

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

**Приладобудівний факультет
Кафедра автоматизації та систем неруйнівного контролю**

«До захисту допущено»
Завідувач кафедри
_____ Юрій КИРИЧУК

« ____ » _____ 2024 р.

Дипломний проєкт

на здобуття ступеня бакалавра

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

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

на тему: «Ультразвуковий товщиномір»

Виконав:

студент IV курсу, групи ПК-01
Сорока Михайло Юрійович

Керівник:

доцент, к.т.н.
Богдан Галина Анатоліївна

Рецензент:

асистент, к.т.н.
Івасенко Віталій Михайлович

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

Студент _____
(підпис)

Київ – 2024 року

ВІДОМІСТЬ ДИПЛОМНОГО ПРОЕКТУ

№ з/п	Формат	Позначення	Найменування	Кількість листів	Примітка
1	A4	ДП ПК01.171760.000 ПЗ	Пояснювальна записка	58	
2	A1	ПК01.171760.100 ЕС	Схема електрична структурна	1	
3	A1	ПК01.171760.200 ЕП	Схема електрична принципова	1	
4	A1	ПК01.171760.300	Корпус	1	
5	A1	ПК01.171760.400	ПЕП	1	
6	A1	ПК01.171760.500	Кришка	1	

				ДП ПК01.171760.000		
	ПІБ	Підп.	Дата			
Розробник	Сорока М.Ю.			Відомість дипломного проекту	Лист	Листів
Керівник	Богдан Г.А.				1	1
Консульт.					КПІ ім. Ігоря Сікорського Каф. АСНК Гр. ПК-01	
Н/контр.						
Зав. каф.	Киричук Ю.В.					

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

Київ – 2024 року

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Приладобудівний факультет

Кафедра автоматизації та систем неруйнівного контролю

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

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

Освітньо-професійна програма «Комп'ютерно-інтегровані системи та технології в приладобудуванні»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ **Юрій КИРИЧУК**

«__» _____ 2024 р.

ЗАВДАННЯ

на дипломний проєкт студенту

Сорока Михайло Юрійович

1. Тема роботи «Ультразвуковий товщиномір», керівник роботи Богдан Галина Анатоліївна, кандидат технічних наук, доцент, затверджені наказом по університету від «28» травня 2024 р. №2121-с

2. Термін подання студентом проєкту

3. Вихідні дані до проєкту: розробка маніпулятора з технологією м'якого захвату.

4. Зміст пояснювальної записки

Вступ

1. Аналітичний огляд

2. Огляд захватів роботів-маніпуляторів

3. Розробка м'якого захвату

Висновки

Список використаних джерел

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

1 – Схема електрична структурна

2 – Схема електрична принципова

3 – ПЕП

4 – Корпус

5 - Кришка

6. Дата видачі завдання _____

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Формулювання завдання проекту	12.02.2024	
2	Проведення аналітичного огляду	18.05.2024	
3	Розробка ультразвукового товщиноміру	21.05.2024	
4	Розробка електричних схем	28.05.2024	
5	Розробка креслеників	01.06.2024	

Студент

Сорока Михайло

Керівник

Галина БОГДАН

Анотація

В даній дипломній роботі представлено розробку нового ультразвукового товщиноміра. На початку роботи автори ґрунтовно описують актуальність та необхідність створення такого приладу.

У першому розділі проведено огляд існуючих методів товщинометрії, таких як ультразвуковий, магнітний, оптичний, механічний, радіоактивний та інші. Описано принцип роботи кожного методу, сферу їх застосування та проведено порівняльний аналіз. Особливу увагу приділено методам ультразвукової товщинометрії, їх перевагам та недолікам.

У другому розділі представлено розрахунки, які дозволили визначити оптимальну структуру схеми, конструкцію перетворювача та підібрати необхідні компоненти для створення приладу. Авторами було обрано АЦП, пам'ять, дисплей, мікроконтролер з можливістю управління в реальному часі та високою продуктивністю обробки сигналів, а також відповідний дисплей і клавіатуру.

Annotation

This diploma thesis presents the development of a new ultrasonic thickness gauge. At the beginning of the work, the authors thoroughly describe the relevance and necessity of creating such a device.

The first chapter reviews existing thickness gauging methods, such as ultrasonic, magnetic, optical, mechanical, radioactive, and others. The principle of operation of each method, the scope of their application, and a comparative analysis are described. Particular attention is paid to ultrasonic thickness measurement methods, their advantages and disadvantages.

The second section presents the calculations that allowed us to determine the optimal circuit structure, transducer design, and select the necessary components to create the device. The authors chose an ADC, memory, display, microcontroller with real-time control and high signal processing performance, as well as a suitable display and keyboard.

Зміст

ВСТУП.....	9
РОЗДІЛ 1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД.....	10
1.1 Товщинометрія та товщиномір.....	10
1.2 Область застосування товщиномірів	10
1.3 Методи товщинометрії.....	11
1.3.1 Магнітна товщинометрія.....	12
1.3.2 Вихрострумова товщинометрія.....	12
1.3.3 Механічна товщинометрія	13
1.3.4 Оптична товщинометрія.....	15
1.3.5 Рентгенівська та гамма-товщинометрія	16
1.3.6 Ультразвукова товщинометрія.....	17
1.4 Методи ультразвукової товщинометрії.....	19
1.4.1 Імпульсно-еховий метод	20
1.4.2 Метод вільних коливань.....	22
1.4.3. Метод акустичної емісії	23
1.4.4 Метод дифрагованих хвиль	25
1.4.5 Частотно-резонансний метод.....	26
1.4.6 Комінований метод.....	26
Висновки до 1 розділу.....	27
РОЗДІЛ 2 ПРОЕКТУВАННЯ ПРИЛАДУ.....	29
2.1. Розрахунок акустичного тракту	29
2.2 Опис роботи приладу	36
2.3 Розрахунок та підбір компонентів для електричної схеми.....	37
2.3.1. Розрахунок та підбір АЦП	37
2.3.2 Розрахунок та підбір смугового фільтра	39
2.3.3 Підбір генератора тактованих імпульсів	41
2.3.4 Підбір пам'яті.....	42
2.3.6 Підбір перемикача	44
2.3.8 Підбір дисплею	46
Висновки до 2 розділу.....	46
ВИСНОВКИ	48
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	49

					ПК01.210315.000ПЗ			
<i>Змн.</i>	<i>Ар</i>	<i>№ до</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>				
<i>Розробив</i>	<i>Сорока М.Ю.</i>				Ультразвуковий товщиномір	<i>Літ.</i>	<i>Арк.</i>	<i>Акрушів</i>
<i>Перевір.рев</i>	<i>Богдан Г.А.</i>						8	
<i>Реценз.</i>						ПБФ, ПК-01		
<i>Н. Контр.</i>								
<i>Затверд.</i>	<i>Богдан Г.А.</i>							

ВСТУП

Товщинометрія є важливим напрямком вимірювальної техніки, що спеціалізується на визначенні товщини різних матеріалів. Цей процес має вирішальне значення для багатьох галузей промисловості, таких як автомобільна, авіаційна, металургійна та будівельна, оскільки точні вимірювання товщини гарантують якість продукції, безпеку конструкцій та ефективність виробничих процесів.

Основними інструментами товщинометрії є товщиноміри, які дозволяють здійснювати ці вимірювання з високою точністю та надійністю. Існує багато різновидів товщиномірів, які використовують різні фізичні принципи, і кожен з них має свої переваги та сфери застосування. Це робить вибір правильного інструмента дуже важливим для досягнення найкращих результатів.

Особливо виділяється ультразвукова товщинометрія, яка є одним з найбільш універсальних і точних методів вимірювання товщини. Вона використовує ультразвукові хвилі, які проникають через матеріал і відбиваються від меж розділу між матеріалами або внутрішніх дефектів. Цей метод дозволяє вимірювати товщину навіть при наявності покриттів або інших перешкод, що робить його незамінним для контролю якості виробів з різних матеріалів. Ультразвукові товщиноміри забезпечують високу точність вимірювань і широкий спектр застосування в різних виробничих умовах, роблячи їх важливим інструментом для підтримання якості та безпеки в промисловості.

					ПК01.171760.000ПЗ	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД

1.1 Товщинометрія та товщиномір

Товщинометрія – це наукова дисципліна, що займається вимірюванням товщини матеріалів без їх пошкодження. Її основна мета – забезпечення якості та надійності продукції в різних промислових секторах шляхом виявлення дефектів, контролю зносу та корозії, а також оцінки структурної цілісності конструкцій без руйнування об'єктів контролю. Основним інструментом у цій галузі є товщиномір – пристрій, який дозволяє точно вимірювати товщину матеріалів без їх руйнування чи зміни властивостей.

Вивчення товщинометрії важливе з кількох причин: підвищення стандартів якості та надійності виробів, оптимізація витрат на обслуговування та ремонт, а також забезпечення безпеки виробничих процесів і експлуатації обладнання. Оскільки контроль товщини матеріалів відіграє ключову роль у багатьох виробничих сферах, розуміння принципів товщинометрії є важливим для стабільної та успішної роботи промислових підприємств.

1.2 Область застосування товщиномірів

Товщиноміри грають вирішальну роль у забезпеченні якості та відповідності розмірів виробничих деталей. Вони необхідні в різних галузях, де точність вимірювань товщини матеріалів має першорядне значення для ефективного функціонування та безпеки виробництва.

У металургії товщиноміри використовуються для контролю товщини стінок труб, листів та інших металевих конструкцій, щоб своєчасно виявити знос, дефекти та корозію. У будівництві їх використовують для перевірки товщини бетонних структур, теплоізоляційних матеріалів та захисних покриттів.

					ПК01.171760.000ПЗ	Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Автомобільні товщиноміри допомагають оцінити стан транспортних засобів, вимірюючи товщину лакофарбового покриття, виявляючи сліди попередніх ремонтів і контролюючи стан кузовних деталей. У сфері енергетики вони використовуються для контролю товщини стінок нафтогазопроводів та обладнання для видобутку і транспортування нафти та газу, що дозволяє своєчасно виявити дефекти і запобігти аварійним ситуаціям.

Таким чином, товщиноміри використовуються в різних секторах промисловості і є необхідними для забезпечення безпеки, надійності та ефективності виробничих процесів, а також для забезпечення високих стандартів якості продукції.

1.3 Методи товщинометрії

Різноманітність видів товщинометрії виникла через потребу в точному вимірюванні товщини різних матеріалів у різних умовах і для різних цілей. Кожен метод (рис.1), такий як ультразвуковий, магнітний, вихрострумний, рентгенівський та лазерний, розроблений для специфічних завдань і типів матеріалів. Саме тому, важливо розуміти для яких умов, який вид товщинометрії є кращим і чому.

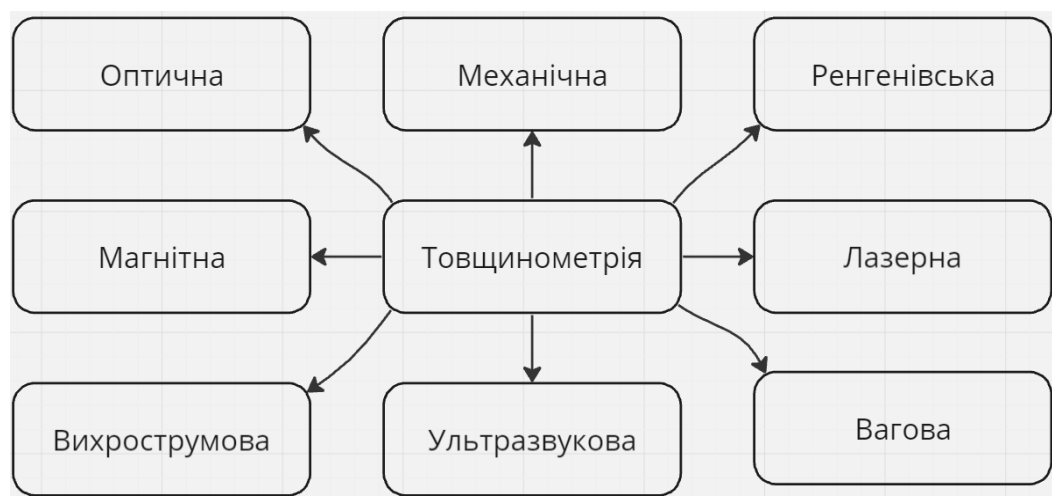


Рис. 1 – Види товщинометрії

1.3.1 Магнітна товщинометрія

Магнітний метод товщиномірів є неінвазивним засобом вимірювання товщини немагнітних покриттів на магнітних основах. Цей метод базується на зміні магнітного поля, яке виникає при розміщенні покриття на основі. Суть його полягає в тому, що вблизи від об'єкта вимірювання формується магнітне поле з відомими параметрами. Аналізуючи зміни в характеристиках цього магнітного поля, ми можемо зробити висновки про властивості об'єкта контролю. Залежно від необхідної точності вимірювання, магнітні перетворювачі можуть бути розділені на кілька типів: пондеромоторні - які вимірюють механічну силу, що виникає в магнітному полі; індукційні - які вимірюють електромагнітну індукцію, що виникає в котушці під впливом змінного магнітного поля; магнітостатичні - які визначають товщину покриття за допомогою магнітостатичного поля.

Цей метод часто використовується для вивчення товщини покриттів на криволінійних, нерівних поверхнях, а також на тонких, чутливих до ультразвуку матеріалах. Важливо зазначити, що для виконання контролю магнітним методом не потрібний прямий контакт з об'єктом контролю.

1.3.2 Вихрострумова товщинометрія

Вихрострумний метод товщинометрії – це неруйнівний метод, що використовується для вимірювання товщини немагнітних покриттів на провідних основах. Він ґрунтується на принципі зміни вихрових струмів, які індукуються в основі під впливом магнітного поля. Тобто за допомогою котушки, яка розміщена над поверхнею об'єкта контролю, генерується змінне магнітне поле. Це поле впливає на досліджувану поверхню і індукує в ній вихрові струми, що виникають в провідній основі матеріалу. Вплив товщини покриття проявляється у зміні щільності та розподілу цих вихрових струмів на поверхні. Після цього зміна вихрових струмів вимірюється за допомогою

					ПК01.171760.000ПЗ	Арк.
						12
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

спеціального датчика, який реєструє зміни магнітного поля. На основі отриманих даних про зміну вихрових струмів та відомих властивостей матеріалів можна розрахувати товщину покриття. Принцип роботи зображено на рис. 2, де 1 - об'єкт контролю, 2 – відбиваюча поверхня, 3 – лінії електромагнітного поля, 4 – осердя котушки.

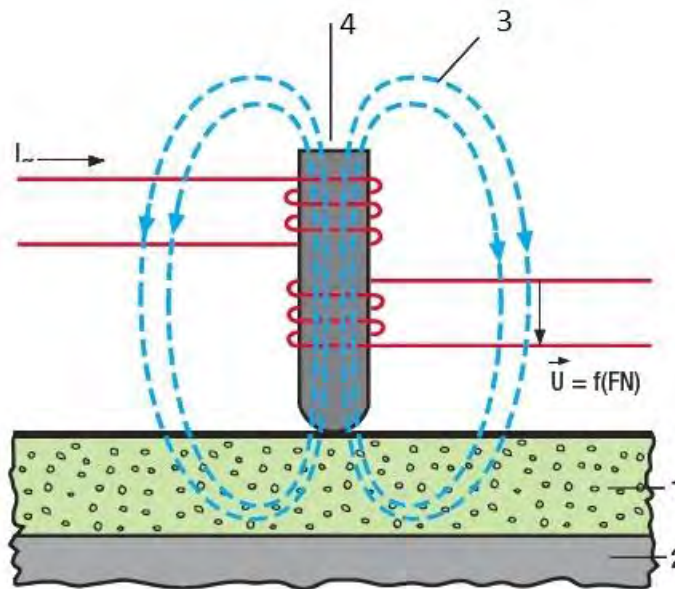


Рис. 2 – Вихрострумівий метод контролю

Перевагами такого методу є можливість здійснювати точний контроль на шорстких на нерівних поверхнях. Проте даний метод є більш залежним від форми об'єкту контролю та потребує точного налаштування в залежності від матеріалу досліджуваного тіла чи покриття.

1.3.3 Механічна товщинометрія

Механічна товщинометрія - це метод вимірювання товщини матеріалів за допомогою механічних пристроїв або інструментів. Цей метод вимірювання базується на принципі використання механічного контакту між вимірювальним пристроєм і досліджуваним матеріалом.

Одним з найпоширеніших пристроїв механічної товщиномірії є мікрометр. Мікрометр (рис. 3) - це прецизійний механічний інструмент, який використовується для вимірювання товщини різних матеріалів. Він складається з вимірювального винта, який рухається відносно фіксованого або поворотного винта. Шкала та додаткові маркування на корпусі мікрометра дозволяють зчитувати вимірювальні значення з високою точністю.



Рис. 3 – Мікрометр:

1 - скоба, 2 – п'ятка, 3- мікрометричний гвинт, 4 – стопор, 5 – стебло, 6 – барабан, 7 – корпус тріскачки

Іншим поширеним механічним пристроєм для вимірювання товщини є калібр. Калібри - це пристрої, які використовуються для вимірювання відстаней між двома протилежними поверхнями або внутрішніми діаметрами отворів. Вони можуть бути механічними або цифровими, і вони зазвичай мають набір змінних пристроїв для різних типів вимірювань.

Механічна товщиномірія використовується в різних галузях, включаючи металообробку, будівництво, авіацію, медицину та інші. Вона дозволяє здійснювати точні виміри товщини матеріалів і виробів з високою репродуктивністю та надійністю. Однак вона може бути менш ефективною в порівнянні з іншими методами, такими як ультразвукова товщиномірія, коли потрібно виміряти товщину великих або складних об'єктів.

					ПК01.171760.000ПЗ	Арк.
						14
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1.3.4 Оптична товщинометрія

Оптична товщинометрія - це метод вимірювання товщини матеріалів, який використовує оптичні принципи та пристрої. Він базується на використанні властивостей світла, що проходить через, або відбивається від поверхні матеріалу.

Оптичних товщиноміри - це пристрої, які вимірюють товщину матеріалу, аналізуючи відбите світло. Наприклад, рефлектметри, які використовуються для вимірювання товщини шару матеріалу на основі інтенсивності відбитого світла (рис. 4).

Інший вид оптичних товщиномірів - це інтерференційні пристрої, які використовують явище інтерференції світла для вимірювання товщини матеріалу. Вони вимірюють різницю в оптичній довжині між відображеними світловими сигналами, що дозволяє точно визначити товщину матеріалу.

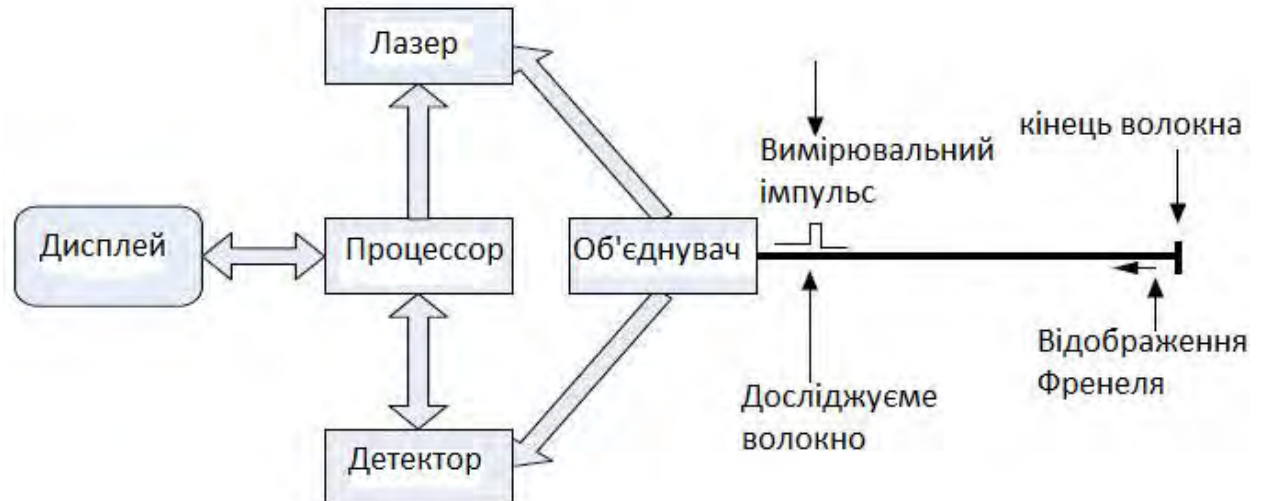


Рис. 4 – Принцип роботи рефлектметра

Оптична товщиномірія застосовується в промисловості, наукових дослідженнях, медицині та інших галузях. Вона дозволяє проводити точні виміри товщини різних матеріалів з високою роздільною здатністю та швидкістю, при цьому забезпечуючи високу точність і безпеку. Як зрозуміло з

Рис.3, найчастіше даний метод використовується при дослідженні волокон та об'єктів контролю, які здатні пропускати світло, або мають малі розміри.

1.3.5 Рентгенівська та гамма-товщинометрія

Рентгенівська та гамма-товщинометрія - це методи вимірювання товщини матеріалів, які використовують рентгенівське та гамма-випромінювання відповідно. Ці методи належать до неруйнівного контролю, проте є менш розповсюдженими через високий рівень небезпеки та високу вартість як обладнання, так і джерел випромінювань.

Рентгенівська товщинометрія базується на принципі поглинання рентгенівських променів матеріалом. Коли рентгенівські промені проходять через матеріал, частина їх енергії поглинається, а частина проходить далі. Інтенсивність променів, що пройшли через матеріал, залежить від його товщини і складу.

Спочатку рентгенівська трубка (рис. 5) або інше джерело генерує рентгенівське випромінювання, яке проходить через досліджуваний матеріал, частково поглинаючись. На протилежній стороні матеріалу детектор вимірює інтенсивність променів, що пройшли. Товщина матеріалу розраховується на основі зменшення інтенсивності рентгенівського випромінювання.

Гамма-товщинометрія використовує гамма-випромінювання, яке також має високу проникну здатність. Принцип дії аналогічний рентгенівській товщинометрії, але замість рентгенівських променів використовується гамма-випромінювання, що генерується радіоактивними ізотопами, такими як кобальт-60 або цезій-137. Етапи процесу вимірювання є аналогічними.

					ПК01.171760.000ПЗ	Арк.
						16
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

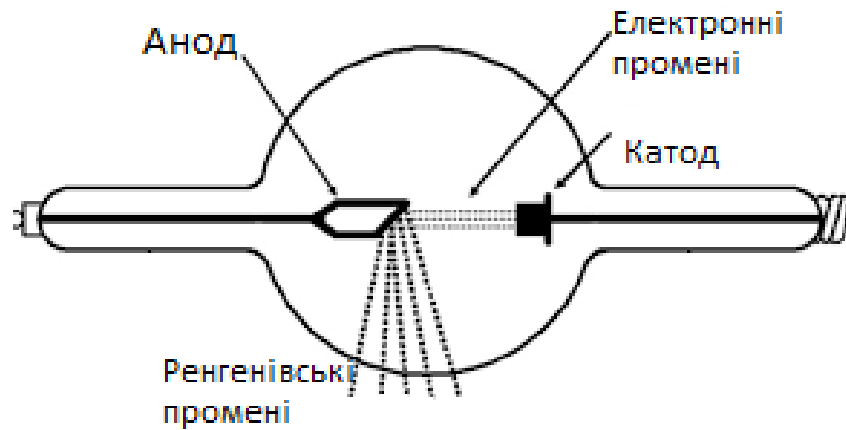


Рис. 5 – Будова ренгенівської трубки

1.3.6 Ультразвукова товщинометрія

Ультразвукова товщинометрія є одним з провідних методів вимірювання товщини матеріалів, що ґрунтується на використанні ультразвукових хвиль. Принцип роботи цього методу полягає в тому, що ультразвукові хвилі направляються на досліджуваний матеріал, проходять через нього та відбиваються назад до датчика. Час, за який хвилі повертаються, використовується для обчислення товщини матеріалу (рис. 6).

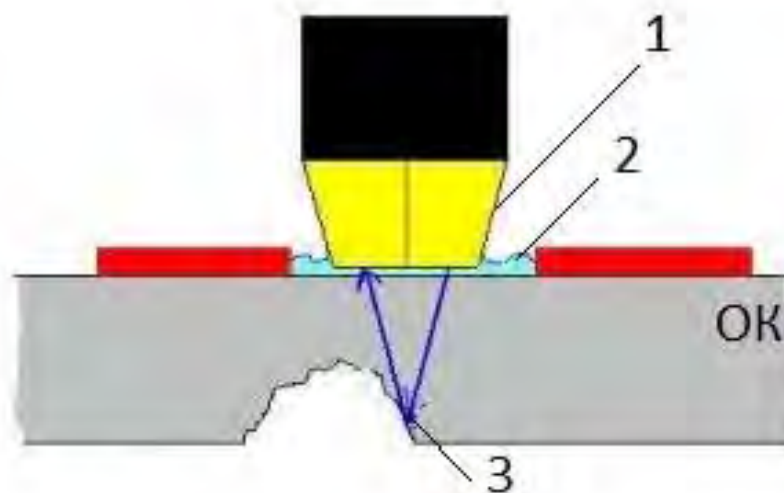


Рис. 6 – Ультразвуковий метод товщинометрії:

1 – датчик товщиноміра, 2 – контактна рідина, 3 – шлях ультразвукового сигналу

Цей метод має кілька важливих переваг. По-перше, ультразвукова товщинометрія є неруйнівним методом, що означає, що вимірювання можна проводити без пошкодження або зміни властивостей матеріалу. Це робить її ідеальною для контролю якості та моніторингу стану об'єктів у різних галузях промисловості. По-друге, ультразвукові товщиноміри здатні працювати з широким спектром матеріалів, включаючи метали, пластики, композити, кераміку та інші.

Крім того, ультразвукова товщинометрія має високу точність і надійність. Вона може застосовуватися для вимірювань у важкодоступних місцях та в складних умовах. Завдяки своїй універсальності та можливості швидкого й точного отримання даних, ультразвукова товщинометрія є важливим інструментом для забезпечення якості та безпеки в багатьох галузях.

Однак, існують певні нюанси використання ультразвукової товщинометрії, які варто враховувати для досягнення максимальної точності та ефективності. По-перше, правильний вибір ультразвукових перетворювачів є критично важливим. Перетворювачі мають бути підібрані відповідно до типу матеріалу і умов вимірювання. По-друге, важливо забезпечити належний контакт між датчиком і поверхнею матеріалу. Для цього часто використовуються спеціальні контактні рідини, що покращують передачу ультразвукових хвиль.

По-третє, на результати вимірювань можуть впливати властивості матеріалу, такі як його структура, щільність і наявність внутрішніх дефектів. Тому, інтерпретуючи дані, необхідно враховувати ці фактори. По-четверте, товщиноміри потребують регулярного калібрування для забезпечення їхньої точності. Використання стандартних зразків під час калібрування дозволяє отримувати більш точні результати.

Нарешті, варто відзначити, що ультразвукова товщинометрія може мати обмеження при роботі з дуже тонкими, багат шаровими матеріалами, де відбиті сигнали можуть перекриватися або спотворюватися. та об'єктами які є чутливими до ультразвукових хвиль. У таких випадках може знадобитися

					ПК01.171760.000ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		18

використання додаткових методів вимірювання або спеціалізованого обладнання.

1.4 Методи ультразвукової товщинометрії

Існує кілька різновидів ультразвукової товщинометрії, кожен з яких має свої унікальні особливості та сфери застосування. До основних видів ультразвукових товщиномірів належать контактні, іммерсійні, фазових зсувів та ехо-імпульсні пристрої (рис.7). Кожен з цих методів базується на певних фізичних принципах і має свої переваги та обмеження, що впливають на вибір оптимального рішення для конкретних завдань.

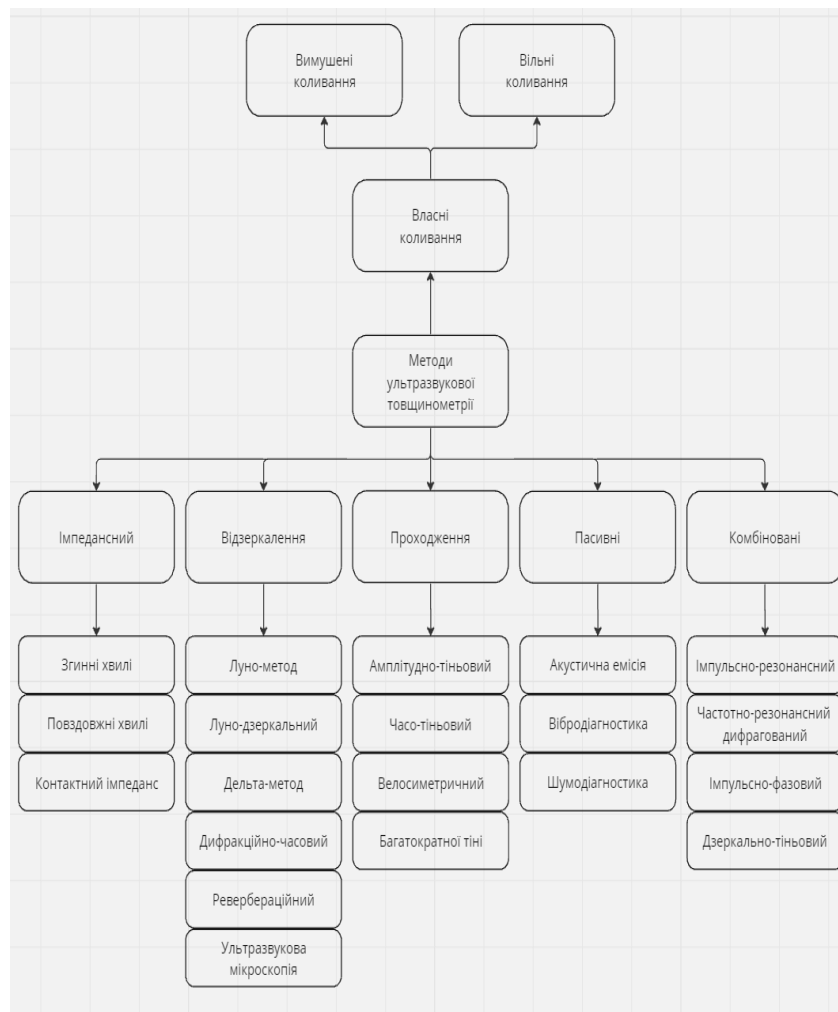


Рис. 7 – Методи ультразвукової товщинометрії

1.4.1 Імпульсно-еховий метод

Імпульсно-еховий метод є одним з найпоширеніших і найефективніших методів ультразвукової товщинометрії. Дослідження базується на принципі генерації ультразвукових імпульсів, які проходять через матеріал і відбиваються від його внутрішніх поверхонь або дефектів. Ультразвуковий перетворювач створює високочастотний електричний сигнал, який перетворюється на механічні вібрації. Ці вібрації генерують ультразвукові хвилі, що поширюються в матеріалі. Ультразвукові хвилі поширюються через матеріал з певною швидкістю, яка залежить від його фізичних властивостей, таких як щільність і еластичність. Швидкість поширення ультразвукових хвиль є унікальною для кожного матеріалу і може змінюватися залежно від його структури і температури. Коли ультразвуковий імпульс досягає межі матеріалу (наприклад, протилежної поверхні або дефекту), частина хвиль відбивається назад до датчика. Ці відбиті хвилі несуть інформацію про відстань до відбивальної поверхні, а також про її характеристики.

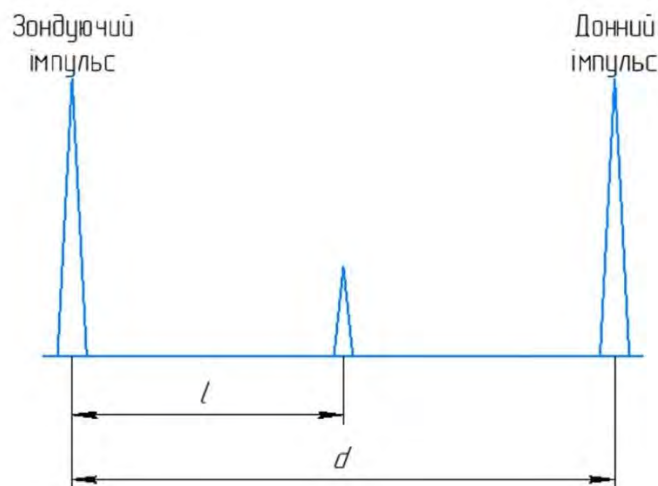


Рис. 8 – Сигнал ехо-імпульсного методу:

l – відстань між зондуючим на дефектним імпульсами, d – відстань між зондуючим та донним імпульсами

Відбиті хвилі повертаються назад через матеріал до ультразвукового перетворювача. Шлях, який проходять хвилі туди і назад, є основою для вимірювання товщини матеріалу. Ультразвуковий перетворювач приймає відбиті хвилі і перетворює їх у електричні сигнали. Ці сигнали обробляються і аналізуються для визначення часу проходження хвиль. Вимірювання часу, за який імпульси повертаються до датчика, дозволяє обчислити товщину матеріалу. Цей час безпосередньо пов'язаний із відстанню, яку пройшли ультразвукові хвилі.

Проте, на даний метод впливає декілька факторів. Так як швидкість ультразвукових хвиль в матеріалі залежить від його щільності і еластичності. Щільніші матеріали, як правило, проводять ультразвукові хвилі швидше, тоді як більш еластичні матеріали можуть сповільнювати хвилі. Також матеріали з однорідною структурою забезпечують більш передбачуване поширення ультразвукових хвиль. Наявність зернистої структури, пористості або армуючих елементів може впливати на проходження хвиль, викликаючи розсіювання і затухання. Зміна температури теж може впливати на швидкість ультразвукових хвиль у матеріалі, тому важливо враховувати температурні умови під час вимірювань.

Крім властивостей досліджуваного об'єкту контролю, на точність вимірювань також впливає якість контакту. Нерівна або груба поверхня матеріалу може ускладнити проведення вимірювань і вимагати попередньої обробки. Для точних вимірювань важливо забезпечити добрий контакт між датчиком і поверхнею матеріалу. Для цього часто використовуються спеціальні контактні рідини або гелі.

Вони відіграють ключову роль у забезпеченні ефективного проведення вимірювань, полегшуючи передачу ультразвукових хвиль між пристроєм і поверхнею матеріалу. Основні критерії для вибору такої рідини включають її здатність до змащування поверхні матеріалу, забезпечення мінімального опору для ультразвукових хвиль, наявність достатньої провідності для сигналу, відсутність пазирів, а також безпечність для використання та сумісність з

					ПК01.171760.000ПЗ	Арк.
						21
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

матеріалами, які досліджуються. Зазначені вимоги дозволяють забезпечити надійність та точність вимірювань, що є важливим для досягнення точних результатів ультразвукової товщинометрії.

1.4.2 Метод вільних коливань

Метод вільних коливань в ультразвуковій товщинометрії ґрунтується на вимірюванні частоти власних коливань пластини/плівки, що досліджується. Ця частота залежить від товщини, матеріалу та геометрії пластини, тому, вимірюючи її, можна з високою точністю визначити товщину.

Для розуміння теорії роботи методу, наведемо приклад його використання в давнину. Традиційно, оглядачі вагонів колись використовували метод прослуховування для виявлення тріщин в осях коліс. Вони стукали молотком по осі і за звуком металу могли визначити наявність дефектів. Виріб без дефектів має чітко визначені параметри коливань: частоту та коефіцієнт загасання. Наявність же неоднорідностей, таких як тріщини, розшарування або раковини, змінює ці параметри. В наш час, замість традиційного простукування молотком, для більш об'єктивного контролю використовується електромагнітний вібратор. Він збуджує вільні коливання в досліджуваному матеріалі. Після чого, п'єзоелементний приймач реєструє весь спектр частот цих коливань. І перетворює отриманий сигнал в електричний. Далі, вже електричний сигнал підсилюється і подається на фільтр

Фільтр, в свою чергу, пропускає лише спектр коливань дефектної ділянки, що дозволяє нам чітко виявити місце дефекту. Відфільтровані коливання посилюються і подаються на індикатор, або дисплей, де і відображається інформація про дефект: його тип, місце розташування та інші характеристики.

Найчастіше, даний метод використовують для перевірки цілісності конструкції та якості склеювання деталей між собою. Забезпечення рівномірного розподілу клею та міцного з'єднання по всій поверхні контакту є критичним при склеюванні матеріалів між собою. Метод вільних коливань

					ПК01.171760.000ПЗ	Арк.
						22
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

допомагає виявляти області з недостатнім або надмірним клеєм, а також з бульбашками повітря чи іншими включеннями, які можуть послабити з'єднання. Ультразвукові хвилі, проходячи через склеєний матеріал, відбиваються від внутрішніх поверхонь або дефектів. Аналізуючи характеристики відбитих хвиль, можна оцінити якість склеювання та виявити можливі проблеми.

Проблемами використання цього методу є його складність, потреба в великій кількості обладнання та можливість застосування тільки до матеріалів з високими значеннями коефіцієнта загасання пружних коливань, таких як текстоліт та фанера. Крім того, він має обмеження по товщині та геометрії досліджуваного об'єкту контролю. Тобто це не універсальний метод, і він не може використовуватися для вимірювання товщини будь-якої пластини або плівки.

1.4.3. Метод акустичної емісії

Метод акустичної емісії (АЕ) – це неруйнівний метод тестування, який широко використовується для виявлення та локалізації дефектів у різних матеріалах. Він ґрунтується на принципі, що коли в матеріалі виникає тріщина або інший дефект, він генерує мікроскопічні еластичні хвилі. Ці хвилі можна "почути" за допомогою датчиків АЕ, які перетворюють їх на електричні сигнали, що потім аналізуються для отримання інформації про дефект (рис. 9).

Працює це таким чином:

- 1) У матеріалі виникає тріщина, розшарування, пори або інший дефект.
- 2) Дефект генерує мікроскопічні еластичні хвилі, які поширюються через матеріал.
- 3) Датчики АЕ, розміщені на поверхні матеріалу, реєструють ці еластичні хвилі.
- 4) Датчики АЕ перетворюють еластичні хвилі на електричні сигнали.

					ПК01.171760.000ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		23

5) Електричні сигнали з датчиків АЕ надходять на спеціальний прилад, де вони аналізуються для отримання інформації про дефект, включаючи його тип, розмір, місце розташування та ступінь серйозності.

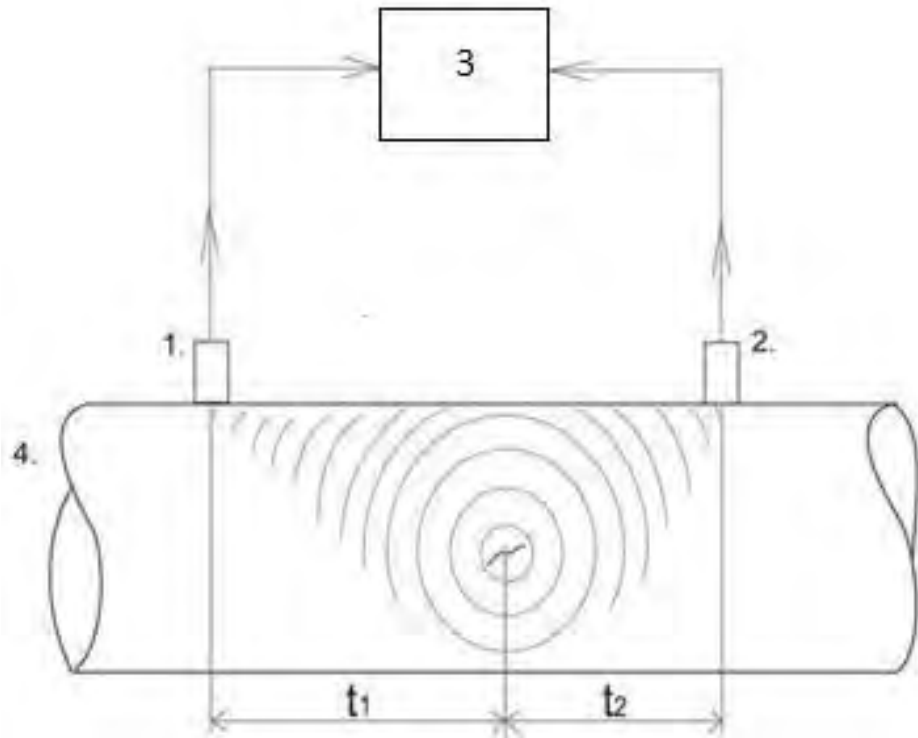


Рис. 9 – Метод акустичної емісії:

1, 2 – датчики АЕ, 3 – система обробки сигналів 4 – об'єкт контролю, t_1 – відстань між дефектом та датчиком 1, t_2 – відстань між дефектом та датчиком 2

Датчики АЕ є дуже чутливими, завдяки чому вони здатні виявляти дуже дрібні дефекти, які неможливо виявити іншими методами, та точно визначає їх розташування. Також, завдяки цим датчикам, ми можемо моніторити стан об'єкту контролю протягом його експлуатації, дозволяючи виявляти дефекти на ранній стадії їх розвитку.

Проте, через високу чутливість, шуми навколишнього середовища можуть впливати на результати АЕ, обмежуючи його застосування в деяких випадках. І для роботи з такими датчиками потрібне спеціальне та дороге обладнання і кваліфіковані фахівці, для правильної інтерпретації результатів.

1.4.4 Метод дифрагованих хвиль

Метод дифрагованих хвиль ґрунтується на вивченні дифракції ультразвукових хвиль на краях або неоднорідностях в матеріалі. Коли ультразвукова хвиля зустрічає край або неоднорідність, вона розсіюється в різних напрямках. Розсіяний сигнал потім аналізується, щоб виділити інформацію про товщину матеріалу. Сам метод є нечутливий до шумів, які можуть бути викликані дефектами..

Перевагами такого методу, є можливість вимірювання в різних умовах, тобто для вимірювання товщини в місцях, де інші методи неможливі, наприклад, на криволінійних поверхнях або в неоднорідних матеріалах, хоч і потребує додаткового обладнання.

Метод дифрагованих хвиль має ряд переваг перед іншими методами ультразвукової товщинометрії, такими як імпульсний та резонансний методи. Він може використовуватися для вимірювання товщини в складних умовах, де інші методи неможливі. Важливо зазначити, що метод дифрагованих хвиль не є абсолютно нечутливим до дефектів. У деяких випадках дефекти можуть впливати на розсіяний сигнал і призводити до помилок у вимірюванні.

Однак, метод дифрагованих хвиль все одно залишається значно менш чутливий до дефектів, ніж інші методи ультразвукової товщинометрії. Хоча є складнішим у використанні та інтерпретації результатів, ніж інші методи. Він також дорожчий і не так широко доступний.

Важливо зазначити, що метод дифрагованих хвиль не є універсальним і не може використовуватися для вимірювання товщини будь-якої пластини/плівки. Вибір методу вимірювання товщини залежить від конкретної задачі, матеріалу та геометрії пластини/плівки.

					ПК01.171760.000ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		25

1.4.5 Частотно-резонансний метод

Частотно-резонансний метод, також відомий як метод резонансу стоячих хвиль, ґрунтується на використанні генератору змінної частоти, для збудження перетворювача. Ультразвукові хвилі, проходячи через матеріал, частково відбиваються від його поверхонь і взаємодіють з падаючими хвилями, утворюючи стоячі хвилі. На певній частоті виникає резонанс, при якому вибір вібрує разом з генератором.

Це збільшує амплітуду ультразвукових коливань у матеріалі, підвищує споживання енергії та знижує вхідний опір навантаження генератора (п'єзоелемента випромінювача). У результаті анодний струм генератора різко зростає, що фіксується індикатором. Резонанс виникає тоді, коли товщина виробу дорівнює цілому числу півхвиль пружної акустичної хвилі.

Даний метод може працювати зі значно тоншими об'єктами, саме тому він широко використовується в контролі товщини мікросхем, плівок, мембран. Крім того, він використовується для дослідження властивостей матеріалів, таких як модуль Юнга та коефіцієнт Пуассона. Також цим методом користуються в медичних та біомедичних дослідженнях, вимірюючи товщину шкіри, волосся, кісток тощо.

1.4.6 Комінований метод

Комбінований метод ультразвукової товщинометрії поєднує в собі два або більше різних методів для вимірювання товщини матеріалу. Це робиться для того, щоб доповнити переваги кожного методу та мінімізувати їхні обмеження. Є велика кількість комбінацій методів, проте найпоширеніші з них:

1) Імпульсний + резонансний метод: Ця комбінація використовує імпульсний метод для вимірювання товщини товстих матеріалів, а резонансний метод - для вимірювання товщини тонких матеріалів.

					ПК01.171760.000ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		26

2) Частотно-резонансний + дифрагований метод: Ця комбінація використовує частотно-резонансний метод для вимірювання товщини однорідних пластин/плівок, а дифрагований метод - для вимірювання товщини неоднорідних пластин/плівок.

Імпульсний + фазовий метод: Ця комбінація використовує імпульсний метод для вимірювання товщини товстих матеріалів, а фазовий метод - для вимірювання товщини тонких матеріалів з високою точністю.

Завдяки різним комбінаціям, ми можемо використовувати один прилад для вимірювання товщини матеріалів різної товщини, від тонких плівок до товстих деталей. Поєднуючи декілька різних методів, комбінований метод може забезпечити високу точність вимірювання товщини, зменшити вплив дефектів в матеріалі на результати вимірювання, та використовувати різні методи для вимірювання товщини матеріалів різної геометрії.

Висновки до 1 розділу

Ультразвуковий метод неруйнівного контролю (УЗД НК) пропонує найкращу універсальність серед методів НК, адже він може використовуватися для різних матеріалів, товщин та геометрій. Різноманіття методів УЗД НК дає можливість вибрати найкращий для конкретної задачі, враховуючи переваги та обмеження кожного з них.

Луна-імпульсний метод є одним із найзручніших та найдоступніших методів УЗД НК, що робить його оптимальним вибором для розробки портативного ультразвукового товщиноміру.

Можна виділити досить велику кількість переваг даного методу, а саме:

- 1) Луна-імпульсний метод легко реалізувати та інтерпретувати.
- 2) Товщиноміри, засновані на цьому методі, можуть бути компактними та легкими, що робить їх зручними для використання в польових умовах.
- 3) Луна-імпульсні товщиноміри, як правило, дешеві та доступні для широкого кола користувачів.

					ПК01.171760.000ПЗ	Арк.
						27
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

4) Цей метод може використовуватися для вимірювання товщини різних матеріалів, товщин та геометрій.

5) Товщиноміри, засновані на луна-імпульсному методі, прості у використанні та не потребують спеціальних навичок.

					ПК01.171760.000ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		28

РОЗДІЛ 2 ПРОЕКТУВАННЯ ПРИЛАДУ

2.1. Розрахунок акустичного тракту

Акустичний тракт — це шлях ультразвукового сигналу від випромінювача через протектор, контактну рідину та об'єкт контролю до дефекту, і назад до приймача. Коефіцієнт акустичного тракту визначає ослаблення сигналу на цьому шляху, враховуючи ефекти ослаблення в протекторі, віддзеркалення, заломлення, трансформацію на межах об'єкта контролю і дефекту, а також згасання сигналу під час його поширення через поглинання та розсіяння. Дефекти, що відбивають ультразвукові хвилі, мають різну форму та розміри, і для розрахунку коефіцієнта акустичного тракту існують стандартизовані моделі з урахуванням відомих акустичних властивостей різних типів дефектів.

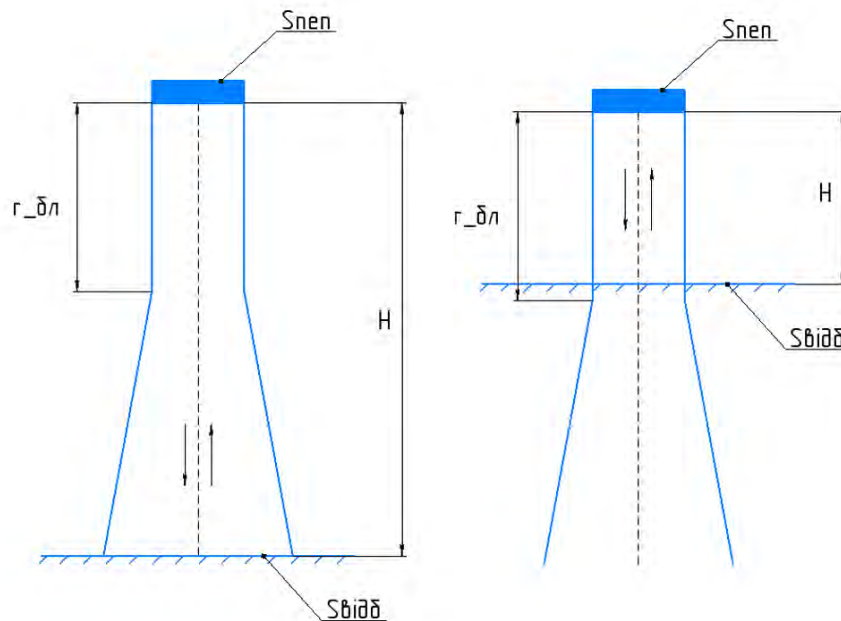


Рис. 10 – Акустичний тракт прямого перетворювача

Формула для розрахунку акустичного тракту для дальньої зони

					ПК01.171760.000ПЗ	Арк.
						29
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

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

$K_{a.t.}$ - коефіцієнт акустичного тракту, λ - довжина ультразвукової хвилі в середовищі, H – відстань від ПЕП до ОК, T_1 - коефіцієнт проходження по інтенсивності на межі середовищ, R_p – відстань ближньої зони, δ_p - коефіцієнт згасання.

Формула для розрахунку акустичного тракту ближньої зони

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

Коефіцієнт акустичного тракту — це числова величина, яка визначається на основі формули, що враховує характеристики спрямованості випромінювання, акустичні властивості, розміри середовищ прийому, променеву картину. Перед розрахунком коефіцієнта необхідно спочатку визначити відповідні параметри.

Для досягнення максимальної роздільної здатності та глибини проникнення ультразвуку важливо правильно підібрати частоту та п'єзоелемент перетворювача. З одного боку, вищі частоти забезпечують кращу роздільну здатність, але з іншого - знижують глибину проникнення. Тому, враховуючи багат шарову конструкцію перетворювача з шаром рідини та гуми, а також стандартизовані частоти та діаметри, було обрано п'єзоелемент ЦТС-19М з робочою частотою 2.5 МГц та діаметром 14 мм. Цей вибір забезпечує баланс між роздільною здатністю та глибиною проникнення, враховуючи вплив всіх середовищ акустичного тракту, включаючи об'єкт контролю.

Таблиця 1. Характеристика матеріалів

					ПК01.171760.000ПЗ	Арк.
						30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Матеріал	Акустичний імпеданс $\frac{кг}{м \cdot с^2}$, 10^6	Швидкість поздовжньої хвилі, м/с	Коефіцієнт згасання на частоті 2,5 МГц, Нп/м	Товщина шару, м, 10^{-3}
Масло моторне	1.514	1740	8.125	28
Резина	1.5	1500	6.912	12
Сталь	46.61	5900	2.3	25

Після визначення оптимальної частоти та п'єзоелемента, наступним кроком є визначення зони акустичного поля, де відбувається відбиття сигналу від поверхні об'єкта контролю. Оскільки структура об'єкта контролю може бути складною, для спрощення розрахунків її потрібно перетворити до еквівалентної одношарової моделі. Для цього обчислюється еквівалентна глибина конвертованої структури, яка враховує вплив всіх шарів на поширення ультразвукового сигналу. Ця величина використовується далі для визначення характеристик відбитого сигналу та глибини дефектів у об'єкті контролю.

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

$H_{екв}$ – товщина еквівалентного середовища, $H_{ст}$, $H_{мм}$, $H_{рез}$ – товщина середовища: сталь, масло моторне, резина, $C_{ст}$, $C_{мм}$, $C_{рез}$ - швидкість поздовжньої хвилі в середовищі: сталь, масло моторне, резина.

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

Ефективність ультразвукового перетворювача та точність ультразвукового контролю залежать від двох ключових параметрів: довжини

					ПК01.171760.000ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		31

хвилі в об'єкті контролю (ОК) та товщини п'єзоелемента. Довжина хвилі в ОК характеризує поширення ультразвукових коливань в матеріалі і може бути розрахована за відповідними формулами. Товщина п'єзоелемента визначає ефективність перетворення електричної енергії в механічні коливання та навпаки. Для оптимальної роботи перетворювача в заданому діапазоні частот рекомендується використовувати півхвильову товщину п'єзоелемента, оскільки це забезпечує максимальну ефективність перетворення енергії та мінімальні втрати. Знання цих параметрів дозволяє розрахувати ближню зону акустичного тракту та правильно підібрати п'єзоелемент для конкретного завдання ультразвукового контролю, що забезпечує точність та надійність результатів. Таким чином, вибір правильних параметрів п'єзоелемента є ключовим для ефективної роботи перетворювача та отримання достовірних даних про стан об'єкта контролю.

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

$h_{\text{ПЕП}}$ – товщина ПЕП, $\lambda_{\text{ПЕП}}$ – довжина ультразвукової хвилі ПЕП, $C_{\text{ПЕП}}$ – швидкість поширення ультразвукової хвилі ПЕП, f – частота коливання -2,5 МГц.

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

$\lambda_{\text{ст}}$ - довжина ультразвукової хвилі в сталі, $h_{\text{ПЕП}}$ – товщина ПЕП, $C_{\text{ст}}$, $C_{\text{ПЕП}}$ - швидкість поздовжньої хвилі в середовищі: сталь, ПЕП.

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

					ПК01.171760.000ПЗ	Арк.
						32
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$r_{\text{бл}}$ – ближня зона, f - частота коливання -2,5 МГц., $C_{\text{ст}}$ – швидкість поширення ультразвукової хвилі в сталі, $\lambda_{\text{ст}}$ - довжина ультразвукової хвилі в сталі, a – радіус ПЕП.

Після розрахунку ближньої зони ($r_{\text{бл}}$) та її порівняння з еквівалентною товщиною ($H_{\text{екв}}$) об'єкта контролю, можна зробити висновок про те, в якій зоні акустичного поля відбувається контроль.

Якщо $r_{\text{бл}} < H_{\text{екв}}$, то контроль проводиться в дальній зоні.

Якщо $r_{\text{бл}} \geq H_{\text{екв}}$, то контроль проводиться в ближній зоні.

Оскільки в даному випадку $r_{\text{бл}} < H_{\text{екв}}$, то контроль проводиться в дальній зоні. Відповідно, для розрахунку акустичного тракту в дальній зоні використовується формула, яка має такий вигляд:

$$K_{a.m.} = \frac{S_{\text{ПЕП}}}{2 \cdot \lambda_{\text{ОК}} \cdot H_{\text{екв}}} T_{l1} \cdot T_{l2} \cdot T_{l3} \cdot R_p \cdot e^{-2 \cdot (H_1 \cdot \delta_{p1} + H_2 \cdot \delta_{p2} + H_3 \cdot \delta_{p3})}$$

$K_{a.t.}$ - коефіцієнт акустичного тракту, $\lambda_{\text{ок}}$ - довжина ультразвукової хвилі в ОК, H – еквівалентна відстань, T_{l1} , T_{l2} , T_{l3} - коефіцієнт проходження по інтенсивності на межі середовищ: ПЕП-масло моторне, масло моторне-резина, резина-ОК, R_p – відстань ближньої зони, H_1 , H_2 , H_3 , - товщина середовищ: сталь, резина, масло моторне, δ_{p1} , δ_{p2} , δ_{p3} - коефіцієнт згасання в середовищах: сталь, резина, масло моторне.

Для продовження розрахунку характеристик акустичного тракту та отримання достовірних результатів ультразвукового контролю, необхідно розрахувати три коефіцієнти проходження по інтенсивності:

Коефіцієнт проходження по інтенсивності на межі ПЕП-масло. Цей коефіцієнт характеризує втрати інтенсивності ультразвукових коливань на межі між п'єзоелектричним елементом та маслом, яке використовується як контактна рідина.

					ПК01.171760.000ПЗ	Арк.
						33
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$T_{11} = \frac{4 \cdot z_{\text{ПЕП}} \cdot z_{\text{масло}}}{(z_{\text{ПЕП}} + z_{\text{масло}})^2} = \frac{4 \cdot 2.28 \cdot 10^7 \cdot 1.514 \cdot 10^6}{(2.28 \cdot 10^7 + 1.514 \cdot 10^6)^2} = 0.234$$

T_{11} - коефіцієнт проходження по інтенсивності на межі середовищ ПЕП-масло, $Z_{\text{ПЕП}}$, $Z_{\text{масло}}$, - акустичний імпеданс середовища: ПЕП, масло

Коефіцієнт проходження по інтенсивності на межі масло-резина. Цей коефіцієнт характеризує втрати інтенсивності ультразвукових коливань на межі між маслом та гумовою прокладкою, яка використовується для герметизації ізоляції ПЕП

$$T_{12} = \frac{4 \cdot z_{\text{рез}} \cdot z_{\text{масло}}}{(z_{\text{рез}} + z_{\text{масло}})^2} = \frac{4 \cdot 1.5 \cdot 10^6 \cdot 1.514 \cdot 10^6}{(1.5 \cdot 10^6 + 1.514 \cdot 10^6)^2} = 1$$

T_{12} - коефіцієнт проходження по інтенсивності на межі середовищ масло-резина, $Z_{\text{рез}}$, $Z_{\text{масло}}$, - акустичний імпеданс середовища: резина, масло

Коефіцієнт проходження по інтенсивності на межі резина-ОК. Цей коефіцієнт характеризує втрати інтенсивності ультразвукових коливань на межі між гумовою прокладкою та об'єктом контролю

$$T_{13} = \frac{4 \cdot z_{\text{рез}} \cdot z_{\text{см}}}{(z_{\text{рез}} + z_{\text{см}})^2} = \frac{4 \cdot 1.5 \cdot 10^6 \cdot 46.61 \cdot 10^6}{(1.5 \cdot 10^6 + 46.61 \cdot 10^6)^2} = 0.121$$

T_{13} - коефіцієнт проходження по інтенсивності на межі середовищ резина-ОК, $Z_{\text{рез}}$, $Z_{\text{ОК}}$, - акустичний імпеданс середовища: резина, ОК

Площа п'єзоелемента впливає на коефіцієнт акустичного тракту, який визначає загальні втрати інтенсивності ультразвукових коливань уздовж всього шляху акустичного сигналу.

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

$S_{\text{ПЕП}}$ – площа ПЕП, a – радіус ПЕП.

					ПК01.171760.000ПЗ	Арк.
						34
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Наступним кроком є розрахунок коефіцієнтів згасання для матеріалів, які використовуються в акустичному тракті, при заданій частоті 2.5 МГц. Ці коефіцієнти характеризують, наскільки інтенсивно поглинаються ультразвукові коливання в даному матеріалі

Моторне масло

$$\delta_{\text{масло}} = 8.125 \frac{\text{Hn}}{\text{м}}$$

Гума

$$\delta_{\text{рез}} = 60 \frac{\text{дБ}}{\text{м}} = \frac{60}{8.68} = 6.912 \frac{\text{Hn}}{\text{м}}$$

Сталь

$$\delta_{\text{ст}} = 2.3 \frac{\text{Hn}}{\text{м}}$$

На завершальному етапі, маючи всі необхідні параметри, можна виконати розрахунок коефіцієнта акустичного тракту. Важливо зазначити, що $K_{a.t.}$ є теоретичним значенням і може відрізнитися від експериментального значення через вплив різних факторів, таких як неоднорідність матеріалу об'єкта контролю, похибки вимірювань, тощо.

$$K_{a.t.} = \frac{1.54 \cdot 10^{-4}}{2 \cdot 2.36 \cdot 10^{-3} \cdot 36.3 \cdot 10^{-3}} \cdot 0.234 \cdot 1 \cdot 0.121 \cdot 1 \cdot e^{-2 \cdot (25 \cdot 10^{-3} \cdot 2.3 + 1210^{-3} \cdot 6.912 + 28 \cdot 10^{-3} \cdot 8.125)} = 0.0121$$

Після розрахунку коефіцієнта акустичного тракту, можна перейти до визначення:

Напруги прийнятого сигналу (U_n). - характеристика амплітуди електричного сигналу, що генерується приймальним п'єзоелементом внаслідок прийому ультразвукових коливань, які пройшли через акустичний тракт.

					ПК01.171760.000ПЗ	Арк.
						35
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Напруги сигналу випромінювання (U_B). - характеристика амплітуди електричного сигналу, що подається на випромінювальний п'єзоелемент для генерування ультразвукових коливань.

$$U_n = U_B \cdot K_{a.m.} \cdot K_{III}$$

U_n - напруга прийнятого сигналу, U_B - напруга сигналу випромінювання, $K_{a.t.}$ - коефіцієнт акустичного тракту, K_{III} - коефіцієнт подвійного перетворення.

У даному випадку для розрахунків приймається коефіцієнт подвійного перетворення (K_{III}) для п'єзоелемента ЦТС-19М, який дорівнює 0.15.

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

Зважаючи на те, що очікувана напруга завод ($U_{зав}$) буде приблизно 1 мВ, з конструктивних міркувань, можна зкласти співвідношення сигнал/завада

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

Тепер, розрахуємо напругу прийнятого сигналу:

$$U_n = \frac{U_n}{U_{зав}} \cdot U_{зав} = 100 \cdot 1 \cdot 10^{-3} = 0.1 \text{ В}$$

Тоді, напруга випромінюваного сигналу:

$$U_{II} = U_B \cdot K_{a.m.} \cdot K_{III} \rightarrow U_B = \frac{U_{II}}{K_{a.m.} \cdot K_{III}} = \frac{0.1}{0.15 \cdot 0.0121} = 54.9 \text{ В}$$

2.2 Опис роботи приладу

Товщиномір з п'єзоелектричним перетворювачем (ПЕП) працює наступним чином. Спочатку на поляризований ПЕП подається імпульс, зазвичай

					ПК01.171760.000ПЗ	Арк.
						36
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

починаючи з негативної півхвилі, що генерує механічні хвилі з частотою 2.5 МГц. Ці ультразвукові хвилі проходять через об'єкт контролю, причому швидкість їх поширення залежить від матеріалу ОК, а частина енергії відбивається від межі між ОК і навколишнім середовищем. Спеціальні електронні схеми вимірюють час проходження хвилі від генерації до прийому, що пропорційно товщині ОК. Відбитий сигнал, зазвичай із малою амплітудою, підсилюється і перетворюється з аналогового в цифровий за допомогою аналогово-цифрового перетворювача (АЦП). Цифровий сигнал обробляється мікроконтролером, який обчислює товщину ОК на основі виміряного часу проходження. Отримане значення товщини ОК відображається на дисплеї товщиноміра (рис. 11)

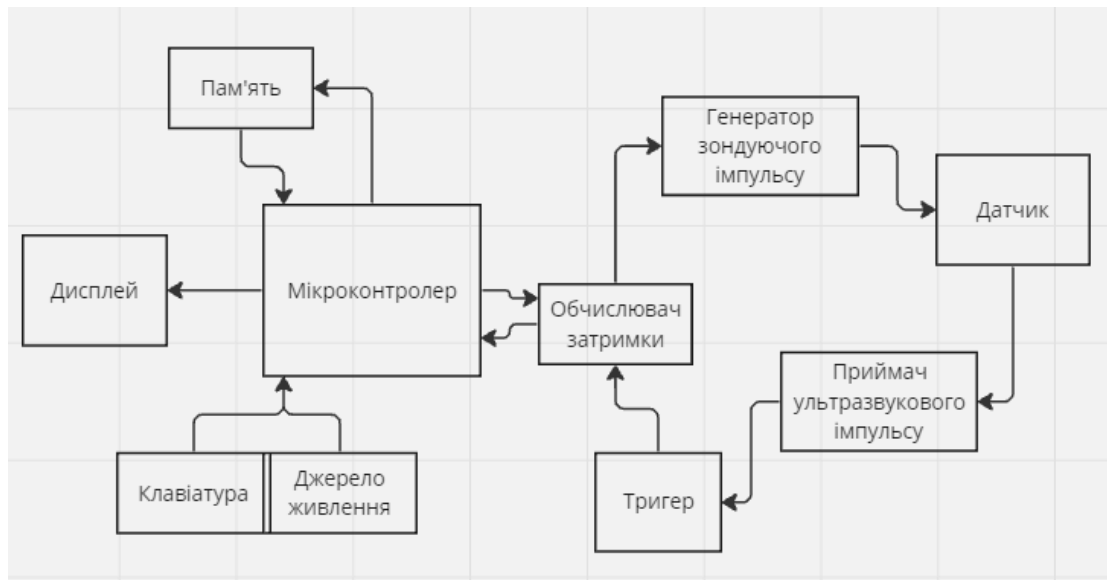


Рис. 11 – структурна схема ультразвукового товщиноміра

2.3 Розрахунок та підбір компонентів для електричної схеми

2.3.1. Розрахунок та підбір АЦП

Частота дискретизації є однією з найважливіших характеристик аналогово-цифрового перетворювача (АЦП). Її значення визначає, скільки разів на секунду АЦП буде вимірювати амплітуду аналогового сигналу.

Згідно з теоремою Котельнікова-Найквіста, щоб уникнути втрати інформації при оцифруванні, частота дискретизації (f_D) повинна бути як мінімум вдвічі більшою за верхню частоту (f_B) спектра вхідного сигналу.

$$f_D > 2 \cdot f_B$$

f_D - частота дискретизації, f_B - верхня частота спектра вхідного сигналу.

Однак, для підвищення точності оцифрованого сигналу рекомендується збільшити частоту дискретизації до трьох разів від верхньої частоти, оскільки подвоєння частоти дискретизації не завжди забезпечує необхідну точність.

$$f_D > 3 \cdot f_B = 3 \cdot 7.5 \cdot 10^6 = 22.5 \text{ МГц}$$

На жаль, складно знайти АЦП з точною частотою дискретизації 22.5 МГц. Тому доцільно використовувати стандартний АЦП з частотою 25 МГц.

Тому ми використовуємо АЦП - ADS7816

ADS7816 - це універсальний 12-бітний аналого-цифровий перетворювач, який вирізняється низьким рівнем шуму та економією енергії. ADS7816 пропонує високу точність та широкі можливості роботи у різних умовах. Завдяки своїм технічним характеристикам, які включають 12-бітну розрядність та частоту дискретизації 50 МГц, він відмінно підходить для різноманітних застосувань. Його низький рівень шуму, на рівні 63 дБFS (SNR) при 1 кГц, робить його ідеальним для ситуацій, де важлива чистота сигналу. Крім того, він ефективно використовує енергію, споживаючи лише 3,5 мкА, що робить його привабливим варіантом для пристроїв з обмеженим джерелом живлення. Інтерфейси SPI та I2C забезпечують зручність підключення, а різні варіанти корпусів, такі як QFN і SOIC, роблять його універсальним для використання в різних пристроях. Варто зауважити, що для роботи з цим АЦП потрібні спеціальні інструменти розробки[13].

					ПК01.171760.000ПЗ	Арк.
						38
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

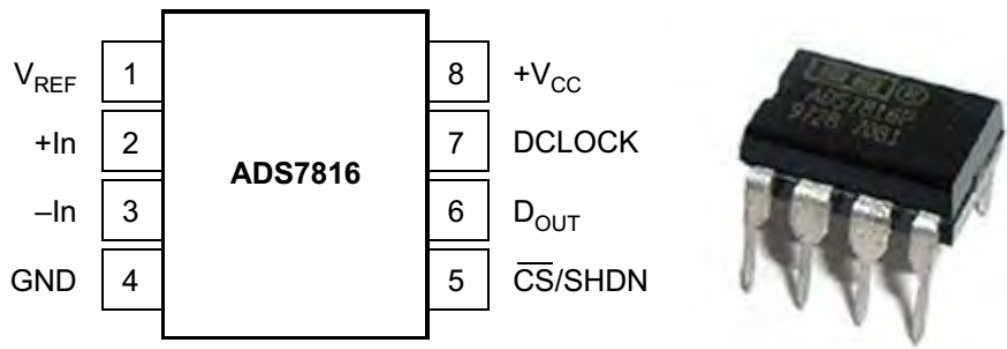


Рис. 12 – АЦП ADS7816

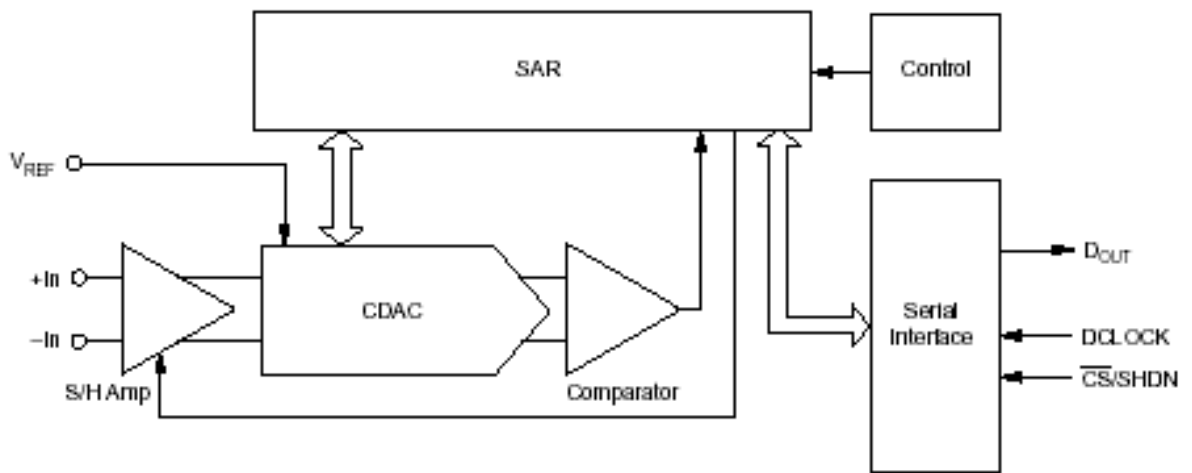


Рис.13 – схема АЦП ADS7816

2.3.2 Розрахунок та підбір смугового фільтра

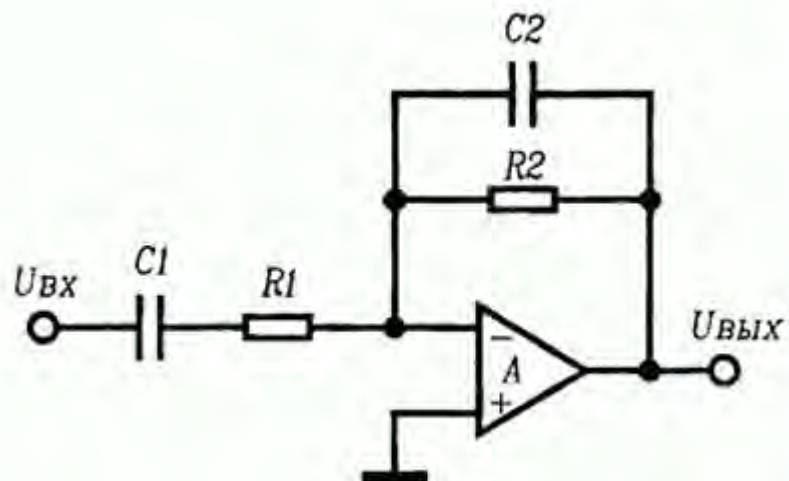


Рис.14 – схема смугового фільтра

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

Перед розрахунком фільтра слід встановити його діапазон частот, від нижньої до верхньої частоти зрізу.

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

$f_{зр1,2}$ - діапазон частот зрізу, $t_{1,2}$ - $R_1 \cdot C_1$ та $R_2 \cdot C_2$ відповідно.

Тобто, нижня частота зрізу при $R_1=1050\text{Ом}$, $C_1=62\text{пкФ}$ обраховується за формулою:

$$f_{зр1} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R_1 \cdot C_1} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 1050 \cdot 6.2} = 2.44\text{МГц}$$

А верхня частота зрізу – $R_2=1050\text{Ом}$, $C_2=20\text{пкФ}$:

$$f_{зр2} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R_1 \cdot C_1} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 1050 \cdot 20 \cdot 10^{-12}} = 7.58\text{МГц}$$

Нам по характеристикам підходить AD8021ARZ

AD8021ARZ - це операційний підсилювач (ОП) загального призначення від Analog Devices, який відзначається своїм малошумним і високошвидкісним характером. Він розроблений для різноманітних використань, де вимагається висока точність, широкий діапазон частот і низький рівень шуму. Завдяки своїм технічним параметрам, таким як швидкість наростання вихідного сигналу 460 В/мкс і полоса пропускання -3 дБ досягає 560 МГц, він може задовольнити потреби вимогливих застосувань. Характеристики цього підсилювача включають одноканальну конфігурацію з високою точністю і низькими значеннями вхідного струму зміщення (7,5 нА) та вхідної напруги зміщення (400 мкВ). Він працює при діапазоні напруги живлення від +4,5 до 24 В або від $\pm 2,25$ до ± 12 В і може працювати в широкому діапазоні температур від -40 до +85 °С. Корпус SOIC-8 (0,154 дюйма) забезпечує зручне розміщення та встановлення в різних пристроях. [12]

					ПК01.171760.000ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		40

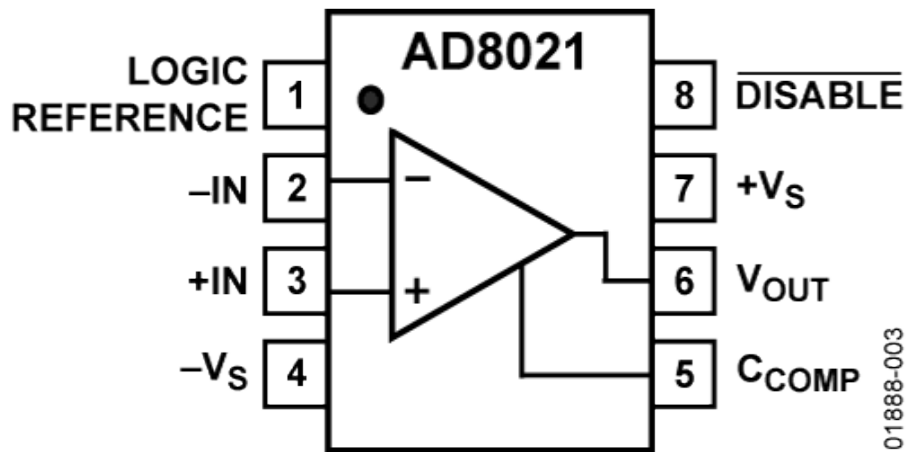


Рис. 15 – схема AD8021ARZ

2.3.3 Підбір генератора тактованих імпульсів

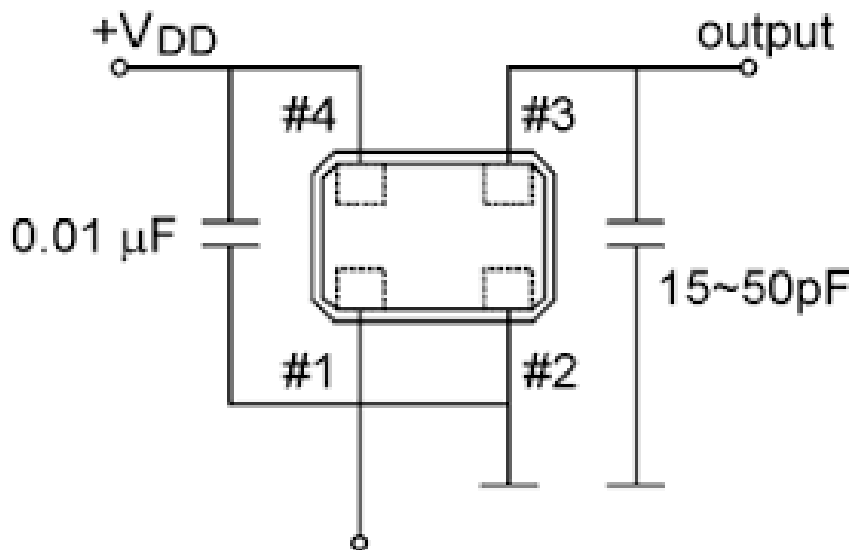


Рис.16 – схема КХО-V97

КХО-V97 - це кварцовий генератор від Geyer Electronics, відомий своєю низьким рівнем шуму та високою стабільністю. Він широко використовується для точної генерації частоти у таких областях, як телекомунікаційне обладнання, GPS-приймачі та промислові системи керування.

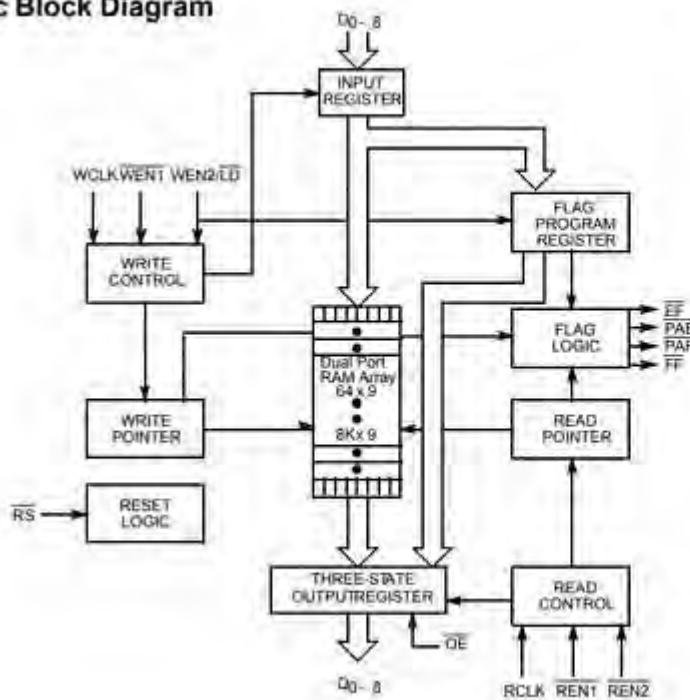
Генератор доступний в різних модифікаціях з частотою від 12 МГц до 50 МГц, зі стабільністю частоти приблизно $\pm 0,25$ ppm. Він має низький рівень шуму фази, приблизно -100 дБс/Гц, і працює в діапазоні напруги живлення від 3,3 В до 5 В. Крім того, генератор має низьке споживання струму, приблизно 10 мА, і компактний корпус SMD розміром 7x5 мм, що робить його зручним для розміщення на печатних платах. Також важливо відзначити, що він може працювати в широкому діапазоні температур від -40 °С до +85 °С, що робить його відповідним для різних умов експлуатації.

2.3.4 Підбір пам'яті

CY7C4231V-25AXCT - це флеш-пам'ять з низьким рівнем споживання енергії, розроблена компанією Cypress Semiconductor. Завдяки своїм характеристикам, вона стала популярним рішенням у багатьох галузях, де важлива надійність та ефективне використання енергії, таких як портативні пристрої, системи керування та медичні пристрої. Її обсяг пам'яті становить 256 МБ, що робить її ідеальним вибором для зберігання великої кількості даних. Пам'ять має швидкість читання 25 МГц та швидкість запису 15 МГц, що забезпечує ефективну обробку та доступ до даних. Інтерфейси SPI та I2C розширюють можливості зв'язку з іншими пристроями. Крім того, пам'ять може працювати в широкому діапазоні напруги живлення від 1,65 В до 3,6 В, що робить її гнучким варіантом для різних додатків. Розміщена у корпусі з 48 контактами SOIC, вона має досить компактні розміри, щоб вміщуватися в різноманітні конструкції пристроїв. Також важливою перевагою є її широкий діапазон робочих температур від -40 до 85 градусів Цельсія, високу надійність та гарантований ресурс запису в 100 000 циклів.

					ПК01.171760.000ПЗ	Арк.
						42
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Logic Block Diagram



Pin Configuration

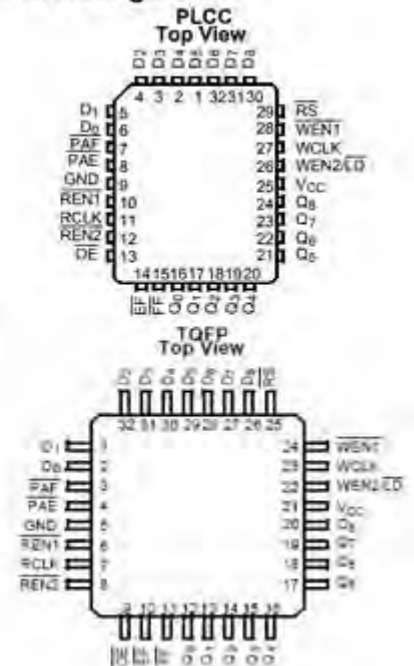


Рис. 17 - схема CY7C4231V-25AXCT

2.3.5 Підбір мікроконтролера

Процесор ESP32-S3 складається з двох ядер Tensilica LX7, які працюють на частоті до 240 МГц. Він має два ядра, одне з яких використовується для розрахунку прийнятого сигналу, а друге - для його візуалізації на дисплеї. Ця архітектура дозволяє ESP32-S3 проводити перевірку сигналу від датчика значно частіше, ніж інші мікроконтролери, забезпечуючи більшу чутливість та точність у вимірюванні та обробці даних. Крім того, наявність окремого ядра ULP допомагає знизити споживання енергії, роблячи ESP32-S3 ефективним для застосувань, де важлива енергоефективність. У сфері пам'яті, ESP32-S3 має 512 КБ вбудованої SRAM і сховище Octal SPI Flash з підтримкою PSRAM. Це дозволяє розширити обсяг доступної пам'яті і зберігати великі обсяги даних. [11]

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

Щодо зв'язку, ESP32-S3 підтримує Wi-Fi 4 (802.11 b/g/n) та Bluetooth з низьким споживанням енергії версії 5.0. Це робить його ідеальним для різних застосувань Інтернету речей, де важлива бездротова комунікація.

ESP32-S3-DevKitC-1

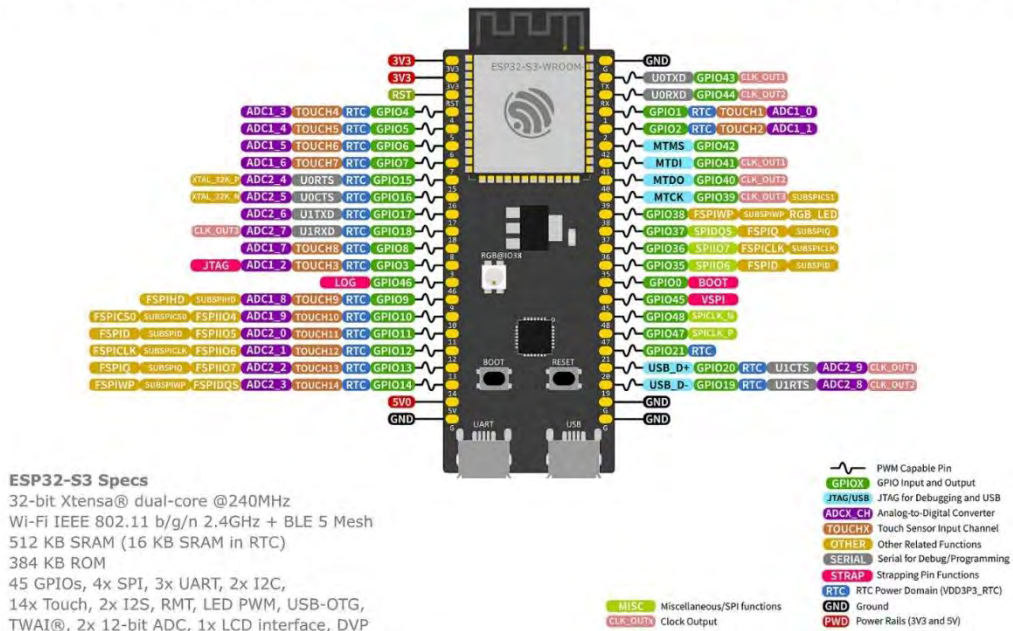


Рис.18 – мікроконтролер ESP32-S3

2.3.6 Підбір перемикача

BU4S66 - це мікросхема з одним контуром двонаправленого аналогового перемикача BU4066B, вбудованого у корпус SMP, розроблена компанією ROHM Semiconductor. Ця мікросхема здатна переносити струм до 66 А та розсіювати потужність до 150 Вт, що робить її ідеальним варіантом для високопотужних застосувань. Управління вмикачем здійснюється шляхом встановлення вхідного сигналу включення (CONT) на рівень "Н" для увімкнення або на рівень "L" для вимкнення.

Додатково, мікросхема має низький опір каналу стоку-витікання (0,016 Ом), що забезпечує ефективну роботу. Також важливою перевагою є надійність - BU4S66 має гарантований ресурс роботи 200 000 циклів перемикачання. Цей

									Арк.
									44
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ПК01.171760.000ПЗ				

компонент доступний за вигідною ціною порівняно з аналогічними пристроями на ринку, що робить його привабливим вибором для різних застосувань. [10]

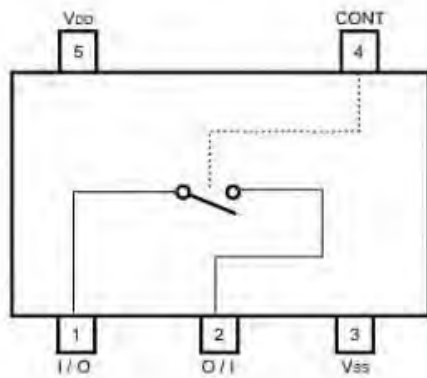


Рис. 19 - схема BU4S66

2.3.7 Підбір клавіатури

Для коректної функціональності перетворювача необхідно мати можливість його налаштування та введення параметрів, тобто, нам потрібен пристрій введення. У даному випадку для цієї мети була використана клавіатура, яка має кнопки TL3305AF260QG та підключена до мікроконтролера [9].

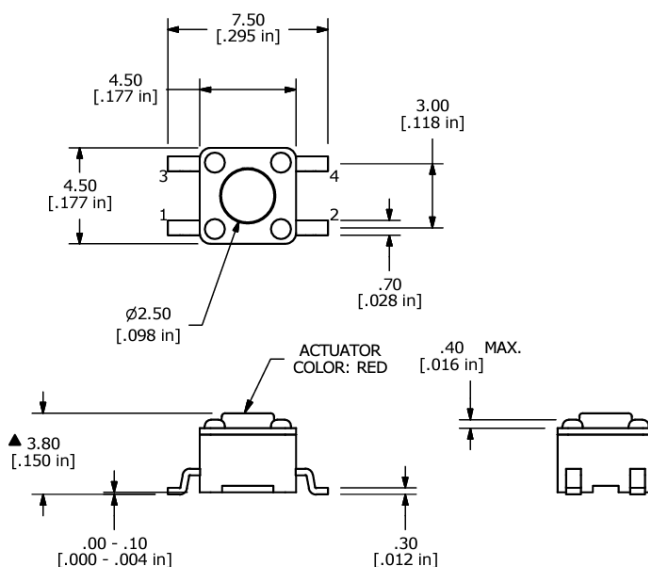


Рис. 20 – схема кнопки TL3305AF260QG

					ПК01.171760.000ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		45

2.3.8 Підбір дисплею

WH1602A - це символно-цифровий рідкокристалічний дисплей з 2 рядками по 16 символів.

Характеристики:

Розмір: 84 x 44 x 13,5 мм

Розмір видимої області: 66 x 16 мм

Розмір символу: 5,56 x 6,5 мм

Кількість символів: 32 (2 рядки по 16)

Підсвічування: LED (зелене або біле)

Інтерфейс: 6800 (ST7066 IC), SPI/I2C (RW1063 IC)

Напруга живлення: 5 В (VCC) та 3 В (VCC)

Діапазон робочих температур: -40°C до +80°C

Споживання струму: 2 мА



Рис.21 дисплей WH1602A

Висновки до 2 розділу

Створення власного ультразвукового товщиноміру: виклик з потенційною вигодою. У цій роботі досліджується процес створення ультразвукового товщиноміру своїми руками. Виявлено, що це складне завдання, яке потребує

					ПК01.171760.000ПЗ	Арк.
						46
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ретельного вивчення багатьох аспектів. Ключові моменти, які слід врахувати при проектуванні товщиноміру:

Точність вимірювань: Товщиномір повинен давати максимально точні результати з мінімальною похибкою.

Частота ультразвуку: Цей параметр визначає глибину проникнення ультразвукових хвиль в матеріал.

Характеристики датчика: Розмір та форма датчика впливають на те, які матеріали можна вимірювати.

Тип матеріалу: Ультразвукові хвилі по-різному поширюються в різних матеріалах, тому товщиномір повинен бути калібрований для конкретного матеріалу.

Вартість: Ціна товщиномірів може суттєво варіюватися, тому важливо вибрати пристрій, який відповідає вашим потребам та бюджету.

Простота використання: Товщиномір повинен бути зручним у використанні, навіть для людей без досвіду роботи з ультразвуком.

Надійність: Пристрій повинен бути стійким до несприятливих умов навколишнього середовища та безперервно працювати протягом тривалого часу.

Окрім цих факторів, важливо врахувати й технічні деталі, такі як:

Діапазон частот фільтра,

Частота дискредитації,

Акустичний такт,

Коефіцієнти акустичного такту,

Неправильний вибір будь-якого з цих параметрів може негативно вплинути на точність, надійність або працездатність товщиноміру.

					ПК01.171760.000ПЗ	Арк.
						47
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВИСНОВКИ

В цій дипломній роботі було проведено аналіз різних методів товщиномірів з метою визначення їх ефективності та застосовності у промислових умовах. Порівняльний аналіз різних методів дозволив виявити, що ультразвукова товщинометрія є універсальним та найбільш ефективним методом порівняно з іншими методами, описаними в роботі. Її висока точність та надійність, а також можливість вимірювання товщини матеріалів різної природи робить її найкращим вибором для вимірювання товщини в широкому спектрі застосувань. Додатково, в цій роботі було розроблено та побудовано власний товщиномір на основі ультразвукової технології, що дозволяє здійснювати точні вимірювання товщини матеріалів з високою ефективністю та низькими витратами. Даний товщиномір є простим у використанні та може бути використаний у різних галузях промисловості для вирішення різноманітних завдань з вимірювання товщини матеріалів.

					ПК01.171760.000ПЗ	Арк.
						48
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Olympus. Thickness Gage Tutorial. – Режим доступу URL: <https://www.olympus-ims.com/en/ndt-theory/thickness-gage/>
- [2] Olympus. Theory and Application of Precision Ultrasonic Thickness Gaging. – Режим доступу URL: <https://www.olympus-ims.com/en/resources/whitepapers/theory-and-application-of-precious-ultrasonic-thickness-gaging/>
- [3] Основи ультразвукового неруйнівного контролю: Підручник / В.К. Цапенко, Ю.В. Куц – К.: НТУУ «КПІ». – 2010. – 448 с.
- [4] Галаган Р. М. Теоретичні основи ультразвукового неруйнівного контролю: підручник / Р. М. Галаган. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 263 с.
- [5] Білокур І. П. Основи дефектоскопії : Підручник. – К.: „Азимут-Україна”, 2004. – 496 с.
- [5] Контроль неруйнівній. Терміни та визначення.: ДСТУ 2865-94.– К., 1994. – 55 с.
- [6] Галаган Р.М. Комп'ютерне проектування електронних схем. Комп'ютерний практикум: навчальний посібник. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. – 419 с.
- [7] Богдан Г.А., Пітух І.О. Ультразвуковий товщиномір із можливістю синхронізації з пристроєм на базі операційної системи “ANDROID”. XVI Всеукраїнська науково-практична конференція студентів, аспірантів та молодих вчених «Погляд у майбутнє приладобудування», 16-17 травня 2023 року, КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ, Україна: збірник праць конференції. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. – С. 299-302.
- [8] Electronic Components Datasheet Search. – Режим доступу URL: <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/619125/DBLECTRO/WH1602A.html>
- [9] Mouser ELECTRONICS. – Режим доступу URL: <https://eu.mouser.com/ProductDetail/E-Switch/TL3305AF260QG?qs=UrFqKgNWc7QGfGfc5KSA7A%3D%3D>

					ПК01.171760.000ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		49

- [10] Electronic Components Datasheet Search. – Режим доступу URL: <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/36360/ROHM/BU4S66.html>
- [11] Electronic Components Datasheet Search. – Режим доступу URL: <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/1642038/ESPRESSIF/ESP32S3.html>
- [12] Electronic Components Datasheet Search. – Режим доступу URL: <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/99324/AD/AD8021.html/>
- [13] Electronic Components Datasheet Search. – Режим доступу URL: <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/543464/TI/ADS7816.html>
- [14] Куц, Ю. В. Новітні системи та технології. Частина I. Загальні питання побудови та опрацювання даних в комп'ютерно-інтегрованих системах НКТД [Електронний ресурс] / Ю. В. Куц, Ю. Ю. Лисенко, А. С. Момот ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 123 с
- [15] Статистичні методи визначення залежностей між випадковими величинами: навчальний посібник / Ю. В. Куц, Ю. Ю. Лисенко; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. – 115 с.
- [63] Єременко В.С. Шляхи мінімізації сумарної похибки вимірювання швидкості ультразвуку в матеріалах з неоднорідною структурою / В.С. Єременко, Р.М. Галаган // Електротехнічні та комп'ютерні системи. Науково-технічний журнал. – Одеса. – 2012. – № 06 (82). – С. 39-45.

					ПК01.171760.000ПЗ	Арк.
						50
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		