

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

**Приладобудівний факультет**

**Кафедра приладів та систем неруйнівного контролю**

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ Протасов А.Г.

«\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

**Дипломний проект**

**на здобуття ступеня бакалавра**

**з напрямку підготовки 6.051003 «Приладобудування»**

**на тему: «Ультразвуковий товщиномір»**

Виконав:

студент ІV курсу, групи ПК-51  
Лагутін Євген Володимирович

\_\_\_\_\_

Керівник:

доцент, к.т.н.  
Баженов В.Г.

\_\_\_\_\_

Консультант з конструкторської частини:

старший викладач, к.т.н.  
Богдан Г.А.

\_\_\_\_\_

Рецензент:

\_\_\_\_\_

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

Студент \_\_\_\_\_

Київ – 2019 року

## ВІДОМІСТЬ ДИПЛОМНОГО ПРОЕКТУ

№ з/п	Формат	Позначення	Найменування	Кількість листів	Примітка
1	A4		Завдання на дипломний проект	2	
2	A4	ПК 51050. 00.000 ПЗ	Пояснювальна записка	66	
3	A3	ПК 51050. 01.000 Е2	Схема електрична структурна	1	
4	A1	ПК 51050. 02.000 Е3	Схема електрична принципова	1	
5	A1	ПК 51050. 03.000 СК	Складальний кресленик	1	
6	A3	ПК 51050. 04.001	Бічна стінка колеса	1	
7	A3	ПК 51050. 05.002	Вал	1	
8	A3	ПК 51050. 06.003	Ручка для колеса	1	

				<b>ДП 510500 00.000.00</b>	
	ПІБ	Підп.	Дата		
Розробн.	Лагутін Є.В.			<b>Відомість дипломного проекту</b>	Лист
Керівн.	Баженов В.Г.				Листів
Консульт.	Богдан Г.А				1
Н/контр.	Лашко О.В.				1
Зав.каф.	Протасов А.Г.				КПІ ім. Ігоря Сікорського Каф. ПСНК Гр. ПК-51

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

**Приладобудівний факультет**

**Кафедра приладів та систем неруйнівного контролю**

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Напрямок підготовки (програма професійного спрямування) – 6.051003  
«Приладобудування»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ Протасов А.Г.

«\_\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

**ЗАВДАННЯ**

**на дипломний проект студенту**

**Лагутін Євген Володимирович**

1. Тема проекту «Ультразвуковий товщиномір», керівник проекту Баженов Віктор Григорович, к.т.н, затверджені наказом по університету від «27» травня 2019 р. № 1384-с

2. Термін подання студентом проекту 10 червня 2019

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

4. Зміст пояснювальної записки

Вступ

1. Аналітичний огляд

2. Вибір та обґрунтування методу контролю

3. Розрахунок

4. Підбір компонентів

5. Список використаних джерел

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

1 – Схема електрична принципова

2 – Схема електрична структурна

4 – Складальний кресленик

5 – Бічна стінка колеса

6 – Вал

7 – Ручка для колеса

6. Консультанти розділів проекту\*

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Конструктська частина	старший викладач Богдан Г.А.		

7. Дата видачі завдання \_\_\_\_\_

#### Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проекту	Термін виконання етапів проекту	Примітка
1	Формулювання завдання проекту	15.03.2019	
2	Проведення аналітичного огляду	13.04.2019	
3	Розрахунок перетворювача	20.04.2019	
4	Підбір та розрахунок компонентів	25.04.2019	
5	Розробка креслеників	02.06.2019	

Студент

Лагутін Є.В.

Керівник проекту

Баженов В.Г.

\_\_\_\_\_

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

Київ – 2019 року

## **Анотація**

Завданням бакалаврського проекту є проектування пристрою для вимірювання товщини ультразвуковим методом. Об'єктом контролю являється корпус судна.

На початку бакалаврської роботи були викладені теоретичні матеріали з основною інформацією про методи, цілі і завдання ультразвукової товщинометрії та областях його застосування.

Основною частиною роботи являється розрахунок ультразвукового тракту перетворювача та додаткових параметрів необхідних для конструювання приладу.

Результати обчислення дали можливість визначитись із структурою схеми та конструкцією перетворювача, а також підібрати необхідні елементи з яких потім був зіставлений прилад.

На фінальному етапі роботи були проведені розрахунки та підбір функціональних вузлів схеми електричної принципової.

Результати проведеної роботи дозволяють сконструювати працездатний прилад для вимірювання товщини, який відповідає поставленому завданню.

## **Summary**

The task of bachelor project is to design a device for measuring thickness by ultrasonic method. The object of control is the ship's hull.

At the beginning of the baccalaureate work theoretical materials with the basic information about methods, goals and tasks of ultrasonic thickness measurement and areas of its application were outlined.

The main part of the work is the calculation of the ultrasonic path of the converter and additional parameters necessary for the design of the device.

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.

At the final stage of work were carried out calculations and selection of functional nodes of the circuit of electric principle.

The results of the work allow us to construct a capable instrument for measuring the thickness, which corresponds to the task.

## **Список умовних позначень**

НК – неруйнівний контроль;

ОК – об'єкт контролю;

ПЕП – п'єзоелектричний перетворювач;

АЦП – аналого-цифровий перетворювач;

УЗК – ультразвуковий контроль;



## Вступ

Ультразвуковий неруйнівний контроль (НК) – є методом визначення товщини, цілісності або інших фізичних властивостей матеріалу за допомогою високочастотних звукових хвиль, який являється широко використовуваним методом неруйнівного контролю для вимірювання товщини матеріалу. Він швидкий, надійний і універсальний, і, на відміну від мікрометра або штангенциркуля, він вимагає доступу лише до однієї сторони об'єкта контролю.

Калібрована точність до  $\pm 2$  мікрометра або  $\pm 0,0001$  дюйма досяжна в деяких застосуваннях.

Перші комерційні ультразвукові датчики, використовуючи принципи, отримані з ехолотатора, були введені в кінці 1940-х років. Невеликі портативні прилади, оптимізовані для широкого спектру завдань в залежності від загрузених тестових програм, стали поширеними в 1970-х роках. Сучасні досягнення в області мікропроцесорних технологій призвели до нових рівнів продуктивності в сучасних і простих у використанні портативних інструментах.

									ПК51.050.000.000	Арк. А
Змн.З	Арк.А	№ докум.№	ПідписПід	Дата						7

## РОЗДІЛ 1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД

### 1.1. Області застосування

Практично будь-який розповсюджений інженерний матеріал може бути контрольований за допомогою ультразвука. Ультразвукові товщиноміри можуть бути встановлені для металів, пластмас, композитів, скловолокна, кераміки та скла. Часто можливі оперативні або виробничі вимірювання екструдованих пластмас і прокату, а також вимірювання окремих шарів або покриттів у багат шарових виробках. Рівні рідини і біологічні зразки також можуть бути виміряні. Ультразвуковий контроль завжди повністю неруйнівний, без необхідності різання або секціонування.

Матеріали, які зазвичай не підходять для звичайного ультразвукового контролю через їх погану передачу високочастотних звукових хвиль, включають деревину, папір, бетон і піну.

#### 1.1.1. Прецизійна ультразвукова товщинометрія – метали

Ультразвукові товщиноміри можуть використовуватися для вимірювання широкого розмаїття кованих, прокатних, механічно оброблених, литих або екструдованих металевих виробів в діапазоні товщин від приблизно 0,2 мм (0,008 ") до 500 мм (20") в залежності від структури зерна.

Типи металевих виробів, що контролюються:

					ПК51.050.000.000	Арк. А
						8
Змн.З	Арк. А	№ докум. №	Підпис/Під	Дата		

- Труби і резервуари. Контроль корозії металевих труб і резервуарів, але також можливо точне вимірювання товщини в процесі виробництва.

- Листи і рулони. Металевий лист і рулон зазвичай можна вимірювати з дуже високою точністю в будь-якій точці, де є доступ з одного боку. Ультразвуковий контроль особливо корисний у разі широких виробів, які не можуть бути легко виміряні механічними датчиками, крім як по краях.

-Автомобільний листовий метал. Складна форма і великий розмір багатьох автомобільних листових металоконструкцій можуть ускладнити механічні вимірювання, але ультразвуковий контроль може бути виконаний в будь-якій точці, де є доступ до однієї сторони, включаючи вимір ступеня зниження на вигинах.

- Трубка малого діаметра. Товщину стінки і концентричність прецизійних металевих трубок діаметром до 2 мм або 0,080 "можна виміряти за допомогою сфокусованих перетворювачів.

- Свердління – занос свердла під час операції свердління може привести до появи зміщення положення отворів. Ультразвуковий датчик може визначати і вимірювати глибину отворів від зовнішньої поверхні в будь-якій точці по довжині деталі.

- Відливки. Товщина стінок порожнистих чорних і кольорових відливок може бути виміряна ультразвуком, навіть якщо вони мають складну форму, наприклад, блоки двигуна.

- Турбінні лопатки. Товщина стінок порожнистих турбінних лопаток для авіаційних двигунів і аналогічних критичних областей застосування може бути виміряна за допомогою невеликих сфокусованих перетворювачів, як для виявлення зміщення активної зони в процесі виробництва, так і для вимірювання зносу в процесі експлуатації.

					ПК51.050.000.000	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		9

- Оброблені деталі – під час операцій обробки може знадобитися перевірка товщини стінок деталей, щоб переконатися, що вони відповідають технічним умовам. Ультразвукові датчики зазвичай можуть виконувати цей вимір, коли внутрішня поверхня деталі важкодоступна або недоступна.

### 1.1.2. Ультразвукова товщинометрія – корозія

Майже все, що зроблено зі звичайних конструкційних металів, може бути схильне до корозії. Особливо важливою проблемою, з якою стикаються багато галузей промисловості, є вимір залишкової товщини стінок в трубах, трубах або резервуарах, які можуть піддаватися корозії на внутрішній поверхні. Така корозія часто не виявляється візуальним оглядом без розрізання або розбирання труби або резервуара. Балки з конструкційної сталі, зокрема опори моста і сталеві опори, також схильні до корозії, яка зменшує початкову товщину металу. Якщо не виявлено протягом певного періоду часу, корозія послабить стіни і може привести до небезпечних руйнувань конструкцій. Як з міркувань безпеки, так і з економічних міркувань потрібно, щоб металеві труби, резервуари або конструкції, схильні до корозії, регулярно оглядалися. Ультразвуковий контроль є широко поширеним неруйнівним методом для проведення цієї перевірки, а ультразвуковий контроль корозійного металу зазвичай проводиться за допомогою двоелементних перетворювачів і спеціальних корозійних датчиків.

Контроль товщини роздільно-суміщеним перетворювачем нерівних поверхонь, які часто зустрічаються в корозійних ситуаціях, дають подвійну перевагу перед одноелементними перетворювачами. Двоелементні перетворювачі містять окремі передавальні і приймальні елементи, встановлені на лініях затримки, які зазвичай зрізаються під кутом до горизонтальної площини (кут нахилу), так що шляхи передавального і приймального променя перетинаються під поверхнею об'єкта контролю. Ця подвійна конструкція з призми забезпечує псевдофокусуючий ефект, який зміщує мертву зону і оптимізує вимір мінімальної товщини стінок при корозії. Подвійні датчики є

					ПК51.050.000.000	Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

більш чутливими, ніж одноелементні перетворювачі, до луна-сигналів від основи корозійних ямок, які представляють собою мінімальну залишкоу товщину стінки. Крім того, подвійні перетворювачі часто можуть використовуватися більш ефективно на шорсткуватих зовнішніх поверхнях. Контактна рідина, що застрягла в комірках на шорсткуватих поверхнях входу звуку, може створювати довгі, луна-сигнали, які заважають роздільній здатності тонкого матеріалу одноелементних перетворювачів. З подвійним перетворювачем, елемент приймача навряд чи вловить це помилкове відлуння. Нарешті, більшість роздільно-суміщених перетворювачів можуть проводити вимірювання при високій температурі, які можуть пошкодити одноелементні контактні перетворювачі.

Всі датчики, призначені для корозії, вимірюватимуть інтервал часу проходження в пряму і зворотню сторону до першого луна-сигналу відбивача. Сучасні прилади можуть також вимірювати інтервал між послідовними множинними луна-сигналами. Цей метод може бути дуже корисний для вимірювання товщини металу тільки в ситуаціях, пов'язаних з товстою фарбою або подібними покриттями, проте вимір луна-луна може бути менш ефективним при виявленні точкової корозії і вимірі істинної мінімальної товщини стінок труби або резервуара.

### 1.1.3. Вимірювання товщини пластика, скловолокна та композитів

Оскільки використання неметалевих конструкційних матеріалів у виробництві зросла, зросла необхідність вимірювання товщини їх стінок для контролю якості. Всі звичайні пластмаси, скловолокно та композити можуть бути виміряні ультразвуком з доступом тільки до однієї сторони.

Вироби з металів що контролюються:

					ПК51.050.000.000	Арк.
						11
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

-Пляшки і контейнери. Виробникам пляшок і контейнерів, виготовлених методом видувного і ротаційного формування, необхідно перевірити товщину стінок, яка зазвичай недоступна для мікрометрів. Ультразвуковий контроль не вимагає різання.

-Пластмасова труба – для забезпечення концентричності можна виконувати вимірювання товщини стінки пластикової труби як в режимі онлайн, так і в автономному режимі.

-Пластикові трубки – за допомогою сфокусованих перетворювачів можна вимірювати невеликі трубки діаметром до 2 мм або 0,080 дюйма, включаючи катетери та інші, включаючи медичні трубки.

-Оболонка кабелю і ізоляція проводу – можна виміряти товщину пластмасової ізоляції на великих і малих електричних і оптоволоконних кабелях, щоб забезпечити концентричність і відповідність специфікаціям мінімальної товщини.

-Пластикові заготовки. Як структурний пластик, так і бар'єрні шари можна виміряти на етапі підготовки заготовки, щоб забезпечити належну товщину кінцевого продукту.

-Багатошарові контейнери і резервуари. Аналогічно, у багатьох випадках ультразвукові датчики можуть вимірювати газовий бар'єр і інші товщини шарів в багатошарових пляшках, харчових контейнерах, паливних баках і аналогічних продуктах.

-Склопластикові труби і резервуари. Ці продукти можна вимірювати як при виготовленні, так і після монтажу, щоб перевірити товщину стінок і виявити розшарування.

-Човни з скловолна. Виробники човнів і морські геодезисти можуть вимірювати товщину корпусу, використовуючи, при необхідності, великі глибини проникнення для великих човнів.

					ПК51.050.000.000	Арк.
						12
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

-Композитні конструкції. Аерокосмічні композити в формі панелей крил і корпусів, обтікачів і аналогічних елементів можуть бути виміряні по товщині і проконтрольовані на розшарування за допомогою простих ультразвукових датчиків.

#### 1.1.4. Інші матеріали

На додаток до вимірювання звичайних металів і пластиків, ультразвукові датчики можуть використовуватися в широкому спектрі інших застосувань, тільки деякі з яких перераховані тут:

-Гумові вироби – шумопоглинання в гумі, як правило, високе в порівнянні з іншими матеріалами, але товщина зазвичай може вимірюватися за допомогою перетворювачів з високопроникаючою здатністю. Загальні області застосування включають товщину стінки гумових труб, загальну товщину і глибину армування в гумових конвеєрних стрічках і товщину протектора в шинах.

-Кераміка. Більшість структурних і електронних виробів з кераміки добре підходять для ультразвукового контролю, включаючи керамічні трубки, контейнери, лопатки і клапани турбін і керамічні покриття. Ультразвукові датчики також можуть бути використані для контролю вимірювання модуля пружності за допомогою вимірювання швидкості звуку.

-Скляний посуд. Скло, як правило, має високу проникаючу здатність для звукових хвиль, і можна вимірювати скляні контейнери, скляні трубки малого діаметра, науковий скляний посуд, лампочки, скляні покриття і аналогічні продукти.

-Рівень рідини. Ультразвукові датчики можуть часто вимірювати висоту або глибину рідини всередині герметичних ємностей, а також в ситуаціях, коли традиційні методи, такі як щупи або калібрувальні поплавці, не можуть бути використані.

-М'які контактні лінзи. Можна вимірювати товщину м'яких контактних лінз за допомогою ультразвуку, які важко виміряти механічно, не спотворюючи

					ПК51.050.000.000	Арк.
						13
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

їх форму, а також розрахувати базову криву по ультразвуковому вимірюванню сагітальної висоти.

-Зразки воску. Можна виміряти товщину воскових малюнків, які використовуються для створення прес-форм для лопаток турбін і аналогічних прецизійних виробів в процесі лиття по виплавлених восках, включаючи товщину воску над керамічними сердечниками.

-Біологічні зразки. Товщина м'яких тканин, таких як шкіра, м'язи, жир і стінки кровоносних судин, часто може бути виміряна в біомедичних дослідженнях.

## 1.2. Теоретичні відомості

Звукова енергія може генеруватися в широкому частотному спектрі. Чутний звук відтворюється у відносно низькочастотному діапазоні з верхньою межею близько двадцяти тисяч циклів в секунду або 20 кілогерц (кГц). Чим вище частота, тим вище крок, який ми сприймаємо. Ультразвук - це звукова енергія на більш високих частотах, що виходить за межі людського слуху. Більшість ультразвукового контролю виконується в діапазоні частот від 500 кГц до 20 мегагерц (МГц, що відповідає мільйону циклів в секунду), хоча деякі спеціалізовані прилади знижують частоту до 50 кГц або нижче, а деякі підвищують і досягають 100 МГц. Незалежно від частоти, звукова енергія складається з послідовності організованих механічних коливань, що поширюються в середовищі, такий як повітря або сталь, в відповідності з основними законами хвильової фізики [1].

Ультразвукові товщиноміри вимірюють товщину з великою точністю, вимірюючи, скільки часу потрібно звуковому імпульсу, що генерується маленьким датчиком, званим ультразвуковим перетворювачем, для проходження через об'єкт контролю і відбиття від внутрішньої поверхні або дальньої стіни. Оскільки звукові хвилі відбиваються від кордонів між

					ПК51.050.000.000	Арк.
						14
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



неоднорідними матеріалами, цей вимір зазвичай виконується з одного боку в режимі «луна / імпульс», як показано на рис. 1.

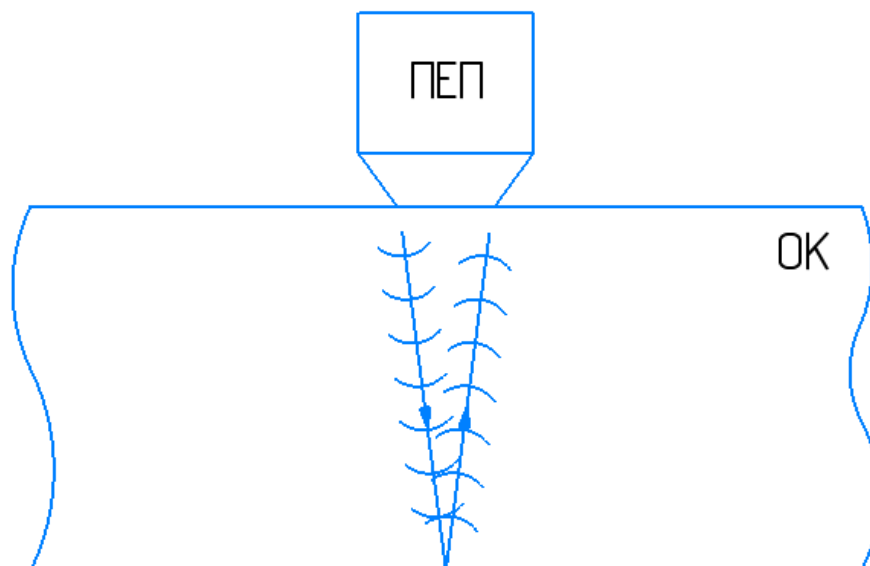


Рис. 1 – Імпульс звукової хвилі випромінюється з перетворювача, відбивається від акустичної межі і надходить на датчик.

Комерційні ультразвукові товщиноміри зазвичай діляться на два типи: корозійні і прецизійні. Корозійні датчики спеціально призначені для вимірювання залишкової товщини стінок металевих труб, резервуарів, конструктивних елементів і судин під тиском, які схильні до внутрішньої корозії, яку не видно зовні. Вони використовують методи обробки сигналів, оптимізовані для визначення мінімальної залишкової товщини в шорсткому, корозійному контрольованому об'єкті, і для цієї мети використовують спеціалізовані двоелементні перетворювачі. Прецизійні датчики використовують одноелементні перетворювачі і рекомендуються для всіх інших застосувань (включаючи гладкий метал). Завдяки наявності безлічі різних типів датчиків прецизійні вимірювачі надзвичайно універсальні і можуть вимірювати з більшою точністю, ніж датчики корозії [1].

									ПК51.050.000.000	Арк.
										15
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата						

### 1.2.1. Ультразвукові перетворювачі

Перетворювач містить п'єзоелектричний елемент, який збуджується коротким електричним імпульсом для генерації ультразвукових хвиль. Звукові хвилі контактують з контрольованим матеріалом і проходять через нього, поки не зустрінуть донну поверхню або інший кордон. Потім відбитий імпульс повертаються назад до перетворювача, який перетворює звукову енергію назад в електричну енергію. По суті, датчик прослуховує відлуння з протилежного боку. Зазвичай цей часовий інтервал становить всього кілька мільйонних часток секунди.

За призначенням перетворювачі ділять на нормальні (прямі), що слугують для генерації поздовжніх хвиль і похилі (призматичні), які використовуються для збудження нормальних, поперечних і поверхневих хвиль. За функціональними ознаками перетворювачі поділяють на роздільні, суміщені і роздільно-суміщені. Роздільні перетворювачі в процесі контролю виконують функції або випромінювача, або приймача і їх включають по роздільній схемі (п'єзоелемент підключений або до генератора, або до підсилювача). Суміщені перетворювачі включають за суміщеною схемою (п'єзоелемент з'єднаний одночасно з генератором і підсилювачем) і вони виконують по черзі функції то випромінювача, то приймача. Роздільно-суміщені перетворювачі містять два п'єзоелемента, включених роздільно, але конструктивно об'єднаних в одному корпусі. Схеми типових перетворювачів, які отримали застосування для цілей ультразвукової товщинометрії наведені на рис. 2. Всі перетворювачі мають наступні основні елементи: п'єзоелемент, корпус, демпфер, що слугує для

					ПК51.050.000.000	Арк.
						16
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

гасіння вільних коливань п'єзопластини і отримання коротких імпульсів, протектор, що захищає п'єзоелемент від зносу.

## Прямий перетворювач

Прямий перетворювач призначений для роботи з поєднаною схемою. П'єзопластини в таких перетворювачах зазвичай виготовляють з ЦТС, також використовують кераміку ПКР і метаніобат свинцю. Товщину п'єзопластини роблять рівній половині довжини хвилі. Для ЦТС на частотах 1 ... 10 МГц вона дорівнює 0,16 ... 1,6 мм. П'єзопластини ПЕП роблять зазвичай круглої форми. Розміри вибирають з урахуванням поля випромінювання-прийому. Збільшення діаметра звужує діаграму направленості в дальній зоні, але в той же час збільшує протяжність ближньої зони, де оцінка розмірів і розташування дефектів ускладнюється наявністю максимумів і мінімумів сигналу. Доцільно застосовувати пластини малого розміру для контролю тонких виробів і великого – для контролю виробів значно товщини.

Прямі перетворювачі із затримкою забезпечують універсальність завдяки безлічі змінних опцій. Знімна лінія затримки, мембрана, відповідна поверхні, і захисна кришка можуть зробити один перетворювач ефективним для широкого спектра застосувань. Як випливає з назви, основна функція лінійного перетворювача затримки полягає у введенні тимчасової затримки між генерацією звукової хвилі і приходом будь-яких відбитих хвиль. Це дозволяє перетворювачу завершити свою функцію «відправки» до того, як він почне свою функцію «прослуховування», так що роздільна здатність на поверхні буде покращена. Вони призначені для використання в таких областях, як високоточні вимірювання товщини тонких матеріалів і перевірки розшарування в композитних матеріалах. Вони також корисні в високотемпературних

									Арк.
									17
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					

ПК51.050.000.000

вимірах, оскільки лінія затримки забезпечує деяку ізоляцію п'єзоелектричного елемента від нагрівання[2].

### Роздільно-суміщений перетворювач

В роздільно-суміщеному перетворювачі для попередження прямої передачі сигналів від випромінювача до приймача є акустичний екран. При роботі з таким перетворювачем, змінюючи кути призми (від 0 до 10 °), висоту і відстань між ними, змінюють мінімальну і максимальну глибину прозвучування об'єкта контролю. Також конструкція роздільно-суміщеного перетворювача має на увазі використання призми, яка є для введення пружних хвиль під кутом до об'єкта контролю [2].

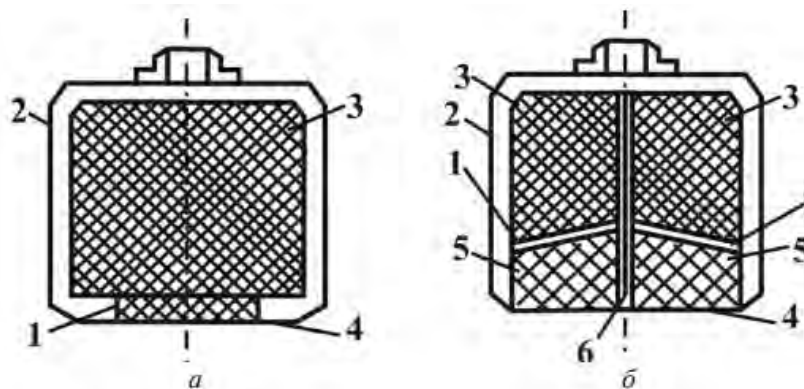


Рис. 2 – Конструкції ультразвукових перетворювачів:

(а) – прямий перетворювач; (б) – роздільно-суміщений перетворювач;

1 – п'єзoeлемент; 2 - корпус; 3 - демпфер; 4 - протектор; 5 - призма; 6 - акустичний екран

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ПК51.050.000.000

Арк.

18

Роздільно-суміщені перетворювачі відрізняються мінімальним рівнем власних шумів, дуже малою мертвою зоною, високою чутливістю. З їх допомогою можна досягти вирівнювання чутливості до дефектів, розташованих на різній глибині.

### Похилий перетворювач

Похилі перетворювачі і зазвичай використовуються для введення заломленої поперечної хвилі в об'єкт контролю. Перетворювачі можуть бути виготовлені з різними фіксованими кутами або мати регулювання кутів, де користувач визначає кути падіння і заломлення. У версіях з фіксованим кутом кут заломлення, зазначений на датчику, є точним лише для конкретного матеріалу, який зазвичай є сталлю. Кутівий шлях проходження звуку дозволяє відображати звуковий промінь від задньої стінки, щоб поліпшити виявлення дефектів в зварних зонах і навколо них. Вони також використовуються для генерації поверхневих хвиль для використання при виявленні дефектів на поверхні компонента.

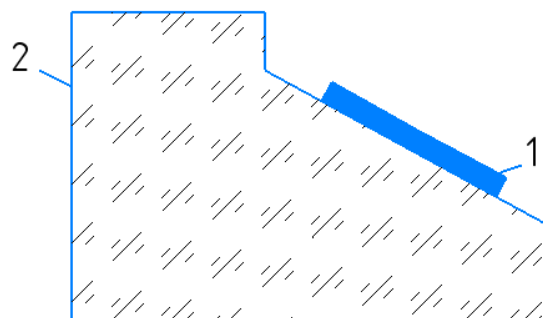


Рис. 3. Спрощена конструкція кутового перетворювача:

1 – п'єзоелектричний перетворювач; 2 – призма для введення  
ультразвуку в ОК під кутом

Зазвичай призми виготовляють з оргскла. Пластини розташовуються під невеликим кутом  $4...5^\circ$ . Між пластинами розміщується звукопоглинаючий екран. Кути нахилу призм, відстань між пластинами підбирається так, щоб забезпечити виявлення дефектів в заданому діапазоні товщин. Максимум випромінювання знаходиться декілька вище точки перетину акустичних осей через затухання та розходження [2].

### 1.3. Методи ультразвукової товщинометрії

Акустичними методами називають методи контролю, засновані на зміні пружних коливань і хвиль в контрольованому об'єкті.

Акустичні методи ділять на дві великі групи:

Активні - використовують випромінювання і прийом акустичних коливань.

Пасивні - засновані тільки на прийомі коливань.

До активних методів відносять методи, засновані на проходженні і відбиванні УЗК.

#### Режими виміру і вибір датчика для точного вимірювання

Якщо ми класифікуємо методи вимірювання за вибором луна-сигналів, що використовуються при вимірюванні часу проходження, ми виявимо, що знову є три основних класифікації або режиму [3]:

					ПК51.050.000.000	Арк.
						20
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Режим 1 – В режимі 1 вимірювання проводиться між імпульсом збудження і першим луна-сигналом задньої стінки від контрольованого об'єкта, використовуючи датчики контактного типу. Це режим загального призначення, який зазвичай рекомендується використовувати, якщо не присутня одна з умов, описаних в режимах 2 або 3.

Режим 2 – В режимі 2 вимір виконується між луна-сигналом збудження, що представляє ближню поверхню контрольованого об'єкта, і першим луна-сигналом задньої стінки з використанням лінії затримки або імерсійних перетворювачів. У пластмасах режим 2 може поліпшити роздільну здатність по мінімальній товщині в порівнянні з режимом 1. Він також використовується для вимірювань на гострих увігнутих або опуклих радіусах або в замкнутих просторах з лінією затримки або імерсійними датчиками, для оперативного вимірювання рухомого матеріалу за допомогою імерсійних датчиків і для високотемпературних вимірювань.

Режим 3 – В режимі 3 вимірювання проводиться між двома послідовними луна-сигналами задньої стінки з використанням лінії затримки або імерсійних перетворювачів. Його можна використовувати тільки тоді, коли з'являються чисті множинні луна-сигнали задньої стінки, що зазвичай обмежує його використання матеріалами з відносно низьким загасанням і високим акустичним імпедансом, такими як дрібнозернисті метали, скло та кераміка. Режим 3 зазвичай пропонує найвищу точність вимірювання і найкращу мінімальну роздільну здатність по товщині за рахунок проникаючої здатності, і він зазвичай використовується, коли вимоги до точності і / або роздільної здатності не можуть бути виконані в режимі 1 або 2.

					<i>ПК51.050.000.000</i>	Арк.
						21
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

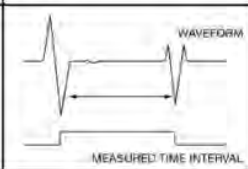
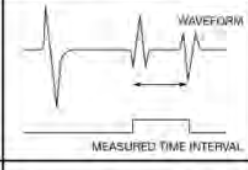
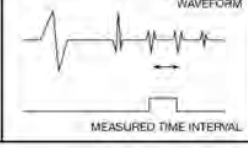
MODE	Форма сигналу	Типи перетворювачів	Приблизний діапазон вимірювання товщини	Орієнтовні межі точності
1		Прямий контакт	$\approx 0.3 \text{ mm to } \approx 635 \text{ mm}$ $\approx 0.012 \text{ in. to } \approx 25 \text{ in.}$	$\pm 0.1 \text{ mm}$ $\pm .001 \text{ in.}$
2		З лінією затримки	$\approx 0.5 \text{ mm to } \approx 50 \text{ mm}$ $\approx 0.02 \text{ in. to } \approx 2 \text{ in.}$	$\pm 0.1 \text{ mm}$ $\pm .001 \text{ in.}$
3		Імерсійний	$\approx 0.2 \text{ mm to } \approx 12.5 \text{ mm}$ $\approx 0.008 \text{ in. to } \approx 0.5 \text{ in.}$	$\pm .004 \text{ mm}$ $\pm .0002 \text{ in.}$

Рис. 4 – Прецизійні методи ультразвукового контролю класифікуються за допомогою луно-сигналів, що використовуються для проведення контролю.

Перетворювачі, що використовуються в точному товщиномірі, зазвичай представляють собою ширококугові одноелементні конструкції. Додатковим поширеним типом перетворювача є подвійний елемент, який зазвичай використовується для корозійного контролю, а не для точних вимірювань. Як випливає з їх назви, в двоелементних перетворювачах використовується пара окремих п'єзоелектричних елементів, один для передачі і один для прийому, пов'язаних з окремими лініями затримки. Вимірювання товщини проводиться в модифікованому способі режиму 1, зчитуючи перший луно-сигнал задньої стінки і віднімаючи нульовий зсув, рівний часу проходження через затримки. Двоелементні перетворювачі, як правило, міцні і здатні витримувати вплив високих температур і дуже чутливі до виявлення точкової корозії або інших локалізованих умов занурення.



### 1.3.1. Луно-імпульсний метод.

Високоякісний генератор виробляє короточасні імпульси (або з високочастотним заповненням - радіоімпульси, або просто короткі імпульси). Відправлений випромінювачем імпульс, відбившись, повертається назад до перетворювача, який працює в цей час на прийом (рис. 5).

З перетворювача сигнал надходить на підсилювач, а потім, на індикатор (рис. 6). Луна-метод дозволяє контролювати вироби при односторонньому доступі до них. Це особливо важливо при контролі виробів, в яких відсутній двосторонній доступ. Крім того, чутливість луна-методом значно вище тіньового. У луна-методі відображення навіть 1% енергії дуже добре не лише виявляється, а й вимірюється. Крім того, луна-метод дозволяє визначити, на якій глибині знаходиться дефект. Якщо часова відстань між зондуючим і відбитим від протилежної поверхні деталі (донний імпульс) прийняти за розмір деталі, то час між посланим імпульсом і моментом приходу відбитого від дефекту імпульсу дає глибину залягання дефекту [1].

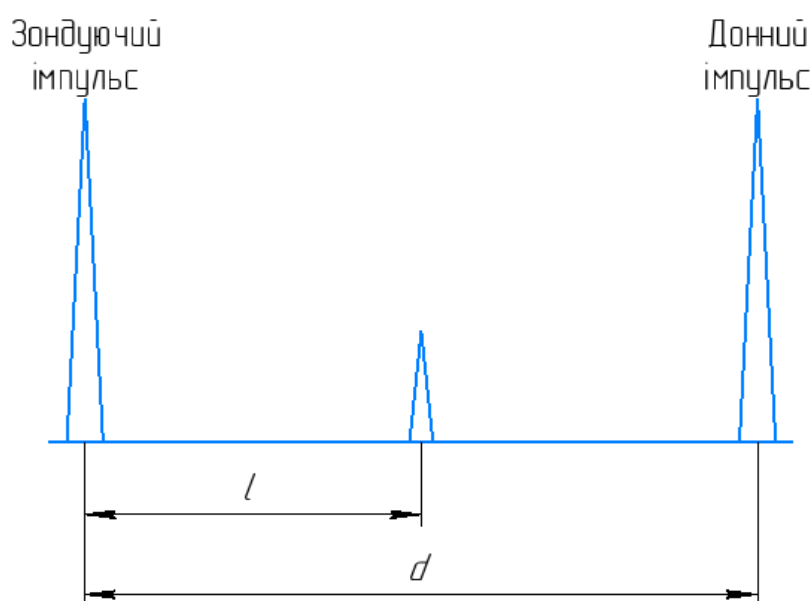


Рис. 5 – Сигнали луно-імпульсного методу

					ПК51.050.000.000	Арк.
						23
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

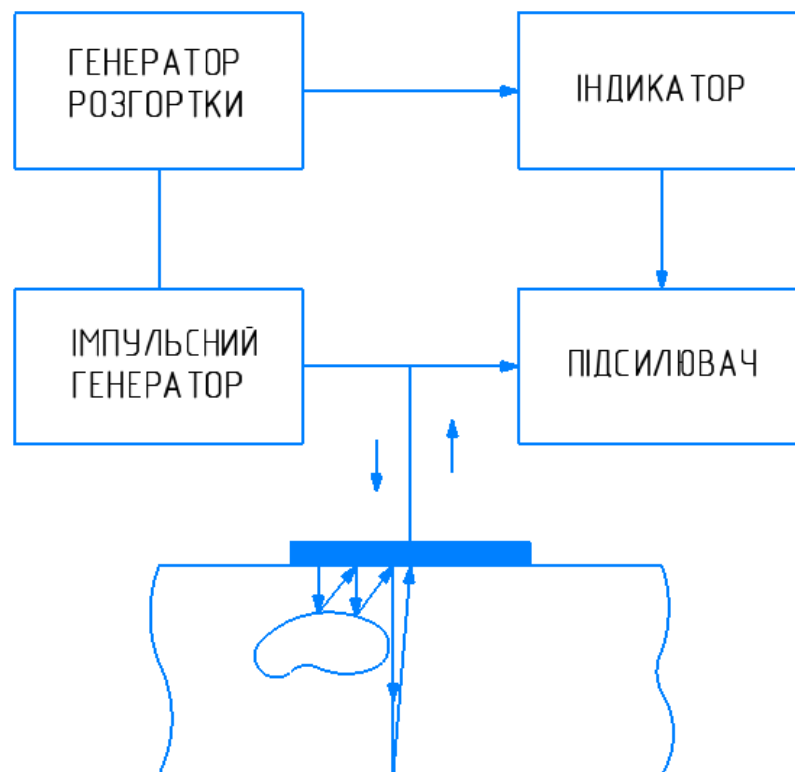


Рис. 6 – Схема луно-імпульсного методу

Також, за амплітудою відбитого сигналу можна судити про розміри дефекту, а вивчаючи спектральний склад відбитого імпульсу, можна отримати інформацію про тип і формі дефекту.

Даний метод потребує калібрування. Цей процес виконують по тому ж принципу, що й вимірювання товщини, єдина різниця в тому, що значення товщини вважається відомим, а швидкість поширення звуку в матеріалі – невідомим. Використовуючи відліковий пристрій шляхом регулювання встановлюється відома товщина еталонного зразка, швидкість звуку в цьому зразку дорівнює швидкості звуку в об’єкті контролю.

Головний недолік луно-методу – наявність мертвої зони під датчиком, що не дає можливості застосовувати його для тонких виробів. Наявність мертвої зони пов’язано з тим, що при близько розташованому дефекті в момент приходу луна-сигналу від нього ще триває випромінювання зондуєчого імпульсу. Для

					ПК51.050.000.000	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		24

зменшення мертвої зони підвищують частоту УЗК, що дозволяє зменшити тривалість зондуючого імпульсу.

Тривалість імпульсу визначає і роздільну здатність методу, тобто мінімальна відстань між дефектами по глибині, при якому їх луна-сигнали сприймаються окремо. Очевидно роздільна здатність луна-методу по глибині дорівнює тривалості зондуючого імпульсу. Підвищення частоти з метою збільшення роздільної здатності обмежено зверху тим, що короткі хвилі починають відбиватися від кордонів кристалічних зерен металу, що викликає появу перешкод. Крім того, зі збільшенням частоти зростає загасання УЗК.

Структурна схема товщиноміра, за допомогою якого вимірюють час приходу першого донного сигналу, відображено на рис. 7

Діапазон вимірюваних товщин. Мінімальну товщину виробів, контрольованих луна-методом, визначає мертва зона товщиноміра. Вона аналогічна мертвої зоні дефектоскопа. Для її скорочення в приладах груп 1 і 3 домагаються мінімальної тривалості зондуючого імпульсу, а в приладах групи 2 - застосовують РС перетворювачі. В результаті мертва зона для товщиномірів груп 1 і 3 становить 0,2 .. 0,3 мм, а для товщиномірів групи 2 - 0,5 .. 1,5 мм.

Для вимірювання інших (крім товщини) розмірів виробів ультразвук застосовують в даний час досить рідко, так як тут більш зручними виявляються інші засоби вимірювання, наприклад оптичні. Застосування ультразвуку для вимірювання діаметрів труб раціонально в комплексних установках для ультразвукового контролю труб, що включають також дефектоскоп і товщиномір.

За схемою, показаної на рис. 7, контроль виконують імпульсним луна-методом в локальній імерсійній ванні. Між перетворювачами 1-4 і контрольованою трубою 5 поміщають тонкий екран 6 з вікнами. Вимірюють час приходу сигналів від екрану II до зовнішньої III і внутрішньої IV стінок труби. Оскільки відстань від перетворювача до екрану точно відомо, інтервал

					<i>ПК51.050.000.000</i>	Арк.
						25
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

часу між зондуєчим імпульсом I і луна-сигнали від екрану II служить для коригування швидкості звуку в імерсійній рідині, яка може змінюватися під впливом температури [3].

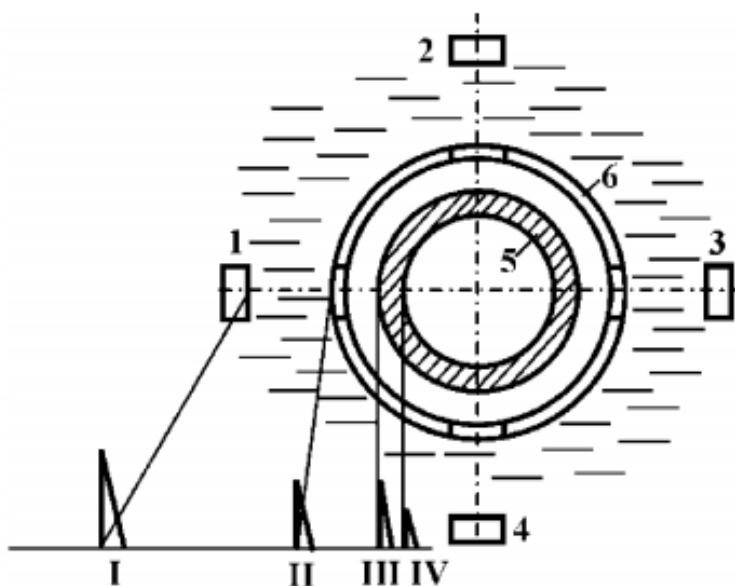


Рис. 7 – Схема вимірювання діаметра і товщини стінки труби

Вимірювання довжини за допомогою ультразвуку доцільно, коли потрібно безперервно вимірювати відстані близько 100 ... 1000 мм. Наприклад, раціонально застосовувати ультразвук для безперервного контролю зносу різця в процесі механічної обробки. Такі вимірювання потрібні при автоматичному обточуванні деталей. Перетворювач приклеюють на плоский торець різця і відстань до ріжучої кромки контролюють за часом приходу ультразвукового імпульсу. Кращі результати дає застосування поперечних хвиль, так як в цьому випадку ускладнена трансформація хвиль і не виникають помилкові сигнали.

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ПК51.050.000.000

Арк.

26

### 1.3.2. Резонансний метод

Резонансний метод заснований на вимірюванні частот і амплітуд ультразвукових коливань, які збуджують резонансні явища в контрольованому об'єкті по його товщині. Резонансні коливання виникають в обмеженій системі при збігу частоти зовнішньої збуджуючої сили з частотою власних коливань виробу. При визначенні резонансної частоти метод дозволяє виміряти товщину виробів (наприклад, стінок резервуарів) в контрольованій зоні, виявити деякі дефекти в цій зоні (наприклад, розшарування), визначити рівень рідини в закритих резервуарах.

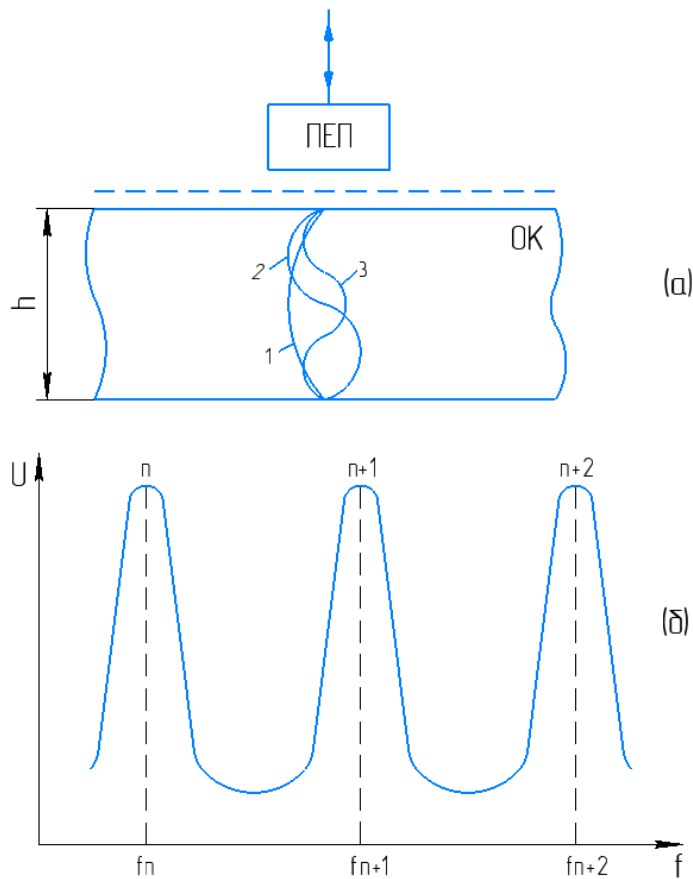


Рис. 8 – Принцип резонансної товщинометрії: формування стоячих хвиль на гармоніках в ОК (а) і відповідні їм резонанси (б): 1,2,3 – перша друга і третя гармоніки

При контролі резонансним методом для збудження перетворювача використовують генератор змінної частоти. На певній частоті в контрольованій деталі виникають стоячі хвилі, тобто настає явище резонансу (виріб буде вібрувати в резонанс з генератором). Це призводить до зростання амплітуди УЗК в деталі, збільшення внаслідок цього споживаної енергії і зменшення вхідного опору навантаження генератора (п'єзоелемента випромінювача). Із зазначеної причини анодний струм генератора різко зростає, що реєструється індикатором. Резонанс при подібному контролі настає в тому випадку, якщо товщина виробу дорівнює цілому числу півхвиль пружної акустичної хвилі. При цьому між товщиною виробу  $h$  і довжиною хвилі  $\lambda_n$  дотримується співвідношення [4]:

$$h = n * \frac{\lambda_n}{2} = n * \frac{C}{2 * f_n} \quad (1.1)$$

де  $n$  - ціле число, яке визначає порядок гармоніки коливання (при резонансі на основній частоті  $n=1$ );  $C$  - швидкість поширення УЗК в матеріалі ;  $f_n$  - частота УЗК.

При складанні двох рівнянь товщини ОК через сусідні гармоніки отримаємо:

$$h = \frac{C}{2 * f_n} * n; \quad h = \frac{C}{(2 * f_{n+1})} * (n + 1) \quad (1.2)$$

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

					<i>ПК51.050.000.000</i>	Арк.
						28
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$h = \frac{c}{2 * \Delta f} \quad (1.3)$$

Визначивши різницю частот коливань двох сусідніх гармонік, при якій настає явище резонансу, і знаючи швидкість поширення УЗК в матеріалі деталі, з наведеного співвідношення обчислюють товщину деталі.

При зміні частоти збудження п'єзоелектричного перетворювача в діапазоні від двох до трьох октав, в такому випадку на даному діапазоні обов'язково виникне не менше 2-х резонансів.

В даний час розроблені системи прямого відліку товщини, що дозволяють обійтися без обчислень, прискорити вимірювання, підвищити їх точність, наприклад прилади типу ТУК-4В. Проводяться дослідження по розробці резонансних товщиномірів, що дозволяють автоматизувати процес вимірювання товщини виробів з записом результатів вимірювань. Інформативним параметром даного методу є різниця між двома частотами сусідніх резонансів  $\Delta f$ .

Недоліком методу є те, що будь-яке високе згасання ультразвуку в матеріалі, шорсткі та неправильні поверхні ОК згладжують різкість резонансу, що призводить до пониження рівня точності контролю.

Задля зниження перешкод, які створює власна резонансна частота п'єзопластини в перетворювачі, використовується діапазон, який перевищує її значення. Випромінювач повинен генерувати на всьому діапазоні частот якомога рівномірніший звуковий тиск, що буде забезпечувати необхідну чутливість. Відповідно до таких вимог необхідно використовувати перетворювачі з помірним згасанням, як і для луно-імпульсного методу.

Як і луно-імпульсний перетворювач, резонансний також потребує калібрування через швидкість звуку в контрольованому матеріалі. Резонансні

					ПК51.050.000.000	Арк.
						29
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

товщиноміри існують з ручним налаштуванням частоти збудження та візуальним відліком резонансної частоти, також є варіант з автоматичним вимірюванням.

### 1.3.3. Безеталонний луноімпульсний метод

Луноімпульсні товщиноміри, що не мають необхідності в калібруванні під час вимірювання товщини об'єктів контролю, виготовлених з різноманітних матеріалів називають безеталонними.

Принцип налаштування безеталонних ультразвукових товщиномірів полягає в тому, що швидкість ультразвуку вимірюється в контрольованому виробі в кожен момент часу. Під час переходу звуку в контрольований матеріал випромінюється одночасно з повздовжньою ще і головна хвиля, яка поширюється вздовж поверхні ОК (рис. 9). Для генерування та детектування цієї хвилі використовується зв'язка з двох окремих перетворювачів. При цьому один, як правило, похилий датчик що приймає поверхневу хвилю, другий – датчик з прямим введенням, який генерує сигнал та приймає повздовжні хвилі.

Оскільки відстань між цими ПЕП відома, то за вимірюваним часом приходу поверхневої хвилі можна визначити її швидкість. Це значення швидкості УЗ використовується для визначення товщини об'єкта контролю, за виміряним третім ПЕП часового інтервалу приходу донного сигналу.

Головна умова, яка необхідна для реалізації цього методу це – наближена рівність швидкостей головної та повздовжньої хвилі в матеріалі, тобто  $C_m \approx C_l$ . Отже для знаходження товщини складається така система рівнянь [4]:

					ПК51.050.000.000	Арк.
						29
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



$$h = \frac{C_l * \tau_1}{2}, a = C_m * \tau_1, C_m \cong C_l \quad (1.4)$$

де  $\tau_1$  і  $\tau_2$  – інтервали часу зондуєчим і донним сигналами при повздовжній хвилі та при головній хвилі.

З результатом розв'язку системи рівнянь впливає така рівність

$$h = \frac{a}{2} * \frac{\tau_1}{\tau_2} \quad (1.5)$$

з чого виходить щоб визначити товщину об'єкта контролю достатньо лише заміряти проміжки часу і зробити операцію ділення.

Також слід підмітити, що, не дивлячись на те, що перший критичний кут є найкращим варіантом для введення головних хвиль в об'єкт контролю, навіть при прямому падінні ультразвукового пучка в об'єкт контролю у матеріалі будуть ефективно збуджувати головні хвилі, але будуть мати значно меншу амплітуду. Даний тип хвиль утворюються на межі пучка повздовжньої хвилі, виникає, так званий, крайовий ефект [4].

					<i>ПК51.050.000.000</i>	Арк.
						30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

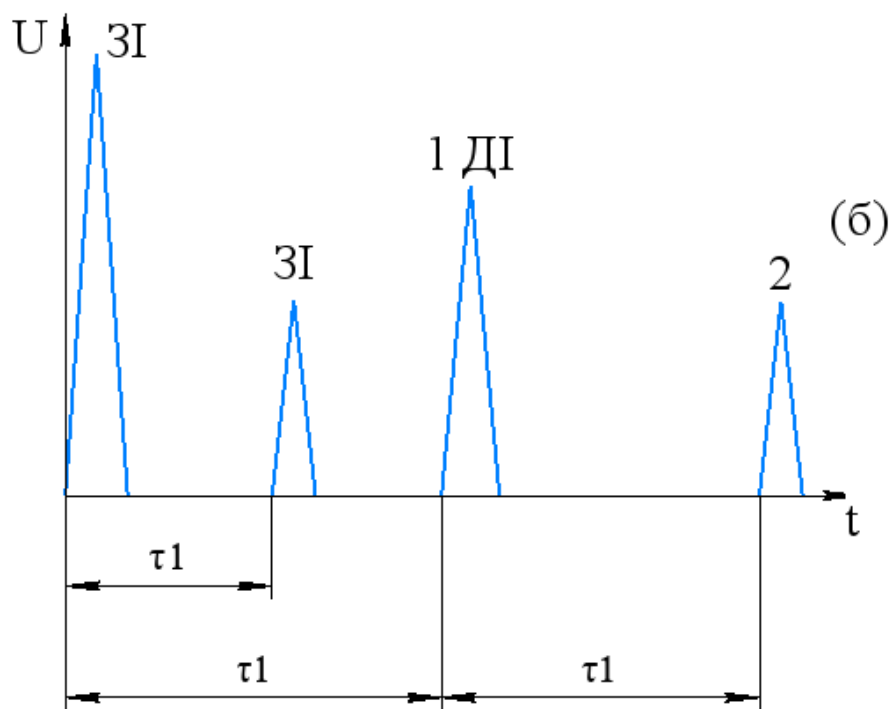
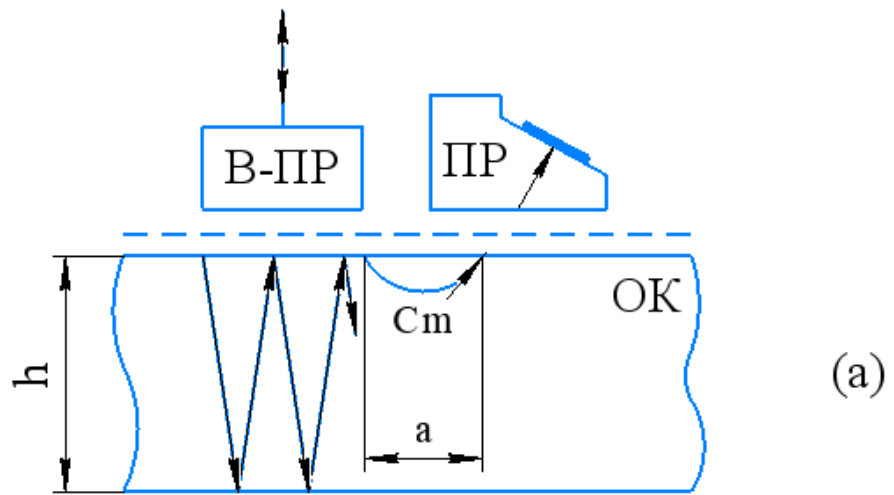


Рис. 9. Безеталонний метод ультразвукової товщинометрії (а) схема роботи методу (б) відображення імпульсів: 1 та 2 – донні сигнали; В-ПР – випромінювач/приймач; ПР – приймач

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

## 1.4. Апаратна реалізація ультразвукової товщинометрії

### 1.4.1. Луноімппульсний товщиномір

Зазвичай в літературі розглядають два методи товщинометрії [3] при ручному виконанні контролю: луноімппульсний і резонансний. Однак з розвитком луноімппульсного методу резонансний виявився неконкурентоспроможним з ним, за діапазоном проникання, вимогам до шорсткості і геометрії поверхонь і іншими параметрами. Внаслідок цього в даний час застосовують тільки луноімппульсний метод. Принцип роботи ультразвукового луноімппульсного товщиноміра з цифровою індикацією, за допомогою якого вимірюють час приходу 1-го донного сигналу, приведено на рис. 10.

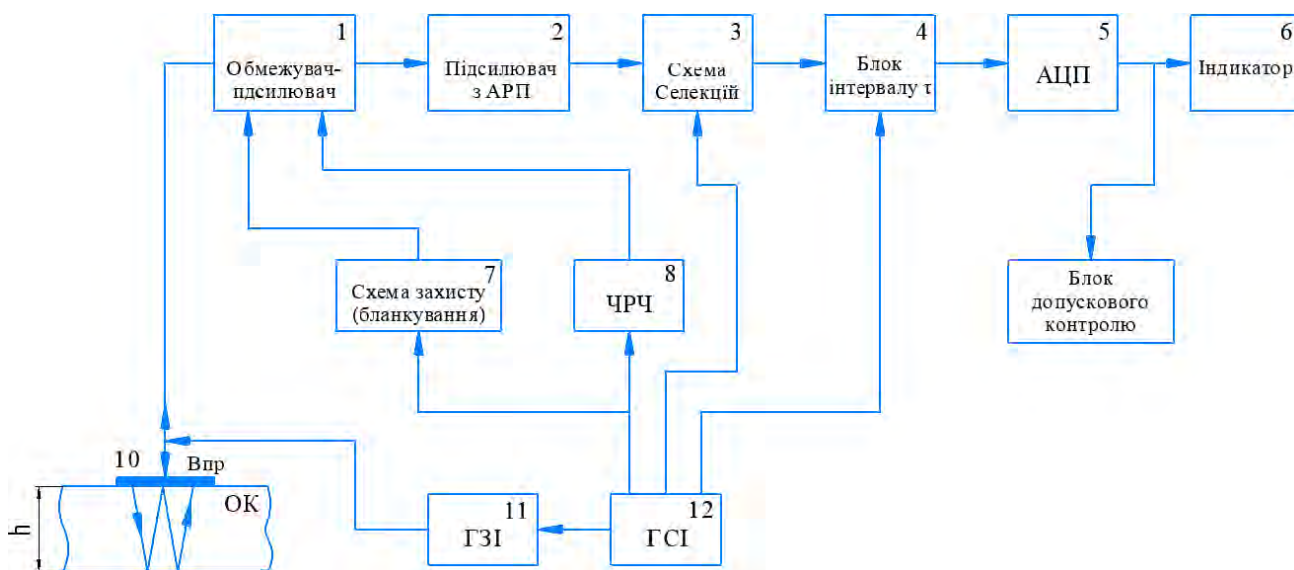


Рис. 10. Функціональна схема ультразвукового луно-імппульсного товщиноміра.

Розгляд роботи основних вузлів схеми:

1 – Підсилювач з високою частотою який має діодний обмежувач на вході і досить низьким вихідним опором;

2 – Підсилювач широкосмуговий з (АРП) автоматичним регулюванням підсилення, що використовується для підвищення амплітуди сигналів відбитих від донної поверхні до стабільного рівня.

3 – блок селекції відповідає за вибір початкового імпульсу, що відбивається від верхньої поверхні об'єкта контролю, а також забезпечує формування кінцевого і початкового (донного) імпульсів, що вимірюються;

4 – блок, що формує вимірювальний інтервал і перетворює його у форму, яка відповідає вимогам АЦП.

5 – блок, що змінює вимірювальний інтервал / його аналог в цифровий код;

6 – блок, який відповідає за індикацію;

7 – схема захисту від завад, що здійснює блокування вхідного підсилювача на момент вимірювального циклу;

8 – часове регулювання чутливості (ЧРЧ), що займається керуванням коефіцієнтом підсилення підсилювача (1) так, щоб була найменша залежність між амплітудою сигналу, відбитого від донної поверхні, та товщини об'єкта контролю;

9 – блок, що відповідає за повідомлення про вихід товщини об'єкта контролю за максимально допустимі межі (опціонально);

10 – контактний або з лінією затримки ультразвуковий перетворювач. Може використовуватись суміщеним або роздільно-суміщеним;

11 – генератор зондуючих імпульсів (ГЗІ), використовується для генерації ультразвукових коливань у ПЕП;

12 – блок генерування синхроімпульсів (ГСІ), який використовується для забезпечення синхронізації роботи вузлів приладу та реалізує імпульсний режим роботи випромінювання-прийому ультразвукових коливань;

						ПК51.050.000.000	Арк.
							33
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			

### 1.4.2. Безеталонний луноімппульсний товщиномір

Суть ідеї (рис. 9) полягає у використанні двох п'єзопретворювачів, установлених на заданій відстані, через що має два електроакустичних тракти для вимірювання часу проходження головної хвилі цієї заданої відстані. Також особливістю схеми є наявність блоку, який формує або напругу, або часовий інтервал, які мають пропорційне значення товщині об'єкта контролю незалежно від швидкості звуку в матеріалі [4].

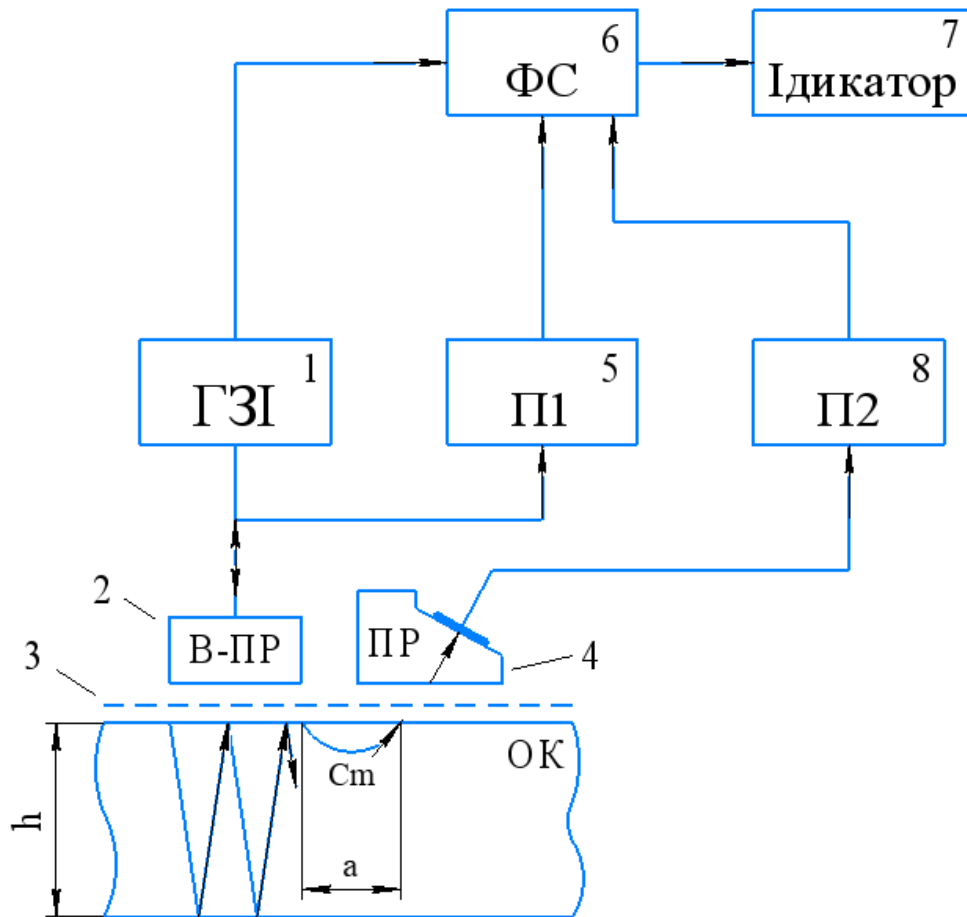


Рис. 11 – Спрощена функціональна схема безеталонного луноімппульсного товщиноміра

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата
------	------	----------	--------	------

Основні вузли схеми:

1 – генератор зонduючих імпульсів;

2 – перетворювач з прямим введенням ультразвукового пучка. Використовується для генерування повздовжньої та головної хвилі і прийому повздовжньої хвилі;

3 – контактна рідна;

4 – перетворювач з введенням ультразвукового пучка під кутом. Слугує приймачем для головної хвилі;

5 і 8 – підсилювачі віддзеркалених сигналів;

6 – схема для формування або напруги, або часового інтервалу, пропорційного товщині об'єкта контролю;

7 – індикатор, що відображає результат вимірювання з блоку 6;

### 1.4.3. Резонансний товщиномір

Резонансну товщинометрію здійснюють, накладаючи приймально-випромінюючий перетворювач на поверхню об'єкта контролю. Змінюючи частоту збудження, домагаються виникнення резонансу і реєструють відповідну йому частоту. Схема представлена на рис. 10.

					ПК51.050.000.000	Арк.
						35
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

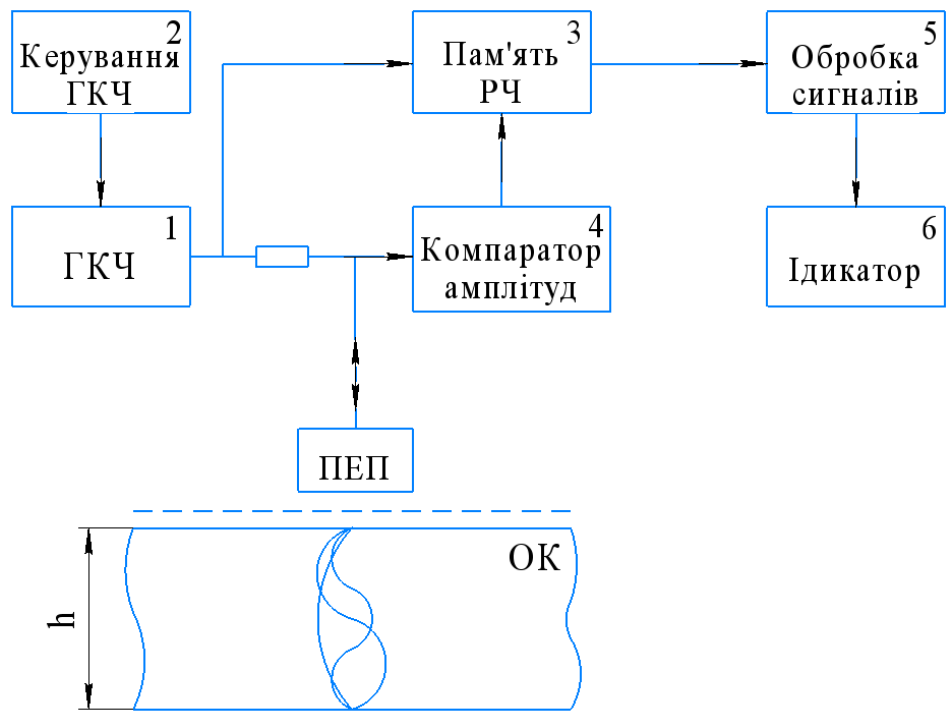


Рис. 12 – Спрощена функціональна схема резонансного товщиноміра

Основні вузли схеми:

- 1 – генератор гармонічного сигналу з керуванням частоти при якому напруга постійна;
- 2 – блок керування ГКЧ, який контролює коливання частоти генератора в межах другої або третьої гармоніки із середньою частотою генератора;
- 3 – блок запису резонансних частот на  $n$  та  $n+1$  гармоніках;
- 4 – блок, який знаходить екстремум АЧХ сигналу ПЕП. Виконується пошук частоти на якій починається резонанс;
- 5 – блок обробки інформації та калібрування товщиноміра на еталонному зразку;
- 6 – індикатор, який відображає інформацію про товщину ОК;

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата
------	------	----------	--------	------

ПК51.050.000.000

Арк.

36

## 1.5. Фактори, що впливають на продуктивність і точність

Вибір відповідного перетворювача для конкретного застосування залежить від діапазону і роздільної здатності необхідного вимірювання товщини, акустичних властивостей контрольованого матеріалу та геометрії деталі. У багатьох випадках це найкраще встановити шляхом експериментів зі стандартами контролю, що представляють бажаний діапазон вимірювань. Як правило, рекомендуються датчики з найвищою частотою і найменшим діаметром, які будуть давати прийнятні результати в необхідному діапазоні. Датчики малого діаметра легше приєднуються до контрольованого матеріалу і дозволяють отримати найтонший шар з'єднання при даному контактному тиску. Крім того, високочастотні перетворювачі генерують луна-сигнали з більш швидким часом наростання і тим самим підвищують точність вимірювань товщини. З іншого боку, для акустичних властивостей або стану поверхні контрольованого матеріалу можуть бути потрібні великі низькочастотні перетворювачі, щоб подолати поганий зв'язок або втрати сигналу через розсіювання або загасання. Вибір оптимального датчика в деяких випадках потребують компромісу проникаючої здатності заради роздільної здатності для тонкого матеріалу або навпаки. У деяких випадках потрібно два або більше перетворювача для повного охоплення необхідного діапазону вимірювань. Існує ряд важливих факторів, які впливають на продуктивність і точність [1].

### 1.5.1. Калібрування

Точність будь-якого ультразвукового вимірювання залежить від точності і ретельності калібрування датчика. Всі ультразвукові датчики проходять калібрування швидкості звуку і зміщення нуля. Важливо, щоб це калібрування проводилось періодично і перевірялось відповідно до інструкцій виробника. Швидкість звуку завжди повинна бути встановлена щодо контрольованого

					ПК51.050.000.000	Арк.
						37
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



матеріалу. Зсув нуля зазвичай залежить від типу перетворювача, довжини кабелю перетворювача та режиму вимірювання.

### 1.5.2. Шорсткість поверхні об'єкта контролю

Найкраща точність вимірювання досягається, коли передня і задня поверхні об'єкта контролю гладкі і паралельні. Якщо поверхня контакту шорстка, мінімальна товщина, яку можна виміряти, може бути збільшена через реверберації звуку в збільшеній товщині шару сполучення. Також можлива неточність, викликана змінами в товщині шару сполучення під перетворювачем. Крім того, якщо будь-яка поверхня об'єкта контролю є шорсткою, зворотний луна-сигнал може бути спотворений через безліч злегка різних шляхів проходження звуку, видимих перетворювачем, і в результаті виникне деяка невизначеність вимірювання.

### 1.5.3. Техніка зв'язку з ОК

В режимі безпосереднього контактного вимірювання в режимі 1 товщина контактної рідини є частиною вимірювання і компенсується частиною каліброваного зміщення нуля. Якщо повинна бути досягнута максимальна точність, техніка з'єднання повинна бути послідовною. Це досягається шляхом використання рідини з відносно низькою в'язкістю, використання тільки достатньої кількості контактної рідини для досягнення нормальних показань і застосування датчика з рівномірним тиском. Невелика практика покаже ступінь тиску від помірного до сильного, яке дає повторювані показання. Як правило, датчики меншого діаметру вимагають меншого зусилля зчеплення, щоб вичавити зайву рідину, ніж датчики більшого діаметра. У всіх режимах нахил

					ПК51.050.000.000	Арк.
						38
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

датчика буде спотворювати відлуння і викликати неточні показання, як зазначено нижче.

#### **1.5.4. Кривизна об'єкта контролю**

З цим пов'язана проблема вирівнювання датчика по відношенню до об'єкта контролю. При вимірюванні на вигнутих поверхнях важливо, щоб перетворювач був розташований приблизно на центральній лінії ОК і як можна ближче до поверхні. У деяких випадках підпружинений тримач може бути корисний для підтримки цього вирівнювання. Як правило, у міру зменшення радіуса кривизни розмір датчика повинен бути зменшений, і стає більш критичним вирівнювання датчика. Для дуже маленьких радіусів, імерсійний підхід буде необхідний. У деяких випадках буде корисно спостерігати за відображенням форми сигналу для допомоги в підтримці оптимального вирівнювання. Часто практика за допомогою дисплея з відображенням форми сигналу дає оператору правильне відчуття найкращого способу утримання перетворювача.

#### **1.6. Вибір та обґрунтування методу контролю**

Будь-яке судно періодично проходять обстеження корпусних конструкцій з метою визначення технічного стану корпусу. При огляді проводять дефектацію корпусних конструкцій, заміри залишкових товщин корпусних конструкцій. В даний час товщину найбільш часто вимірюють за допомогою ультразвукових методів, які забезпечують високу точність, але потребують контактного матеріалу (як правило, рідини або геля), який може бути незручним для використання оскільки корпус судна має багато нерівностей. Ще однією з проблем є складна форма елементів корпусу що робить неможливим

					ПК51.050.000.000	Арк.
						39
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

використання трекерів і потребує ручного контролю. Щоб подолати ці проблеми, існує ряд гумових з'єднувальних матеріалів, щоб забезпечити «сухий» контакт ультразвуку із поверхнею. Крім того, якщо секції, які досліджуються, великі або численні, необхідно, щоб ця оцінка здійснювалася швидко, аби всі області були перевірені в розумний час. Пропонується для швидкого огляду в сухому стані, використання каткового ультразвукового перетворювача. Ці перетворювачі використовують м'яку гумову шину для з'єднання ультразвуку від перетворювача у рухомому пристрої до поверхні що контролюється.

Колісний зонд використовує класичний ультразвуковий перетворювач з прямим введенням, що дозволяє здійснювати акустичний контакт датчика з поверхнею без використання контактної рідини. Зовнішня частина каткового перетворювача обертається, дозволяючи колесу котитися по поверхні, тоді як внутрішня частина збірки утримує ультразвуковий перетворювач при фіксованих кутах відносно поверхні.

Відомий тип колісного зонда [7] використовує полімерний міхур, заповнений рідиною, для оточення вузла перетворювача. Цей міхур зазвичай формується у вигляді невеликої шини, прикріпленої до обертової частини колеса і яка обертається при скануванні колесом по поверхні. Шина може бути виготовлена з поліуретану, силікону або іншого спеціалізованого матеріалу з покращеними ультразвуковими та механічними властивостями. Цей тип колісного зонда можна назвати «зондом, заповненим рідиною».

Також відомий тип колісного зонда [7] використовує твердий ротор, який обертається навколо внутрішнього статора (тобто осьового вузла), який не обертається. Статор утримує перетворювач у фіксованому положенні. Ротор може бути виготовлений з матеріалу з відносно низьким ультразвуковим загасанням, таким як акриловий пластик і покритий тонким сумісним матеріалом, таким як поліуретан або силікон. Проте деякі «тверді» зонди використовують жорсткий контакт з досліджуваною поверхнею. Цей тип колісного зонда можна назвати "щільним колісним зондом".

					ПК51.050.000.000	Арк.
						40
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Ультразвукові колісні зонди звичайно потребують контакт між колесом і контрольованою поверхнею, щоб забезпечити ефективну ультразвукову передачу, зонди з колесами використовують шини, виготовлені з матеріалів «сухого» контакту, і можуть використовуватися без змащування контактною рідиною між колесом та об’єктом контролю. Сухе зчеплення використовує спеціальні полімери для виготовлення шин. Один тип шини із «сухим» контактом використовує гідрофільні полімери. Ці полімери поглинають воду і стають м’якими і гнучкими при гідратації. Прикладом є сорт полімеру, який використовується для контактних лінз. При гідратації ці полімери дуже добре передають ультразвук до досить високих частот ( $> 5$  МГц) і виділяють невелику кількість води, достатню для ефективної передачі ультразвуку. Незважаючи на непогані ультразвукові властивості, гідрофільні полімери можуть не мати відповідних механічних властивостей для широкого використання колісних зондів. Також їх властивості змінюються при висиханні полімеру. Недоліком сухого контакту є схильність шин до пилу та бруду, що знижує ефективність ультразвукової передачі.

В таких застосуваннях як тестування товщини та виявлення розшарування, в колісному зонді зазвичай використовується один перетворювач розташований вертикально до поверхні, і дані відображаються у форматі А-скан або В-скан. Колісний зонд для відображення корозії може використовувати один перетворювач розташований вертикально до поверхні або зонд з фазованою решіткою, налаштований для лінійних сканувань, що дозволяє збирати дані для дисплея С-скан. Ще однією особливістю використання ультразвукових перетворювачів для пошуку корозійних ділянок є те, що на відміну від звичайних ультразвукових товщиномірів де вимірюється час подвійного проходження ультразвукових коливань через об’єкт контролю інформаційним параметром одночасно є час та амплітуда прийнятого сигналу.

На рис. 13 та рис. 14 показані основні частини заповненого рідиною ультразвукового колеса зонда. Супорт - це кронштейн, що підтримує колісний зонд, який дозволяє його встановити, але він не повинен бути окремим вузлом.

					<i>ПК51.050.000.000</i>	<i>Арк.</i>
						<i>41</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		



Рис. 13. Частини каткового перетворювача

Колісні зонди, заповнені рідиною, зазвичай потребують двох клапанів: один - для введення наповнювальної рідини в колесо, а інший - для виходу повітря. Клапан заповнення може бути розташований у бічній пластині або на одному кінці вузла осі. Випускний клапан зазвичай розташований у бічній пластині. Ідея полягає в тому, щоб заповнити колесо рідиною і переконатися, що повітря не потрапило в колесо. Захоплене повітря перешкоджає ультразвуковій передачі всередині колеса. Зонди з твердим ядром вимагають дуже точного і щільного прилягання між секціями ротора і статора. Утворюється дуже дрібна порожнина, як правило, заповнена легким маслом, таким як силіконове масло, щоб виключити попадання повітря.

Корисним додатком до цієї конструкції є встановлення герконових реле для визначення пройденої відстані колісним зондом.

Ультразвукові колісні зонди були розроблені в ряді форм для сканування великих площ об'єкта контролю. Ці зонди спрямовані на підтримку послідовного зв'язку між перетворювачем і структурою що контролюється за допомогою обертової шини з легко деформованого каучуку (для забезпечення гарного контакту з шорсткими поверхнями) з низьким затуханням до ультразвуку. Завдяки цьому вони мають непогану перспективу у застужванні при пошуку корозії корпусу судна.

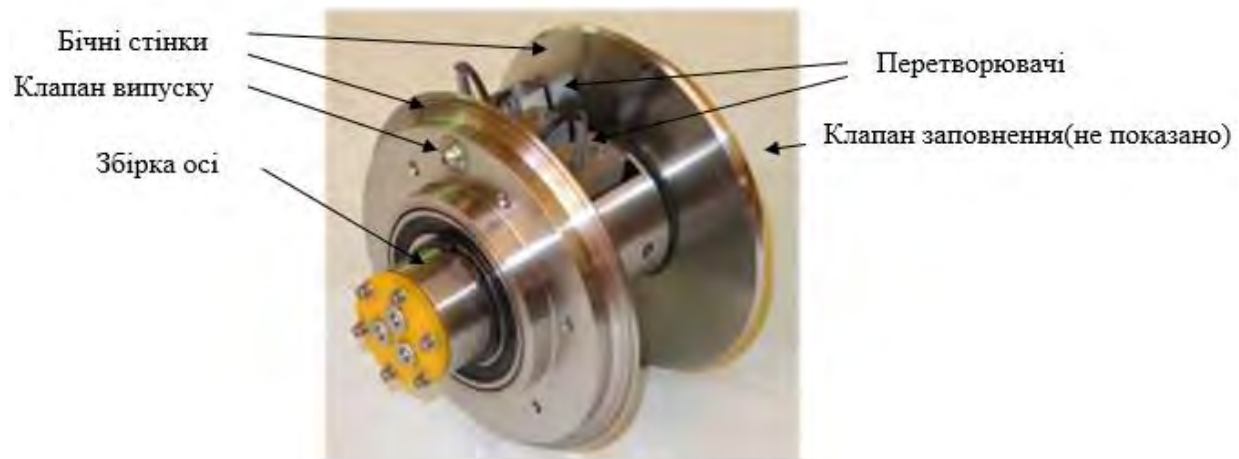


Рис. 14. Частина каткового перетворювача

					<i>ПК51.050.000.000</i>	Арк.
						43
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## РОЗДІЛ 2 ПРОЕКТУВАННЯ ПРИЛАДУ

### 2.1. Розрахунок акустичного тракту

Акустичним трактом називають шлях ультразвуку від випромінювача до дефекту і потім до приймача. Коефіцієнт акустичного тракту визначає ослаблення ультразвукового сигналу на цьому шляху.

Зазвичай дефекти від яких відбивається ультразвукова хвиля мають різноманітну форму та розміри. Існують стандартизовані моделі для розрахунку коефіцієнта акустичного тракту під різні типи форм та розмірів дефектів з відомими акустичними властивостями.

Оскільки темою роботи є товщиномір, то в даному випадку використовується модель акустичного тракту прямого перетворювача відбивачем якого є донна поверхня.

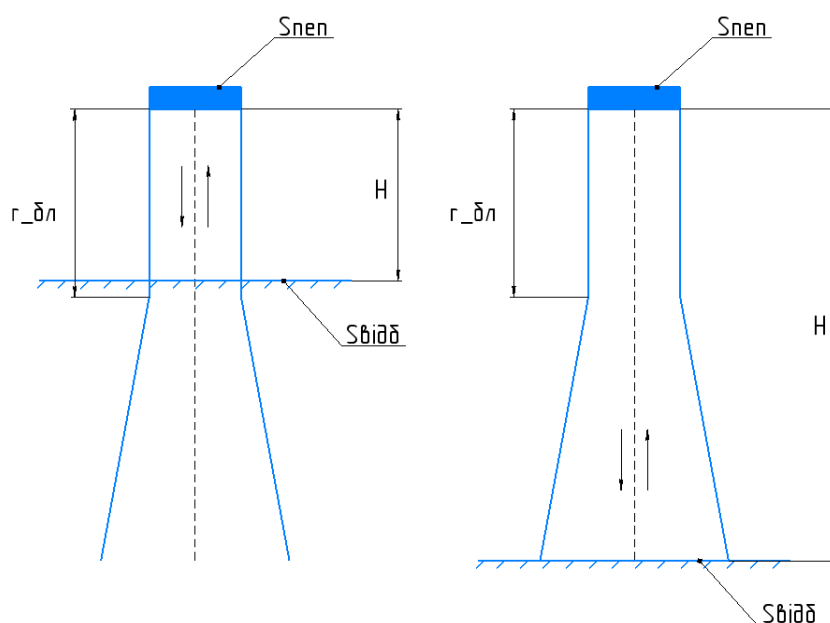


Рис. 15 – Акустичний тракт прямого перетворювача для дальньої та ближньої зони відбивачем якого є донна поверхня.

					ПК51.050.000.000	Арк.
						44
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Формула акустичного тракту для дальньої зони

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

Формула акустичного тракту для ближньої зони

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

Перед розрахунком коефіцієнта  $K_{a.t.}$  необхідно визначити певні параметри.

Оскільки конструкція перетворювача має шар рідини та резини, тому структура вважається багатшаровою лінією затримки, а отже при розрахунку коефіцієнта  $K_{a.t.}$  необхідно врахувати всі впливи, обумовлені кожним середовищем (в тому числі ОК) через яке проходить акустичний тракт [5].

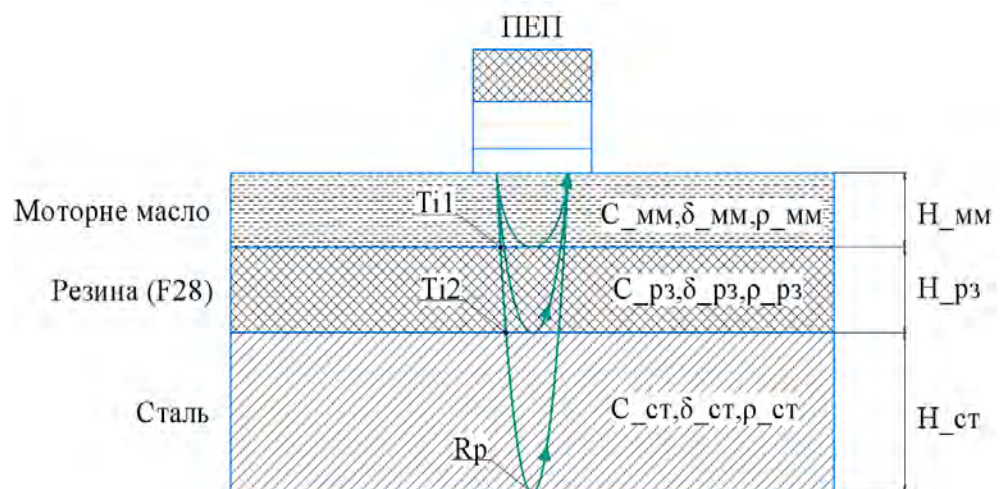


Рис. 16 – Променева картинка проходження акустичного тракту.

					ПК51.050.000.000	Арк.
						45
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



Спочатку визначимо частоту, на якій буде працювати перетворювач. Чим вище частота, тим менше проникаюча здатність ультразвуку (глибина проникнення): тим сильніше відбувається його згасання. Таким чином, важливо знайти оптимальну частоту, яка дає максимальну роздільну здатність при достатній проникаючій здатності.

Оскільки перетворювачі мають стандартизовані частоти та діаметри, з конструктивних міркувань було обрано п'єзопластину виготовлену з матеріалу ЦТС-19М з робочою частотою 2.5 МГц та діаметром 14 мм.

Таблиця 1. Характеристики матеріалів

Матеріал	Акустичний Імпеданс, $\frac{\text{кг}}{\text{м} \cdot \text{с}^2}, 10^6$	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

Далі визначимо, в якій зоні акустичного поля відбувається відбиття сигналу від поверхні. Враховуючи багатошаровість структури, необхідно її конвертувати до одношарової відносно об'єкта контролю. Розрахуємо еквівалентну глибину конвертованої структури:

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

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

									Арк.
									46
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					

ПК51.050.000.000

Для розрахунку ближньої зони акустичного тракту необхідно визначити довжину хвилі ОК а також товщину п'єзопластини.

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

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

Вибір півхвильової товщини п'єзопластини обумовлений максимальною ефективністю перетворення у режимі випромінювання та приймання пружних хвиль.

Знаючи товщину п'єзопластини, можемо розрахувати довжину хвилі ОК:

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

Розраховуємо ближню зону для еквівалентної глибини акустичного тракту:

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

Отже розрахувавши ближню зону можна сказати, що  $r_{\text{бл}} < H_{\text{екв}}$  і контроль проводиться в дальній зоні, тому модифікована формула, в даному випадку, для розрахунку акустичного тракту буде мати такий вигляд:

					ПК51.050.000.000	Арк.
						47
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

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

Розрахуємо три коефіцієнти проходження по інтенсивності, які мають межі: ПЕП-масло, масло-резина, резина-ОК.

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

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

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

Також коефіцієнт акустичного тракту потребує розрахунку площі п'єзоелемента.

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

Коефіцієнти згасання матеріалів при частоті 2.5 МГц:

Масло моторне

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

					ПК51.050.000.000	Арк.
						48
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Резина (F28)

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

Сталь 15

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

Визначивши всі необхідні параметри можна розрахувати коефіцієнт акустичного тракту:

$$K_{\text{а.т.}} = \frac{S_{\text{ПЕП}}}{2 \cdot \lambda_{\text{ст}} \cdot H_{\text{екв}}} T_{I1} \cdot T_{I2} \cdot T_{I3} \cdot R_p \cdot e^{-2 \cdot (H_{\text{масло}} \cdot \delta_{\text{масло}} + H_{\text{рез}} \cdot \delta_{\text{рез}} + H_{\text{ст}} \cdot \delta_{\text{ст}})}$$
$$K_{\text{а.т.}} = \frac{1.54 \cdot 10^{-4}}{2 \cdot 2.36 \cdot 10^{-3} \cdot 36.3 \cdot 10^{-3}} \cdot 0.234 \cdot 1 \cdot 0.121 \cdot 1 \cdot e^{-2 \cdot (25 \cdot 10^{-3} \cdot 2.3 + 12 \cdot 10^{-3} \cdot 6.912 + 28 \cdot 10^{-3} \cdot 8.125)} = 0.0121$$

Розрахувавши  $K_{\text{а.т.}}$  можна перейти до визначення напруги прийнятого сигналу та напруги сигналу випромінювання.

Загальна формула:

$$U_{\text{п}} = U_{\text{в}} \cdot K_{\text{а.т.}} \cdot K_{\text{ПП}}$$

					ПК51.050.000.000	Арк.
						49
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Коефіцієнт подвійного перетворення  $K_{\text{ПП}}$  для ЦТС-19М беремо 0.15.

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

Отже  $\frac{U_{\text{п}}}{U_{\text{зав}}} = 40$  дБ. Змінимо дБ на «рази»:

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

Розрахуємо напругу прийнятого сигналу:

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

Знаючи напругу прийнятого сигналу можна розрахувати напругу випромінювання сигналу:

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

## 2.2. Опис роботи приладу

На поляризований п'єзоперетворювач подається імпульс, який починається з від'ємної півхвилі, з напругою від генератора на 50 В.

					ПК51.050.000.000	Арк.
						50
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

П'єзоелемент починає генерувати механічні хвилі з частотою 2.5 МГц, які проходять через ОК і повертаються на той же п'єзоелемент. Час  $\tau$  між зонduючим та прийнятим сигналом буде залежати від  $h$  - відстані, пройденої сигналом в обох напрямках. Отриманий сигнал подається на підсилювач оптимізований на регулювання змінним підсиленням, який використовується для реалізації автоматичного регулювання підсиленням. З підсилювача змінна напруга вихідного сигналу перемножується сама на себе, тим самим стає постійною після чого порівнюється з необхідним значенням напруги. Підсилення контролюється за допомогою зворотнього зв'язку, що надходить зі схеми порівняння до підсилювача . Далі сигнал переходить з аналогового стану у цифровий за допомогою АЦП після чого надходить пам'яті FIFO, де чекає своєї черги на обробку мікроконтролером. Після закінчення обробки сигналу, інформація передається на дисплей. Також мікроконтролером керується транзистор що забезпечує генерування імпульсу на ПЕП та подача тактованих імпульсів на АЦП та пам'ять FIFO через перемикач.

## 2.3. Розрахунок та підбір елементів для електричної схеми

### 2.3.1. Розрахунок та вибір підсилювача для змінного підсилення

Для змінного підсилення був обраний підсилювач AD604.

AD604 - це дуже точний двоканальний підсилювач зі змінним підсиленням (VGA) з лінійним входом в дБ, оптимізований для управління змінним підсиленням на основі часу в ультразвукових приладах; тим не менш, він підтримує будь-який прилад, що вимагає низького рівня шуму, широкої смуги пропускання і регулювання підсиленням. Кожен канал AD604 забезпечує вхідний опір 300 кОм і уніполярним регулюванням підсилення для простоти

					ПК51.050.000.000	Арк.
						51
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

використання. Визначені користувачем діапазони посилення, масштабування підсилення (дБ / В).

- Точність посилення  $\pm 1,0$  дБ;
- Масштабування зі змінним посиленням: від 20 дБ/В до 40 дБ/В;
- 2 незалежних лінійних каналу в дБ. Програмований діапазон абсолютного підсилення на канал від 0 дБ до 48 дБ (підсилення передпідсилювача = 14 дБ) до 6 дБ до 54 дБ (підсилення передпідсилювача = 20 дБ).

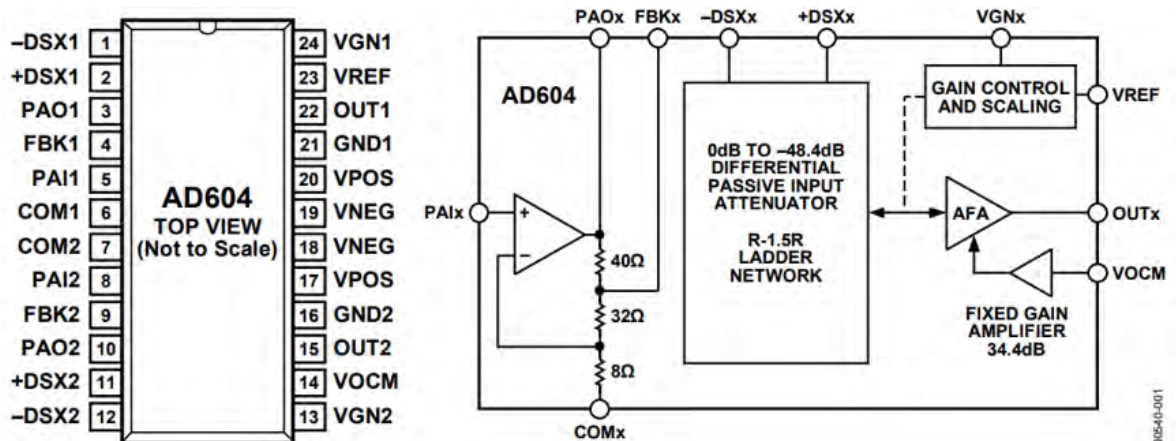


Рис. 17 – Схема AD604

Для заданого масштабування підсилення VREF може бути розраховане, як показано в рівнянні [11]:

$$VREF = \frac{2.500V \cdot 20dB/V}{Gain Scale} \quad (2.1)$$

При діапазоні підсилення (20-40) дБ/В, то напруга необхідна для керування підсиленням буде – (2.5-1.66) В.

Щоб реалізувати автоматичне регулювання підсиленням була використана схема підключення запропонована виробником (Рис. 15).

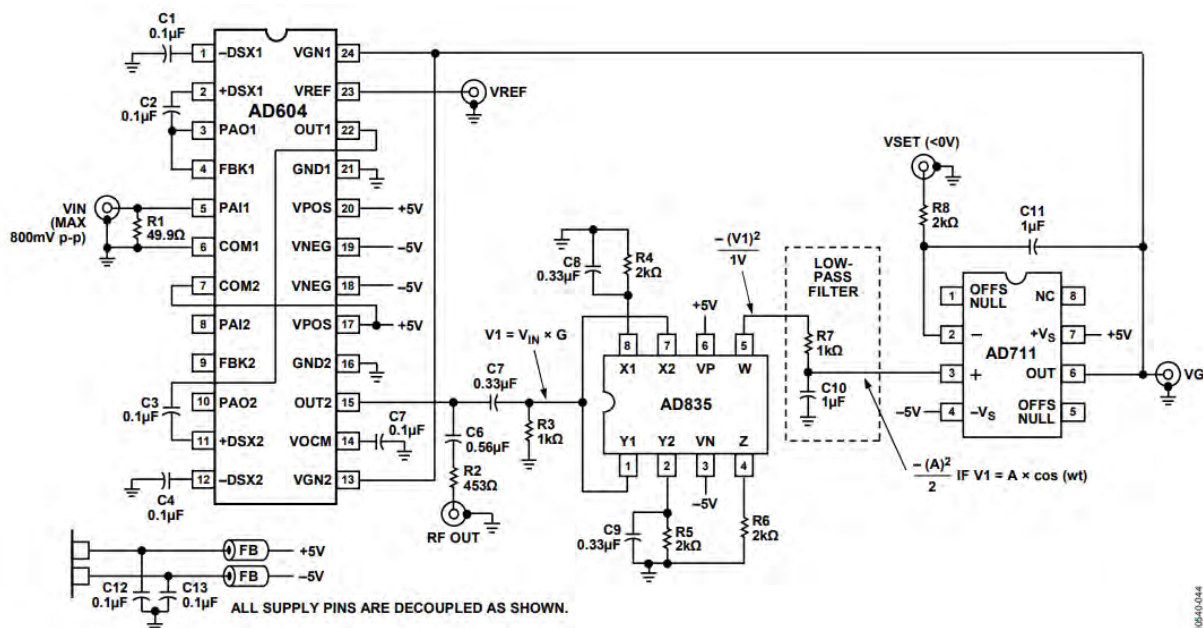


Рис. 18 – Схема реалізації АРП на базі AD604

Вивід VOСМ шунтується конденсатором 0,1 мкФ на землю.

### 2.3.2. Підбір схеми перемноження сигналу

В якості схеми перемноження для АРП був використаний перемножувач AD835.



AD835 являє собою аналоговий пермножувач, виготовлений по вдосконаленому діелектрично ізолюваному додатковому біполярному процесу [12].

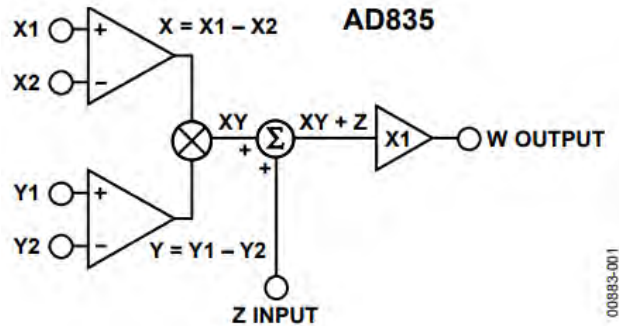


Рис. 16. Схема перемноження AD835

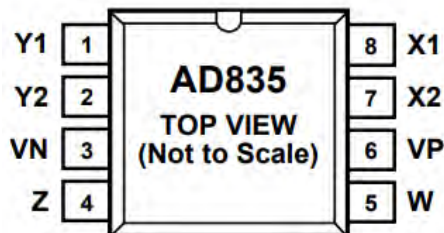


Рис. 19 – Зовнішній вигляд AD835

### 2.3.3. Підбір блоку порівняння

Для схеми порівняння був використаний операційний підсилювач AD711  
AD711 – високошвидкісний, прецизійний монолітний операційний підсилювач, що пропонує високу продуктивність та низьку напругу зсуву(0.25мВ) і дрейф напруги зсуву [13].

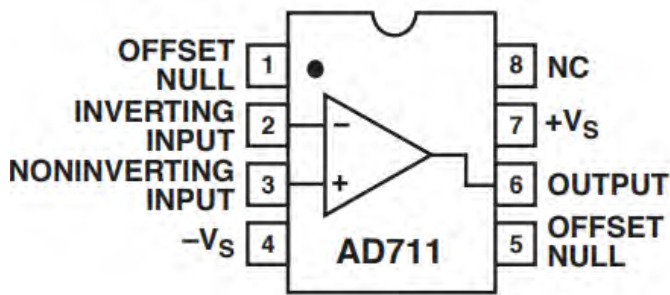


Рис. 20. Мікросхема ОП AD711

### 2.3.4. Підбір та розрахунок АЦП

Частота дискретизації є однією з основних характеристик АЦП. Частоту дискретизації  $f_d$  можна визначити виходячи із теореми Котельникова-Найквіста.

$$f_d > 2 \cdot f_b \quad (2.2)$$

Частота дискретизації визначається виходячи з  $f_b$ , де  $f_b$  – верхня частота обмеженого спектра вхідного сигналу.

Енергетично значущою в техніці вважається частина спектра, що містить 95% всієї енергії спектра, або 95% площі, що перекривається спектром [10]. В даному випадку енергетичне значення має третя гармоніка, тому при основній частоті  $f = 2.5$  МГц  $f_b = 7.5$  МГц.

Збільшення частоти дискретизацій в 2 рази від верхньої частоти не завжди відтворює необхідну інформацію вірно, тому для підвищення точності відцифрованого сигналу збільшуємо частоту дискретизації в 3 рази.

Враховуючи все вище сказане, отримуємо частоту дискретизації:

$$f_d > 3 \cdot f_b = 3 \cdot 7.5 \cdot 10^6 = 22.5 \text{ МГц.}$$

Оскільки складно знайти АЦП на 22.5МГц, візьмемо частоту дискретизації  $f_d = 25$  МГц. Тоді час циклу дискретизації дорівнюватиме:

$$t_d = \frac{1}{25 \cdot 10^6} = 0.04 \text{ мкс.}$$

					ПК51.050.000.000	Арк.
						55
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

В схемі використовуємо АЦП AD9050.

AD9050 являє собою 10-розрядний монолітний дискретно-аналоговий перетворювач (АЦП) з вбудованою системою відстеження та утримання і еталонном. Пристрій розроблений для недорогих, високопродуктивних приладів і вимагає тільки +5 В і тактової частоти кодування для досягнення 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 [14].

Маючи частоту дискретизації 60 МГц цей АЦП повністю задовольняє нашим умовам.

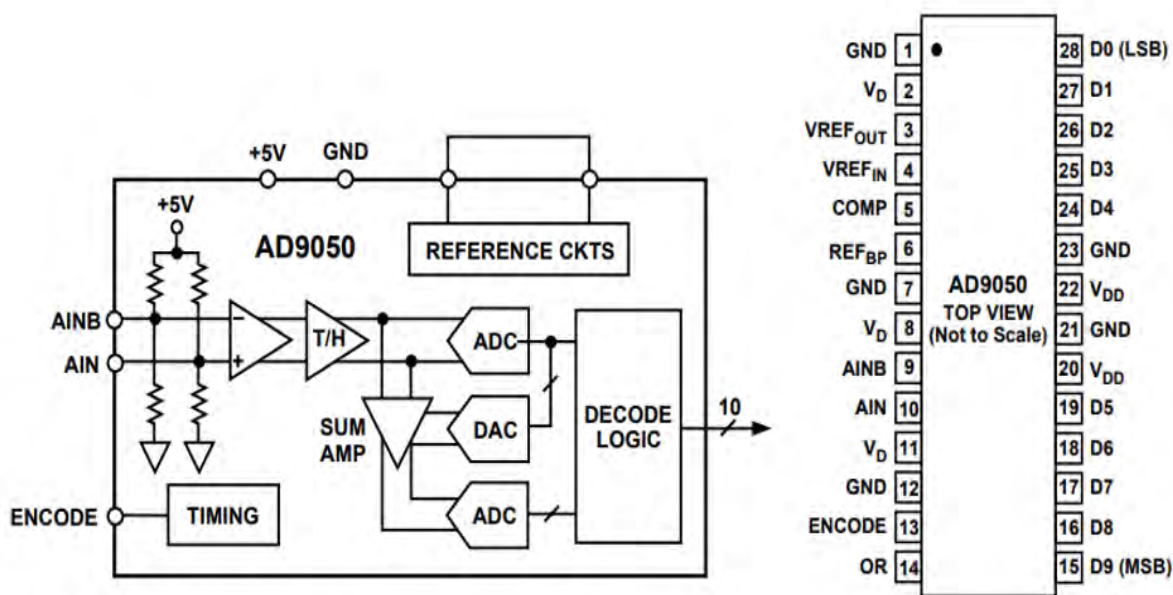


Рис. 21 – Схема АЦП AD9050

### 2.3.5. Розрахунок та підбір смугового фільтра

Використовується схема з операційним підсилювачем

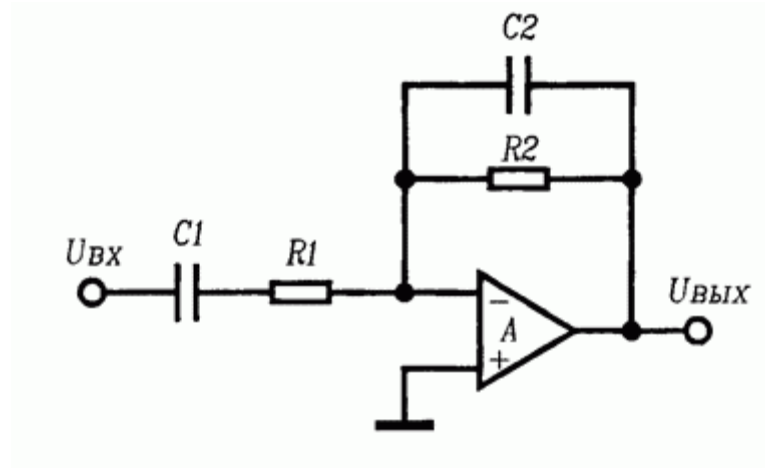


Рис. 22 – Схема активного смугового фільтра

Для розрахунку фільтра необхідно визначити верхню та нижню частоту зрізу.

$$f_{зр1,2} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \tau_{1,2}} \quad (2.3)$$

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  $f_{зр1} \approx 7.5$  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 частота зрізу при  $R_1 = 1050 \text{ Ом}$ ,  $C_1 = 62 \text{ пкФ}$ :

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

В якості ОП був використаний AD9631

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 [15].

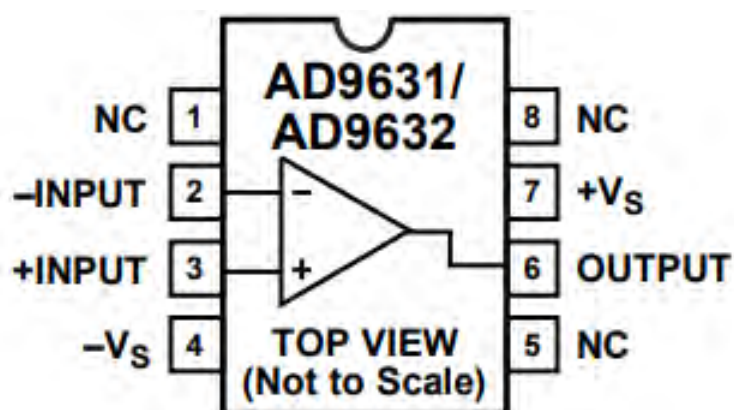


Рис. 23. Схема AD9631.

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ПК51.050.000.000

Арк.

58

### 2.3.6. 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.

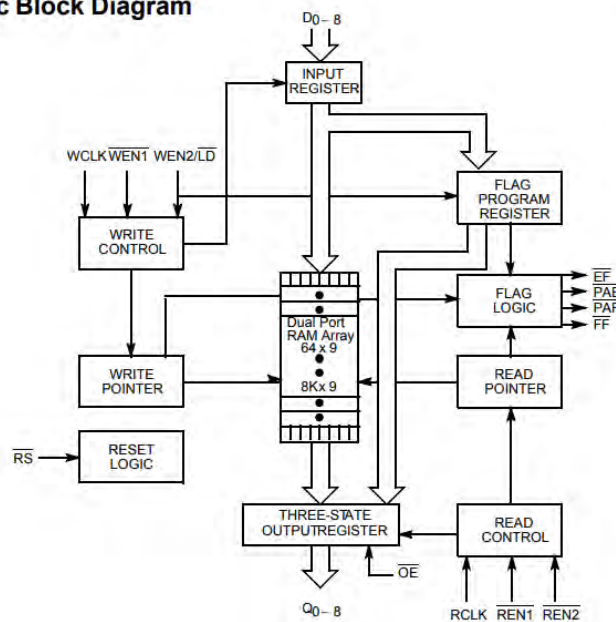
Ці FIFO мають 18-бітові вхідні і вихідні порти. Вхідний порт управляється тактованими імпульсами (WCLK) і контактом дозволу входу (WEN). Дані зчитуються в FIFO на кожному такті при підтвердженні WEN. Вихідний порт управляється іншим тактовим виводом (RCLK) і іншим активуючим контактом (REN) [16].

Об'єм пам'яті – 18.4 kb (1024 x 18)

Швидкість передачі даних – 100 MHz

Напруга живлення – 3.3 В

Logic Block Diagram



Pin Configuration

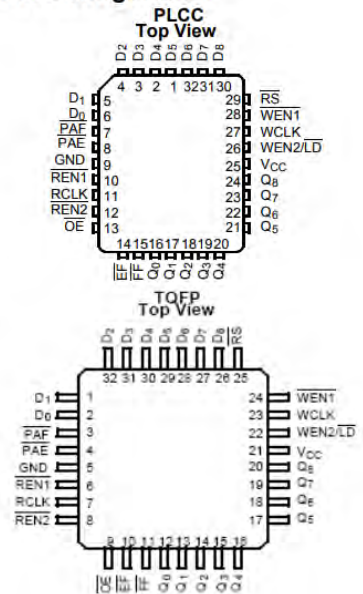


Рис. 24. Схема CY7C4231V-25AXCT

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ПК51.050.000.000

Арк.

59

### 2.3.7. Підбір генератора тактованих імпульсів

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

Напряга живлення – 3.3 В.

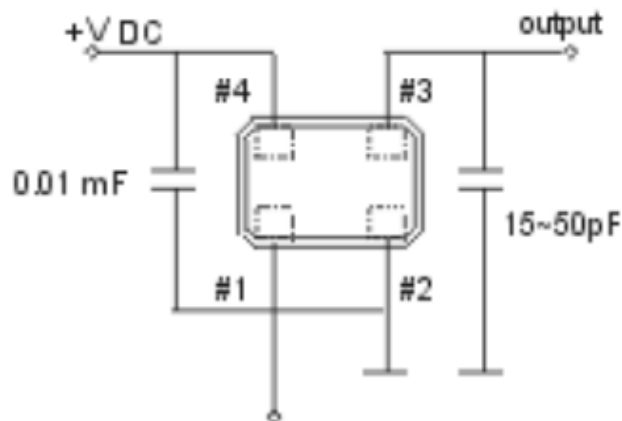


Рис. 25 – Схема КХО-V97

### 2.3.8. Підбір перемикача

В якості керованого перемикача був використаний 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).

						ПК51.050.000.000	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			60

Використовується для блокування подачі тактованих імпульсів з генератора.

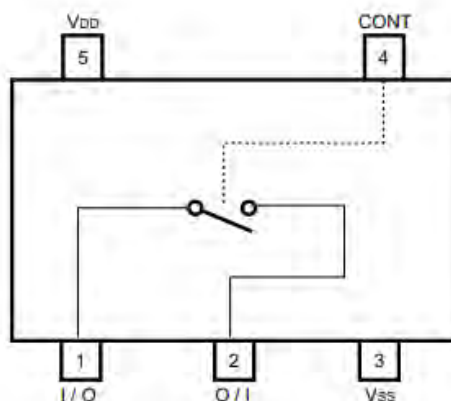


Рис. 26 – Схема BU4S66

### 2.3.9. Підбір мікроконтролера

В ролі плати керування та обробки інформації був обраний мікроконтролер STM32F407.

Кожен з виводів GPIO може бути налаштований програмно як вихід або як альтернативна периферійна функція. Більшість виводів GPIO використовуються спільно з цифровими або аналоговими альтернативними функціями. Конфігурація альтернативної функції входів / виходів може бути заблокована, якщо необхідно, дотримуючись певної послідовності, щоб уникнути помилкового запису в регістри входів / виходів. Входи / виходи на APB2 з частотою перемикання до 18 МГц.

					ПК51.050.000.000	Арк.
						61
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		





Рис. 27 – Мікроконтролер STM32F407

Характеристики мікроконтролера:

- максимальна частота 168 МГц
- 64 або 128 Кбайт флеш-пам'яті
- 20 Кбайт SRAM
- Живлення елементів від 1,8 до 3,6 В і вводу / виводу
- POR, PDR і програмований детектор напруги (PVD)
- 4 – 26 МГц кварцовий генератор
- Вбудований калібрований RC-генератор 16 МГц

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ПК51.050.000.000

Арк.

62

- Генератор 32 кГц для RTC з калібруванням
- Режими сну, зупинки та режиму очікування
- Обробка внутрішніх і зовнішніх переривань
- 3 x 12-бітові, 1  $\mu$ s A / D перетворювачі (до 16 каналів)
- 16-канальний DMA контролер
- Повна швидкість інтерфейсу USB 2.0

### 2.3.10. 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.

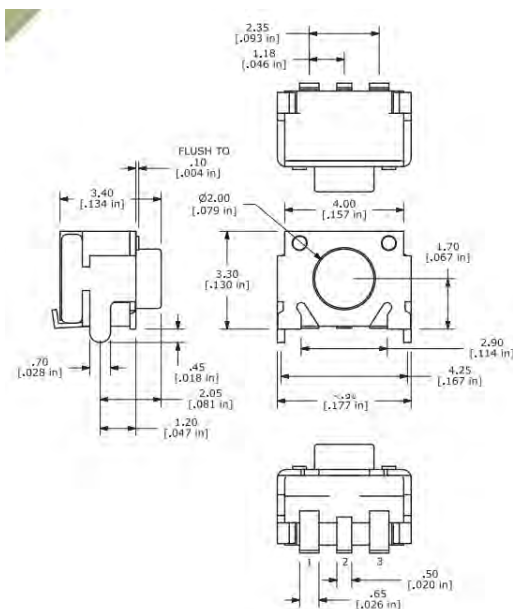


Рис. 28 – Загальний вигляд кнопки TL3340

					ПК51.050.000.000	Арк.
						63
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

### 2.3.11. Підбір дисплея

Для схеми був обраний рідкокристалічний дисплей WH1604 від фірми Winstar.

Використовується для виводу обробленої мікроконтролером інформації.

Характеристики дисплея:

- 16 символний x 4 лінія
- 5x8 точок (включаючи курсор)
- Вбудований контролер
- 5 В живлення



Рис. 29 – Дисплей WH1604

					ПК51.050.000.000	Арк.
						64
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

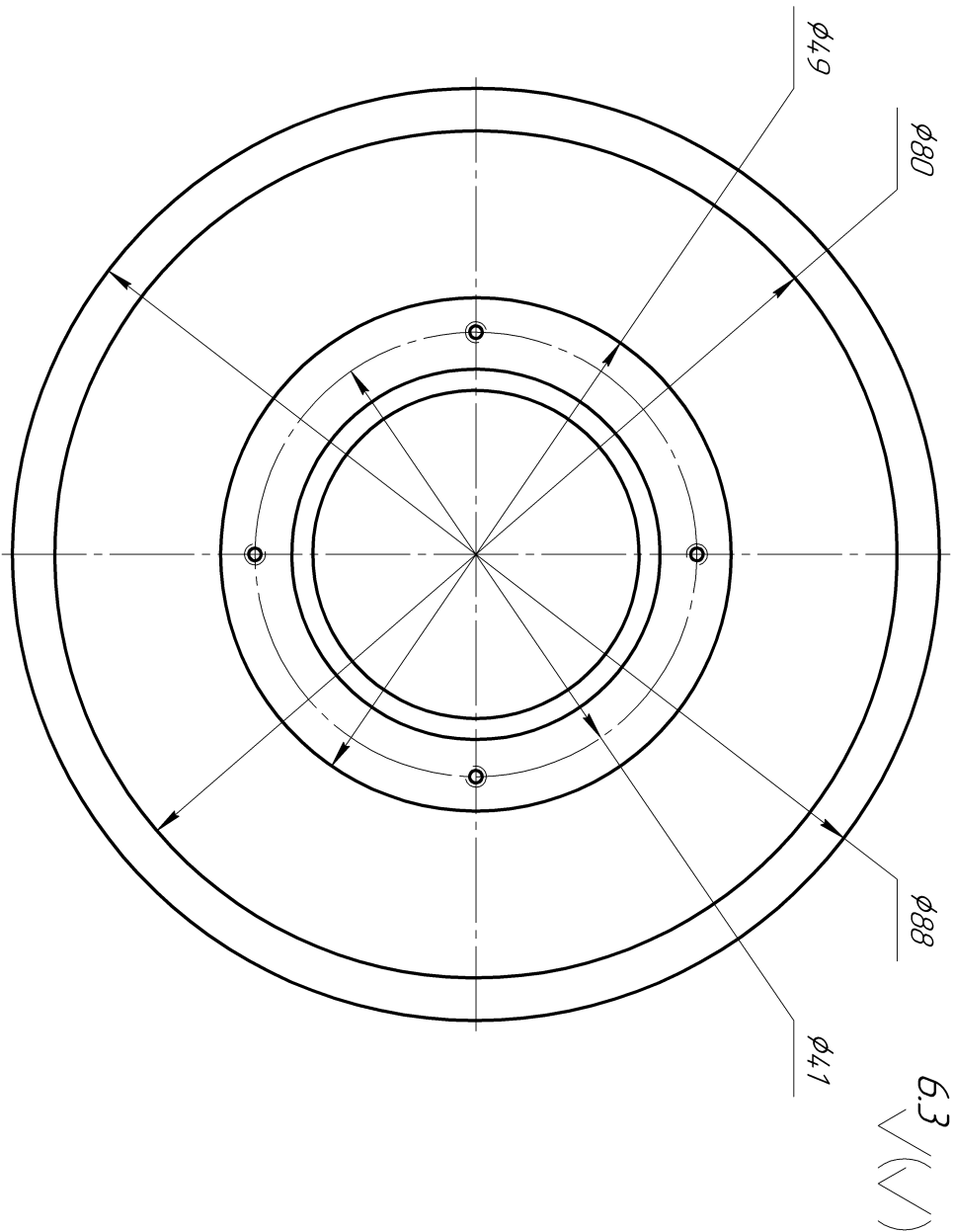
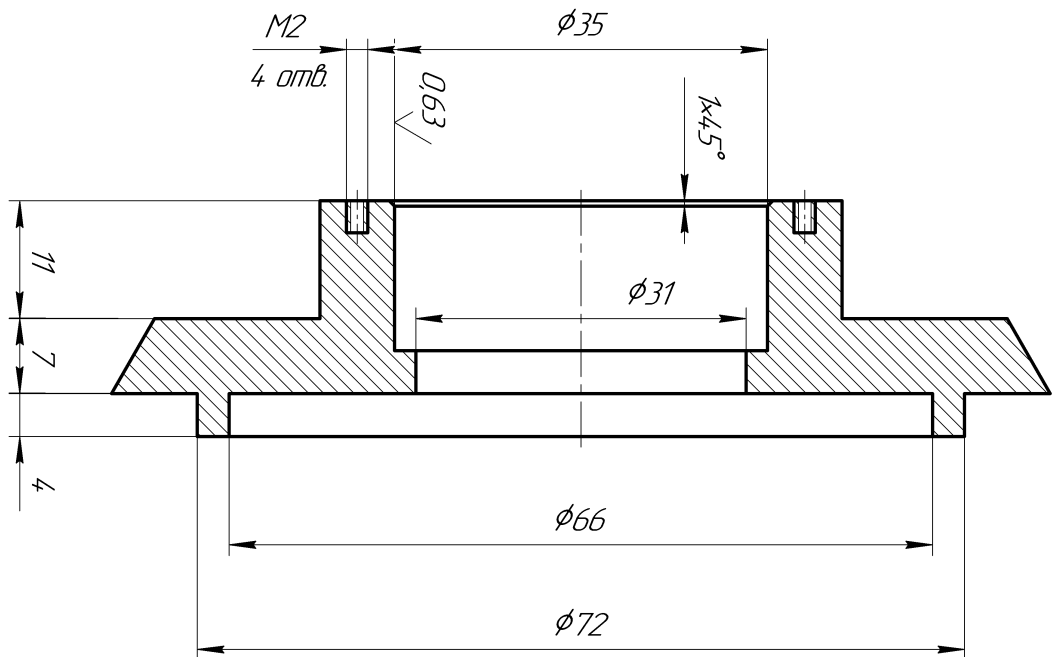
- [1] Olympus. Thickness Gage Tutorial. – Режим доступу URL: <https://www.olympus-ims.com/en/ndt-theory/thickness-gage/>
- [2] Ультразвуковая толщинометрия: учебное пособие / М.М. Коротков. – Томск: Изд. ТПУ, 2008. – 94 с.
- [3] Olympus. Theory and Application of Precision Ultrasonic Thickness Gaging. – Режим доступу URL: <https://www.olympus-ims.com/en/resources/white-papers/theory-and-application-of-precious-ultrasonic-thickness-gaging/>
- [4] Основы ультразвукового неруйнівного контролю: Підручник / В.К. Цапенко, Ю.В. Куц – К.: НТУУ «КПІ». – 2010. – 448 с.
- [5] 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'ютерно-інтегровані технології» / Р. М. Галаган; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 5,12 Мбайт). – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 263 с.
- [6] A.M. Robinson, B.W. Drinkwater, J. Allin. (2003) Dry-coupled low-frequency ultrasonic wheel probes: application to adhesive bond inspection. *NDT&E International*, 36, 27–36.
- [7] John Norman. NTS ULTRASONICS PTY LTD: An Introduction to Ultrasonic Wheel Probes. – Режим доступу URL: <http://ntsu.net.au/introduction%20to%20wheel%20probes.pdf>.
- [8] Guidelines for Thickness Measurement of Hull. – Режим доступу URL: <http://www.ccs.org.cn/ccswzen/font/fontAction!downloadArticleFile.do?attachId=4028e3d6584bd31f01586fe7f3ad0047>
- [9] А. Дж Пейтон, В. Волош Аналоговая электроника на операционных усилителях – М.: БИНОМ, 1994 – 352 с.: ил. – ISBN 5-7503-0013-7
- [10] Расчет параметров разрабатываемого АЦП. – Режим доступу URL: [https://works.doklad.ru/view/\\_Tyi\\_vM9\\_GY.html](https://works.doklad.ru/view/_Tyi_vM9_GY.html)

					ПК51.050.000.000	Арк. 65
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- [11] Dual, Ultralow Noise Variable Gain Amplifier AD604. – Norwood, MA 02062-9106, U.S.A: Analog Devices, Inc, 2010. – 32с.
- [12] Voltage Output, 4-Quadrant Multiplier AD835. – Norwood, MA 02062-9106, U.S.A: Analog Devices, Inc, 2014. – 14с.
- [13] Precision, Low Cost, High Speed, BiFET Op Amp AD711. – Norwood, MA 02062-9106, U.S.A: Analog Devices, Inc, 2002. – 16с.
- [14] 10-Bit, 40 MSPS/60 MSPS A/D Converter AD9050. – Norwood, MA 02062-9106, U.S.A: Analog Devices, Inc, 1997. – 12с.
- [15] Ultralow Distortion, Wide Bandwidth Voltage Feedback Op Amps AD9631. – Norwood, MA 02062-9106, U.S.A: Analog Devices, Inc, 2014. – 20с.
- [16] FIFO IDT72225LB10J. – San Jose: Integrated Device Technology, Inc, 2013. – 16с.

					<i>ПК51.050.000.000</i>	Арк.
						66
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		





1. НРС 28...32
  2. Покрыття Хім. Окс. прм.
  3. Недказані зрначчні відхилення
- розмірів по Н12; н12; ±  $\frac{IT12}{2}$

6.3  $\sqrt{(\sqrt{V})}$

№м/Лист	№ док.ум.	Підп.	Листа	ПК5.1050.04.001	Лист	Маса	Матеріал
Розроб.	Лазунин Є.В.						
Перев.	Божечко В.Г.			БІЧНА СТІНКА	Лист		2:1
Зачинп.				КОЛЕСА	Лист		1
Назнач.				Сталь 50 ДСТУ Б EN 1090:2014			
Унів.	Богдан Г.А.			КТІ ПК-51			

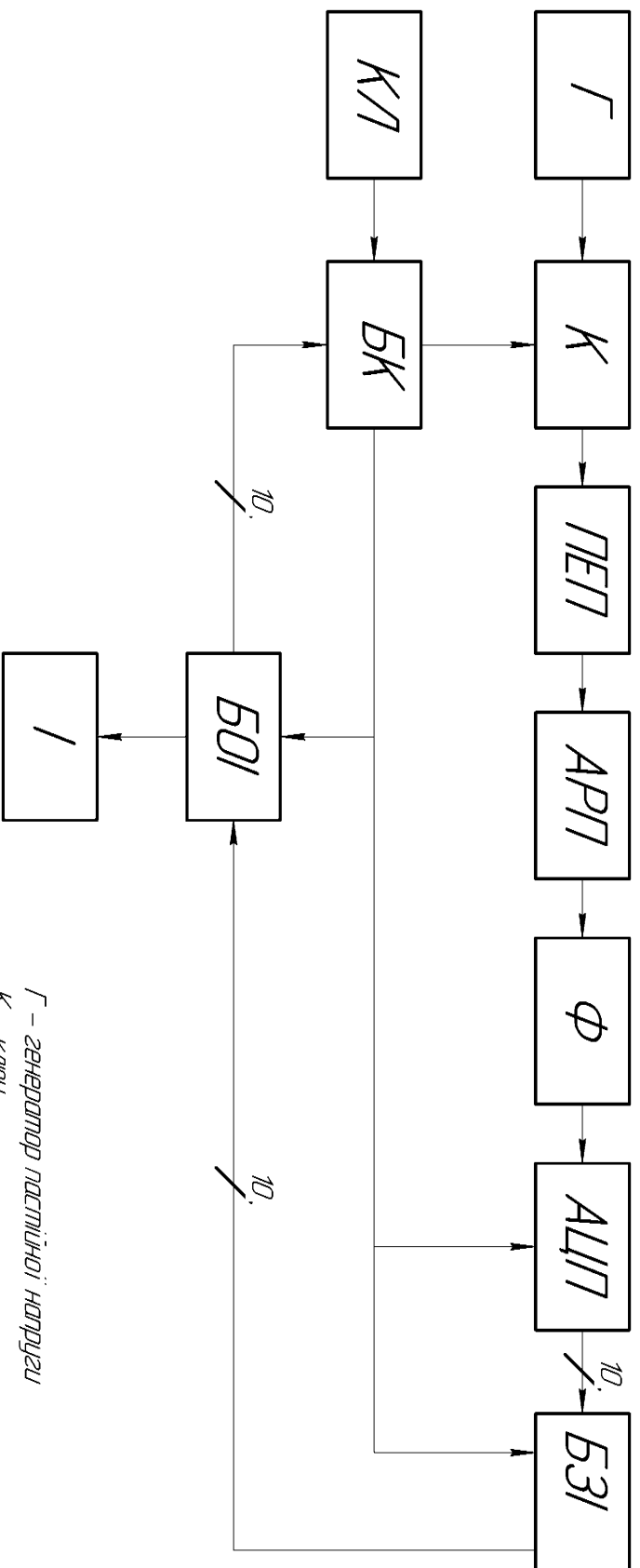






Формат	Зона	Поз.	Позначення	Найменування	Кільк.	Примітка
				<u>Документація</u>		
			ПК51.050.03.000 СК	Складальний кресленник		
				<u>Деталі</u>		
	A3	1	ПК51.050.04.001	Бічна стінка колеса	2	
	A3	2	ПК51.050.05.002	Вал з кріпленням перетворювача	1	
	A3	3	ПК51.050.06.003	Ручка для колеса	1	
		4		Кришка	2	
		5		П'єзоелектричний перетворювач	1	
		6		Прохідний роз'єм	1	
		7		Клапан	1	
		8		Шина	1	
				<u>Стандартні вироби</u>		
		9		Гвинти M2x6 ДСТУ ГОСТ 10337:2008	8	
		10		Гвинти M2.5x6 ДСТУ ГОСТ 10337:2008	4	
				Кільця стопорні		
		11		A16 ДСТУ ГОСТ 13943-86	2	
				Підшипники ДСТУ ГОСТ 520:2014		
		12		6202-2RS-16	2	d=16
		13		Шайби 2 Н	8	
		14		Шайби 2.5 Н	4	

<b>ПК51.050.000.000</b>				
Изм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дата
Розроб.		Лагутін Е.В.		
Перев.		Богдан Г.А.		
Н.контр.				
Утв.		Баженів В.Г.		
Ультразвуковий товщиномір			Лит.	Лист
				Листів
				1
<b>КПІ ПСНК ПК-51</b>				



Г – генератор постійної напруги  
 К – ключ  
 ПЕНТ – п'єзоелектричний перетворювач  
 АРПТ – блок автоматичного регулювання підсиленням  
 Ф – фільтр  
 АЦПТ – аналого-цифровий перетворювач  
 БЗІ – блок запису інформації  
 БК – блок керування  
 БЗІ – блок обробки інформації  
 Д – дисплей  
 КП – клавіатура

ПК510500.01.000Е2									
Нам	Лист	№ докум.	Титул	Дата	Ультразвуковий товщинимір				
Версія	Листин	Є.В.			Схема електрична структурна				
Перед									
І.контр									
Н.контр									
Уніб	Баженов В.Г.								
Лист	Маса	Матриць							
Лист	Листів	1							
КП1 ПК-51									



Поз. познач.	Найменування	Кіл.	Примітка
	<u>Інші елементи</u>		
BQ1	ЦТС-19М 14×0.6	1	
	<u>Конденсатори ГОСТ 5621-70</u>		
C1	X7R 0402 1нФ±10%	1	
C2,C4...6	X7R 0402 100нФ±10%	4	
C3,C11,C7	Y5V 0603 330нФ±20%	3	
C8,C9	X5R 0402 1мкФ±10%	2	
C10	NP0 0603 62пФ±5%	1	
C12	NP0 0603 20пФ±5%	1	
C13-C15	X7R 0402 100нФ±10%	3	
	<u>Мікросхеми ГОСТ 7352-78</u>		
DA1	IR21271S	1	
DA2	AD835	1	
DA3	AD604	1	
DA4	AD711	1	
DA5	KXO-V97	1	
DA6	AD9631	1	
DA7	BU4S66	1	
DD1	STM32F407	1	
DD2	AD9050	1	
DD3	WH1604	1	
DD4	CY7C4221V	1	

					<b>ПК51.050.000.00.ЕП</b>			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.		Лагутін Є.В			<b>Ультразвуковий товщиномір</b>	Лім.	Арк.	Аркушів
Перевір.		Баженов В.Г.					PAGE \*	2
Реценз.						<b>КПІ,ПБФ</b>		
Н. Контр.								
Затверд.								

