

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

**Приладобудівний факультет**

**Кафедра приладів і систем неруйнівного контролю**

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ Анатолій ПРОТАСОВ

«\_\_» \_\_\_\_\_ 2020 р.

**Дипломний проєкт**

на здобуття ступеня бакалавра

**за освітньо-професійною програмою «Комп'ютерно-інтегровані системи та технології неруйнівного контролю і діагностики»**

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

**на тему: «Ультразвуковий прилад для контролю виробів з композиційних матеріалів»**

Виконав:

студент ІV курсу, групи ПК-61 Швидкий Олександр Вікторович \_\_\_\_\_

Керівник:

д.т.н., професор Куц Юрій Васильович \_\_\_\_\_

Консультант з графічного розділу:

ст.вик., к.т.н. Богдан Галина Анатоліївна \_\_\_\_\_

Консультант з розробки ел. схеми:

к.т.н., доцент Баженов Віктор Григорович \_\_\_\_\_

Рецензент:

\_\_\_\_\_

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

Студент \_\_\_\_\_

Київ – 2020 року

## ВІДОМІСТЬ ДИПЛОМНОГО ПРОЄКТУ

№ з/п	Формат	Позначення	Найменування	Кількість листів	Примітка
1	A4		Завдання на дипломний проєкт	2	
2	A4	ДП ПК61. 00.000 ПЗ	Пояснювальна записка	67	
3	A1	ДП ПК61. 01.000 ТК	Складальний кресленик. П'єзоперетворювач	1	
4	A3	ДП ПК61. 02.000 ТК	Деталювання. Корпус	1	
5	A3	ДП ПК61. 03.000 ТК	Деталювання. Кришка	1	
6	A1	ДП ПК61. 04.000 ТК	Схема електрична принципова	1	
7	A1	ДП ПК61. 05.000 ТК	Схема структурна	1	

				<b>ДП ПК61.20.000.00</b>		
	ПБ	Підп.	Дата			
Розробн.	Швидкий О.В.			<b>Відомість дипломного проєкту</b>	Лист	Листів
Керівн.	Куц Ю.В.				1	1
Консульт.					КПІ ім. Ігоря Сікорського Каф. ПСНК Гр. ПК-61	
Н/контр.	Лашко О.В.					
Зав.каф.	Протасов А.Г.					

**Пояснювальна записка**  
**до дипломного проєкту**  
**на тему: «Ультразвуковий прилад для контролю**  
**виробів з композиційних матеріалів»**

Київ – 2020 року

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

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

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

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

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

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ Анатолій ПРОТАСОВ

« \_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2020 р.

**ЗАВДАННЯ**

**на дипломний проєкт студенту  
Швидкого Олександра Вікторовича**

1. Тема проєкту «Ультразвуковий прилад для контролю виробів з композиційних матеріалів», керівник проєкту Куц Юрій Васильович, доктор технічних наук, професор, затверджені наказом по університету від «25» травня 2020 р. № 1180-с

2. Термін подання студентом проєкту 9 червня 2020 року

3. Вихідні дані до проєкту: товщина композиту: 5...10 мм

4. Зміст пояснювальної записки

Вступ

1. Аналіз виробів з композитних матеріалів як об'єктів неруйнівного контролю

2. Розрахунок акустичного тракту приладу

3. Обґрунтування амплітудо-фазового методу вимірювання часових інтервалів з використанням фазоманіпульованих сигналів

4. Підбір компонентів електричної принципової схем

## Висновки

### Список використаних джерел

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

1 – Схема електрична принципова

2 – Схема електрична структурна

3 – П'єзоперетворювач

4 – Корпус

5 – Кришка

6. Консультанти розділів проєкту\*

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

7. Дата видачі завдання \_\_\_\_\_

### Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проєкту	Термін виконання етапів проєкту	Примітка
1	Формулювання завдання проєкту	10.02.2020	
2	Обговорення змісту ПЗ	18.02.2020	
3	Розрахунок компонентів	20.03.2020	
4	Оформлення пояснювальної записки	24.04.2020	
5	Розробка креслеників	3.06.2020	

Студент

Олександр ШВИДКИЙ

Керівник

Юрій КУЦ

\_\_\_\_\_

## Анотація

У даній роботі був спроектований ультразвуковий прилад для контролю виробів з композиційних матеріалів.

У першому розділі було виконано аналіз виробів з композитних матеріалів як об'єктів ультразвукового контролю, розглянуто фізико-механічні характеристики композиційних матеріалів, обґрунтовано використання лунаїмпульсного методу ультразвукової товщинометрії для контролю композитів та розглянуто нормативно-методичні матеріали ультразвукового неруйнівного контролю.

У другому розділі був здійснений розрахунок акустичного тракту приладу та визначено геометричні розміри п'єзопласитини.

У третьому розділі проведено моделювання амплітудо фазового метода визначення часових інтервалів з використанням фазоманіпульованих сигналів та розроблено структуру приладу

У четвертому розділі виконаний підбір та розрахунок компонентів для електричної принципової схеми.

У висновку наведено загальні результати, отримані під час виконання дипломного проекту.

Сторінок основного тексту 67, використаних джерел 32, графічна частина складається з п'яти креслень. Схема електрична принципова – А1, структурна схема – А1, складальний кресленик – А1, деталювання: Кришка – А3, Корпус – А3.

## **Annotation**

In this work, an ultrasonic monitor for composite materials products was designed.

At the first distribution, there is a complete analysis of the types of composite materials with ultrasound control, the physical and mechanical characteristics of composite materials are examined, and the brown-and-white method of ultrasonic monitoring is wound up. In the second section, the acoustic path of the device was calculated and the geometric dimensions of the piezoelectric plate were determined.

In the third section the amplitude of the phase method for determining time intervals using phase-manipulated signals is modeled and the structure of the device is developed.

In the fourth section the selection and calculation of components for the electrical schematic is performed.

The conclusion presents the general results obtained during the implementation of the diploma project.

The pages of the main text 67, the sources used 32, the graphic part consists of five drawings. Schematic electrical diagram – A1, block diagram – A1, assembly drawing – A1, detailing: Cover – A3, Housing – A3.





3.3. Структура приладу.....	49
Висновки до 3 розділу .....	52
<b>РОЗДІЛ 4 ПІДБІР КОМПОНЕНТІВ ЕЛЕКТРИЧНОЇ</b>	
<b>ПРИНЦИПОВОЇ СХЕМИ .....</b>	<b>53</b>
4.1. Підбір АЦП.....	53
4.2. Підбір ЦАП.....	54
4.3. Підбір генератора.....	55
4.4. Підбір лічильників .....	55
4.5. Підбір компаратора .....	56
4.6. Підбір Мікроконтролера .....	56
4.7. Розрахунок ФНЧ.....	58
4.8. Підбір підсилювача.....	58
4.9. Підбір комутатора.....	60
4.10. Підбір регістра .....	60
Висновки до 4 розділу .....	61
<b>ВИСНОВКИ .....</b>	<b>62</b>
<b>Список використаних джерел .....</b>	<b>63</b>

## Перелік основних скорочень та позначень

АХС – амплітудна характеристика сигналів;

АЦП – аналогово-цифровий перетворювач;

ЕАТ – електроакустичний тракт;

ДПГ – дискретне перетворення Гільберта;

КМ – конструкційні матеріали;

НК – неруйнівний контроль;

ОК – об'єкт контролю;

ПЕП – п'єзоелектричний перетворювач;

СКВ – середнє квадратичне відхилення;

с/ш – сигнал/шум;

УЗТ – ультразвукова товщинометрія;

УЗНК – ультразвуковий неруйнівний контроль;

ПГ – перетворення Гільберта;

ПК – персональний комп'ютер;

ПЗ – програмне забезпечення;

ЦАП – цифро-аналоговий перетворювач;

ФМ – фазова маніпуляція;

ФХС – фазова характеристика сигналів;

					<b>ПК 61.200000.000ПЗ</b>	Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## ВСТУП

Під час експлуатації та ремонту різноманітних приладів, не раз виникає потреба дослідження їхніх характеристик, таких як геометричні розміри, товщини стінок при одностороннього доступі, наприклад у газових труб. З усіма цими завданнями допомагають впоратися методи ультразвукової товщинометрії (УЗТ), а саме товщиноміри. Товщиномір - вимірювальний прилад що дає змогу визначати товщину з великою точністю.

Одним із основних методів (УЗТ) являється лунаїмпульсний ультразвуковий метод. Він заснований на аналізі часу за який ультразвуковий імпульс проходить через об'єкт контролю та повертається і аналізі амплітуд випроміненого та прийнятого сигналів. Проте лише аналіз часу за який проходить імпульс та прийнятої амплітуди не дає можливість досить точно визначити товщину. Задля підвищення точності використовують окрім часових та амплітудних характеристик ще й фазові, це дозволяє суттєво збільшити точність вимірювання товщини.

Із цим завданням допомагають впоратися фазові методи УЗТ. На сьогоднішній день існує багато різноманітних матеріалів для яких важлива точність виготовлення, та якісний контроль їх параметрів під час експлуатації. Виділяються серед таких них виділяються композиційні та багатошарові матеріали. За рахунок своїх переваг, таких як міцність, легкість, довговічність, вони все частіше починають використовуватися при виготовленні різноманітного обладнання. Тому завдання контролю їхніх параметрів стоїть як ніколи раніше.

При контролі даних матеріалів завдання ускладнюється, за рахунок більшого згасання ультразвукових коливань, порівняно з простими одношаровими матеріалами. При цьому відношення сигнал/шум менше, а це в свою чергу веде до зменшення чутливості, роздільної здатності, збільшення похибки та погіршення інших метрологічних характеристик. Немалу похибку при проведенні контролю створює суміщення відбитих від межі сигналів у

					<b>ПК 61.200000.000ПЗ</b>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		11

часі, що ускладнює контроль. Усі вищеперераховані несприятливі фактори, при контролі композитних матеріалів, ведуть до більш прискіпливого підходу, а саме вибору методів та засобів опрацювання інформаційних сигналів з підвищеними вимогами.

Метою даного дипломного проекту є розробка структурної, функціональної та електрично-принципової схем ультразвукового приладу для контролю товщини композиційних матеріалів. А саме, товщини захисних плоско-паралельних пластин, які забезпечують захист від радіаційного випромінювання та виготовлені на основі вольфраму і полістиролу.

					<b>ПК 61.200000.000ПЗ</b>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		12

# РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ВИРОБІВ З КОМПОЗИТНИХ МАТЕРІАЛІВ ЯК ОБ'ЄКТІВ УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОНТРОЛЮ

## 1.1. Обґрунтування лунаїмпульсного методу УЗТ для контролю виробів з композитних матеріалів

Існує велика кількість різноманітних методів УЗТ. Кожен з них використовується у відповідності з поставленими завданнями, має свої переваги та недоліки. Класифікація основних методів представлена на рис. 1.1.

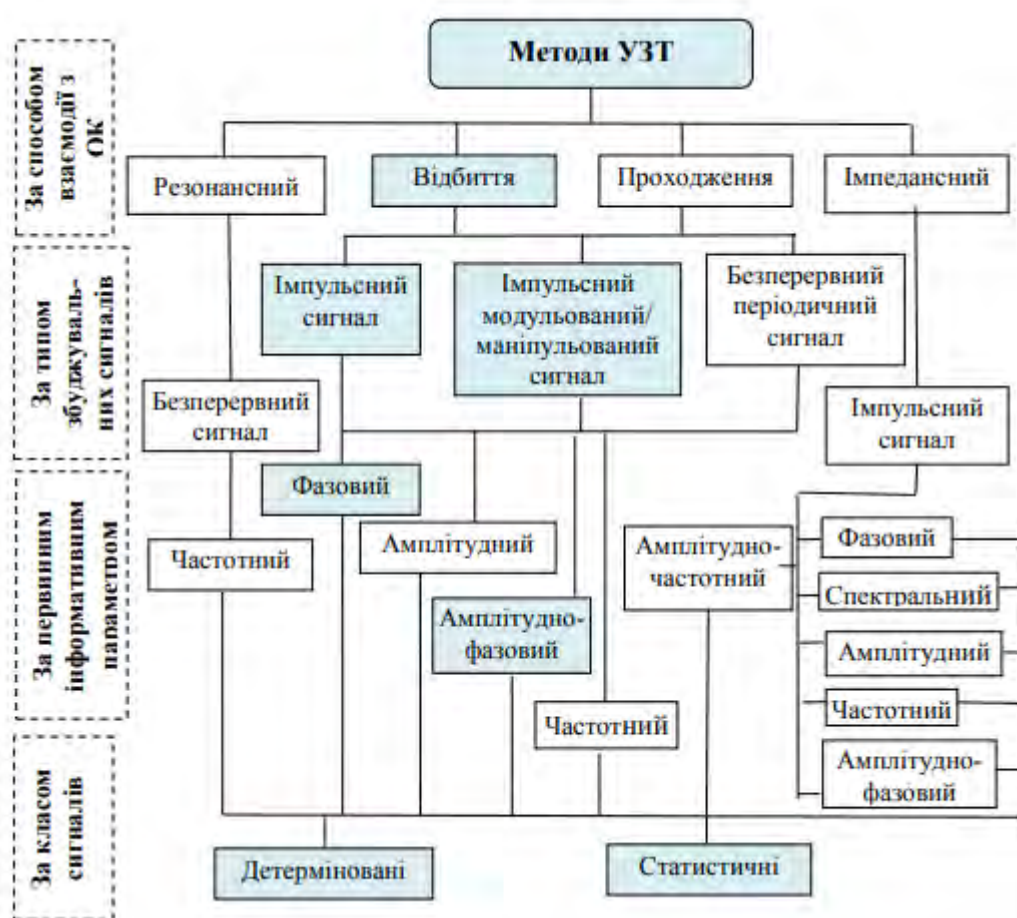


Рис. 1.1 – Класифікація основних методів УЗТ

Методами які отримали найбільше розповсюдження при контролі товщини є лунаїмпульсний та резонансний методи [1]. В свою чергу лунаїмпульсний поділяється на лунаметод з еталонуванням та безеталонний лунаїмпульсний метод [8]. Перший потребує калібрування, на відміну від

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

другого, однак є простішим, що у свою чергу зменшує дороговизну, у порівнянні з другим.

В найпростішому випадку для визначення товщини  $h$  виконуть аналіз часу  $\tau$  між зондуєчим та першим донним імпульсом [3]. В загальному випадку розрахунок проводять з допомогою формули 1.1.

$$h = \frac{c * \tau}{2}, \quad (1.1)$$

Де  $c$  – швидкість звуку в об’єкті контролю (ОК),  $\tau$  – час за який ультразвук проходить через ОК та повертається назад,  $h$  – вимірювана товщина.

В даному випадку необхідно знати точне значення швидкості поширення звуку в ОК, в протилежному випадку товщина буде визначена з похибкою. Для цього використовують зразки із того ж матеріалу що й ОК та з відомою товщиною, так звані калібрувальні зразки.

Серед основних вимог, що пред’являються до ОК є: стан поверхні, однакове відтворення швидкості звуку в різних напрямках, форми та інші. Якщо потрібно визначити товщину ОК у якого присутнє лакофарбне покриття застосовують зразок з аналогічним покриттям. У випадках коли ОК являє собою об’єкт криволінійної форми, наприклад труби, застосовують зразок аналогічної форми [4].

Перетворення електричних сигналів в ультразвукові коливання, та навпаки, найчастіше відбувається за рахунок п’єзоелектричних перетворювачів (ПЕП). Однак це можливо зробити іншим способом, наприклад з допомогою електромагнітноакустичних перетворювачів (ЕМА) [7]. Перші потребують використання контактної рідини на відміну від других. Однак на сьогоднішній день вони залишаються на етапі лабораторних досліджень, через дуже низький коефіцієнт перетворення електричних сигналів у механічні коливання [8]. Даний коефіцієнт менший

					<b>ПК 61.200000.000ПЗ</b>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		14

ніж у тих же п'єзоелектричних перетворювачів приблизно у 1000 разів. Задля протидії цьому використовують величезні напруги живлення. В наслідок цього перетворювачі можуть розжарюватися, що викликає проблеми під час експлуатації, не говорячи уже за те що для підтримання такого обладнання потрібна власна електростанція. Саме тому більше поширення отримали саме ПЕП.

Найчастіше використовують роздільно-суміщені або прямі суміщені перетворювачі. Можливе використання одного перетворювача, який буде одночасно випромінювати і приймати сигнал або двох один буде відповідати лише за випромінення а інший лише за приймання сигналу. Задля отримання донних сигналів великої амплітуди роботу перетворювачів розраховують для ближньої зони, так званої зони Френеля. При визначенні товщини використовують не одне значення  $\tau$ , а декілька, а потім знаходять середнє арифметичне набору значень часу. Це дозволяє зменшити похибку вимірювання.

При розрахуванні коефіцієнта акустичного тракту  $K_{a.t.}$  для ближньої зони використовують формулу 1.2.

$$K_{a.t.} = \frac{p_{\Pi}}{p_{В}} = 0,8T_I R_p e^{-2h\delta_p}, \quad (1.2)$$

де  $T_I$  – коефіцієнт проходження пружних коливань через границю двох середовищ за інтенсивністю,  $R_p$  – коефіцієнт відбиття пружних коливань від границі двох середовищ за тиском,  $\alpha p$  – коефіцієнт загасання пружних коливань в середовищі ОК за тиском

Коефіцієнти  $T_I$  та  $R_p$  визначаються через акустичні імпеданси суміжних середовищ за формулами (1.3) та (1.4).

					<b>ПК 61.200000.000ПЗ</b>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		15

$$T_I = \frac{4z_1 z_2}{(z_1 + z_2)^2}, \quad (1.3)$$

$$R_p = \frac{z_1 - z_2}{(z_1 + z_2)}, \quad (1.4)$$

Приклад тракту з прямим ПЕП представлений на рис. 2.1 для випадку коли відбивачем є донна поверхня.

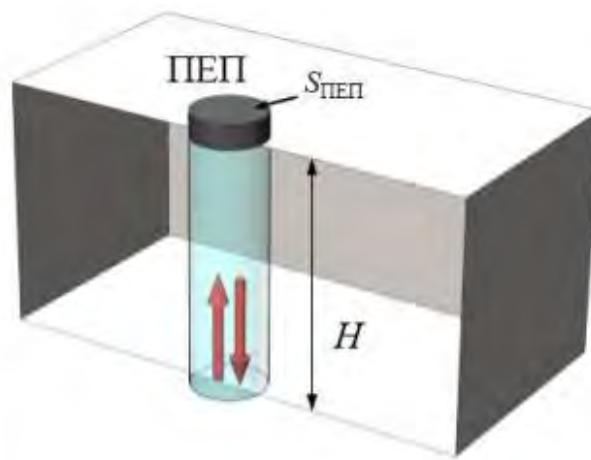


Рис. 2.1 – Акустичний тракт для ближньої зони

де  $h$  – товщина,  $S_{\text{ПЕП}}$  – площа перетворювача.

Оскільки частина відлунь може опинитися в дальній зоні, їх потрібно врахувати та оцінити їх амплітуду. Для визначення коефіцієнту акустичного тракту  $K_{\text{а.т.}}$  у дальній зоні використовують формулу (1.5).

$$K_{\text{а.т.}} = \frac{S_{\text{ПЕП}}}{2\lambda H} T_I R_p e^{-2H\delta_p}, \quad (1.5)$$

Акустичний тракт для випадку коли відбивачем є донна поверхня у дальній зоні наведено на рис. 1.3.



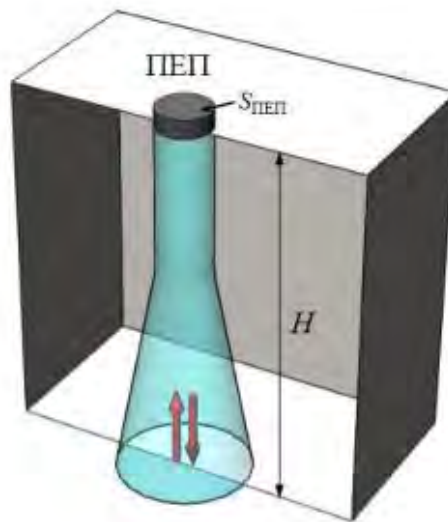


Рис. 1.3 – Акустичний тракт для дальньої зони

де  $h$  – товщина,  $S_{\text{ПЕП}}$  – площа перетворювача.

Під час проходження акустичного імпульсу через ОК амплітуда сигналу сильно зменшується. Приклад зонduючого та відбитого сигналу наведено на рис. 1.4.

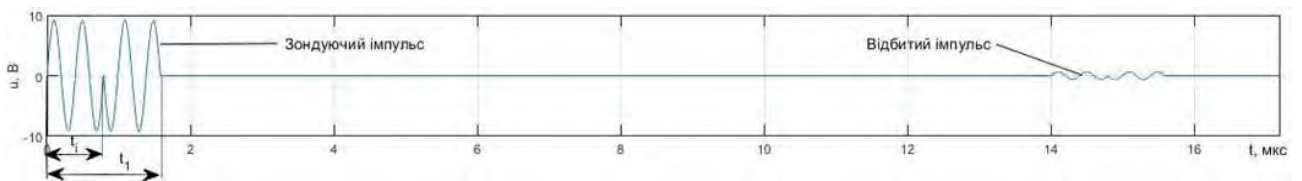


Рис 1.4 – Графік зонduючого та відбитого сигналів, при луноімпульсній товщинометрії

Як видно з графіка Амплітуда після проходження через ОК сильно падає, це пов'язано з малим коефіцієнтом акустичного тракту в композитних матеріалів [10]. В наслідок цього сигнал дуже сильно послаблюється, амплітуда зменшуються.

В загальному випадку аналітична модель луноімпульсного товщиноміра, що працює за еталонуванням представлено на рис. 1.5.

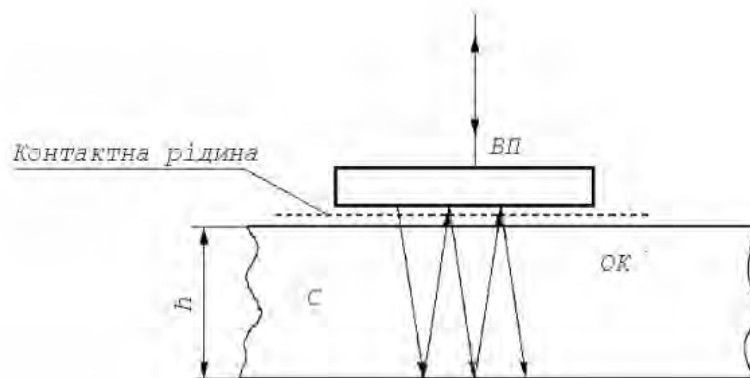


Рис. 1.5 – Аналітична модель луноімпульсного товщиноміра де ВП – вимірювальний пристрій, ОК – об’єкт контролю,  $h$  – товщина.

В даному випадку ВП являється одночасно приймачем та випромінювачем ультразвукових коливань. Контактна рідина необхідна для забезпечення акустичного контакту між ОК та перетворювачем-приймачем [9].

При її відсутності сильно ускладнюється передача звукових імпульсів в ОК. В ролі контактної рідини може виступати вода або технічне мастило.

## 1.2. Аналіз фізико-механічних характеристик композиційних матеріалів

Композитні матеріали - це багатокомпонентні матеріали, які зазвичай складаються з пластичної основи (матриці), та армованого наповнювача, що має велику міцність, жорсткість та інші важливі характеристики. Підбираючи склад матриці та наповнювача можна отримувати матеріали з необхідними властивостями які кардинально відрізняються від тих які мають складові композиту [3].

Композитні матеріали отримали велике поширення у багатьох галузях виробництва, таких як: авіабудування, ракетобудування, суднобудування, електроніка, оборотне виробництво, автомобілебудування та інші. Таке широке поширення стало можливе завдяки їхнім властивостям. Які багато в чому виграють у порівнянні з простими матеріалами.

					<b>ПК 61.200000.000ПЗ</b>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		18

Композитні матеріали це підрозділ конструкційних матеріалів (КМ), до якого також входять металеві та неметалеві конструкційні матеріали.

Класифікація КМ за природою походження наведена на рис. 1.6.



Рис 1.6 – Класифікація КМ (за природою походження)

Самі ж композиційні матеріали поділяються на ті, що мають за основу: полімерну, металеву, неорганічну та інші матриці.

Металеві КМ поділяються за системами сплавів на: сплави кольорових металів та чорні метали. Акустичні властивості деяких з них (для частоти 2,5 МГц) наведено в табл. 1.1.

Табл. 1.1 – Акустичні властивості металевих КМ

Речовина	$c_l * 10^3,$ м * с <sup>-1</sup>	$c_t * 10^3,$ м * с <sup>-1</sup>	$\rho * 10^3,$ кг * м <sup>3</sup>	$\alpha,$ Нп * м <sup>-1</sup>	$z * 10^{-6},$ кг / м <sup>2</sup> * с
Алюміній	6,24	3,1	2,7	0,1...1,0	0,05...0,06
Бронза	3,5...3,8	2,3...2,5	8,0...9,0		30,0...34,0
Вольфрам	5,32	2,6	19,3		102,7

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

**ПК 61.200000.000ПЗ**

Арк.

19

Дюралюміній	6,2...6,4	3,0...3,2	2,7...2,8	0,1...1,0	19,0...20,0
Залізо	5,93	3,23	7,8		46,3
Латунь	4,3...4,7	3,1...3,5	8,4...8,5	0,2...5,0	36,0...40,0
Мідь	4,72	2,4	8,9	0,5...5,0	42,0
Нікель	5,7	3,0	8,9		50,7
Сталь вуглецева	5,9...5,94	3,2...3,25	7,7...7,9	0,1...10	45,9...46,3
Титанові сплави	6,05...6,3	3,1...3,3	4,5...4,7		27,0...29,0
Сталь аустенітна	5,7...6,14	3,305	7,6...8,0	0,3...40	44,0...48,0
Чавун	3,5...5,8	2,2...3,2	7,2...7,6	0,3...50	26,0...42,0

де  $c_l$  – швидкість поздовжніх хвиль;  $c_t$  – швидкість поперечних хвиль;  
 $\alpha$  – коефіцієнт згасання за інтенсивністю;  $z$  – акустичний імпеданс;  $\rho$  –  
густина матеріалу.

Неметалеві КМ мають у своєму списку: скло, кераміку,  
металокераміку, пластики, деревина та інші [2]. Вони діляться за складом,  
способом отримання, різновидами наповнювачів та типом їх розташування в  
матеріалі. Їхні акустичні властивості наведені в табл. 1.2.

Табл. 1.2 – Акустичні властивості неметалевих КМ

Речовина	$c_l * 10^3,$ $м * с^{-1}$	$c_t * 10^3,$ $м * с^{-1}$	$\rho * 10^3,$ $кг * м^3$	$\alpha,$ $Нп * м^{-1}$	$z * 10^{-6},$ $кг / м^2 * с$
----------	-------------------------------	-------------------------------	------------------------------	----------------------------	----------------------------------

Бетон	2,1...5,2		1,8...2,8		6,0...9,5
Полістирол	2,37	1,12	1,12	10...13	2,5
Скло віконне	5,7	3,4	2,1...2,6	0,4...0,7	11...15
Органічне скло	2,65...2,73	1,12...1,2	1,17...1,2	25...35	3,0...3,3
Текстоліт	2,4...2,8		2,3...2,5	80...120	6,0...6,4
Фарфор	5,3...5,35	3,5...3,7	2,3...2,6	0,1...0,4	15...20
Фторопласт	1,35		2,2	180	3,0
Ебоніт	2,4		1,2	90	2,9
капрон	2,5	1,1	1,1		
Нейлон	1,8...2,2		1,1...1,2	33	

Для композитних матеріалів характерний великий коефіцієнт загасання ультразвукових коливань. Це пов'язано у першу чергу із тим що такі матеріали мають у своєму складі декілька матеріалів. А саме, декілька шарів у багатошарових КМ, або частинки чи вкраплення іншорідного матеріалу всередині матриці. На межі кожного шару відбувається часткове відбиття та втрата енергії, а при частинках великого розміру в матриці КМ, призводить до великого розсіювання коливань, інтерференції та дифракції.

Все це створює перешкоди при поширенні ультразвукових коливань та веде до малої амплітуди прийнятих коливань. Основними перевагами композитних матеріалів є міцність та легкість. В свою чергу мається на увазі не звичайна, а конструкційна міцність.

					<b>ПК 61.200000.000ПЗ</b>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		21

Конструкційна міцність - це міцність, що враховує конструкційні, експлуатаційні і технологічні чинники [7]. Вона майже завжди менша ніж у самого матеріалу. На неї впливає багато чинників серед яких: форма та розмір, стан матеріалу, особливості середовища в якому буде проходити експлуатація, анізотропія характеристик матеріалу, стан матеріалу біля поверхневих шарів та інші.

Серед вищеперерахованих чинників великий вплив на конструкційну міцність відіграє геометрія деталі. І саме зміна геометричних розмірів під час використання деталі веде до її руйнування. Адже при зміні геометрії змінюється розподіл сил та механічних напружень, які впливають на деталь

Тому потрібно своєчасно контролювати стан таких деталей аби протидіяти цьому та своєчасно ремонтувати або замінити пошкоджені деталі. А з даним контролем і допомагають сучасні методи УЗТ. Композитним матеріалам притаманні такі хіміко-фізичні характеристики як:

- Густина  $d$  в діапазоні: 400 - 2600 кг/м<sup>3</sup>.
- Границя міцності  $\sigma_b$  в діапазоні: 500 – 1300 МПа.
- Модуль пружності  $E$  в діапазоні: 35 – 250 ГПа.
- Питома міцність  $\sigma_b/d$  в діапазоні: 40 – 60.
- Питома жорсткість  $E/d$  в діапазоні: 0,4 – 0,6.

Як видно з характеристик композитних матеріалів вони мають такий набір характеристик, що дозволяє їм конкурувати із металами, а в деяких випадках навіть перевершувати їх. Однак їхні акустичні властивості сильно ускладнюють проведення контролю.

При створенні багат шарових композитних матеріалів не раз стоїть задача яким чином поїдати кілька різних матеріали разом. Зазвичай використовують клей або пайку. У випадку з металами доцільно використовувати пайку, адже паяне з'єднання більш міцне ніж клейове. А у випадку коли ми працюємо з неметалами використовують клей.

					<b>ПК 61.200000.000ПЗ</b>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		22

Хоча на сьогоднішній день існує велика кількість різноманітних клеїв, що вражають своєю міцністю з'єднання. У табл. 1.3 наведені типові приклади створення композитних багатошарових матеріалів.

Табл. 1.3 – Приклад утворення матеріалів із кількох шарів

Схема	Матеріал елементів	Вид з'єднання
 <p>1 – обшивка; 2 - лонжерон</p>	1 – метал або армований пластик; 2 – метал або пластик	Клейове або паяне
 <p>1 – покриття; 2 - каркас</p>	1- пластик армований або неармований; 2- метал	Клейове
 <p>1-3 – неметалічні шари різного призначення</p>	1-3 – пластик армований або неармований	Клейове
 <p>1,2 - листи</p>	1,2 – метал або пластик	Клейове

Як можна побачити існує велика кількість різноманітних способів об'єднання шарів композиту разом.

Більш детально буде розглянуто композит на основі вольфраму та полістиролу. У ролі матриці буде виступати полістирол а в ролі армуючих компонентів буде виступати порошкоподібний вольфрам марки 9.0 і 20.0. Пластини виготовлені з композиту на основі вольфраму дуже часто застосовують як аналог для захисту від радіаційного випромінювання.

На відміну від важких свинцевих пластин, пластини з даного композиту є більш легкими, і майже не поступаються у захисних властивостях з пластинами із свинцю [5]. Такі властивості даного композита пов'язані у першу чергу із тим що вольфрам має велику густину ( $\rho_{\text{вф}} = 19,25 \text{ г/см}^3$ ), а це в свою чергу дозволяє радіаційному випромінюванню затримуватись всередині частинок порошку вольфраму. А матриця з полістиролу надає легкості.

Адже густина полістиролу складає всього ( $\rho_{\text{пс}} = 1,069 - 1,125 \text{ г/см}^3$ ).  
 Задля більш однакових фізичних характеристик даного композиту, порошок  
 вольфраму проходить додаткову обробку.

Його завантажують в спеціальну S-подібну трубку та промивають  
 потоком дистильованої води, а регулювання кута трубки та швидкості подачі  
 води, дозволяє отримувати різні фракції порошку [6]. Схема промивки  
 порошку з вольфраму представлена на рис. 1.7.

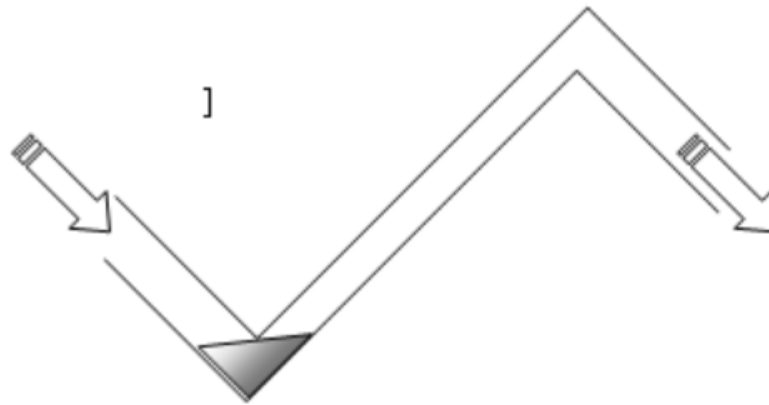
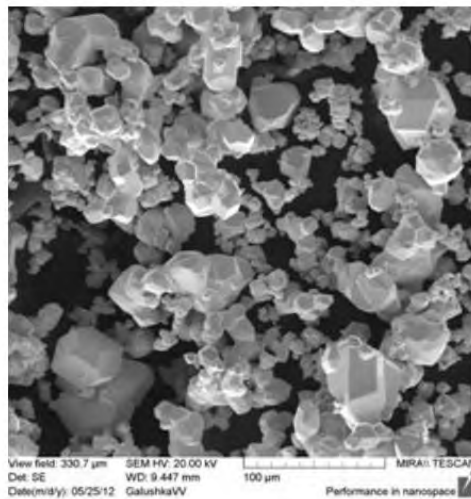
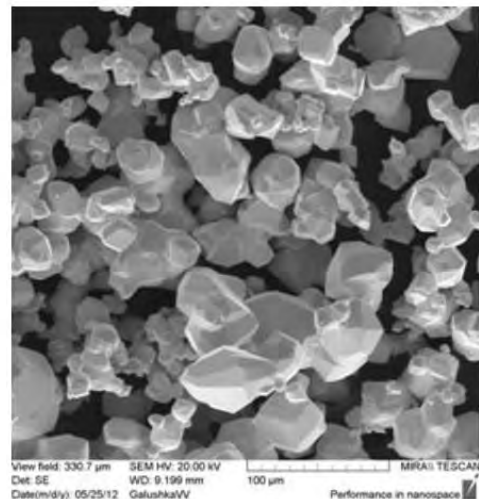


Рис. 1.7 – Схема промивки порошку з вольфраму

Після промивки зображення порошоків показано на рис. 1.8.



а)



б)

Рис. 1.8 – Ілюстрація порошку вольфраму до промивки та після,

а) до промивки б) після промивки

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

**ПК 61.200000.000ПЗ**

Арк.

24



Як ми можемо переконатися після промивки вольфрам став більш однорідним, за розміром (діапазон значень діаметрів зменшився).

В якості полімеру при виготовленні композита метал-полімер використовують полістирол марки 500. В початковому вигляді гранули даного матеріалу мають розмір в середньому 4 мм. Тому його додатково подрібнюють за допомогою планетарної мікрмельниці. На рис. 1.9 представлено результат подрібнення.

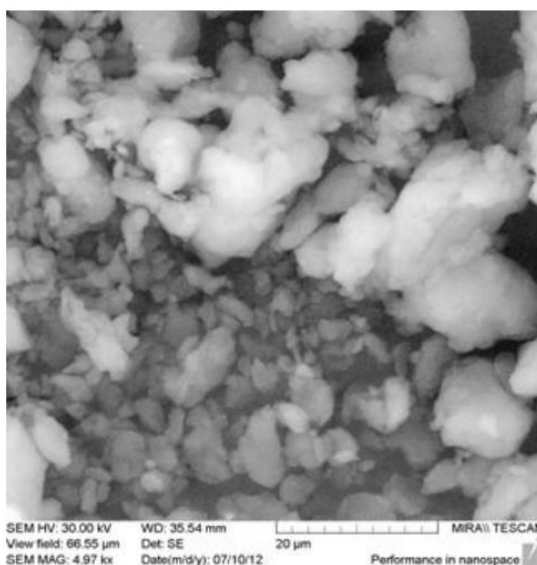


Рис. 1.9 – Полістирол після подрібнення

Приготування даного композиту здійснюється за допомогою змішування полістиролу з необхідною кількістю порошку вольфраму, після чого порошок запікається при температурі 155 (C<sup>0</sup>) та потрапляє на прес - форму [10].

На рис. 1.10, 1.11 та 1.12 представлено залежність швидкості поширення звуку і затухання, густини та імпедансу відносно об'ємної частки вольфраму в композиті метал-полімер.

Для розрахунків в подальшому будуть використовуватися характеристики для 60 % частки вольфраму в композиті. Це забезпечує золоту середину між вагою та здатністю захищати від радіації.

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

**ПК 61.200000.000ПЗ**

Арк.

25



Рис. 1.10 – Графік залежності швидкості поширення звуку та затухання від об'ємної частки вольфраму

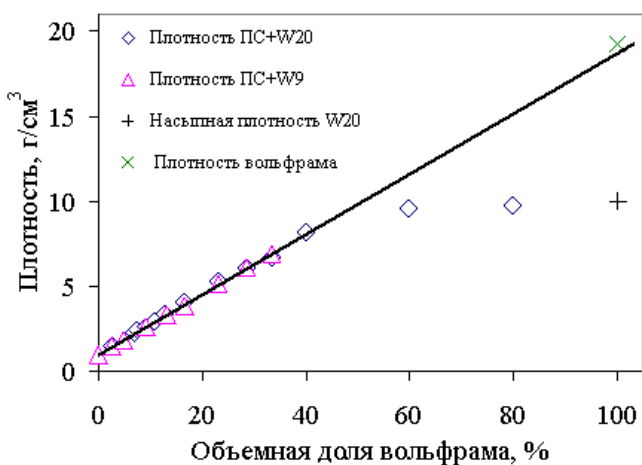


Рис. 1.11 – Графік залежності густини від об'ємної частки вольфраму

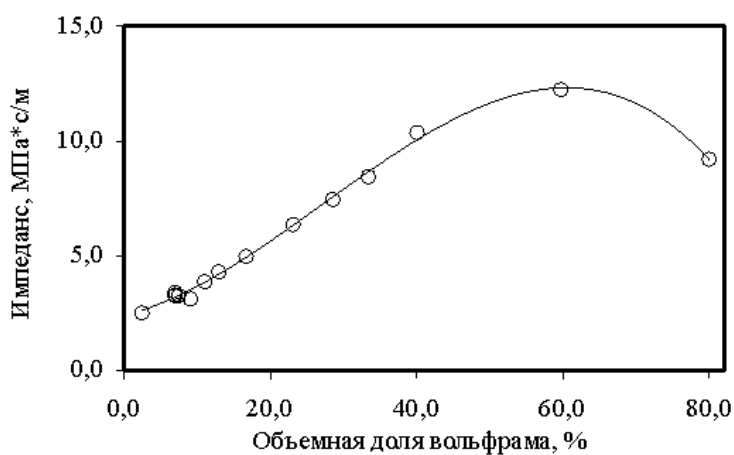


Рис. 1.12 – Графік залежності імпедансу від об'ємної частки вольфраму

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

### 1.3. Нормативно-методичне забезпечення ультразвукового неруйнівного контролю

Під час проведення ультразвукового неруйнівного контролю не один раз стоїть задача його правильного проведення та оформлення результатів. Необхідно правильно підібрати зразки для калібрування, вірно налаштувати прилади які будуть здійснювати контроль.

Також немалу роль грає чистота поверхні ОК, тому її слід підготувати до проведення ОК, відповідно до нормативів. У вирішені всіх цих питань допомагають нормативно-методичні документи. У них сформульовані необхідні умови проведення та реалізації контролю.

В загальному випадку за галузями використання нормативно-методичні документи поділяються на ті, що використовуються в:

- авіації;
- металургії;
- дослідженні властивостей матеріалів;
- зварюванні та пайці;
- атомній енергетиці;
- резервуари під тиском;
- трубне виробництво;
- нафта та газ;
- будівництво.

Для кожної галузі розроблена своя сукупність необхідних нормативів. Важливою є і сертифікація персоналу, який буде здійснювати контроль.

За сертифікацію персоналу відповідають такі нормативно-методичні документи як EN ISO 9712: 2012 та EN 4179 до: 2017 [11]. В даних документах детально розписано про рівні кваліфікації у сфері НК, вимоги

					<b>ПК 61.200000.000ПЗ</b>	Арк.
						27
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

яким мають відповідати спеціалісти та необхідні умови задля отримання цих рівнів.

Існує величезна кількість стандартів у сфері ультразвукового НК, як закордонних так і державних. В табл. 1.4 наведені основні державні стандарти у сфері ультразвукового НК, більш детально виведені стандарти у сфері УЗТ.

Для якісного проведення контролю потрібно відповідати всім вимогам зазначених у даних документах. Тільки за умови їх дотримання контроль буде проведено якісно, що в свою чергу забезпечить підтримання ОК в належному чині. За стандартизацію в галузі НК та технічну діагностику в Україні відповідає ТК-78 "Технічна діагностика і неруйнівний контроль". Даний комітет відповідає за введення нормативних документів всіх рівнів, від стандартів підприємств до національних. Також на задачу ТК-78 покладено узгодження європейських (EN) та міжнародних (ISO) стандартів з існуючими в нашій державі.

Табл. 1.4 – Чинні стандарти ультразвукового НК

ДСТУ EN 583-4:2007	Неруйнівний контроль. Ультразвуковий контроль. Частина 4. Контролювання несущільностей, перпендикулярних до поверхні
ДСТУ EN 1330-4:2016 — На заміну ДСТУ EN 1330-4:2008	Неруйнівний контроль. Термінологія. Частина 4. Терміни стосовно ультразвукового контролю
ДСТУ EN ISO 2400:2016 — На заміну ДСТУ 4001–2000 (ISO 2400:1972)	Неруйнівний контроль. Ультразвуковий контроль. Технічні умови на калібрувальний зразок № 1
ДСТУ EN ISO 7963:2016 — На заміну ДСТУ 4002–2000 (ISO 7963:1985)	Неруйнівний контроль. Ультразвуковий контроль. Технічні умови на калібрувальний зразок № 2
ДСТУ ISO 10375:2015	Контроль неруйнівний. Ультразвуковий контроль. Визначення характеристик перетворювача й акустичного поля

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

**ПК 61.200000.000ПЗ**

Арк.

28

<b>ДСТУ EN ISO 16810:2016 — На заміну ДСТУ EN 583-1- 2001</b>	Неруйнівний контроль. Ультразвуковий контроль. Загальні вимоги
<b>ДСТУ EN ISO 16811:2015</b>	Неруйнівний контроль. Ультразвуковий контроль. Налаштування чутливості і діапазону розгортки
<b>ДСТУ EN ISO 16823:2016 — На заміну ДСТУ EN 583- 3:2005</b>	Неруйнівний контроль. Ультразвуковий контроль. Метод проходження
<b>ДСТУ EN ISO 16826:2015</b>	Неруйнівний контроль. Ультразвуковий контроль. Виявлення несучільностей перпендикулярних до поверхні
<b>ДСТУ EN ISO 16827:2015</b>	Неруйнівний контроль. Ультразвуковий контроль. Визначення характеристик і розмірів несучільностей
<b>ДСТУ EN 10160:2015</b>	Контроль ультразвуковий сталевих виробів плоскої форми завтовшки 6 мм або більше (метод відбиття)
<b>ДСТУ EN 10306:2017</b>	Залізо і сталь. Ультразвуковий контроль двотаврових балок Н і І перетинів з паралельними полками.
<b>ДСТУ EN 10308:2015</b>	Неруйнівний контроль. Ультразвуковий контроль сталевого сортового прокату
<b>ДСТУ EN 12668-1:2015</b>	Неруйнівний контроль. Характеристика і верифікація обладнання для ультразвукового контролю. Частина 1. Прилади
<b>ДСТУ EN 12668-2:2015</b>	Неруйнівний контроль. Характеристика і верифікація обладнання для ультразвукового контролю. Частина 2. Перетворювачі
<b>ДСТУ EN 12668-3:2015</b>	Неруйнівний контроль. Характеристика і верифікація обладнання для ультразвукового контролю. Частина 3. Комбіноване обладнання
<b>ДСТУ EN 14127:2014</b>	Неруйнівний контроль. Ультразвукове вимірювання товщини
<b>ДСТУ EN 15317:2015</b>	Неруйнівний контроль. Ультразвуковий контроль. Характеристика і верифікації обладнання для ультразвукової товщинометрії
<b>ДСТУ ISO 12710:2017</b>	Неруйнівний контроль. Ультразвуковий контроль. Оцінка електронних

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

**ПК 61.200000.000ПЗ**

Арк.

29

	характеристик ультразвукових дефектоскопів
<b>ДСТУ ISO 16831:2017 (ISO 16831:2012, IDT)</b>	Неруйнівний контроль. Ультразвуковий контроль. Визначення характеристик і верифікація ультразвукового обладнання для вимірювання товщини

Серед стандартів у сфері ультразвукового НК є і ті що втратили свою чинність, їх перелік наведений у табл. 1.5. Це пов'язано з тим що прогрес не стоїть на місці, з'являються нові вимоги до точності контролю та нові методи його проведення. Саме тому з часом відбувається вихід з чинності старих нормативів та вхід більш сучасних. Нові нормативи вже можуть давати відповідь на питання яким чином контролювати нові матеріали та розроблені прилади з потрібною точністю, на відміну від застарілих.

Табл. 1.5 – Нормативи що втратили чинність

<b>ДСТУ EN 583-1-2001</b>	Неруйнівний контроль. Ультразвуковий контроль. Частина 1. Загальні вимоги
<b>ДСТУ EN 583-3:2005</b>	Неруйнівний контроль. Контроль ультразвуковий. Частина 3. Метод проходження
<b>ДСТУ EN 1330-4:2008</b>	Неруйнівний контроль. Термінологія. Частина 4. Терміни стосовно ультразвукового контролю
<b>ДСТУ EN 1712:2005</b>	Неруйнівний контроль зварних з'єднань. Контроль зварних з'єднань ультразвуковий. Рівні приймання
<b>ДСТУ EN 1713:2005</b>	Неруйнівний контроль зварних з'єднань. Контроль ультразвуковий. Характеристика індикацій дефектів зварних швів
<b>ДСТУ EN 1714:2005</b>	Неруйнівний контроль зварних з'єднань. Контроль зварних з'єднань ультразвуковий
<b>ДСТУ EN 10228-3-2001</b>	Неруйнівний контроль поковок із сталі. Частина 3. Ультразвуковий контроль поковок з феритної чи мартенситної сталі

## Висновки до 1 розділу

В даному розділі було здійснено обґрунтовано використання лунаімпульсного методу УЗТ, для контролю композиту метал-полімер на основі вольфраму та полістиролу. Цей метод достатньо простий в реалізації та дає змогу контролювати даний матеріал з необхідною точністю .

Було проведено огляд нормативно-методичного забезпечення в галузі ультразвукового НК. Де ми побачили, що існує велика кількість нормативів, які задають правила вірного виконання контролю.

Також було виконано аналіз фізико-механічних властивостей композиційних матеріалів. Більш детально описано акустичні властивості композиту на основі вольфраму та полістиролу як матеріалу для захисту від радіаційного випромінювання, та наведено приклад виготовлення даного матеріалу.

Виходячи з цього можемо зробити висновок що даний матеріал якнайкраще підходить як заміна важким свинцевим пластинам для захисту від радіації.

					<b>ПК 61.200000.000ПЗ</b>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		31

## РОЗДІЛ 2 РОЗРАХУНОК АКУСТИЧНОГО ТРАКТУ ПРИЛАДУ

### 2.1. Обґрунтування структури тракту

Акустичний тракт представляє собою шлях від перетворювача до дефекта або, в моєму випадку, до донної поверхні ОК та назад до приймача. В основному розрахунок акустичного тракту зводиться до визначення коефіцієнта акустичного тракту. На рис. 2.1 представлено модель акустичного тракту для прямого ПЕП у випадку коли відбивачем є донна поверхня для ближньої та дальньої зони.

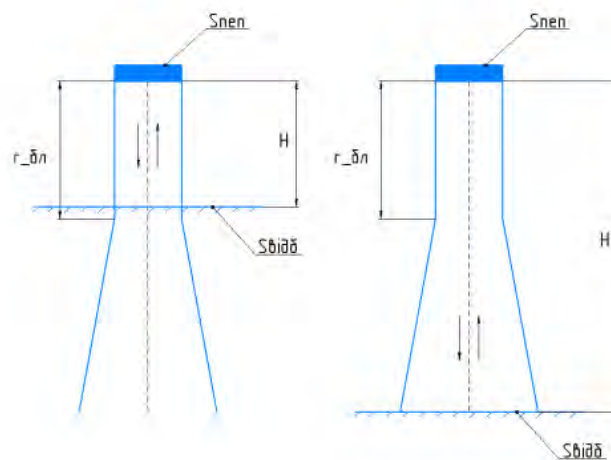


Рис. 2.1 – Модель акустичного тракту для випадку коли відбивачем є донна поверхня для ближньої та дальньої зони

У зв'язку із тим, що конструкція ПЕП має в своєму складі ще й шар контактної рідини (моторне масло), така конструкція вважається багатошаровою лінією затримки, саме тому потрібно врахувати вплив усіх шарів на коефіцієнт акустичного тракту. На рис. 2.2 зображено променеву картину проходження акустичного тракту.



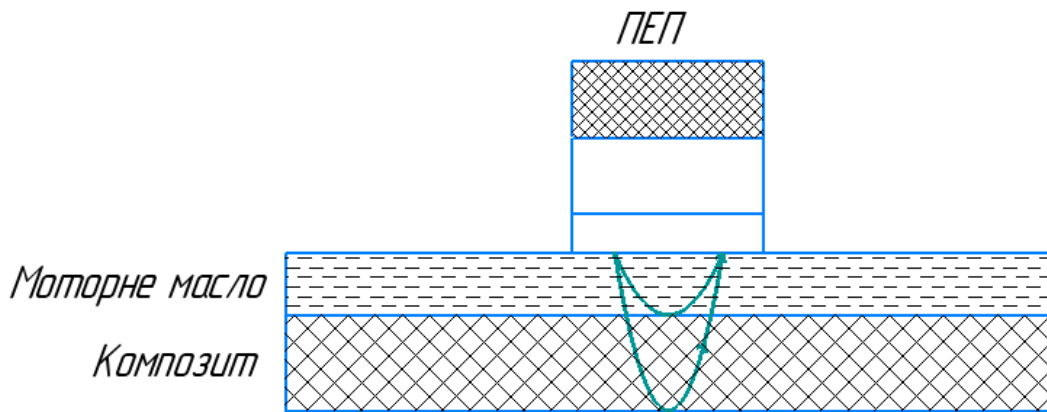


Рис. 2.2 – Променева картина акустичного тракту

У зв'язку з тим, що оцінка часу затримки відбувається між двома донними імпульсами, нехтуємо товщиною шару контактної рідини, та враховуємо тільки шар композиту.

## 2.2. Розрахунок перетворювача

Важливу роль під час проведення контролю відіграє правильний підбір частоти ультразвуку. Тому потрібно підібрати таку частоту щоб відповідала нашим потребам. При збільшенні частоти буде зменшуватись глибина проникання але буде зростати роздільна здатність та затухання. Таким чином потрібно знайти золоту середину між глибиною проникнення та необхідною нам роздільною здатністю.

Існує багато стандартизованих ПЕП, які мають стандартні частоти та діаметри. Виходячи з конструктивних міркувань було вирішено використовувати ПЕП з матеріалу ЦТС-19 який має робочу частоту 2,5 МГц і діаметр 7,5 мм.

Знаходимо товщину п'єзопластини та довжину хвилі в ОК. Товщина пластини розраховується за допомогою формули 2.2.

$$h_{\text{ЦТС}} = \frac{c_{\text{ЦТС}}}{2 * f'} \quad (2.1)$$

Вхідні дані:

$$\text{Швидкість звуку в ЦТС-19 } C_{\text{ЦТС}} = 3,3 * 10^3 \frac{\text{м}}{\text{с}};$$

$$\text{Частота: } f = 2,5 * 10^6 \text{ Гц};$$

Звідси:

$$h_{\text{ЦТС}} = \frac{C_{\text{ЦТС}}}{2 * f} = \frac{3,3 * 10^3}{2 * 2,5 * 10^6} = 0,66 * 10^{-3} \text{ м};$$

Використовуємо півхвильову товщину п'єзопластини, це дає змогу максимально ефективно проводити перетворення у режимі випромінювання та приймання хвиль.

Визначаємо довжину хвилі в ОК за формулою 2.2.

$$\lambda_{\text{КОМ}} = 2 * h_{\text{ЦТС}} * \left( \frac{C_{\text{КОМ}}}{C_{\text{ЦТС}}} \right); \quad (2.2)$$

Звідси:

$$\lambda_{\text{КОМ}} = 2 * h_{\text{ЦТС}} * \left( \frac{C_{\text{КОМ}}}{C_{\text{ЦТС}}} \right) = 2 * 0,66 * 10^{-3} * \left( \frac{1,3 * 10^3}{3,3 * 10^3} \right) = 5,2 * 10^{-4} \text{ м}.$$

Величина ближньої зони визначається як :

$$r_{\text{бл}} = \frac{a^2}{\lambda_{\text{КОМ}}}, \quad (2.3)$$

Звідси, за формулою 2.3 глибина ближньої зони дорівнює:

$$r_{\text{бл}} = \frac{a^2}{\lambda_{\text{КОМ}}} = \frac{(7,5 * 10^{-3})^2}{5,2 * 10^{-4}} = 0,108 \text{ м}.$$

Оскільки товщина ОК не перевищує 10 мм ( $r_{\text{бл}} > h_{\text{ОК}}$ ) контроль відбувається у ближній зоні.

					<b>ПК 61.200000.000ПЗ</b>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		34

### 2.3. Розрахунок коефіцієнта акустичного тракту

Коефіцієнт акустичного тракту – коефіцієнт який показує у скільки разів амплітуда прийнятого сигналу буде менша за ту що була відправлена в ОК. На нього впливають такі фактори як: форма та розмір ефекту, розмір використаного ПЕП, глибина на якій залягає дефект, акустичні властивості матеріалу з якого складається ОК та частота з якою проводиться контроль.

Вхідні параметри:

$$\text{Мінімальна товщина ОК: } h_{max} = 10^{-2} \text{ м;}$$

$$\text{Максимальна товщина ОК } h_{min} = 5 * 10^{-3} \text{ м;}$$

$$\text{Густина ЦТС-19 } \rho_{цтс} = 7 * 10^3 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3};$$

$$\text{Густина композиту } \rho_{ком} = 10^4 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3};$$

$$\text{Коефіцієнт затухання по інтенсивності(амплітуді) } \delta_l = 1800 \frac{\text{дБ}}{\text{м}}$$

$$\text{Діаметр перетворювача } a = 7,5 * 10^{-3} \text{ м;}$$

Імпеданс між ОК та перетворювачем визначається за формулою 2.4:

$$Z = \rho * C, \quad (2.4)$$

Звідси за формулою 2.4 імпеданси дорівнюватимуть:

$$z_1 = \rho_{цтс} * C_{цтс} = 7 * 10^3 * 3,3 * 10^3 = 23,1 * 10^6 \text{ Па} * \frac{\text{с}}{\text{м}};$$

$$z_2 = \rho_{ком} * C_{ком} = 10^4 * 1,3 * 10^3 = 13 * 10^6 \text{ Па} * \frac{\text{с}}{\text{м}};$$

Знаходимо коефіцієнти  $T_l$  та  $R_p$  за формулою 1.3 та 1.4 відповідно.

$$T_l = \frac{4z_1z_2}{(z_1 + z_2)^2} = \frac{4 * 23,1 * 10^6 * 13 * 10^6}{(23,1 * 10^6 + 13 * 10^6)^2} = 0,922;$$

$$R_p = \frac{z_1 - z_2}{z_1 + z_2} = \frac{23,1 * 10^6 - 13 * 10^6}{23,1 * 10^6 + 13 * 10^6} = 0,28;$$

					<b>ПК 61.200000.000ПЗ</b>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		35

Площа перетворювача  $S_{\text{пеп}}$  визначається за формулою 2.5:

$$S_{\text{пеп}} = \frac{\pi * a^2}{4}, \quad (2.5)$$

Звідси:

$$S_{\text{пеп}} = \frac{\pi * a^2}{4} = \frac{3,14 * (7,5 * 10^{-3})^2}{4} = 44,16 * 10^{-6} \text{ м}^2.$$

Враховуючи те, що:

$$\delta_I = 2\delta_p, \quad (2.6)$$

За формулою 2.6:

$$\delta_p = 0,5 * \delta_I = 1800 * 0,5 = 900 \frac{\text{дБ}}{\text{м}},$$

Оперуючи тим, що 1 Непр = 8,685 дБ, отримуємо:

$$\delta_p = \frac{900}{8,685} = 103,616 \frac{\text{Нп}}{\text{м}}.$$

Використовуючи формулу 1.3 та 1.4 розраховуємо коефіцієнт акустичного тракту  $K_{\text{а.т.}}$  для ближньої зони при мінімальній та максимальній товщині ОК:

$$K_{\text{а.т.}} = \frac{p_{\text{п}}}{p_{\text{в}}} = 0,8T_I R_p e^{-2h_{\text{max}}\delta_p} = 0,8 * 0,922 * 0,28 * e^{-2*10^{-2}*103,616} = 0,026,$$

за умов максимальної товщини ( $h_{\text{max}}$ ) та:

$$K_{\text{а.т.}} = \frac{p_{\text{п}}}{p_{\text{в}}} = 0,8T_I R_p e^{-2h_{\text{min}}\delta_p} = 0,8 * 0,922 * 0,28 * e^{-2*5*10^{-3}*103,616} = 0,073,$$

за умов мінімальної товщини ( $h_{\text{min}}$ ).

Оскільки частина відлунь може потрапити із дальньої зони необхідно розрахувати  $K_{\text{а.т.}}$  для дальньої зони за формулою 1.5:

$$K_{\text{а.т.}} = \frac{S_{\text{ПЕП}}}{2\lambda h_{\text{max}}} T_I R_p e^{-2h_{\text{max}}\delta_p} =$$

					<b>ПК 61.200000.000ПЗ</b>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		36

$$= \frac{44,16 * 10^{-6}}{2 * 5,2 * 10^{-4} * 10^{-2}} * 0,922 * 0,28 * e^{-2 * 10^{-2} * 103,616} = 0,138,$$

за умов максимальної товщини ( $h_{\max}$ ) коефіцієнт затухання становить :

$$K_{\text{а.т.}} = 0,138.$$

Знаходимо  $K_{\text{а.т.}}$  для умови мінімальної товщини ( $h_{\min}$ ):

$$K_{\text{а.т.}} = \frac{S_{\text{ПЕП}}}{2\lambda h_{\min}} T_I R_p e^{-2h_{\min}\delta_p} =$$

$$= \frac{44,16 * 10^{-6}}{2 * 5,2 * 10^{-4} * 5 * 10^{-3}} * 0,922 * 0,28 * e^{-2 * 5 * 10^{-3} * 103,616} = 0,777;$$

за умов мінімальної товщини ( $h_{\min}$ ) коефіцієнт затухання становить:

$$K_{\text{а.т.}} = 0,777.$$

Судячи з результатів після проходження хвилі через ОК її амплітуда буде становити лише 2,6% та 7.3% відсотки, відповідно за умов максимальної та мінімальної товщини контрольованого об'єкта.

Визначення напруги прийнятого сигналу відбувається за допомогою формули 2.7.

$$U_{\text{п}} = U_{\text{в}} * K_{\text{а.т.}} * K_{\text{ПП}}, \quad (2.7)$$

Визначаємо  $U_{\text{п}}$  за формулою 2.8

$$U_{\text{п}} = \frac{U_{\text{п}}}{U_{\text{зав}}} * U_{\text{зав}}, \quad (2.8)$$

З конструктивних міркувань приймаємо відношення с/ш - 40 дБ, вважаючи що  $U_{\text{зав}} \approx 1$  мВ.

Здійснюємо перетворення дБ в рази :

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

					<b>ПК 61.200000.000ПЗ</b>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		37

Звідси:

$$U_{\Pi} = \frac{U_{\Pi}}{U_{\text{зав}}} * U_{\text{зав}} = 100 * 1 * 10^{-3} = 0,1 \text{ В.}$$

Розраховуємо напругу випроміненого сигналу використовуючи формулу 2.7 для мінімальної та максимальної товщини ОК:

Коефіцієнт подвійного перетворення для ЦТС-19 становить  $K_{\text{ПП}} = 0,15$ ;

$$U_{\text{в1}} = \frac{U_{\Pi}}{K_{\text{а.т.маx}} * K_{\text{ПП}}} = \frac{0,1}{0,026 * 0,15} = 25,64 \text{ В;}$$

$$U_{\text{в2}} = \frac{U_{\Pi}}{K_{\text{а.т.мін}} * K_{\text{ПП}}} = \frac{0,1}{0,073 * 0,15} = 9,13 \text{ В;}$$

## 2.4. Товщиноміри

### Товщиномір ультразвуковий 45MG

Прилад Olympus 45MG - вдосконалений ультразвуковий товщиномір, оснащений стандартними функціями і додатковим програмним забезпеченням для вимірювання товщини. Цей унікальний прилад сумісний з усіма дво- і одноелементними перетворювачами виробництва Olympus, тим самим будучи комплексним рішенням в переважній більшості випадків контролю.

У своїй базовій конфігурації 45MG - дуже простий у використанні прилад, що вимагає мінімальної підготовки оператора для використання найпоширеніших функцій приладу. Однак, з додатковими опціями ПО і перетворювачами 45MG стає більш удосконаленим приладом і його застосування далеко виходить за рамки простого товщиноміра. Крім того, більшість опцій можливо придбати окремо; під час покупки приладу або пізніше, у міру необхідності. В табл. 2.1 наведені основні технічні характеристики товщиноміра 45MG, а на рис. 2.3 – зовнішній вигляд [12].

					<b>ПК 61.200000.000ПЗ</b>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		38

Табл. 2.1 – Технічні характеристики товщиноміра 45MG

Діапазон товщини	Від 0,080 до 635,00 мм в залежності від матеріалу, стану поверхні, температури і обраної конфігурації (Повний діапазон вимагає додаткового ПЗ для одноелементних датчиків)
Діапазон швидкості в матеріалі	0,508 мм / мкс 18,699 мм / мкс
Діапазон частот датчика	Стандартний: від 2,25 до 30 МГц (-3 дБ) Підвищене проникнення (опція): від 0,50 до 30 МГц (-3 дБ)
Діапазон робочої температури	Від -10 ° С до 50 ° С
Дискретність (регульована)	Низька: 0,1 мм Стандартна: 0,01 мм ПО для одноелементних датчиків: 0,001 мм.
Вага	430,9 грам
Режими виміру з використанням одноелементного датчика (опція)	Режим №1 :оцінюється часовий інтервал між донним дуна-сигналом та імпульсом збудження  Режим №2: Часовий інтервал між ехо-сигналом лінії затримки і першим донним луна-сигналом (для датчиків з затримкою або іммерсійних датчиків)  Режим №3: Часовий інтервал між

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

**ПК 61.200000.000ПЗ**

Арк.

39

	послідовними донними луна сигналами, такими за першим луна-сигналом від поверхні розділу після імпульсу збудження (для датчиків з затримкою або іммерсійних датчиків)
Режим вимірювання з використанням роздільно-суміщеного датчика	Часовий інтервал від прецизійної затримки після збудливого імпульсу до першого луна-сигналу
Вимірювання Ехо-відлуння (опція)	Час між двома послідовними донними луна-сигналами без урахування товщини фарби або іншого покриття
Вимірювання THRU-COAT® (необов'язково)	Вимірювання реальної товщини металевих виробів і покриття з використанням одиночного донного луна-сигналу (за допомогою датчиків D7906-SM, D7906-RM і D7908)
Корпус	Ударостійкий водостійкий корпус з герметизованими роз'ємами. Відповідає вимогам IP67.
Розміри (Ш x В x Г)	Габаритні: 91,1 мм x 162 мм x 41,1 мм
Електроживлення	3 батареї AA/USB-порт для зарядки
Термін служби батареї:	3 лужні батареї AA: від 20 до 21 години

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

**ПК 61.200000.000ПЗ**

Арк.

40



	3 батареї AA NiMH: від 22 до 23 годин 3 літій-іонні батареї AA: від 35 до 36 годин
ємність	475 000 значень вимірів товщини або 20 000 зображень А-скан зі значеннями вимірів товщини



Рис 2.3 – Товщиномір Olympus 45MG

### Ультразвуковий товщиномір DM5E

Ультразвуковий товщиномір DM5E - це втілення останніх розробок компанії GE Sensing & Inspection Technologies в області моніторингу корозії. Товщиноміри DM5E мають безліч переваг в порівнянні з попередніми версіями товщиномірів - поліпшена стабільність і повторюваність вимірювання товщини при нормальних і підвищених температурах [13].

Товщиномір DM5E розроблений для експлуатації в найсуворіших умови, проведення вимірювань товщини стінки трубопроводів, посудин під тиском і резервуарів в нафтовій і газовій промисловості, а також нафтохімічних і енергетичних секторах промисловості.

Ультразвуковий товщиномір DM5E випускається в трьох модифікаціях:

- DM5E Basic
- DM5E
- DM5E DL

### **Ультразвуковий товщиномір DM5E Basic**

Базова версія включає в себе широкий спектр функцій, включаючи Min / Max захоплення, B-Scan, сигналізація, а так само диференціальне вимірювання товщини дозволяє миттєво порівняти виміряну і номінальну товщину.

### **Ультразвуковий товщиномір DM5E**

DM5E включає в себе всі особливості DM5E Basic, а також має режим роботи «DUAL MULTI». Даний режим був використаний в попередніх версіях товщиномірів корозії GE і виявився неоціненним при вимірюванні товщини металу з покриттям. Не має потреби видалення покриття в точці вимірювання (економлячи часу і грошей). Користувачі можуть оновити DM5E Basic до DM5E.

### **Ультразвуковий товщиномір DM5E DL**

Товщиномір DM5E DL ідентичний DM5E, але має вбудований реєстратор даних в файлах, завдяки чому є можливість зберігання до 50.000 результатів вимірювань. Файли можуть бути передані на ПК за допомогою порту Mini USB Com. Файли можуть також бути імпортовані безпосередньо в Microsoft Excel за допомогою макросів. Всі букви і цифри Дані для імен файлів і замітки безпосередньо вводяться з клавіатури. Обидві основна і стандартна версії товщиномера можуть бути оновлені до версії DL. У табл. 2.2 наведені основні технічні характеристики, а на рис. 2.4 зовнішній вигляд.

					<b>ПК 61.200000.000ПЗ</b>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		42

Табл. 2.2 – Технічні характеристики ультразвукового товщиноміра DM5E

Діапазон вимірювання товщини	от 0,60 до 508,00 мм
Діапазон швидкості ультразвуку	от 0,508 до 18,699 мм/мс
Основна допустима похибка	$\pm (0,01 + 0,005H)$ мм
Робочі частоти, МГц	2; 5,0; 10,0
Час автономної роботи	60 годин
Діапазон робочих температур	від -10 ° С до 204 ° С
Живлення	3 В
Габаритні розміри, мм	138x32x75
Маса електронного блоку, г	223

Переваги:

- Міцний корпус;
- Ергономічний дизайн;
- Мала вага, всього 223г;
- До 60 годин автономної роботи;
- РК-дисплей з підсвічуванням;
- Зручна, водо- і пилонепроникна мембранна клавіатура;
- Проста та інтуїтивна навігація по меню;
- Можливість роботи при температурі до + 204 С;
- Вимірювання товщини виробів з покриттями;



Рис. 2.4 – Ультразвуковий товщиномір DM5E

### Товщиномір ультразвуковий ТУЗ-1

Даний товщиномір використовується для вимірювання товщини різних виробів, включаючи вироби, доступ до яких є тільки з одного боку. В табл. 2.3 наведені основні технічні характеристики даного товщиноміра, а на рис. 2.5 – зовнішній вигляд [14].

Основними перевагами даного товщиноміра є його малі габаритні розміри та великий діапазон вимірювання по сталі. Велика внутрішня пам'ять дозволяє робити до 2400 вимірювань. Не варто також забувати про велику автономність що складає не менше 25 годин.

Табл. 2.3 – Технічні характеристики товщиноміри ТУЗ-1

Діапазон вимірювання (по сталі), мм	0,6...300
Роздільна здатність вимірювання товщини, мм	є
сканування	є

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

**ПК 61.200000.000ПЗ**

Арк.

44

Сигналізація неприпустимого утонення об'єкта контролю	є
Калібрування «нуля» датчика	ручне
Вбудована пам'ять результатів вимірювання	є (2400 вимірювань)
Вихід на ПЕОМ має можливість оформлення протоколу вимірювань	є
Час безперервної роботи від повністю заряджених акумуляторів, не менше, годин	25
Діапазон робочих температур	-10...+45°C
Ступінь захисту корпусу по ГОСТ 14254	IP53
Габаритні розміри електронного блоку, мм	164x84x30
Маса електронного блоку, не більше, кг	0,4



Рис. 2.5 – Товщиномір ультразвуковий ТУЗ-1

					<b>ПК 61.200000.000ПЗ</b>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		45

## Висновки до 2 розділу

Результатом даного розділу було обґрунтування акустичного тракту для ближньої та дальньої зон. Судячи з результатів після проходження хвилі через ОК її амплітуда буде становити лише 2,6% та 7.3% відсотки, відповідно за умов максимальної та мінімальної товщини контрольованого об'єкта. Також з розрахунків було визначено необхідну напругу випромінювання в ОК, вона становить  $U_{в1} = 25,64$  В та  $U_{в2} = 9,13$  В, відповідно для максимальної та мінімальної товщини контрольованого об'єкта.

Також здійснено розрахунок геометричних розмірів ПЕП таких як діаметр та товщина. Проведено огляд новітніх товщиномірів різної цінової категорії, де було представлено їхні основні технічні характеристики.

					<b>ПК 61.200000.000ПЗ</b>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		46

# РОЗДІЛ 3 ОБҐРУНТУВАННЯ АМПЛІТУДО-ФАЗОВОГО МЕТОДУ ВИМІРЮВАННЯ ЧАСОВИХ ІНТЕРВАЛІВ З ВИКОРИСТАННЯМ ФАЗОМАНІПУЛЬОВАНИХ СИГНАЛІВ

## 3.1. Ідея методу

Існує велика кількість способів удосконалення УЗНК, виділяються серед них ті що пов'язані з використанням фазоманіпульованих сигналів. Прості сигнали уже не дають змоги з потрібною точністю та вірогідністю давати результати контролю. Ефективність фазоманіпульованих сигналів уже давно практично та теоретично доведена у великій кількості галузей таких як: радіолокація [15], системи передавання інформації [17], зв'язку [16] та інших. Сигнали складної форми мають багато переваг, наприклад у них більша смуга частот, що дозволяє більш раціонально її використовувати. А це в свою чергу покращує роздільну здатність під час радіолокації. Існують приклади використання складних сигналів й у НК. Так у УЗТ використовують фазоманіпульовані сигнали-носії. Говорячи про маніпуляцію мають на увазі процес контролю раптових змін параметрів сигналу. В роботах [18-20] описано застосування ФМ-сигналів. Це дає змогу підвищити відношення с/ш під час прозвучування матеріалів з значними коефіцієнтами загасання. Особливістю ФМ-сигналів є раптова зміна фази коливання, при цьому частота сигналу та фаза залишається не змінними.

Даний метод визначення затримки сигналів базується на використанні фазових характеристик ФМ-сигналів. Опрацювання сигналів базуються на правилах визначення їхніх характеристик з допомогою ДПГ. Метод використовується тільки за відношення с/ш що дорівнює більше 10. В противному випадку буде відбуватись поява помилок під час знаходження стрибків ФХС та їхніх координат. У даному методі буде використаний один із найпростішого способу маніпуляції з фазою – так званий двопозиційний, який ще має назву двійкової маніпуляції. В міжнародній термінології даний спосіб має назву BPSK (binary phase-shift keying) [21]. Під час маніпуляції

					<b>ПК 61.200000.000ПЗ</b>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		47

такого типу сигнал утворюється завдяки послідовному склеюванню відрізків гармонічного сигналу, які мають однакову тривалість, але один з них має змінену фазу. Маніпуляція в даний спосіб здійснюється з допомогою процесу інвертування сигналу [22-23].

### 3.2. Моделювання методу

Моделювання відбувається з допомогою програмного засобу MATLAB.

Визначення затримки за даним методом відбувається у такій послідовності:

1) Спочатку утворюємо зондуєчий сигнал 3.1.

$$\begin{aligned} s_0(t) &= S_0 \cos(2\pi f_0 t + \varphi_0), \quad t \in [0, T_c), \\ s_1(t) &= S_0 \cos(2\pi f_0 t + \varphi_0 + \pi) = -s_0(t), \quad t \in [T_c, 2T_c), \end{aligned} \quad (3.1)$$

де  $S_0$  – амплітуда,  $f_0$  – частота,  $\varphi_0$  – початкова фаза,  $T_c$  – тривалість з незмінною фазою.

2) Потім утворюємо прийнятий сигнал 3.2.

$$u_3(t) = \begin{cases} U \sin 2\pi f t, & t \in [0, \tau_1], \\ -U \sin 2\pi f t, & t \in [\tau_1, \tau_i], \\ 0, & t \notin [\tau_i, T_n], \end{cases} \quad (3.2)$$

де  $U$  – амплітуда,  $f$  – частота,  $\tau_1$  – момент зміни фази,  $\tau_i$  – тривалість імпульсу.

3) Визначаємо фазову характеристику сигналу  $u(t) = u_3(t) + u_b(t)$  через ДПГ за виразом 3.3.

$$\tilde{\Phi}(t) = \arctg \frac{\hat{u}(t)}{u(t)} + \mathbf{K}[u(t), \hat{u}(t)] + 2\pi \mathbf{L}[u(t), \hat{u}(t)], \quad (3.3)$$

де  $\mathbf{K}[u(t), \hat{u}(t)] = 0,5\pi \{2 - \text{sign} \hat{u}(t) [1 + \text{sign} u(t)]\}$  – оператор що здійснює розгортання сигналу на інтервалі  $[-\pi, \pi)$ ,  $\mathbf{L}[u(t), \hat{u}(t)]$  – оператор що виконує функцію додавання одиниці у випадку коли дробова частина фазової характеристики сигналу раптово змінюється на інтервалі від  $\pi$  до  $-\pi$ .



4) Проводимо диференціювання задля визначення моментів зміни значення ФХС.

5) Здійснюємо селекцію стрибків ФХС, що несуть інформацію за обвідною сигналу  $u(t)$ .

5.1) Визначаємо обвідну сигналу  $u(t)$  з допомогою виразу 3.4.

$$A(t) = \sqrt{u^2(t) + \hat{u}^2(t)}. \quad (3.4)$$

5.2) Проводимо медіанну фільтрацію для функція  $A(t)$ , дана функція дає змогу мінімізувати шуми та імпульсні завади, при цьому не втрачаючи стрибкові значення функції.

5.3) Процес формування стробів після фільтрації функції  $A(t)$  за виразом 3.5.

$$str(t, M_a) = 0,5 [\text{sign}(\text{Med}(A(t), M_a)) + 1], \quad (3.5)$$

Де  $M_a$  – апертура фільтра, **Med** – оператор що здійснює фільтрацію сигналу.

5.4) Далі виділяємо стрибки що несуть інформацію з функції  $u(t)$  за її похідною –  $d\tilde{\Phi}(t)/dt$ . У зв'язку із тим що дана похідна має як інформативні так і не інформативні стрибки ФХС, виділення інформативних відбувається після стробування, тобто з функції  $str(t, M_a) \cdot d\tilde{\Phi}(t)/dt$  [24-25].

6) Оцінюємо час затримки спираючись на інформативні стрибки фазової характеристики сигналу.

Під час моделювання були використанні наступні характеристики сигналів:

Амплітуда зондуючого сигналу  $U = 9,13\text{В}$  ;

Частота сигналу  $f = 2,5\text{МГц}$  ;

Тривалість ФМ – сигналу  $\tau_1 = 4T$  ;

					<b>ПК 61.200000.000ПЗ</b>	Арк.
						49
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Тривалість ФМ сигналу перед фазовою маніпуляцією  $\tau_i = 2T$ ;

Коефіцієнт акустичного тракту  $K_T = 0,073$ ;

Час затримки  $\tau_s = 35T$ ;

Період сигналу  $T = f^{-1}$ .

Результати моделювання представлені на рис 3.1.

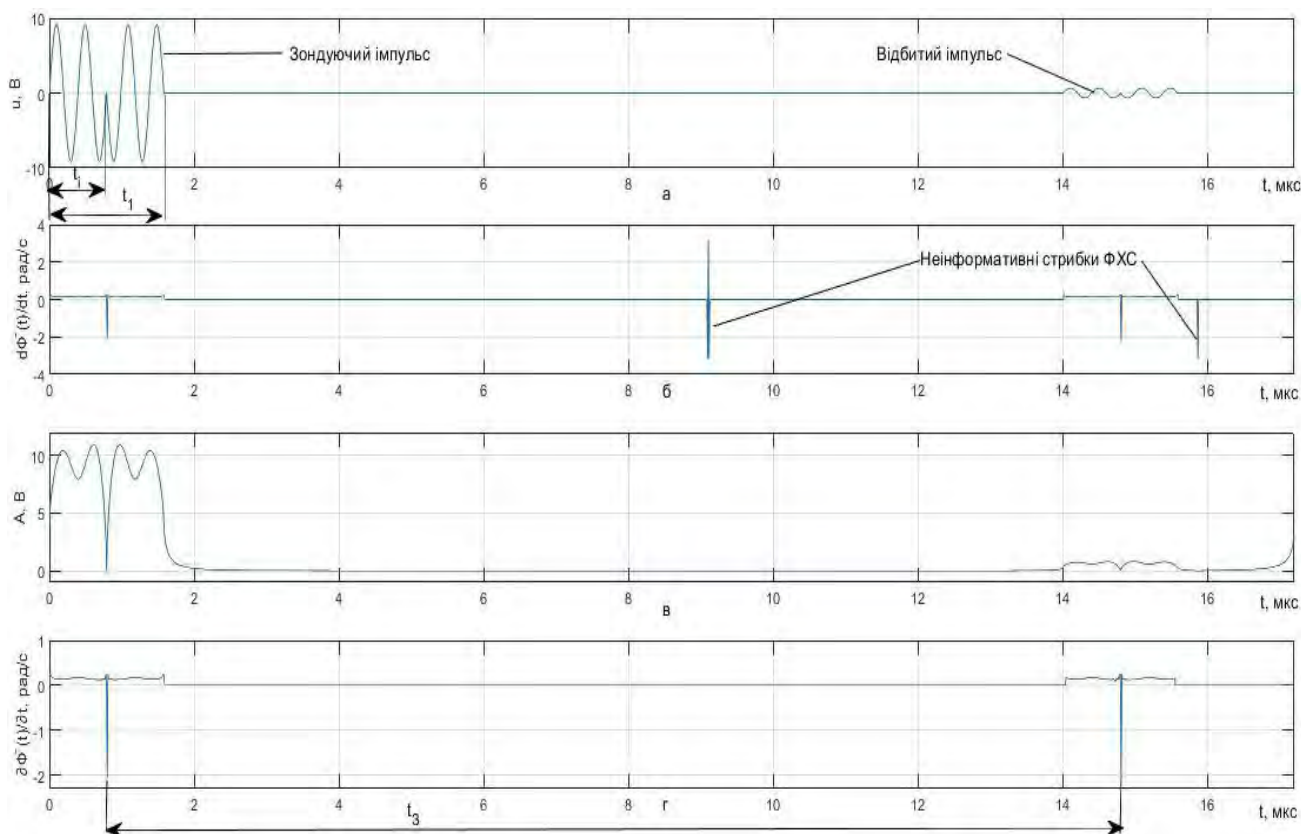


Рис. 3.1 – Графіки модельованого сигналу

де а – графік змодельованого сигналу  $u(t)$ , б – графік похідної сигналу  $d\tilde{\Phi}(t)/dt$ , в – графік обвідної сигналу, г – графік функції  $str(t, M_a) \cdot d\tilde{\Phi}(t)/dt$  з виділеними інформативними стрибками.

Тривалість затримки  $\tau_s$ , яка виникає під час поширення сигналу в об'єкті контролю дорівнює інтервалу час між інформаційними стрибками ФХС. Аналізуючи графіки можна побачити, що на інтервалах  $t \in (0,8; 0,81)$  мкс та  $t \in (14,8; 14,81)$  мкс фаза має стрибкоподібну зміну. Дані стрибки

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

**ПК 61.200000.000ПЗ**

Арк.

50

надійно визначаються, а їх координати незмінні і залишаються такими самими при зміні амплітуди донних сигналів, після проходження в ОК [26-27].

. Для випадку коли опрацювання сигналів проводиться цифровим способом, визначення інтервалу часу відбувається автоматично [28-30]. Після проходження сигналу через АЦП виникає матриця значень  $u[j]$  сигналу  $u(t)$  на рівновіддаленій часовій ґратці.

$$S[j] = S[jT_d], \quad (3.6)$$

де  $j = \overline{1, J}$ ,  $J = [T_c / T_d]^+$ ,  $[\cdot]^+$  оператор що виконує функцію відкидання нецілої частини числа.

У зв'язку з цим всі характеристики сигналу – функції аргументу  $jT_d$ . Саме тому відділки інтервалу  $\tau_3$  мають дискретні значення. А для того, щоб знайти тривалість  $\tau_3$ , необхідно отримати номери відділків з максимальними значеннями із масиву значень функції  $str[j, M_a] \cdot \Delta\tilde{\Phi}[j]$ ,  $j = \overline{1, J}$ , в даній функції  $\Delta\tilde{\Phi}[j]$  – це наша різниця номерів елементів із максимальними значеннями із масиву  $\tilde{\Phi}[j]$ .

Звідси часовий інтервал  $\tau_3$  можна розрахувати за формулою 3.7.

$$\tau_3 = T_d(j_k - j_n) = T_d k. \quad (3.7)$$

де  $T_d$  – крок,  $j_n$  – початок інтервалу,  $j_k$  – кінець інтервалу

Під час проведення реальних експериментів із сигналами даного типу, неминуче виникає похибка  $\Delta\tau_k$  пов'язана з квантуванням. Вона має випадковий характер та розташована на початку та в кінці інтервалу [31].

Тому в реальних умовах проведення експерименту формула для розрахунку приймає наступний вигляд

$$\tau = T_d(j_k - j_n) + \Delta\tau_k, \quad (3.8)$$

					<b>ПК 61.200000.000ПЗ</b>	Арк.
						51
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Ймовірність похибки  $\Delta\tau_k$  розподілена за законом Сімпсона, і має інтервал  $\Delta\tau_k \in (-T_d, T_d)$ . СКВ похибки становить  $\sigma_{\Delta\tau} = T_d/\sqrt{6}$  [32].

### 3.3. Структура приладу

Структурна схема розробленого ультразвукового товщиноміра, зображена на рис. 3.2.

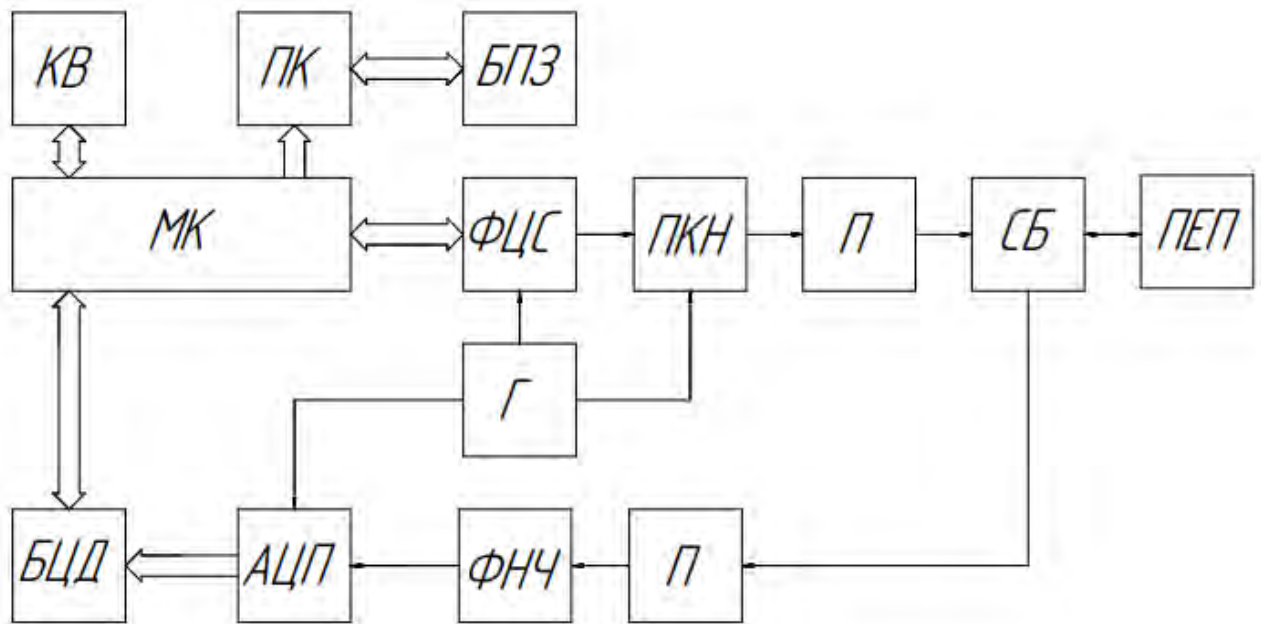


Рис. 3.2 – Структурна схема ультразвукового товщиноміра, що працює на основі оцінки затримки між донними фазоманіпульованими сигналами

ПКН – перетворювач код-напруга

СБ – схема блокування

Г – генератор

П – підсилювач

ФЦС – формувач цифрових сигналів

ФНЧ – фільтр низьких частот

АЦП – аналогово-цифровий перетворювач

БЦД – блок цифрових даних

МК – мікроконтролер

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

**ПК 61.200000.000ПЗ**

Арк.

52

ПК – персональний комп'ютер

КВ – клавіатура

БПЗ – блок програмного забезпечення

ПЕП – п'єзо електричний перетворювач

Принцип роботи даної схеми наступний:

- МК формує коди значень ФМ сигналу;
- Ці коди запам'ятовуються в окремому ОЗУ, що знаходиться в ФЦС;
- За синхросигналом з МК лічильник адреси ОЗУ починає вибирати коди ФМ сигналу з частотою мінімум в 10-16 разів вищою за розраховану частоту сигналу-носія;
- Коди з виходу ОЗУ перетворюються у напругу за допомогою перетворювача код-напруга (ПКН);
- На виході ПКН сигнал підсилюється до необхідного рівня для узгодження з ПЕП.
- Прийняті сигнали з ПЕП підсилюються на П та проходять через ФНЧ;
- Далі відбувається перетворення аналогового сигналу з ПЕП на цифровий в АЦП;
- Після чого дані з АЦП передаються на ОЗУ, що знаходиться в БЦД, де за синхросигналом з МК лічильник адреси ОЗУ починає зчитувати коди сигналу;
- Після цього дані передаються в МК де відбувається їх обробка;
- В кінці дані з МК передаються на ПК де відбувається їх кінцева обробка за допомогою БПЗ.

Алгоритм роботи засобу представлений на рис. 3.3.

					<b>ПК 61.200000.000ПЗ</b>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		53

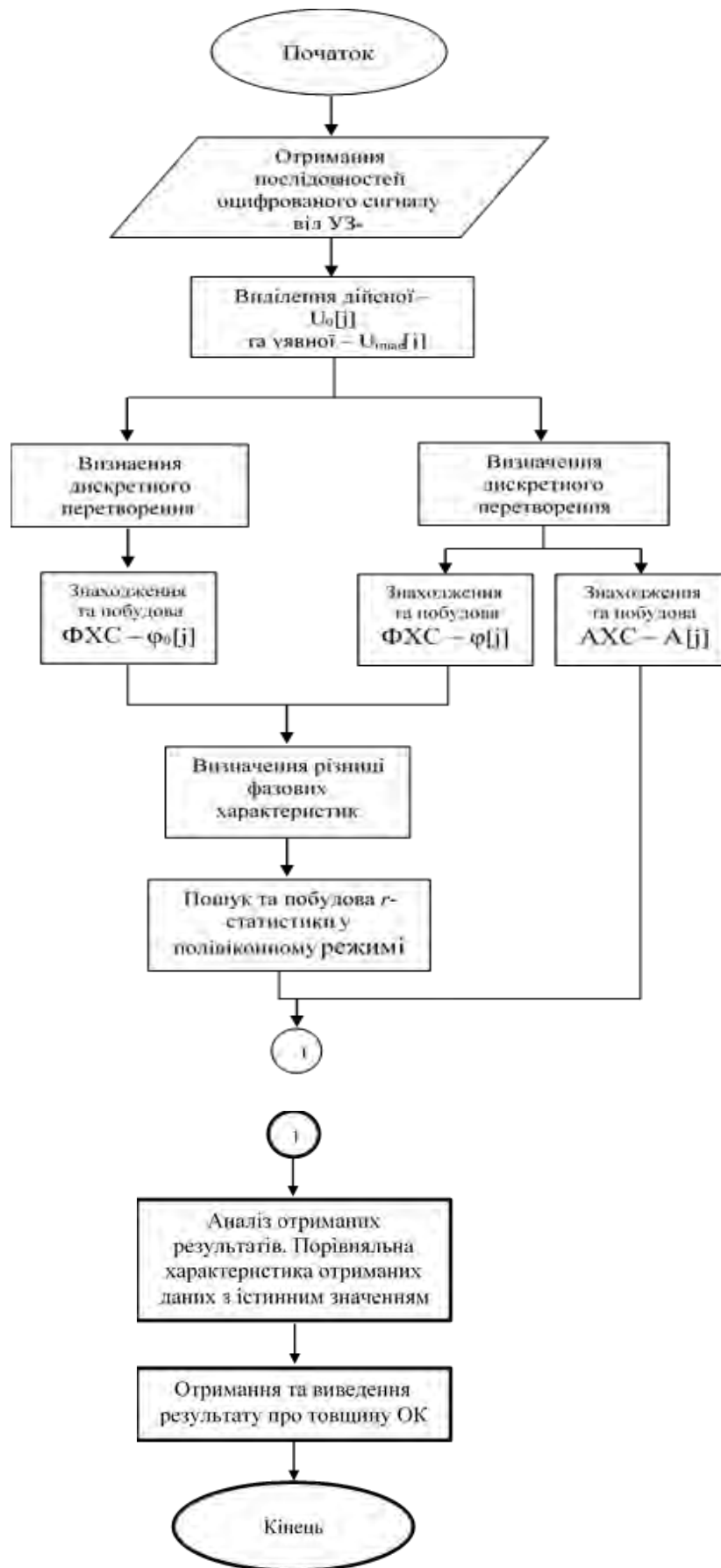


Рис. 3.3 – Ідея здійснення опрацювання сигналу

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

### **Висновки до 3 розділу**

В даному розділі було описано ідею метода вимірювання часової затримки з допомогою фазоманіпульованих сигналів. Було проведено моделювання випромінених та прийнятих ультразвукових сигналів, та подальше їх оброблення на основі перетворення Гільберта та виділення інформаційних стрибків ФХС.

Також було розроблена структурна схема приладу та описаний принцип роботи приладу та алгоритм здійснення опрацювання сигналу.

					<b>ПК 61.200000.000ПЗ</b>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		55

## РОЗДІЛ 4 ПІДБІР КОМПОНЕНТІВ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ПРИНЦИПОВОЇ СХЕМИ

### 4.1. Підбір АЦП

Для даного приладу було вирішено використовувати 10 - бітне АЦП AD9051. Дане АЦП має необхідні нам параметри для здійснення аналого-цифрового перетворення сигналу нашого приладу. Характеристики даного АЦП представлені в табл. 4.1.

Табл.4.1 – Основні характеристики AD9051

розрядність	10-bit
потужність	250 мВт
Одинична напруга живлення	5 В
Сумісність з 3 В або 5 В логічними входами	Присутня
Процес виготовлення	BiCMOS
Діапазон робочих температур	(-40 ° С до + 85 ° С).
Джерело опорної напруги	Присутнє 2,5 В
Можливість використання зовнішнього джерела напруги	Присутнє
Цифровий вихідний струм	20 мА
Смуги входу	50 МГц або 130 МГц

Даний агрегат має низьку вартість та високу як для такої вартості продуктивність. Двоетапна архітектура використана в даному АЦП оптимізована таким чином щоб забезпечувати найкращі динамічні

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

**ПК 61.200000.000ПЗ**

Арк.

56



показники, зберігаючи при цьому низький рівень споживання енергії. Конфігурація входів та виходів даної схеми представлена на рис. 4.1.

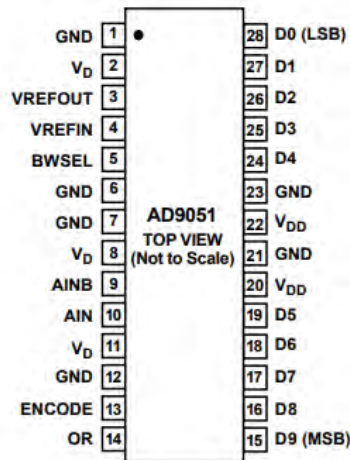


Рис. 4.1. – Конфігурація входів та виходів

#### 4.2. Підбір ЦАП

Обираючи ЦАП було вирішено використовувати мікросхему AD9760. Дана схема представляє собою 10-бітний цифро-аналоговий перетворювач малої споживаної потужності з вихідним струмом 20 мА та > 100 кОм вихідним опором. Гнучкий робочий діапазон AD9760 з одним джерелом живлення від 2,7 В до 5,5 В і низьке розсіювання потужності добре підходять для портативних приладів з низькою потужністю. Конфігурація входів та виходів схеми AD9670 показана на рис. 4.2.

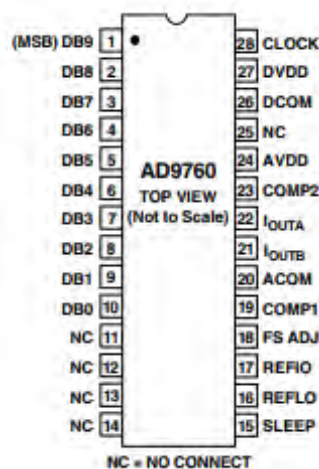


Рис. 4.2 – Конфігурація входів та виходів схеми AD9670

### 4.3. Підбір генератора

У якості генератора було вирішено використовувати мікросхему LMK60E2. Дана мікросхема представляє собою високошвидкісний генератор частотою 100 МГц та напругою живлення в діапазоні від 3.465 В до 3.135В. Конфігурація входів схеми LMK60E2 показана на рис. 4.3.

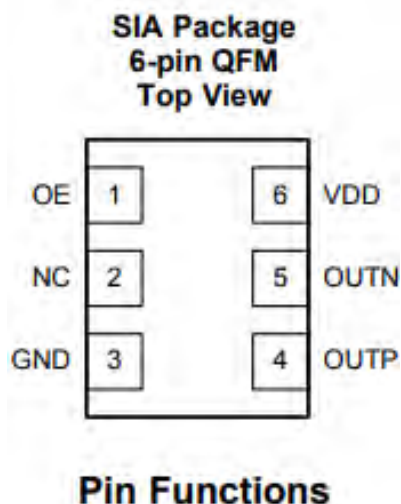


Рис. 4.3 – Конфігурація входів та виходів схеми LMK60E2

### 4.4. Підбір лічильників

У якості лічильника адресу було вирішено використовувати чотири паралельно підключені схеми 555IE-10. Це було здійснено у зв'язку з тим що наш лічильник повинен генерувати в ОЗУ більше 5000 адрес для запам'ятовування значень прийнятого сигналу. Конфігурація входів схеми 555IE-9 представлена на рис. 4.4.

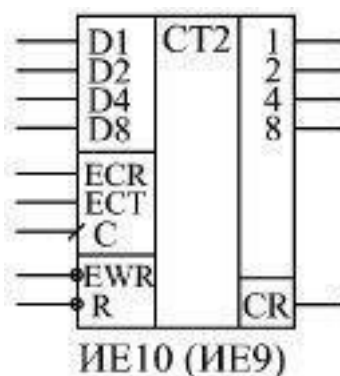


Рис. 4.4 – Конфігурація входів та виходів схеми 555IE-9

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

#### 4.5. Підбір компаратора

У якості компаратора було вирішено використовувати схему 554СА3А. К554СА3А - популярний компаратор напруги. Має два виходи - з відкритим колектором і відкритим емітером. Мікросхема К554СА3 випускається в пластиковому корпусі типу DIP-14, однак має ряд аналогів в 8-вивідних корпусах, як в пластикових так і в метало-скляних. Конфігурація виходів показана на рис. 4.5.

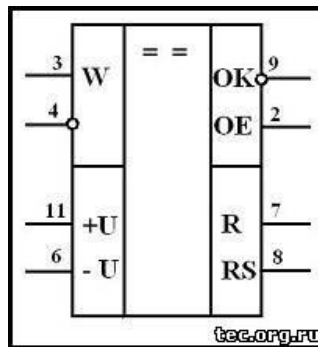


Рис. 4.5. – Конфігурація входів мікросхеми 554СА3А

#### 4.6. Підбір Мікроконтролера

У якості мікроконтролера був використаний мікроконтролер середньої цінової категорії – АТМЕГА64D3. Даний мікроконтролер добре показує себе під час роботи та має низьке енергоспоживання. XMEGA D3 - це сімейство малої потужності, високої продуктивності та багатой периферії 8/16-бітні мікроконтролери CMOS на основі розширеної архітектури RISC. За один тактовий цикл, XMEGA D3 досягає наближення пропускну здатності 1 мільйон інструкцій в секунду (MIPS) на 1 МГц, що дозволяє дизайнеру системи оптимізувати енергоспоживання порівняно зі швидкістю обробки. Процесор AVR поєднує обширний набір інструкцій з 32 регістрами які виконують загальне призначення. Всі 32 регістри безпосередньо підключені до Арифметичної логічної одиниці (ALU). Основні технічні характеристики представлені в табл. 4.2. Блок діаграму даної схеми разом із входами та виходами представлено на рис. 4.6.

Табл. 4.2. – Основні технічні характеристики мікроконтролера  
XMEGA D3

Тип	AVR
Об'єм пам'яті EEPROM	2 кВ
Об'єм пам'яті SRAM	4 кВ
Об'єм Flash пам'яті	64 кВ
Тактова частота	32 МГц
Кількість каналів ШИМ	18
Напруга живлення	1,6...3,6 В DC
Діапазон робочих температур	(-40 °C до + 85 °C).

Figure 2-1. Block Diagram and Pinout

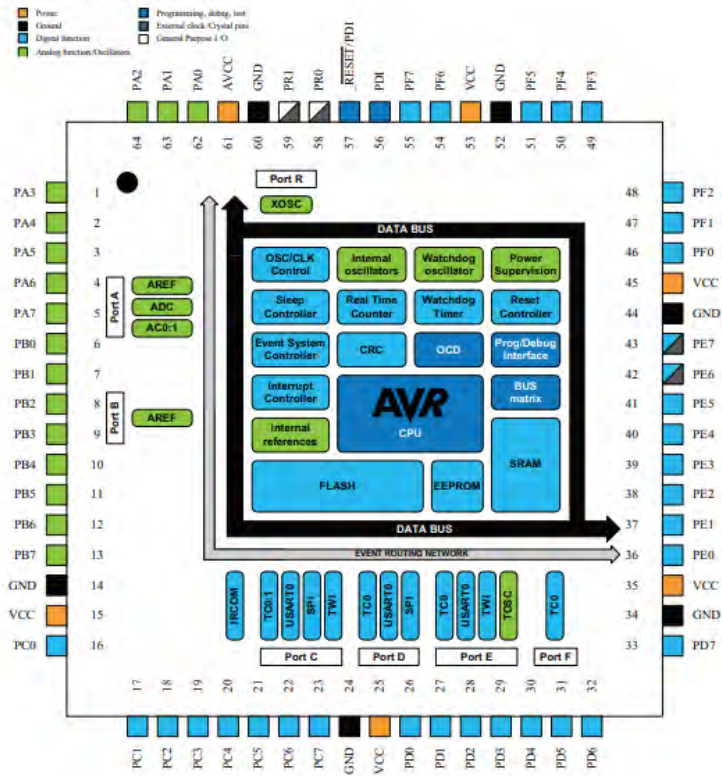


Рис. 4.6 – Блок-діаграма мікросхеми XMEGA D3

#### 4.7. Розрахунок ФНЧ

У якості фільтра низьких частот була використана типова електрична схема ФНЧ, зображена на рис. 4.7.

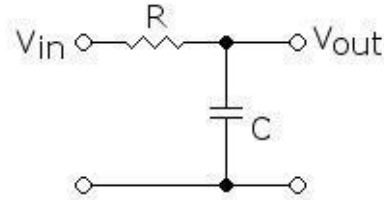


Рис. 4.7 – Електрична схема ФНЧ

У зв'язку з тим що потрібно пропускати широкосмуговий фазоманіпульований (ФМ) сигнал, відсікаємо з допомогою фільтра всі частоти, що вище 50 МГц. Розрахунок фільтра проводимо за формулою 4.1.

$$f = \frac{1}{2\pi RC}, \quad (4.1)$$

Призначаємо  $R = 1$  кОм. Використовуючи формулу 4.1 маємо:

$$C = \frac{1}{2\pi Rf} = \frac{1}{2 * 3,14 * 10^3 * 50 * 10^6} = 3,183 \text{ пФ}$$

Значення  $C = 3,183$  округляємо до стандартної ємності 339 конденсатора ,звідси  $C = 3,3$  пФ.Тоді наш фільтр буде пропускати все що нижче частоти:

$$f = \frac{1}{2\pi RC} = \frac{1}{2 * 3,14 * 10^3 * 3,3 * 10^{-12}} = 48,23 \text{ МГц}$$

#### 4.8. Підбір підсилювача

У якості силового підсилювача, якому буде необхідно підсилювати сигнал у великих мешах, було вирішено використати схему силового підсилювача LTS – 6090. Таке рішення необхідне у зв'язку із тим що потрібно підсилювати сигнал майже до рівня 26 В для подання на ПЕП, а звичайний підсилювач на таке не спроможний. Діапазон живлення: від 4,75 В до  $\pm 70$  В (140 В). Конфігурація входів та виходів показана на рис. 4.8.

					<b>ПК 61.200000.000ПЗ</b>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		61

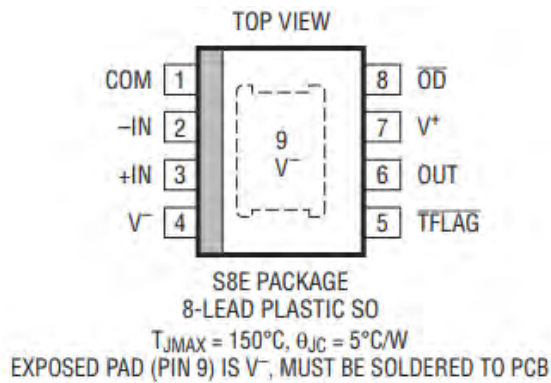


Рис. 4.8 – Конфігурація входів та виходів мікросхеми LTS – 6090.

Однак підсилення прийнятого сигналу з ПЕП уже не потребує такого силового підсилювача, тому ми можемо використати типовий підсилювач AD 797 зображений на рис. 4.9.

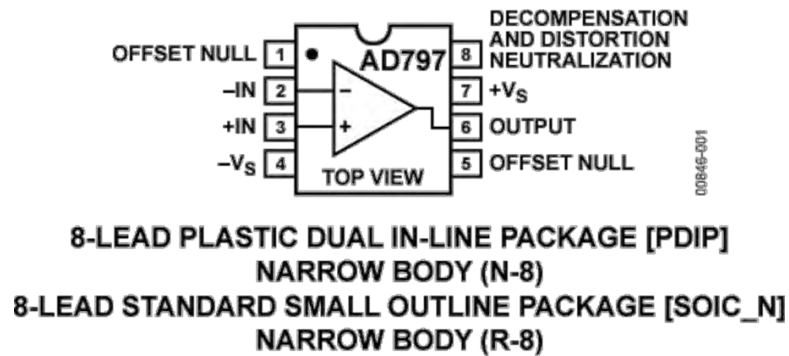


Рис. 4.9 – Конфігурація входів та виходів AD797

Оскільки розраховане значення прийнятої напруги  $U_{\text{пр}} = 0,1 \text{ В}$ , його потрібно підсилити до одиничного рівня АЦП яке становить  $U_{\text{о.р.}} = 5 \text{ В}$ . Тобто підсилити в  $K_{\text{під}}$  разів. Використовуючи формулу 4.2 розраховуємо  $K_{\text{під}}$

$$K_{\text{під}} = \frac{U_{\text{пр}}}{U_{\text{о.р.}}} = -\frac{R_2}{R_1} \quad (4.2)$$

Звідси:

$$K_{\text{під}} = \frac{U_{\text{пр}}}{U_{\text{о.р.}}} = \frac{5}{0,1} = 50 \text{ разів}$$

Призначаємо  $R_1 = 1 \text{ кОМ}$ .

					<b>ПК 61.200000.000ПЗ</b>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		62

З формули 4.2 отримуємо:

$$R_2 = K_{\text{під}} * (R_1) = 50 * 1 * 10^3 = 50 \text{ КОМ}$$

#### 4.9. Підбір комутатора

У якості ключа був вибраний комутатор 590КН1. 590КН1 – являє собою восьмиканальний МОП-комутатор, що має у своєму складі дешифратор, що здійснює комутацію напруги в діапазоні від мінус 5 до 5 В. Конфігурація входів та виходів показана на рис. 4.10.

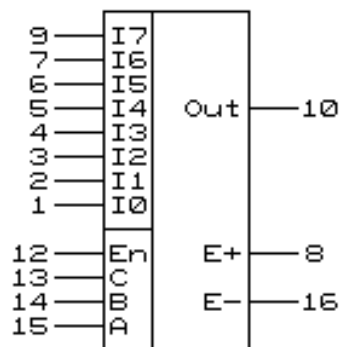


Рис. 4.10 – Конфігурація входів та виходів мікросхеми 590КН1

#### 4.10. Підбір регістра

В якості регістра було вирішено використовувати мікросхему 155ИР13. Дана схема представляє собою універсальний зсувний регістр з чотирьох розрядами. Конфігурація входів та виходів даного регістра представлена на рис. 4.11.

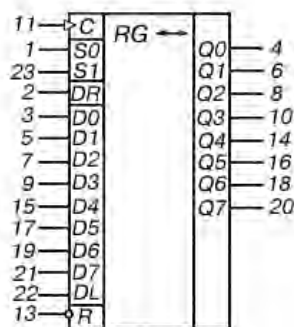


Рис. 4.11 – Конфігурація входів та виходів чотирьох розрядного регістра 155ИР13

## Висновки до 4 розділу

В даному розділі був здійснений підбір та розрахунок компонентів для електричної принципової схеми. А саме здійснений підбір АЦП, ЦАП відповідно до необхідної швидкості перетворення сигналу з аналогового у цифровий та навпаки . Виконаний вибір розміру ОЗУ необхідний нам для збереження отриманих даних з ПЕП. Виконано підбір силового підсилювача, для забезпечення необхідної амплітуди сигналу при подані на ПЕП, та розраховано підсилювач, який виконує функцію підсилення прийнятого сигналу з ПЕП.

Генератор використано такий що забезпечує потрібну нам швидкість генерації сигналу. Фільтр низьких частот розраховано таким чином, щоб він міг пропускати широкосмуговий фазоманіпульований (ФМ) сигнал.

Мікроконтролер вибраний середнього цінового сегменту у зв'язку з тим що задача швидкого зчитування прийнятих даних покладена на ОЗУ, а мікроконтролер лише здійснює його обробку зі своєю швидкістю роботи.

					<b>ПК 61.200000.000ПЗ</b>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		64



## ВИСНОВКИ

У відповідності до поставленої задачі дипломного проекту було здійснено розробку ультразвукового приладу для контролю товщини композитних матеріалів, а саме контролю товщини плоско паралельних пластин композиту на основі вольфраму та полістиролу межах від 5 до 10 мм, та з похибкою вимірювань, що не перевищує два відсотки (2%).

Під час виконання дипломного проекту було вирішено використати лунаїмпульсний метод УЗТ, а саме амплітудо-фазовий метод вимірювання часових інтервалів з використанням фазоманіпульованих сигналів.

В ході виконання здійснено розрахунок акустичного тракту де отримано дані для здійснення моделювання та проектування приладу.

Розроблено накладний суміщений ПЕП із відносно малими геометричними розмірами, здійснено деталювання основних деталей ПЕП. Також в дипломному проекті було виконано розробка структурної та електричної принципової схеми. Похибка вимірювання створеного приладу не перевищує задану завданням дипломного проекту величину.

					<b>ПК 61.200000.000ПЗ</b>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		65

## Список використаних джерел

1. Болтон У. Конструкционные материалы: металлы, сплавы, полимеры, керамика, композиты: Карманный справочник. /Пер. с англ. — М.: Издательский дом «Додэка-XXI», 2004. — 320 с, ил. (Серия «Карманный справочник»).
2. Попович В. В. Технологія конструкційних матеріалів і матеріалознавство: Підручник для студ. вищ. навч. закл. / В. В. Попович, В. В. Попович. — Львів: Світ, 2006. — 624 с.
3. Пчелінцев В. О. Механічні властивості та конструкційна міцність матеріалів: Навч. посіб. / В. О. Пчелінцев, А. І. Дегула. — Суми: СумДУ, 2012. — 247 с
4. А. В. Смирнов “Акустичні властивості композиту 0-3 на основі вольфраму та полістиролу”: [Електрон. ресурс]. — Дата доступу 23.03.2020: <http://jre.cplire.ru/jre/dec12/17/text.html>
5. byanets A.N., Rybyanets A.A. Ceramic piezocomposites: modeling, technology, and characterization// IEEE transactions on ultrasonics ferroelectrics, and frequency control. — 2011. — v.58. — №9. — p.1757-1773.
6. Akdogan E.K., Allahverdi M., Safari A. Piezoelectric composites for sensor and actuator applications// IEEE Trans Ultrason Ferroelectr Freq Control. — 2005. — v.52. — №5. — p.746-775.
7. 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 данні (1 файл: 5,12 Мбайт). — Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. — 263 с.

					<b>ПК 61.200000.000ПЗ</b>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		66

8. Ф166 Фазовий метод ультразвукової лунаїмпульсної товщинометрії виробів з конструкційних матеріалів: Монографія /Ю.В. Куц, О.В, Монченко, І.М. Бистра, та ін. / – К.: Інтерсервіс, 2019. – 192 с.

9. Основи ультразвукового неруйнівного контролю: Підручник/ В.К.Цапенко, Ю.В. Куц; –Київ:НТУУ “КПІ”.- 2009. - 431 с., рис. 187.

10. “Композити на основі вольфраму”: [Електрон. ресурс]. – Дата доступу 25.03.2020: <http://him-prom.com.ua/volfram/kompozity-na-osnove-volframa-w-cu-w-ni-cu.html>

11. Сучасні технології дефектоскопії. Курс лекцій. [Електронний ресурс] : навч. посіб. для студ., які навчаються за спеціальністю 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані системи», освітньо-професійною програмою «Комп'ютерно-інтегровані технології та системи неруйнівного контролю і діагностики»/ О.В. Лашко ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 2,55 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 141 с.

12. “ Товщиноміри ультразвукові”: [Електрон. ресурс]. – Дата доступу 25.03.2020: <https://prom.ua/ua/p60433556-tolschinomer-ultrazvukovoj-olympus.html>

13. “ Товщиноміри ультразвукові”: [Електрон. ресурс]. – Дата доступу 25.03.2020: <https://prom.ua/ua/p200637979-ultrazvukovoj-tolschinomer-dm5e.html>

14. “Товщиноміри ультразвукові”: [Електрон. ресурс]. – Дата доступу 25.03.2020: <https://prom.ua/ua/p62081303-tolschinomer-ultrazvukovoj-tuz.html>

15. Справочник по радиолокации. Под ред. М. Скольника. Нью-Йорк. 1970: Пер. с англ. (в 4-х томах)/ Под общей ред. К.Н. Трофимова; Т.3. Радиолокационные устройства и системы / Под ред А.С. Виницкого. – М.: Сов. радио, 1978. – 528 с.

					<b>ПК 61.200000.000ПЗ</b>	Арк.
						67
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

16. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение / Б. Скляр. – М.: Изд. Дом «Вильямс», 2003.– 104 с.

17. Бабак В.П. Обробка сигналів у радіоканалах цифрових систем передавання інформації : Навч. посібник / В.П. Бабак, Т.М. Наритник, Ю.В. Куц та ін. /За заг. ред. чл.-кор.НАН України В.П. Бабака. – К.: Книжкове вид-во НАУ, 2005. – 476 с.

18. Качанов В.К. Особенности применения сложномодулированных сигналов в ультразвуковой дефектоскопии / В.К. Качанов, И.В. Соколов //Дефектоскопия. – 2007. - № 12. С. 18-42.

19. Карпаш О.М. Обґрунтування можливості використання кодів Баркера для підвищення чутливості ультразвукового безконтактного способу вимірювання товщини / О.М. Карпаш, І.В. Рибіцький, М.О. Карпаш // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. –2008. –№2. – С. 31 – 35.

20. Карташев В. Г. Оптимальное выделение сигналов на фоне структурного шума в УЗ дефектоскопии / В. Г. Карташев, В. К. Качанов // Дефектоскопия, 1992. – №7. – С. 14-24.

21. Королев М.В. Широкополосные ультразвуковые преобразователи/М.В.Королев, А.Е.Карпельсон.–М.:Машиностроение, 1982.– 157 с.

22. Патент на корисну модель 79972 Україна, МПК (2006) G01B 17/02 Спосіб ультразвукового вимірювання товщини матеріалів та виробів / Ю.В. Куц, В.Л. Найда, Ю.А. Олійник та ін.; заявник та патентовласник Національний авіаційний університет. – № u201212606; заявл. 05.11.2012; опубл. 13.05.2013. Бюл.№9.

23. Куц Ю.В. Фазовий спосіб ультразвукової товщинометрії / Ю.В. Куц, Ю.А. Олійник, О.Д. Близнюк та ін. // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2013.– №1. – С. 23-37.

					<b>ПК 61.200000.000ПЗ</b>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		68

24. Фазовий метод ультразвукової лунаїмпульсної товщинометрії виробів з конструкційних матеріалів: Монографія / Ю.В. Куц, О.В Монченко, І. М. Бистра, О.В. Олійник. – К.: Інтерсервіс, 2019. – 192 с.

25. Цапенко В.К. Основи ультразвукового неруйнівного контролю: Підручник / В.К. Цапенко, Ю.В. Куц. – К.: НТУУ «КПІ», 2010. – 448 с.

26. Derhunov O. Improvement of ultrasonic testing method for materials with significant attenuation / O. Derhunov, Y. Kuts, O. Monchenko, S. Shengur, Y. Oliinyk // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies ISSN 1729-3774 – 1/9(91) 2018.–P.54-61.

27. Куц Ю.В. Ультразвуковое измерение толщины многослойных материалов и изделий / Ю.В. Куц, О.В. Монченко // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2008. - №1. С. 35-38.

28. Куц Ю.В. Фазовий спосіб ультразвукової товщинометрії / Ю.В. Куц, В.Ю. Куц, Ю.А. Олійник, О.Д. Близнюк // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2013.– №1. – С. 23-37.

29. Куц Ю.В. Використання ультразвукового двошкального способу для підвищення точності вимірювання товщини виробів товщинометрії / Ю.В. Куц, Близнюк О.Д., В.Ю. Куц, О.В Монченко, Ю.А. Олійник // Системи обробки інформації.– 2015. – №7(132). – С. 6-10.

30. Бистра І.М. Експериментальні дослідження фазового методу ультразвукового неруйнівного контролю / І.М. Бистра, Ю.В. Куц, Ю.А. Олійник // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2013. – № 1/9 (61). – С. 49-53.

31. Куц Ю.В. Підвищення достовірності виявлення сигналів ультразвукової лунаїмпульсної товщинометрії за їх значного загасання / Ю.В. Куц, О.Д. Близнюк, О.В. Монченко, Ю.А. Олійник // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2019. – №2.– С.13–17

32. Куц Ю.В. Застосування кругових статистик для виявлення сигналів  
ультразвукового неруйнівного контролю / Ю.В. Куц, О.Д. Близнюк, Ю.Ю  
Лисенко, М.О. Редька // Технічна діагностика та неруйнівний контроль. –  
2018. – №2. – С.32-36.

					<b>ПК 61.200000.000ПЗ</b>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		70

## ДОДАТОК

**Лістинг програми формування та опрацювання сигналів УЗТ за  
амплітудо-фазовим лунаїмпульсним методом УЗТ з використанням  
сигналів-носіїв з фазовою маніпуляцією**

```
clear ...
```

**Лістинг функції що виконує перетворення Гільберта**

```
function ...
```