

Інтерес до явищ акустичної емісії в авіації обумовлений тим, що при належному розвитку ці методи дозволяють визначити наявність, величину і розташування мікротріщин що розвиваються, причому дистанційно зі значною швидкістю. Що стосується використання на практиці технічного обслуговування і ремонту літальних апаратів використання методу акустичної емісії може стати одним з інтегральних способів оцінки технічного стану планера і основних силових вузлів у зв'язку з розвитком втомної пошкоджуваності конструкції при тривалій експлуатації.

Незважаючи на здавалося б простоту, контроль деталей (особливо складної форми) ультразвуковими і звуковими методами має ряд особливостей і труднощів. Тому методи застосовують лише для тих деталей, для яких розроблені відповідні методики або технології, що визначають мету, зони і

					НАЗВА ДОКУМЕНТУ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

чутливість контролю; місця введення УЗК в деталь; тип використовуваного дефектоскопа; оптимальний кут введення УЗК в деталь; тип запобігливо головки; контрольний зразок (еталон); способи забезпечення акустичного контакту; рідина для забезпечення акустичного контакту; настройку дефектоскопа перед контролем; технологію проведення контролю; розшифрування результатів контролю; норми на відбраковування деталей; запобіжні заходи.

Мета, зони і чутливість контролю визначають на основі статистичних даних про місця поширення дефектів матеріалу, їх характеру і орієнтації і технічних умов на деталь. Введення УЗК здійснюють з доступних поверхонь так, щоб забезпечувалися оптимальні умови виявлення дефектів в місцях їх найбільш ймовірного виникнення. При цьому використовують різні типи фіксаторів, що дозволяють усувати перешкоди через відображення УЗК від конструктивних нерівностей деталі. Технологія проведення контролю складається з наступних операцій: підготовка деталі до контролю; розміщення необхідної апаратури і приладів; розбивка деталі на зони контролю; нанесення контактної рідини в місцях введення УЗК; установка і сканування шукача при контролі в кожній зоні введення УЗК; спостереження за індикатором і визначення дефектів за його свідченнями.

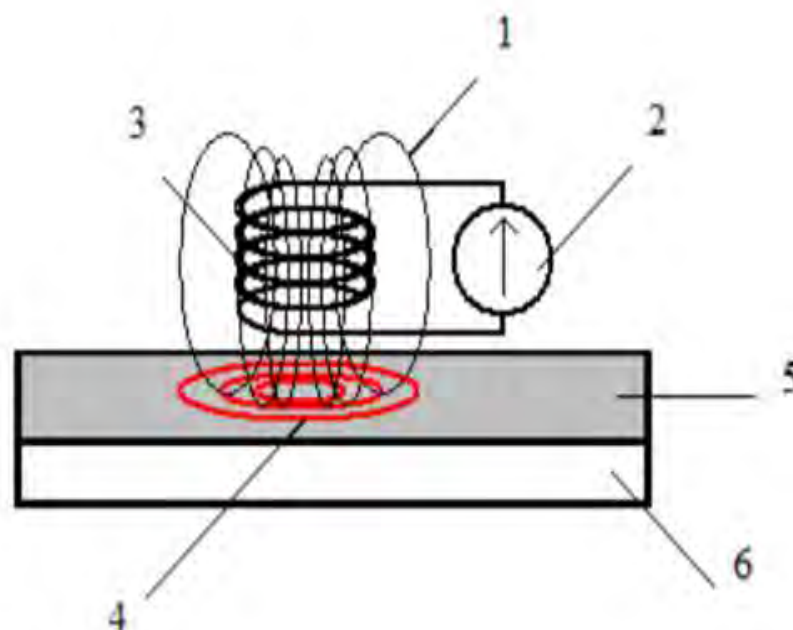
Розшифрування виникаючих сигналів і їх відмінність від сигналів-перешкод вимагає спеціальних навичок і може бути здійснено тільки спеціально підготовленим персоналом. Наявність мертвих зон, тобто неконтрольованих ділянок на деталях, і необхідність складного налаштування дефектоскопа є недоліками акустичних методів неруйнівного контролю. Проте, акустичні методи постійно розвиваються, з'являються нові високопродуктивні прилади. Цей вид контролю все ширше застосовується при експлуатації і ремонті літальних апаратів.

					НАЗВА ДОКУМЕНТУ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1.3 Товщинометрія

1.3.3 Вихростумовий метод

Цей метод заснований на зміні магнітного поля вихрових струмів. В залежності від зміни відстані від яка проводить від об'єкта до перетворювача. Цей тип товщиноміра використовується для вимірювання товщини неперекриваних покриттів на провідній підкладці і навпаки. Зменшення товщини досліджуваного покриття викликає ущільнення вихрового поля під сенсором і збільшення його впливу на амплітуду струму в котушці. Оскільки існує кореляція між товщиною покриття і створюваною щільністю створюваного вихрового поля, це дозволяє чисельно оцінити товщину покриття цим методом, але в межах максимум 2 мм. Вихреструми або струми. Струмо-індукційні струми, що виникають в провідниках при проходженні магнітного поля. Вони виникають під впливом електромагнітного поля. Вони називаються вихорами, так як вони замкнуті в кільці. Електромагнітне поле вихрострумів має частоту до 1 МГц. На малюнку 10 показаний метод управління вихрострумом (1 електромагнітні польові лінії, 2-індикатор, 3-обмотка індуктивності, 4 польові вихроструми, 5-випробуване покриття, 6-базові продукти).



					НАЗВА ДОКУМЕНТУ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Рис.1.11 Вихрострумний метод контролю

Індукційна обмотка (3), по якій протікає високочастотний ток, генерує магнітне поле змінного типу (1). Наближаючись до досліджуваної поверхні (5), вона збуджує в ній вихрові струми (4), які захоплюються і вимірюються однією і тією ж обмоткою (3). За результатами вимірювань зроблено висновок про товщину продукту.

Використання вихрострумних товщиномірів обмежена. Необхідно враховувати мінімальний радіус основи (вказаний в паспортних даних пристрою), шорсткість і товщину покриття, а також необхідно враховувати робочу частоту товщиноміра, так як при збільшенні робочої частоти приладу глибина проникнення об'єкта управління вихрострумом зменшується. У деяких випадках ця функція дає перевагу, наприклад, при роботі з тонкою основою. Тому для різних завдань потрібні різні робочі частоти.

Переваги вихретокового методу:

- Малий вплив шорсткості об'єкту контролю на вимір;
- Можливість вимірювати дрібні предмети без додаткових інструментів;
- Вимірювання на виробках зі змінною і високою намагніченістю;
- Висока точність вимірювань;
- Тестування злегка залежить від геометрії об'єкту під час виміру.

недоліки:

- Залежність отримання результатів вимірювань від електропровідності покриття (необхідно зберегти кілька калібрувальних характеристик);
- Залежність від температури (зміна температури продукту призводить до зміни магнітної проникності і електропровідності основи).

					НАЗВА ДОКУМЕНТУ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1.3.1. Ультразвукова товщинометрія

У наш час вимірювання товщини все більшого поширення набуває по різних напрямках діяльності. У зв'язку з цим необхідно визначити товщину продуктів і окремих частин складних конфігурацій. Наприклад, необхідно вимірювати за допомогою одностороннього доступу, оскільки доступ до іншої сторони може бути важкодоступним або неможливим. Крім того, бувають ситуації, коли необхідно виміряти товщину деталей, демонтаж яких неможливо. У таких ситуаціях ультразвуковий товщиномір підходить для вимірювання. Ультразвуковий товщиномір є акустичним методом контролю. Діапазон частот для цього типу вимірювання товщини становить від 20 кГц до 100 кГц. Розглянемо фізику даного методу трохи детальніше. На рис.1.12 зображено ультразвуковий метод товщинометрії (1 датчик товщиноміра, 2 кабель датчика, 3-відбитий сигнал, 4 падаючий сигнал, 5 об'єкт контролю - покриття, 6-основа виробу).

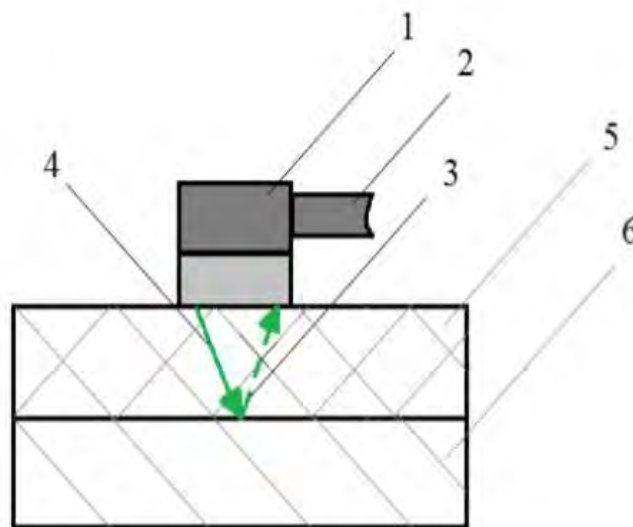


Рис.1.12 Ультразвуковий метод товщинометрії

Ультразвуковий товщиномір заснований на тому, що датчик пристрою (1) посиляє імпульс (4) на контрольовану поверхню (5), потім він проходить через це покриття і відбивається від межі носія. Потім відбитий сигнал (3) перетворюється датчиком (1) в електричний сигнал. потім ми

					НАЗВА ДОКУМЕНТУ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

можемо сказати про товщину лакофарбового покриття продукту.

При використанні ультразвукового методу необхідно використовувати контактну рідину. Оскільки ультразвук не дуже добре поширюється на повітрі, тому, коли сенсор контактує з покриттям, необхідний контактний носій.

У вигляді контактної рідини (контактного середовища) використовуються:

- Вода;
- Олія;
- Гліцерин;
- Пропіленгліколь.

Основними параметрами ультразвукової товщинометрії є:

частота хвилі, довжина і швидкість ультразвукових коливань. Основна залежність цих параметрів відбивається у формулі (1.1)

$$l = \frac{c}{f} \quad (1.1)$$

де l -довжина хвилі, c - швидкість звуку, f -частота ультразвукових коливань. З формули (1.1) видно, що довжина хвилі ультразвуку зменшується із збільшенням частоти ультразвукових коливань. Для адаптації пружних коливань до електричного сигналу застосовуються різні методи і навпаки. Загалом, використовується п'єзоелектричний ефект. Цей ефект полягає в порушенні і прийомі пружних хвиль за допомогою перетворення електричних коливань в акустичній хвилі і назад за допомогою п'єзоелектричних перетворювачів, що мають чутливий елемент (п'єзокерамічний).

При пружній деформації п'єзокерамічної пластини на її поверхні з'являється різниця потенціалів. Величина і змінна у часі різниці потенціалів

					НАЗВА ДОКУМЕНТУ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

пропорційній заданій механічній дії. Цей ефект називається прямим п'єзоелектричним ефектом.

Зворотний п'єзоелектричний ефект полягає в додатку електричного імпульсу до поверхні п'єзокерамічної пластини через його пружні деформації. Зсув граней цієї п'єзокерамічної пластини дуже малий (не більше 10-4 мм).

Якщо в п'єзоелектричній пластині порушити коливання електричним імпульсом і дозволити коливанням бути вільними, то коливання будуть відбуватися на власній частоті (f_0), яка пропорційна товщині п'єзокерамічної пластини (h) і швидкості звуку в п'єзокерамічному матеріалі (c). Ця залежність добре представлена в формулі (1.2):

$$f(0) = \frac{c}{h*2} \quad (1.2)$$

де f_0 - власна частота коливань, c -швидкість звуку в матеріалі п'єзопластини, h -товщина п'єзопластини [1].

З формули 2 видно, що власна частота коливань імпульсу залежить від значень товщини п'єзопластини і швидкості звуку в матеріалі

п'єзопластини. Товщина покриття обчислюється за формулою (1.3):

$$s = 0.5 * c * (\tau - \tau_0) \quad (1.3)$$

де s -вимірювана товщина, c -швидкість звуку, τ -час проходження відбитого сигналу, τ_0 -час проходження імпульсу. Формула (1.3) показує, що час подорожі (τ_0) і швидкість звуку будуть більш точно визначені, тим точніше будуть вимірювання товщини. Тому вам необхідно правильно відрегулювати товщину.

Існує три групи приладів для трьох завдань вимірювання товщини ультразвуку:

1 Ручне управління продуктами з гладкими паралельними поверхнями

									Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	НАЗВА ДОКУМЕНТУ				

2. Ручна перевірка виробів з грубими непаралельними поверхнями, наприклад продуктами, внутрішня поверхня яких піддалася корозії.

3. Автоматичне управління в потоці (як правило, прокатка труб).

Для 1 і 2 завдання вимірювання потрібна висока точність. Для 3 завдання потрібна висока точність для усунення розсіяного відображення від протилежної поверхні (нерівномірна), в той час як вимоги до точності такі, як в задачах 1 і 2, не потрібні. У товщиномірів використовуються ПК-перетворювачі. Вони використовуються для зменшення мінімальної вимірної товщини, яка визначається в мертвій зоні. Мертва зона залежить від розмірів перетворювача і частоти (чим менше розміри перетворювача і тим вище частота, тим менше мертва зона). для приладів типу 1 і типу 2 мінімальна вимірня товщина складає 0,1-0,5 мм, для приладів третього типу товщина складає 0,5-1,0 мм. але максимальна товщина (зазвичай 200-1000 мм) контрольованого об'єкта не обмежується фізичними причинами, за винятком великого загасання ультразвукової хвилі в деяких матеріалах (високолеговані сталі, чугуни і т.д).

Існують фактори, які обмежують максимальну товщину: кривизну вхідної поверхні, велику нерівномірність і непаралельність поверхні об'єкта управління. У Товщиномірах, щоб зменшити помилку, викликану вищевказаними причинами, є перемикач частоти (усереднення, зазвичай 4 вимірювання в секунду, а також при високих температурах в середньому 20 вимірювань в секунду). для більш точних вимірювань необхідно провести якісний акустичний контакт між датчиком (перетворювачем) і об'єктом контролю.

При вимірюванні в ультразвукових товщиномірів є похибка. Похибка вимірювання складається з частини, пропорційної товщині і частини, що не

					НАЗВА ДОКУМЕНТУ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

залежить від вимірної товщини. Основна похибка товщиноміра (+0,1 мм), а в діапазоні 100-1000 мм похибка збільшується ($0,001h + 0,1$) мм, де h - вимірjana товщина). І з'являється додаткова похибка через несприятливі умови управління (при вимірюванні контрольованого об'єкта з нерівномірною вхідною поверхнею час проходження ультразвуку збільшується від датчика до інтерфейсу між двома середовищами). вимірювання рекомендується проводити з шорсткістю вхідної поверхні $Rz \leq 40$ мкм, при збільшенні Rz до 160 мкм виникає додаткова похибка (0,2 мм). Ця похибка може бути зменшена шляхом забезпечення такої ж шорсткості (При вимірюванні та налаштування) при очищенні вхідної поверхні і стабілізації прилягання датчика. Додаткова похибка (+0,2 мм) з'являється при вимірюванні локального проріджування, що моделюється плоским дном (діаметром 1 мм) і на грубій (Rz до 320 мкм) внутрішній поверхні. Крім того, при вимірі на непараллельній поверхні випробуваного об'єкта виникає додаткова похибка ($\pm 0,3$ мм). При управлінні трубами (діаметром 6-20 мм) з'являється додаткова похибка ($\pm 0,1$ мм), ця помилка може бути зменшена шляхом регулювання товщини на зразку з тією ж кривизною, що і виріб. Налаштування товщиноміра проводять в декілька етапів:

- На зразку відомої товщини (товщина зразка повинна бути більше тієї, яку очікують у процесі вимірювання), матеріалу такого ж, як і у контрольованого, з приблизно однаковою температурою і шорсткістю поверхні з об'єктом контролю проводять налаштування швидкості звуку.
- Налаштування нуля перетворювача (часу проходження) проводять на зразку, товщина якого повинна бути менше, ніж очікується при вимірі.
- При контролі та налаштуванні товщиноміра необхідно використовувати одну і ту ж контактну рідину.

Переваги ультразвукового методу:

- Метод є неруйнівним;

					НАЗВА ДОКУМЕНТУ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- Підходить для більшості типів покриттів матеріалів;
- Має великий діапазон виміру;
- Можливість проведення вимірювань при наявності одностороннього доступу;
- Володіє малим часом вимірювання;
- Висока точність і надійність вимірювання;
- Універсальність (всі стандартні конструкційні матеріали, можуть бути виміряні з відповідними установками, в тому числі метали, пластмаси, композити, скловолокна, кераміка і гума).

Також в ультразвуковому методі є і недоліки:

- Для точності вимірювання необхідно рівномірно притискати датчик до об'єкта контролю;
- При нерівній і непараллельній поверхні виробу і при структурній неоднорідності металу ускладнюється процес вимірювання;
- Дані товщиноміри дороги;
- Труднощі виділення сигналу на тлі шумових перешкод;
- Необхідність застосування контактної рідини.

1.3.2 Магнітний метод

Магнітний метод заснований на залежності параметрів магнітного поля від товщини немагнітних покриттів на феромагнітних підкладках. Для проведення досліджень поблизу об'єкта вимірювання від зовнішнього джерела створюється магнітне поле з відомими параметрами. При подальших змінах характеристик магнітного поля можна судити про характеристики цього об'єкта. Розглянемо теоретичні основи цього явища. Магнітна індукція B (щільність магнітного потоку), що виникає між досліджуваним об'єктом і датчиком пристрою, залежить від величини джерела намагнічування H і

					НАЗВА ДОКУМЕНТУ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

магнітної проникності середовища у відповідності до наступного співвідношення:

$$B = \mu_0 * \mu * H \quad (1.4)$$

де B - магнітна індукція, Тл; μ_0 - магнітна проникність у вакуумі ($\mu_0 = 4\pi * 10^{-7}$ Гн / м), Гн / м; μ - відносна магнітна проникність матеріалу (середовища), Гн / м; H - напруженість магнітного поля, А / м. Всі матеріали поділяються на 3 групи в залежності від значення магнітної проникності:

- Діамагнетик (магнітна проникність даних речовин менші або приблизно дорівнює одиниці);
- Парамагнетики (магнітна проникність даних речовин не значно відрізняється від одиниці);
- Ферромагнетики (магнітна проникність даних речовин приблизно варіюється в межах 102-105). Поблизу парамагнітних і діамагнітних тел спотворення магнітного поля може бути зафіксовано тільки при створенні особливих умов і з допомогою високочутливого приладу. Так як спотворення поля поблизу цих речовин незначно. А поблизу ферромагнетиків спостерігається значне спотворення магнітного поля. оскільки магнітна проникність цих речовин в сотні і тисячі разів перевищує магнітну проникність повітря. Тому магнітний метод вимірювання товщини ефективно використовується при вивченні ферромагнітних продуктів. При роботі з цим методом контролюються матеріали з магнітною проникністю більше сорока. На поверхні ферромагнетика інтенсивність магнітного поля і щільність магнітного потоку між об'єктом управління і перетворювачем пристрою максимальні. Тобто при видаленні від поверхні магнітна індукція і сила магнітного поля зменшуються в Відповідно до експоненціальним законом:

$$H_z = H_0 * e^{kz} \quad (1.5)$$

де H_z - напруженість магнітного поля на відстань (z) від поверхні виробу; H_0 - напруженість магнітного поля на поверхні ферромагнетика; k - коефіцієнт

					НАЗВА ДОКУМЕНТУ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

загасання, залежить від феромагнітних властивостей досліджуваного матеріалу і характеристик що генеруються магнітним полем. Основою магнітної товщинометрії є визначення даної залежності. Розрізняють 3 види магнітних перетворювачів: пондеромоторий, індукційний і магнітостатичних

1.4 Аналіз методів товщинометрії

При визначенні товщини виробу необхідно визначити покриття і основу.

Вимірювання товщини радіацією є дуже трудомістким і небезпечним для людей. Також цей тип товщиномірів має велику помилку. Тому радіаційний метод вимірювання в цьому випадку поступається вихрострумовому, магнітному та ультразвуковому методу. Ультразвукові товщиноміри є універсальними приладами. Що дає велику перевагу перед іншими типами лічильниками товщин. Але ультразвукові товщиноміри дорогі. А також необхідно використовувати контактну рідину, що ускладнює процес вимірювання. Вихрострумовий товщиномір дуже поширений в області вимірювання непровідних покриттів на основах з кольорових металів. Основним недоліком методу вихрострумів є залежність отримання результатів вимірювань від електропровідності покриття. Це звужує застосування цього методу в порівнянні з магнітним методом при вимірюванні товщини лако-фарбового покриття на феромагнітній основі. Магнітні товщиноміри є найбільш поширеними пристроями. Оскільки цей тип товщиноміра активно використовується в автомобільній промисловості, для вимірювання товщини лако-фарбового покриття. Магнітне вимірювання товщини є найбільш оптимальним методом вимірювання лако-фарбових покриттів на феромагнітній основі. Оскільки в цьому вимірі існує тільки один істотний недолік, висока споживана потужність в порівнянні з ультразвуковим методом. Але це компенсується перевагами в порівнянні з іншими методами вимірювання.

					НАЗВА ДОКУМЕНТУ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Розділ 2 проєктування приладу

2.1 Розрахунок акустичного тракту

Акустичним трактом називають шлях ультразвукового сигналу від випромінювача до дефекту або відбивача і далі до приймача коливань (випромінювач – протектор – контактна рідина – об’єкт контролю – дефект – об’єкт контролю – контактна рідина – протектор – приймач). В акустичному тракті можуть виникати такі ефекти: ослаблення в протекторі, віддзеркалення, заломлення, трансформація на межі ОК і на дефекті, згасання (поглинання, розсіяння) під час поширення ультразвуку в ОК.

					НАЗВА ДОКУМЕНТУ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

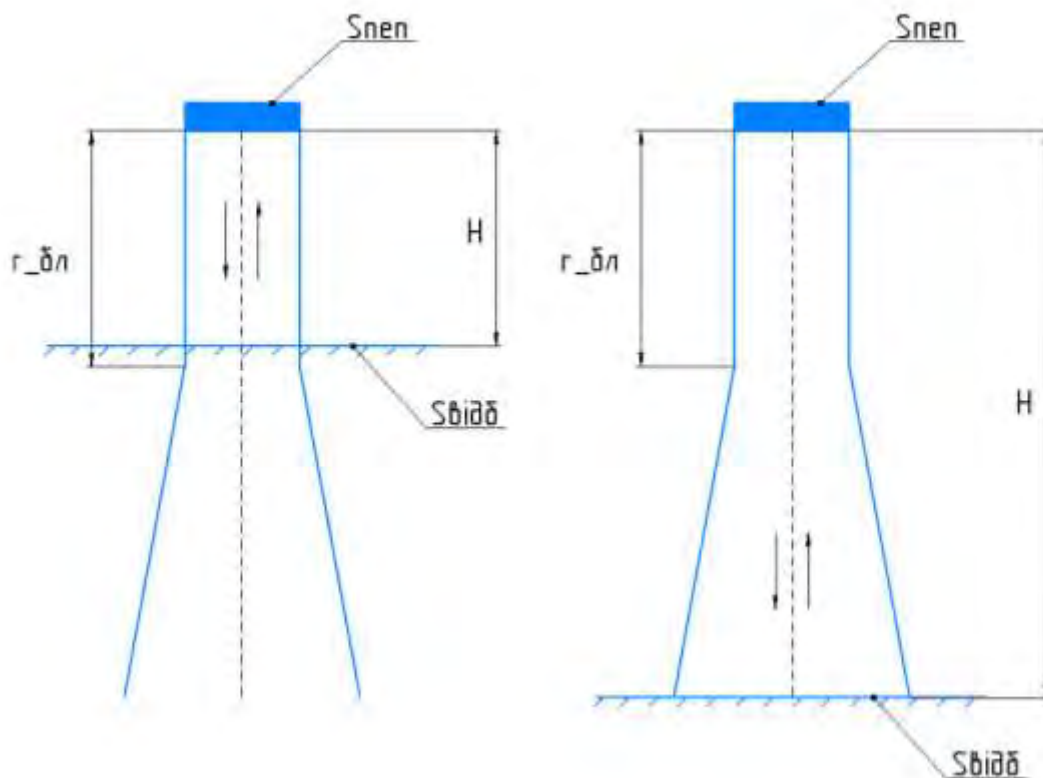


Рис. 2.1

Формула розрахунку дальньої зони акустичного тракту:

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

Формула розрахунку ближньої зони акустичного тракту:

$$K_{a.т} = 0.8 * T_1 * R_p * e^{-2 * H * \delta_p}$$

Таблиця 1

Коефіцієнт акустичного тракту – числова величина, що розкривається через формулу акустичного тракту. Коефіцієнт акустичного тракту враховує променеву картину, характеристики направленості випромінювання-прийому і структурну схему акустичного тракту (акустичні характеристики і розміри середовищ, що перетинаються акустичним променем).

					НАЗВА ДОКУМЕНТУ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Розрахуємо еквівалентну глибину конвертованої структури:

Матеріал	Акустичний імпеданс, $\frac{\text{кг}}{\text{м} \cdot \text{с}^2}, 10^2$	Швидкість повздожньої хвилі, м/с	Коефіцієнт згасання на частоті 2.5 МГц, Нп/м	Товщина шару м, 10^3
Моторне масло	1.514	1740	8.125	28
Резина	1.5	1500	6.912	12
Сталь	46.61	5900	2.3	25

$$H_{\text{екв}} = H_{\text{ст}} + \frac{C_{\text{мм}}}{C_{\text{ст}}} \cdot H_{\text{мм}} + \frac{C_{\text{рез}}}{C_{\text{ст}}} \cdot H_{\text{рез}};$$

$$H_{\text{екв}} = 25 \cdot 10^{-3} + \frac{1740}{5900} \cdot 28 \cdot 10^{-3} + \frac{1500}{5900} \cdot 12 \cdot 10^{-3} = 36.3 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

Товщина п'єзопластини будь-якої форми та розміру розраховується за формулою:

$$h_{\text{ПЕП}} = \frac{\lambda_{\text{ПЕП}}}{2} = \frac{C_{\text{ПЕП}}}{2 \cdot f} = \frac{3000}{2 \cdot 2.5 \cdot 10^6} = 0.6 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

Розраховуємо довжину хвилі ОК:

$$\lambda_{\text{ст}} = 2 \cdot h_{\text{ПЕП}} \cdot \left(\frac{C_{\text{ст}}}{C_{\text{ПЕП}}}\right) = 2 \cdot 0.6 \cdot 10^{-3} \cdot \left(\frac{C_{\text{ст}}}{C_{\text{ПЕП}}}\right) = 2.36 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

Розрахуємо ближню зону еквівалентної глибини акустичного тракту:

$$r_{\text{бл}} = \frac{f \cdot a^2}{C_{\text{ст}}} = \frac{a^2}{\lambda_{\text{ст}}} = \frac{(7 \cdot 10^{-3})^2}{2.36 \cdot 10^{-3}} = 20.8 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

Розрахувавши ближню зону можемо сказати, що $r_{\text{бл}} < H_{\text{екв}}$ отже контроль проводиться в дальній зоні

Формула для розрахунку акустичного тракту має вигляд

$$K_{\text{а.т.}} = \frac{S_{\text{ПЕП}}}{2 \cdot \lambda_{\text{ОК}} \cdot H_{\text{екв}}} T_{I1} \cdot T_{I2} \cdot T_{I3} \cdot R_p \cdot e^{-2 \cdot (H_1 \cdot \delta_{p1} + H_2 \cdot \delta_{p2} + H_3 \cdot \delta_{p3})}$$

					НАЗВА ДОКУМЕНТУ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Розраховуємо коефіцієнти проходження інтенсивності, котрі мають межі:
ПЕП-масло, масло-резина, резина-ОК.

$$T_{I1} = \frac{4 \cdot Z_{\text{ПЕП}} \cdot Z_{\text{масло}}}{(Z_{\text{ПЕП}} + Z_{\text{масло}})^2} = \frac{4 \cdot 2.28 \cdot 10^7 \cdot 1.514 \cdot 10^6}{(2.28 \cdot 10^7 + 1.514 \cdot 10^6)^2} = 0.234$$

$$T_{I2} = \frac{4 \cdot Z_{\text{рез}} \cdot Z_{\text{масло}}}{(Z_{\text{рез}} + Z_{\text{масло}})^2} = \frac{4 \cdot 1.5 \cdot 10^6 \cdot 1.514 \cdot 10^6}{(1.5 \cdot 10^6 + 1.514 \cdot 10^6)^2} = 1$$

$$T_{I3} = \frac{4 \cdot Z_{\text{рез}} \cdot Z_{\text{ст}}}{(Z_{\text{рез}} + Z_{\text{ст}})^2} = \frac{4 \cdot 1.5 \cdot 10^6 \cdot 46.61 \cdot 10^6}{(1.5 \cdot 10^6 + 46.61 \cdot 10^6)^2} = 0.121$$

Розрахунок площі п'єзоелементу коефіцієнту акустичного тракту.

$$S_{\text{ПЕП}} = \pi \cdot a_{\text{ПЕП}}^2 = \pi \cdot (7 \cdot 10^{-3})^2 = 1.54 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2.$$

Коефіцієнти згасання матеріалів при частоті 2.5 МГц:

Масло моторне

$$\delta_{\text{масло}} = 8.125 \text{ Нп/м.}$$

Резина

$$\delta_{\text{рез}} = 60 \text{ дБ/м} = 60/8.68 = 6.912 \text{ Нп/м}$$

Сталь

$$\delta_{\text{ст}} = 2.3 \text{ Нп/м.}$$

Розраховуємо коефіцієнт акустичного тракту:

$$K_{\text{а.т.}} = \frac{1.54 \cdot 10^{-4}}{2 \cdot 2.36 \cdot 10^{-3} \cdot 36.3 \cdot 10^{-3}} \cdot 0.234 \cdot 1 \cdot 0.121 \cdot 1 \cdot e^{-2 \cdot (2.5 \cdot 10^{-3} \cdot 2.3 + 12 \cdot 10^{-3} \cdot 6.912 + 10^{-3} \cdot 8.125)} = 0.0121$$

Вважаючи, що напруга завад буде $U_{\text{зав}} \approx 1 \text{ мВ}$, з конструктивних міркувань, можна взяти відношення сигнал/завада – 40 дБ.

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

$$20 \log_{10} \left(\frac{U_{\text{п}}}{U_{\text{зав}}} \right) = 40 \text{ дБ} \rightarrow \frac{U_{\text{п}}}{U_{\text{зав}}} = 10^{\frac{40}{20}} = 100 \text{ (рази)}$$

					НАЗВА ДОКУМЕНТУ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Розрахуємо напругу прийнятого сигналу:

$$U_{\text{п}} = U_{\text{п}}/U_{\text{зав}} \cdot U_{\text{зав}} = 100 \cdot 1 \cdot 10^{-3} = 0.1 \text{ В.}$$

Розраховуємо напругу випромінювання сигналу:

$$U_{\text{п}} = U_{\text{в}} \cdot K_{\text{а.т.}} \cdot K_{\text{ПП}} \rightarrow U_{\text{в}} = U_{\text{п}}/K_{\text{ПП}} \cdot K_{\text{а.т.}} = 0.1/0.15 \cdot 0.0121 = 54.9 \text{ В}$$

2.2 Розрахунок АЦП

Основна характеристика АЦП- частота дискретизації. Частоту дискретизації можна визначити за теоремою Котельнікова-Найквіста.

$$f_{\text{д}} > 2 \cdot f_{\text{в}}$$

$f_{\text{в}}$ - верхня частота обмеженого спектра вхідного сигналу

$f_{\text{д}}$ – частота дискретизації

Для підвищення точності відцифрованого сигналу, потрібно збільшити частоту дискретизації в 3 рази від верхньої. Тому що збільшення в 2 рази не завжди дає необхідну точність.

Отже розрахуємо необхідну частоту дискретизації

$$f_{\text{д}} > 3 \cdot f_{\text{в}} = 3 \cdot 7.5 \cdot 10^6 = 22.5 \text{ МГц.}$$

Так як складно знайти АЦП з частотою 22.5 МГц. Візьмемо АЦП із стандартною частотою 25 МГц.

Отже час циклу дискретизації $t_{\text{д}}$ буде дорівнювати 0.04 мкс

$$t_{\text{д}} = \frac{1}{25 \cdot 10^6} = 0.04 \text{ мкс}$$

Використаємо в схемі АЦП AD9050

AD9050 являє собою 10-розрядний монолітний дискретно-аналоговий перетворювач (АЦП) з вбудованою системою відстеження та утримання і еталоном. Пристрій розроблений для недорогих, високопродуктивних приладів і вимагає тільки +5 В і тактової частоти кодування для досягнення

					НАЗВА ДОКУМЕНТУ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

часу дискретизації 40 MSPS або 60 MSPS з роздільною здатністю 10 біт.
 Тактовані імпульси кодування сумісні з TTL, а цифрові виходи – CMOS;
 обидва можуть працювати з логікою 5 В / 3 В, обраної користувачем. Маючи
 частоту дискретизації 60 МГц цей АЦП повністю задовольняє нашим
 умовам.

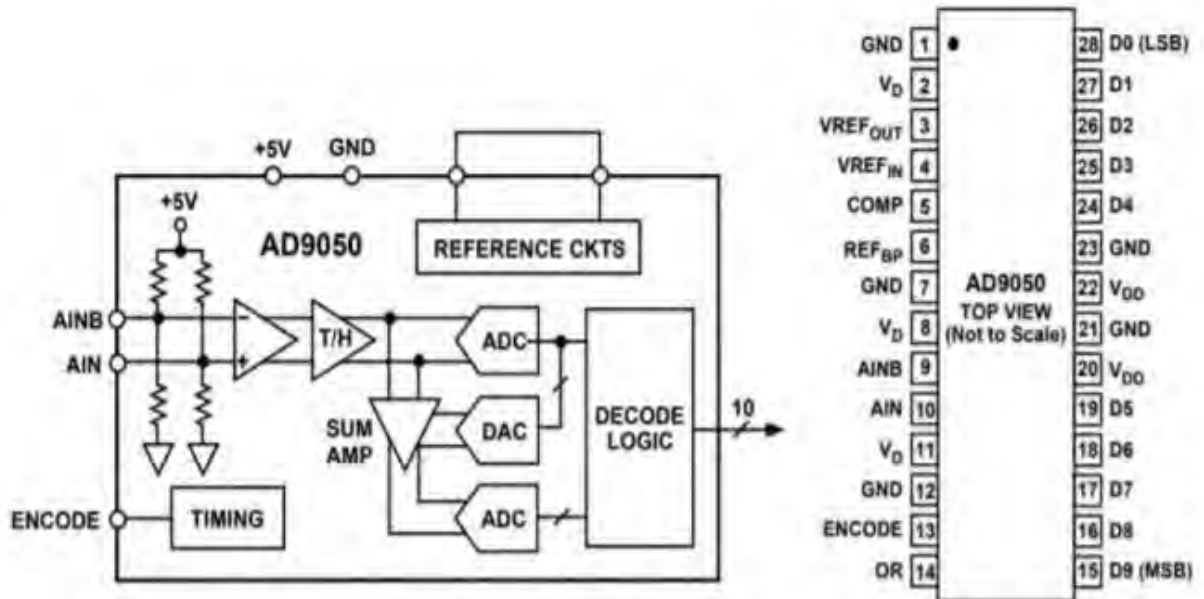


Рис.2.2 Схема АЦП AD9050

2.3 Підбір смугового фільтра

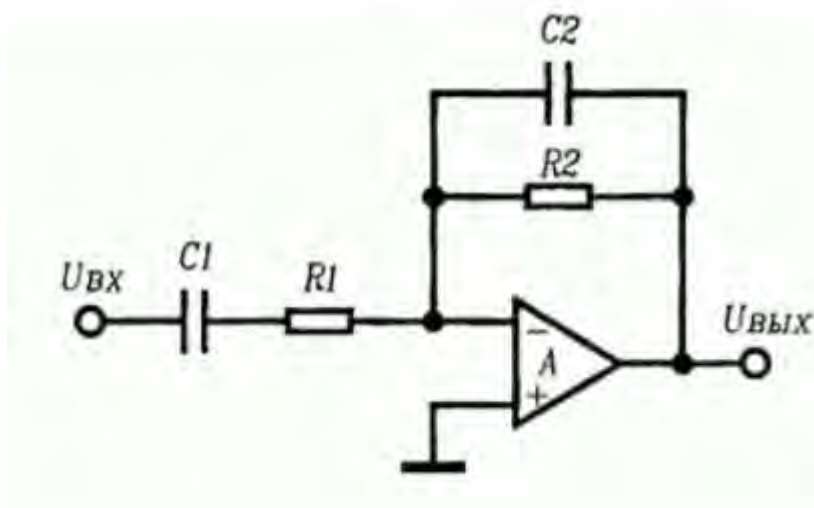


Рис. 2.3 Схема активного смугового фільтра

Визначаємо верхню та нижню частоту зрізу

$$f_{зр1,2} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \tau_{1,2}}$$

де $f_{зр1}$ – нижня частота зрізу; $f_{зр2}$ – верхня частота зрізу; $\tau_{1,2} = R_{1,2} \cdot C_{1,2}$.
Для нижньої частоти розраховуємо $f_{зр1} \approx 2.5$ МГц, для верхньої $f_{зр2} \approx 7.5$ МГц. Верхня частота зрізу при $R_1 = 1050$ Ом, $C_1 = 20$ пкФ

$$f_{зр2} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R_2 \cdot C_2} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 1050 \cdot 20 \cdot 10^{-12}} = 7.58 \text{ МГц.}$$

Нижня частина зрізу при $R_1 = 1050$ Ом, $C_1 = 62$ пкФ:

$$f_{зр1} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R_1 \cdot C_1} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 1050 \cdot 62 \cdot 10^{-12}} = 2.44 \text{ МГц.}$$

AD9631 – це високошвидкісний і широкосмуговий підсилювач.

Використовуючи структуру зворотного зв'язку по напрузі, експоненційна стабілізація часу, смуга пропускання і низький рівень спотворень AD9631 відповідають вимогам багатьох приладів, які раніше залежали від підсилювачів зворотного зв'язку по струму. Його класична структура операційного підсилювача працює набагато більш передбачувано в багатьох приладах

					НАЗВА ДОКУМЕНТУ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

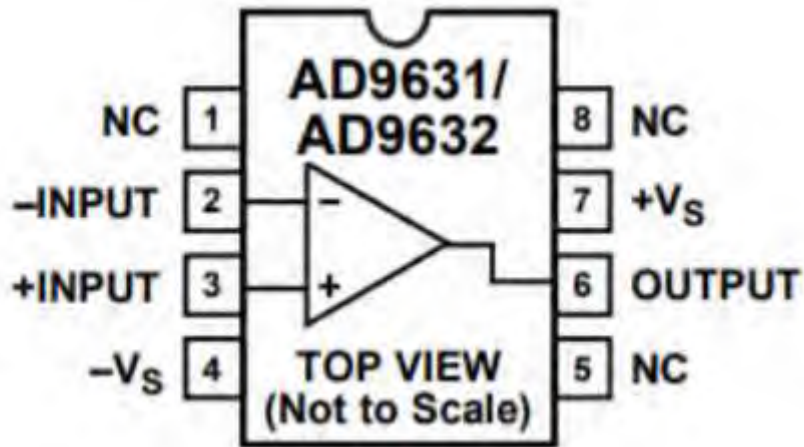


Рис.2.4 Схема AD9631

2.4 Підбір пам'яті FIFO

В якості пам'яті FIFO була використана схема IDT72225LB10J.

IDT72225LB10J – це дуже високошвидкісний, малопотужний блок пам'яті «FIRST IN – FIRST OUT» (FIFO) з синхронізованими елементами керування для читання і запису. Ці FIFO застосовуються для широкого кола завдань буферизації даних. Ці FIFO мають 18-бітові входні і вихідні порти. Вхідний порт управляється тактованими імпульсами (WCLK) і контактом дозволу входу (WEN). Дані зчитуються в FIFO на кожному такті при підтвердженні WEN. Вихідний порт управляється іншим тактовим виводом (RCLK) і іншим активуючим контактом (REN) [16]. Об'єм пам'яті – 18.4 kb (1024 x 18) Швидкість передачі даних – 100 MHz Напруга живлення – 3.3 V

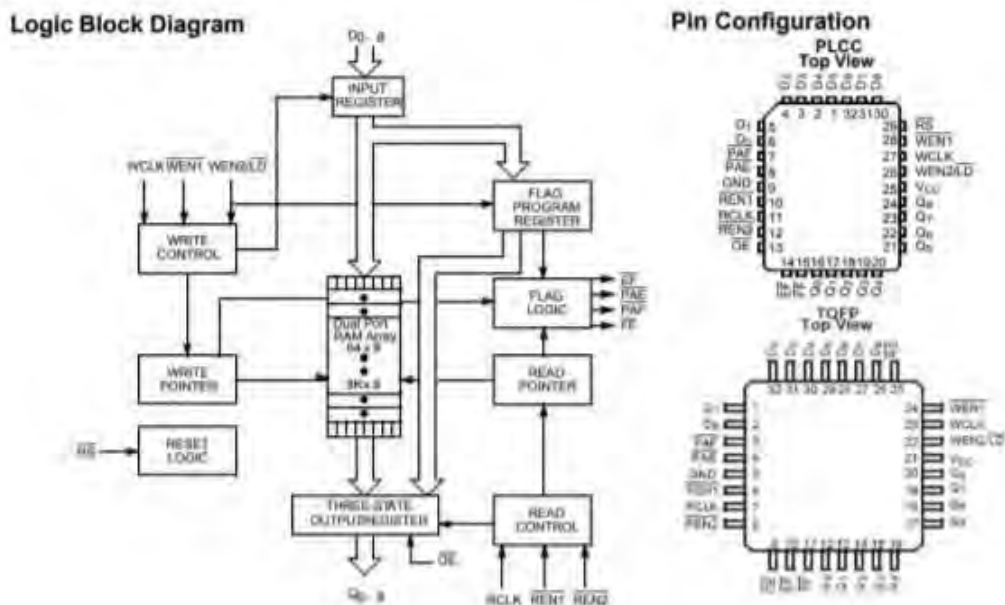


Рис.2.5 Схема CY7C4231V-25AXCT

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

НАЗВА ДОКУМЕНТУ

Арк.

2.5 Генератор тактованих імпульсів

В ролі генератора тактованих імпульсів виступає схема КХО-V97. Генератор працює на частоті необхідній нам частоті – 25 МГц.

Напруга живлення – 3.3 В.

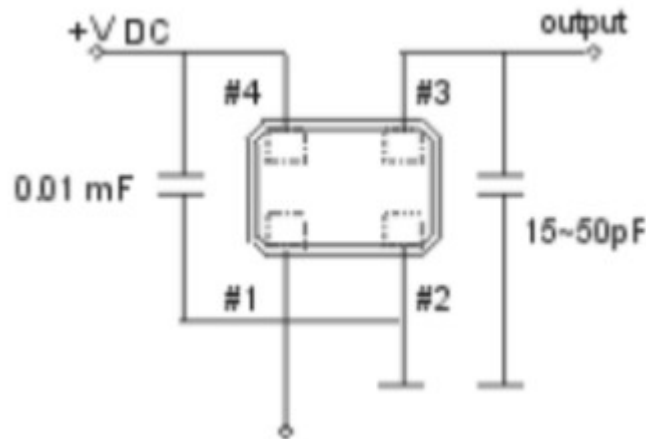


Рис.2.6 Схема КХО-V97

2.6 Підбір перемикача

Був обраний перемикач BU4S66

BU4S66 – це ультра-компактна мікросхема з одним контуром двонаправленого аналогового перемикача BU4066В, вбудованого в корпус SMP. Встановлення вхідного сигналу включення (CONT) на рівень "Н" встановлює імпеданс між входом перемикача і низьким опором вихідних контактів (стан ON), а встановлення CONT на рівень "L" встановлює високий опір (стан OFF). Змн. Арк. № докум. Підпис Дата Арк. 60 ПК51.050.000.000 Використовується для блокування подачі тактованих імпульсів з генератора.

						НАЗВА ДОКУМЕНТУ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			

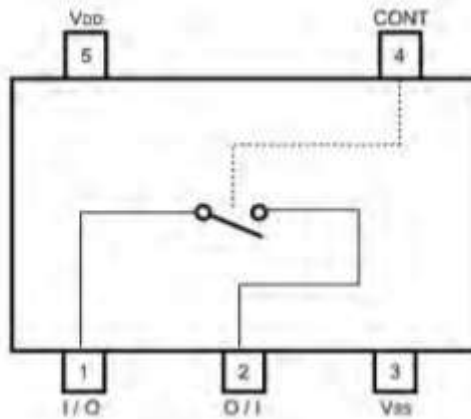


Рис.2.7 Схема BU4S66

2.7 Підбір мікроконтролера

Для обробки інформації та плати керування був підібраний мікроконтролер STM32F407.

STM32F40 працює на базі - 168 МГц процесора / 210 DMIPS до 1 МБайт флеш-пам'яті з наявним Ethernet MAC

У мікроконтролерах серії STM32 F4 є можливість управління МК в

реальному часі і високою продуктивністю обробки сигналів, власними сигнальними процесорами, доповнюючи, таким чином лінійку контролерів STM32 новим класом пристроїв, сигнальними мікроконтролерами (англ. Цифровий контролер сигналу, DSC).

						НАЗВА ДОКУМЕНТУ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			



Рис.2.7

Характеристики МК STM32F4

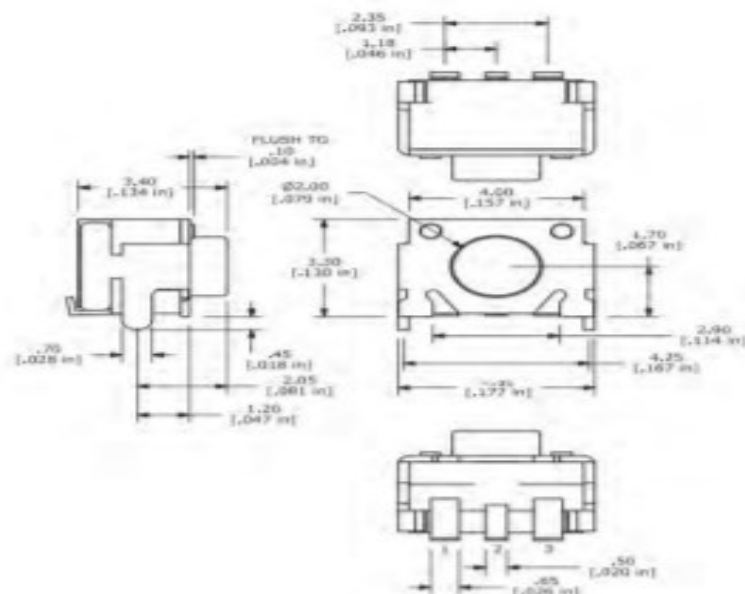
- 32-розрядний процесор Cortex-M4 ARM;
- Частота тактування 168МГц, 210 DMIPS / 1,25 DMIPS / МГц (Dhrystone 2.1);
- Піддержка DSP-інструкцій;
- Нова високоефективна АНВ-матриця шин;
- До 1 Мбайта Flash-пам'яті;
- До 192 + 4 кбайт SRAM-пам'яті;
- Напруженість живлення 1,8... 3,6В (POR, PDR, PVD і BOR);
- Внутрішні генератори RC на 16МГц і 32кГц (для RTC);
- Зовнішнє джерело тактування 4... 26МГц і для RTC - 32,768кГц;
- Модулі відкладки SWD / JTAG, модуль ETM;
- Три 12-бітних АЦП
- Два 12-бітних ЦАП;
- DMA-контролер на 16 потоках з підтримкою пакетної передачі;
- 17 таймерів (16 і 32 розряди);

						НАЗВА ДОКУМЕНТУ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			

- Два сторонні таймери (WDG та IWDG);
- Комунікаційні інтерфейси: I2C, USART (ISO 7816, LIN, IrDA), SPI, I2S;
- CAN (2,0 В Active);
- USB 2.0 FS / HS OTG;
- 10/100 Ethernet MAC (IEEE 1588v2, MII / RMII);
- Контролер SDIO (карти SD, SDIO, MMC, CE-ATA);
- Інтерфейс цифрової камери (8/10/12/14-бітні режими);
- FSMC-контролер (Compact Flash, SRAM, PSRAM, NOR, NAND та LCD 8080/6800);
- Апаратний генератор випадкових чисел;
- Апаратне вичислення CRC, 96-бітний унікальний ідентифікатор;
- Модуль шифрування AES 128, 192, 256, Triple DES, HASH (MD5, SHA-1), HMAC;
- Широкотемпературний діапазон діпазону -40... 105 ° С.

2.8 Підбір клавіатури

Для правильної роботи перетворювача необхідно його відкалібрувати для цього потребується пристрій введення. Для цього був використана матрична клавіатура з кнопок TL3340 підключена до мікроконтролера.



					НАЗВА ДОКУМЕНТУ				Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					

Рис.2.7 Загальний вигляд кнопки

2.9 Підбір дисплея

Для схеми був обраний LCD модуль компанії Winstar, котрий буде використаний для виведення обробленої інформації

Характеристики:

1. Символьний LCD дисплей 20x4
2. 5x8 точок (включая курсор)
3. Вбудований контроллер (ST7066 або еквівалентний)
4. +5В
5. LED управляється от PIN1, PIN2, PIN15, PIN16 or A and K
6. Інтерфейс: 6800, на вибір SPI/I2C (RW1063 IC)
7. WH2004B : FFC конектор
8. WH2004F : 7 кольорів LED



Рис.2.8 дисплей

					НАЗВА ДОКУМЕНТУ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2.10 Опис роботи приладу

Всі виміряні товщини покриттів, в яких використовують ультразвукові датчики, засновані у вимірі часу проходження хвиль, вимірювальною головкою, надійно доторкаються через тонкий шар нанесеного гелю. хвиля проходить через оболочку до тих пір поки не зустрінеться з матеріалами інших густин, це може бути будь-яке покриття. Коливання буде частково віддзеркалювати повернену хвилю, зареєстровану в вимірювальній головці. Прилад побудований так, що він реєструє лише найсильніші сигнали, і перераховує їх по товщині покриття, які зчитуються на дисплей вимірювача. Слабкі хвилі приладом ігноруються.

Висновок:

В даній роботі були розглянуті різні типи ультразвукових товщиномірів, їх застосування в різних сферах. Також були розглянуті різні методи товщинометрії та УЗ дефектоскопії, було оцінено їхні переваги і недоліки. Також в даній роботі був розроблений прилад для вимірювання товщини, для нього були підібрані необхідні компоненти. В ході роботи було розглянуто багато матеріалу та технічної літератури.

Ультразвукова товщинометрія є високоточним, мобільним та високоефективний методом неруйнівного контролю. Завдяки своєчасно проведеним дослідженням можна заздалегідь виявити найбільш небезпечні ділянки конструкції або виробу и відновити їх, тим самим, уникнувши аварійних ситуацій. За допомогою УЗ товщиноміра можна вимірювати товщини різних матеріалів, таких як з пластмас, скла, кераміки та інших матеріалів з високим загасанням ультразвуку при односторонньому доступі до поверхні цих виробів. За допомогою ультразвукового товщиноміра можна визначити ступінь корозійного і ерозійного зносу по залишковій товщині

					НАЗВА ДОКУМЕНТУ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Список використаних джерел

1. Теоретичні основи ультразвукового неруйнівного контролю [Електронний ресурс]: підручник для здобувачів ступеня бакалавра за освітньою програмою «Комп'ютерноінтегровані технології та системи неруйнівного контролю і діагностики» спеціальності «Автоматизація та комп'ютерноінтегровані технології» / Р. М. Галаган; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові данні (1 файл: 5,12 Мбайт). – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 263 с.
2. А. Дж Пейтон, В. Волош Аналоговая электроника на операционных усилителях – М.: БИНОМ, 1994 – 352 с.: ил. – ISBN 5-7503-0013-7
3. Расчет параметров разрабатываемого АЦП. – Режим доступа URL: https://works.doklad.ru/view/_Tyi_vM9_GY.html
4. FIFO IDT72225LB10J. – San Jose: Integrated Device Technology, Inc, 2013. – 16с.
5. А. Дж Пейтон, В. Волош Аналоговая электроника на операционных усилителях – М.: БИНОМ, 1994 – 352 с.: ил. – ISBN 5-7503-0013-7
6. А. Дж Пейтон, В. Волош Аналоговая электроника на операционных усилителях – М.: БИНОМ, 1994 – 352 с.: ил. – ISBN 5-7503-0013-7

					НАЗВА ДОКУМЕНТУ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		