

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

Приладобудівний факультет

Кафедра автоматизації та систем неруйнівного контролю

«На правах рукопису»

УДК _____

До захисту допущено:

Завідувач кафедри

_____ Юрій КИРИЧУК

« ____ » _____ 2025 р.

Магістерська дисертація

на здобуття ступеня магістра

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

спеціальності 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка»

на тему: «Інтелектуальна ультразвукова система контролю герметичності та корозійної стійкості трубопроводів»

Виконав (-ла):

студент (-ка) II курсу, групи ПК-41мп

Сорока Михайло Юрійович _____

Керівник:

доцент

Богдан Галина Анатоліївна _____

Консультант з розробка стартап-проектів:

Завідувач кафедри економічної кібернетики,

Доктор економічних наук, професор

Бояринова Катерина Олександрівна _____

Рецензент:

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

Студент (-ка) _____

Київ – 2025 року

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Приладобудівний факультет
Кафедра автоматизації та систем неруйнівного контролю

Рівень вищої освіти – другий (магістерський)

Спеціальність – 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка»

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

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Юрій КИРИЧУК

«__» _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ

на магістерську дисертацію студенту

Сорока Михайло Юрійович

1. Тема дисертації «Інтелектуальна ультразвукова система контролю герметичності та корозійної стійкості трубопроводів», науковий керівник дисертації Богдан Галина Анатоліївна, доцент, затверджені наказом по університету від «04» листопада 2015 р. №4793-с.
2. Термін подання студентом проєкту 10.12.2025.
3. Об'єкт дослідження : способи здійснення контролю герметичності та корозійної стійкості трубопроводів великого діаметра.
4. Вихідні дані : автоматизована ультразвукова система контролю герметичності та корозійної стійкості трубопроводів.
5. Перелік завдань, які потрібно розробити: виконати літературний огляд за темою дослідження, провести аналіз існуючих систем контролю; розробити розрахункову частину системи та виконати її моделювання, обрати вид контролю та обґрунтувати вибір..
- 6.Орієнтований перелік графічного ілюстративного матеріалу: результати моделювання роботи системи; оглядовий плакат розробленої системи; апаратна реалізація системи.
7. Орієнтований перелік публікацій: немає.

8. Консультанти розділів дисертації

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
Розробка стартап-проектів	Завідувач кафедри економічної кібернетики, Доктор економічних наук, професор Бояринова Катерина Олександрівна		

9. Дата видачі завдання _____

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проєкту	Термін виконання етапів проєкту	Примітка
1	Формулювання завдання проєкту	06.09.2025	
2	Проведення аналітичного огляду	16.09.2025	
3	Розрахунок параметрів	03.10.2025	
4	Підбір компонентів	15.10.2025	
5	Розробка схем	06.11.2025	
6	Розробка стартап-проєкту	17.11.2025	
7	Здача диплому на перевірку керівнику	25.11.2025	

Студент

Михайло СОРОКА

Керівник

Галина БОГДАН

Реферат

У роботі розроблено автоматизовану ультразвукову систему контролю труб із застосуванням технології LRUT. Тема є актуальною, оскільки у сучасних умовах автоматизації та зростання обсягів неруйнівного контролю виникає потреба у системах, здатних ефективно виконувати такі завдання.

Актуальність роботи полягає у необхідності підвищення точності та надійності виявлення дефектів у трубопроводах великого діаметра за допомогою автоматизованих ультразвукових систем.

Мета роботи – дослідити можливості застосування автоматизованих систем ультразвукового контролю труб та розробити систему для точного визначення дефектів у трубопроводах великого діаметра та довжини.

Завдання роботи включають: аналіз сучасних методів ультразвукового контролю; розробку автоматизованої системи контролю із застосуванням LRUT; забезпечення постійного акустичного контакту між об'єктом контролю та датчиками; моделювання роботи системи за допомогою сучасного програмного забезпечення; оцінку перспектив впровадження системи на національному та міжнародному ринках.

Об'єкт дослідження – трубопроводи великого діаметра.

Предмет дослідження – процеси виявлення дефектів у трубопроводах за допомогою ультразвукових технологій та автоматизованих систем контролю.

Методи дослідження включають математичне та комп'ютерне моделювання, теоретичний аналіз методів LRUT, експериментальні дослідження прототипу системи та аналіз ефективності роботи у різних умовах.

Наукова новизна роботи полягає у розробці методики інтеграції технології LRUT у автоматизовані системи контролю та алгоритмів подвійної віконної обробки сигналів, що підвищують точність визначення дефектів у реальному часі.

Практичне значення полягає у можливості застосування розробленої системи як основного або допоміжного засобу неруйнівного контролю

трубопроводів, а також у потенційній комерційній реалізації на вітчизняному та міжнародному ринках.

Розроблена система завдяки універсальності алгоритмів може бути адаптована під інші методи виявлення дефектів із мінімальними змінами.

Ключові слова: контроль трубопроводу, LRUT, ПЕП, автоматизований неруйнівний контроль (НК), ультразвукова діагностика.

Abstract

The paper describes an automated ultrasonic pipe inspection system using LRUT technology. The topic is relevant because, in the current environment of automation and growth in non-destructive testing, there is a need for systems capable of performing such tasks effectively.

The relevance of the work lies in the need to improve the accuracy and reliability of defect detection in large-diameter pipelines using automated ultrasonic systems.

The aim of the work is to investigate the possibilities of using automated ultrasonic pipe inspection systems and to develop a system for the accurate detection of defects in large-diameter and long pipelines.

The tasks of the work include: analysis of modern methods of ultrasonic testing; development of an automated testing system using LRUT; ensuring constant acoustic contact between the test object and the sensors; modelling the operation of the system using modern software; assessment of the prospects for the implementation of the system on the national and international markets.

The object of the study is large-diameter pipelines.

The subject of the study is the processes of detecting defects in pipelines using ultrasonic technologies and automated control systems.

Research methods include mathematical and computer modelling, theoretical analysis of LRUT methods, experimental studies of the prototype system, and analysis of its performance under various conditions.

The scientific novelty of the work lies in the development of a methodology for integrating LRUT technology into automated control systems and double-window signal processing algorithms that improve the accuracy of real-time defect detection.

The practical significance lies in the possibility of using the developed system as a primary or auxiliary means of non-destructive testing of pipelines, as well as in its potential commercial implementation in domestic and international markets.

Thanks to the versatility of its algorithms, the developed system can be adapted to other defect detection methods with minimal changes.

Keywords: pipeline inspection, LRUT, PEP, automated non-destructive testing (NDT), ultrasonic diagnostics.

ЗМІСТ

ВСТУП	9
РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ.....	11
1.1.Об'єкт контролю: труби сталеві безшовні гарячодеформовані.....	11
1.2. Область застосування	13
1.3.Контрольовані показники якості	16
1.4.Класифікація пошкоджень і дефектів	19
1.5. Обґрунтування доцільності застосування методу ультразвукової дефектоскопії	22
1.6. Теоретичні основи методу ультразвукової дефектоскопії	23
1.7 Завдання, що підлягають розв'язанню в подальших розділах роботи .	30
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1	32
РОЗДІЛ 2. РОЗРАХУНКОВА ЧАСТИНА	34
2.1 Принцип дії системи.....	34
2.2 Опис функціональної схеми	38
2.3 Розрахунок акустичної частини.....	40
2.4. Розрахунок вузлів електричної схеми.....	44
ВИСНОВОК ДО РОЗДІЛУ 2	57
РОЗДІЛ 3	59
МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ТА АЛГОРИТМИ ОПРАЦЮВАННЯ СИГНАЛУ	59
3.1 Загальна методика моделювання та опрацювання сигналу	59
3.2 Моделювання обробки сигналу	62
3.3. Моделювання г-статистики фазових характеристик сигналу	69
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 3	72
РОЗДІЛ 4. Методики визначення герметичності та товщини труби.....	74
4.1 Загальні положення.....	74
4.2 Методика ультразвукового визначення герметичності трубопроводу	77
4.3 Методика ультразвукового вимірювання товщини стінки труби.....	80
4.4 Алгоритм реалізації інтелектуальної методики.....	82
4.5 Оцінювання похибок та невизначеності вимірювань	84
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 4	88
РОЗРОБКА СТАРТАП ПРОЕКТУ.....	90
5.1 Опис ідеї проекту.....	90
5.2 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап проекту	95
5.3 Розроблення ринкової стратегії проекту	108
5.4. Бізнес-модель реалізації стартап-проекту та оцінювання його економічної ефективності.....	114
ВИСНОВОК ДО РОЗДІЛУ 5	125
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	127
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.....	129

ВСТУП

Неруйнівний контроль відіграє критично важливу роль у сучасному виробництві, ставлячи за головну мету істотне підвищення якості, надійності та тривалості експлуатації продукції.

Досягнення цих високих показників можливе лише за умови безперервної та всебічної інтеграції контролю на всіх стадіях життєвого циклу виробу. Це означає, що перевірка починається з вхідного контролю сировини, заготовок та напівфабрикатів, продовжується під час усіх проміжних технологічних операцій, і завершується фінальною оцінкою готової продукції. Крім того, НК незамінний під час моніторингу об'єктів у процесі їх подальшої експлуатації, що є основою для технічної діагностики.

Основне призначення неруйнівних методів є превентивним: вони дозволяють запобігти використанню тих елементів чи вузлів, які містять дефекти або відхилення, що не відповідають встановленим нормам придатності. Таким чином, НК є потужним інструментом забезпечення безпеки, підвищуючи загальну надійність і довговічність виробів. У деяких випадках, ретельна діагностика дає змогу обґрунтовано продовжити термін служби обладнання понад стандартні межі, оптимізуючи ресурси.

Рішення про впровадження неруйнівного контролю завжди ґрунтується на аналізі економічної доцільності, тобто на співвідношенні витрат на його проведення та отриманого економічного ефекту (запобігання аваріям, скорочення втрат від браку, подовження ресурсу). Практика виробництва однозначно доводить, що, попри найретельніші процеси виготовлення та жорсткий операційний контроль, повністю уникнути виникнення дефектів неможливо.

Саме тому, постійне зростання вимог до якості та безпеки продукції вимагає ширшого застосування та вдосконалення методів НК. Це стимулює виробництва до технічного переоснащення — забезпечення сучасними дефектоскопами, засобами візуалізації та іншими високоточними діагностичними приладами. Водночас, ключовим фактором успіху є

підготовка висококваліфікованих фахівців, здатних правильно обирати та застосовувати ці технології. Адже ефективність виконання завдань контролю значною мірою залежить від грамотного вибору його виду та методики проведення для конкретного матеріалу та типу дефекту.

РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ

1.1.Об'єкт контролю: труби сталеві безшовні гарячедеформовані

Сталеві безшовні труби, виготовлені методом гарячої прокатки, є незамінним елементом інфраструктури та машинобудування. Протягом тривалого часу вони успішно та широко застосовуються у критично важливих секторах економіки, зокрема у нафтогазовій та хімічній промисловості, де транспортування агресивних чи небезпечних середовищ вимагає найвищої надійності, а також у військовій промисловості та машинобудуванні.

Ці труби належать до найпопулярніших видів трубопровідної арматури, що зумовлено їх винятковою міцністю та надійністю в експлуатації. Головною та визначальною перевагою таких труб є повна відсутність будь-яких зварних швів чи інших механічних з'єднань. Ця особливість гарантує абсолютну герметичність і значно подовжує довговічність конструкцій, особливо там, де витік робочого середовища є категорично неприпустимим і може призвести до серйозних наслідків.

Виробництво безшовних сталевих труб відбувається шляхом гарячої прокатки на високотехнологічному спеціалізованому устаткуванні. Після первинної гарячої деформації, труби можуть піддаватися додатковому холодному прокатуванню (холодній деформації), що дозволяє підвищити точність розмірів та поліпшити якість поверхні готового виробу.

Діапазон розмірів гарячедеформованих труб є досить широким. Діаметр типово коливається від 25 до 700 мм, а товщина стінки може становити від 2,5 до 75 мм. Характерною особливістю технології є те, що такі труби здебільшого виготовляються великого діаметра; мінімальний діаметр, що досягається стандартними методами, становить близько 57 мм. Хоча використання спеціальних редуційних станів із натягом дає змогу зменшити зовнішній діаметр до 5 мм, подальше технологічне зменшення розмірів стає неможливим.

Оскільки збільшення діаметра труби прямо пропорційно зростанню робочого навантаження на її стінки, більшість гарячедеформованих виробів є товстостінними (зазвичай, товщина стінки перевищує 3 мм). Труби випускають різної довжини та форми перерізу, що забезпечує їхню універсальність для використання в різноманітних інженерних та експлуатаційних умовах.

Для стандартизації гарячедеформовані труби класифікують за низкою ознак:

Точність виготовлення:

1. Звичайна
2. Підвищена (П)
3. Висока (В)

Форма поперечного перерізу:

1. Кругла (найпоширеніша)
2. Квадратна
3. Прямокутна (профільні труби)

Товщина стінки:

1. Тонкостінна
2. Товстостінна

Довжина:

1. Немірної довжини (НД) — від 4 до 12,5 м.
2. Мірної довжини (М) — фіксована довжина в межах немірної.
3. Кратної мірної довжини (КР) — фіксована, з обов'язковим припуском (близько 0,5 см) на кожен різ.
4. Приблизної довжини
5. Обмеженої довжини (ОГ)

Приклад маркування слугує для ідентифікації всіх ключових характеристик виробу та підтвердження його відповідності стандартам (наприклад, ГОСТ 8731):

Труба 159 × 8 мм, мірної довжини (М), підвищеної точності виготовлення (П), виготовлена зі сталі марки 20, категорії 2, за групою А згідно з ГОСТ 8731, методом гарячої прокатки зі злитка.

1.2. Область застосування

Безшовні сталеві труби, виготовлені методом гарячої прокатки, є стратегічно важливим і універсальним матеріалом, що забезпечує високий рівень надійності в критичних інженерних системах. Їхній надзвичайно широкий спектр використання обумовлений унікальним поєднанням високої механічної міцності, абсолютної герметичності, значної термостійкості та стійкості до екстремального внутрішнього тиску. Труби виробляються з різних марок сталі — вуглецевих, легованих і високоякісних конструкційних, що дозволяє успішно експлуатувати їх в екстремальних умовах, зокрема при високих температурах, надмірному тиску, вібраційних навантаженнях та дії агресивних середовищ.

Корозійна стійкість - одна з ключових експлуатаційних характеристик цих труб, так як під час експлуатації часто труби використовують при роботі з рідинами та газами. Для забезпечення довговічності та запобігання передчасному руйнуванню, у виробництві активно використовуються леговані та нержавіючі сталі. Додавання легуючих елементів (хрому, нікелю, молібдену) формує на поверхні металу пасивну захисну оксидну плівку, яка ефективно протистоїть хімічній корозії та електрохімічним процесам. Це особливо важливо в хімічній промисловості та при транспортуванні сірководневих або хлоридних середовищ у нафтогазовій галузі. Завдяки цій стійкості, безшовні труби забезпечують тривалий термін служби та мінімізують ризики аварій, пов'язаних із втратою цілісності стінки.

Виробництво та якість таких труб строго регламентуються державними стандартами (наприклад, ГОСТ 8731-78 і ГОСТ 8732-78), які встановлюють точні допуски за геометричними параметрами, а також вимоги до хімічного складу сталі та її механічних властивостей. Це забезпечує стабільність характеристик продукції на ринку.

1. Нафтогазова промисловість

Цей сектор є найбільшим споживачем безшовних труб, оскільки вони є незамінними у системах видобутку та магістрального транспортування вуглеводнів:

Трубопроводи високого тиску для перекачування нафти, газу та конденсату.

Обсадні труби (casing pipes) для зміцнення та ізоляції стінок глибоких свердловин.

Насосно-компресорні труби (НКТ) для експлуатації свердловин та подачі реагентів.

Елементи бурильних колон.

Критично важлива безшовна конструкція, так як вона усуває ризик розгерметизації або витіку при роботі під тиском, що часто перевищує 60–100 МПа, особливо в умовах глибокого буріння та освоєння морських родовищ.

2. Теплоенергетика

У тепловій та атомній енергетиці безшовні труби експлуатуються в умовах високих термічних навантажень:

Виробництво паропроводів, перегрівників, водяних економайзерів і колекторів котлів високого тиску (на ТЕС та ТЕЦ).

Системи для парових турбін та теплообмінників, де робочі температури можуть сягати 500–600 °С.

Для цих цілей застосовують спеціальні жароміцні та жаростійкі сталі (наприклад, 15Х5М, 12Х1МФ, 20, 09Г2С), що забезпечують як міцність, так і антикорозійний захист при тривалому впливі гарячої пари та води.

3. Хімічна та нафтопереробна промисловість

Тут труби працюють у найбільш агресивних хімічних середовищах — з кислотами, лугами, органічними сполуками та парами:

Трубопроводи високого тиску у виробництві базових хімікатів (аміаку, метанолу).

Реактори, колони синтезу та теплообмінники, що вимагають стійкості до температури до 700 °С.

Часто використовуються аустенітні нержавіючі сталі (наприклад, 10X17N13M2T, 08X18N10T), які ідеально поєднують пластичність із високою корозійною стійкістю.

4. Машино- та автомобілебудування

У цій галузі труби виступають як конструкційні елементи та деталі машин:

Гідравлічні та пневматичні системи (наприклад, корпуси гідроциліндрів і напірні магістралі).

Конструкційні елементи рам, мостів, шасі важкої та спеціалізованої техніки.

Завдяки високій ударній в'язкості та добрій механічній оброблюваності (точінню, свердлінню), вони ідеально підходять для динамічно навантажених вузлів.

5. Оборонна, авіаційна та космічна техніка

У стратегічно важливих галузях високі вимоги до надійності та безпеки роблять безшовні труби незамінними для:

Гідравлічних і паливних магістралей в авіації та суднобудуванні.

Високонапірних контурів у ракетних системах і бронетехніці.

Балонів, резервуарів і гідравлічних акумуляторів високого тиску (витримують понад 200 атм).

Таким чином, надійність, довговічність та герметичність безшовних гарячедеформованих труб роблять їх незамінними в усіх критичних секторах промисловості, де від цілісності трубопроводів безпосередньо залежать безпека, технологічні процеси та екологічна стабільність.

1.3. Контрольовані показники якості

Сортамент гарячедеформованих безшовних труб суворо регламентується державними стандартами, головним з яких є ГОСТ 8732-78 "Трубы стальные бесшовные горячедеформированные". Цей документ визначає основні розміри, допуски, геометричні параметри, а також вимоги до точності виготовлення. Відповідність вимогам ГОСТ є ключовим показником якості та надійності трубопровідної продукції.

1. Допуски за довжиною і геометрією труб

Одним із найважливіших параметрів є граничні відхилення по довжині. Вони визначають точність виготовлення труб і впливають на їх сумісність у монтажних системах.

Для труб мірної довжини і труб кратної мірної довжини з довжиною до 6 метрів допустиме відхилення становить не більше ± 10 мм.

Якщо ж труба має довжину понад 6 метрів або зовнішній діаметр перевищує 152 мм, то максимальне відхилення може складати до ± 15 мм.

Для труб немірної довжини, які виробляються партіями, встановлюються окремі технічні умови залежно від діаметра та призначення.

Окрім довжини, у стандарті зазначені допуски по овальності, прямолінійності, товщині стінки та зовнішньому діаметру, які впливають на герметичність та можливість подальшої механічної обробки.

2. Класифікація за групами якості

ГОСТ 8731-74 (разом із 8732-78) поділяє гарячедеформовані труби на п'ять груп якості, позначених літерами «А», «Б», «В», «Г» і «Д». Кожна група визначається різними критеріями контролю — від хімічного складу до гідравлічних випробувань.

Група "А" — контроль механічних властивостей

Вироби виготовляються із сталей марок Ст2сп, Ст4сп, Ст5сп, Ст6сп відповідно до ГОСТ 380-94. Головна увага приділяється випробуванню на міцність, пластичність та ударну в'язкість. Такі труби використовуються у

загальнопромислових трубопроводах, де діють стандартні тиски і температури.

Група "Б" — контроль хімічного складу

Застосовуються сталі, регламентовані стандартами ГОСТ 19281, ГОСТ 380, ГОСТ 4543 та ГОСТ 1050. Основна мета — забезпечення стабільності хімічного складу, що визначає корозійну стійкість та зварюваність. Такі труби часто використовують у хімічній і нафтохімічній промисловості.

Група "В" — комбінований контроль

Регламентується тими ж стандартами, що і група «Б», але передбачає подвійний контроль — і за хімічним складом, і за механічними властивостями. Застосовується для високонапірних трубопроводів, енергетичних установок та систем з підвищеними вимогами до надійності.

Група "Г" — контроль після термічної обробки

Труби виготовляються зі сталей за ГОСТ 19281, ГОСТ 4543, ГОСТ 1050. Механічні властивості визначаються на зразках після нормалізації або загартування і відпуску. Такий підхід дозволяє оцінити експлуатаційні характеристики матеріалу після повного технологічного циклу. Вироби групи «Г» використовують у котельному виробництві, теплоенергетиці та машинобудуванні.

Група "Д" — гідравлічні випробування

Контроль зосереджений на випробуванні гідравлічним тиском для перевірки герметичності шва та стійкості стінки до розриву. Хімічний склад і механічні характеристики можуть не перевірятися детально. Такі труби використовують у системах транспортування води, газу, стисненого повітря, де основну роль відіграє герметичність і тискотривкість.

3. Вимоги до якості поверхні та контролю

Поверхня гарячедеформованих труб повинна бути чистою, без тріщин, раковин, окалин та вм'ятин. Допускаються незначні дефекти глибиною до 0,5 мм після зачистки, якщо вони не знижують міцність виробу.

Кожна партія труб проходить:

1. Візуально-вимірювальний контроль:

Поверхня труб повинна бути чистою, рівною, без видимих пошкоджень, задирок, окалини, тріщин, раковин, вм'ятин та слідів корозії.

Вимоги залежать від групи якості труб і сфери їх застосування:

Для труб високої точності (група В, Г) не допускаються будь-які поверхневі дефекти, навіть після зачистки.

Для труб звичайної точності (група А, Б, Д) допускаються незначні поверхневі дефекти, якщо вони не знижують товщину стінки нижче мінімально допустимого значення.

Допустимі норми дефектів - глибина рисок, вм'ятин і задирок — не більше 0,5 мм для труб до 76 мм діаметра, для труб більшого діаметра — до 1,0 мм. Після зачистки поверхня повинна бути пивною, без різких переходів, зачистка проводиться шліфуванням або обробкою наждачним кругом, без порушення геометрії труби.

2. Ультразвукову перевірку на суцільність:

Дозволяє виявити внутрішні тріщини, несплавлення, розшарування, пори, неметалеві включення. Контроль здійснюється за ГОСТ 17410-78 або ISO 10893-10. Рівень чутливості калібрується за еталонними зразками (ЗДО, ЗОК). Для труб із підвищеними вимогами — проводиться суцільний ультразвуковий контроль кожного метра.

3. Механічні випробування:

Включають випробування на розтяг, згин, сплющення, ударну в'язкість за ГОСТ 10006, ГОСТ 7268, ГОСТ 9454.

4. Гідравлічне випробування під тиском:

Кожна труба перевіряється на герметичність під тиском від 20 до 25 МПа (іноді до 40 МПа для спеціальних типів). Мета — виявити течі, мікротріщини, дефекти зварювання (для зварних труб). Випробування проводяться на гідравлічних стендах з фіксацією результатів у паспорті труби.

Таким чином, державні стандарти ГОСТ 8731-74 та 8732-78 забезпечують єдину систему технічного регулювання у виробництві гарячедеформованих безшовних труб, що гарантує їх якість, взаємозамінність і безпечну експлуатацію в умовах високих навантажень і тиску.

1.4.Класифікація пошкоджень і дефектів

Окрім загальних поверхневих дефектів, у трубопровідних системах часто виявляють глибші пошкодження, які стосуються внутрішньої структури металу, стінок труб і місць зварних з'єднань. Такі дефекти є одними з найбільш небезпечних, адже саме вони можуть спричинити втрату герметичності, руйнування стінки або аварійне розгерметизування системи.

Причинами виникнення пошкоджень можуть бути:

1. Порушення умов транспортування та складування труб
2. Неправильне укладання або монтаж трубопроводу
3. Механічні дії при експлуатації (вібрація, тиск, гідроудари)
4. Внутрішня або зовнішня корозія
5. Виробничі дефекти, що виникли під час прокатки або зварювання

1. Типи внутрішніх і структурних дефектів стінки труб:

1.1. Тріщини

Це вузькі подовжені пошкодження, які можуть бути як поверхневими, так і внутрішніми наскрізними. Мають, як правило, кут розкриття близький до 90° і спрямовані в радіальному напрямку від поверхні до серцевини металу. Виникають у результаті охолоджувальних напружень, ударів, або втомного руйнування. Особливо небезпечні тріщини в зоні зварного шва, де напруження найвищі.

1.2. Розшарування металу

Утворення паралельних шарів усередині стінки труби, що свідчить про металургійний дефект. Виникає при неоднорідному прокатуванні або включеннях шлаку. Таке розшарування знижує міцність і може призвести до відриву частин металу під дією тиску.

1.3. Металеві відшарування (плівки, полони)

Це тонкі відшаровані ділянки металу, які частково з'єднані з основною масою. Мають різну товщину і довжину, орієнтовані уздовж напрямку прокатки. Такі дефекти часто залишаються невидимими під час поверхневого контролю, але чітко виявляються ультразвуковим методом (УЗК).

1.4. Рванина (розриви металу)

Представляє собою окиснені розриви різної довжини і глибини, які розташовані під кутом до напрямку прокатки. Виникають при перегріві металу, перевищенні швидкості прокатки або дефектах кристалізації.

1.5. Неметалеві включення (ізоляція)

Мають вигляд сірчаних, силікатних або шлакових вкраплень, що потрапили до металу під час виплавки. Такі включення знижують щільність, в'язкість і зварюваність металу. При експлуатації служать осередками корозії та втомного руйнування.

1.6. Канавки, риски, подряпини

Мають поздовжній характер і утворюються в процесі прокатки або транспортування, коли труба контактує з гострими предметами. Вважаються лінійно-протяжними дефектами, довжина яких перевищує ширину та глибину. Хоча вони можуть виглядати незначними, саме такі пошкодження часто стають причиною витоків під тиском.

2. Дефекти, що виникають у процесі транспортування та експлуатації

Після виготовлення труби можуть зазнати деградації матеріалу під впливом зовнішніх факторів. Такі пошкодження поділяються на:

2.1. Надмірне стоншення стінки

Зазвичай є наслідком корозійних процесів, ерозії потоку газу або рідини, кавітаційних ефектів. Має рівномірний або локальний характер. Критичним параметром під час технічної діагностики є мінімальна залишкова товщина стінки, а не загальна площа ураження.

2.2. Локальні дефекти

Окремі ділянки пошкоджень, які можуть бути точковими (пітінг) або кільцевими. Найчастіше спричинені електрохімічною корозією, пошкодженням захисного покриття, або ударними впливами.

2.3. Лінійно-протяжні дефекти

До цієї категорії належать подряпини, канавки, вм'ятини, а також механічні шрами від інструментів чи транспортувальних роликів. Їх небезпека полягає у локальному підвищенні напруженості металу, що призводить до появи втомних тріщин.

3. Класифікація за ступенем небезпеки

Згідно з ГОСТ 3242, API 5L і методиками технічної діагностики (наприклад, ДСТУ EN 13480-5:2020), усі дефекти поділяються на:

некритичні — не впливають на працездатність, усуваються шліфуванням або локальним ремонтом;

умовно припустимі — можуть залишатися за наявності контрольних випробувань (гідравлічних або ультразвукових);

критичні — підлягають негайному усуненню або заміні труби.

Для визначення рівня небезпеки враховують такі параметри:

1. Глибину та протяжність дефекту,
2. Залишкову товщину стінки,
3. Робочий тиск і температуру середовища,
4. Матеріал і марку сталі,
5. Ступінь напруженості в зоні пошкодження.

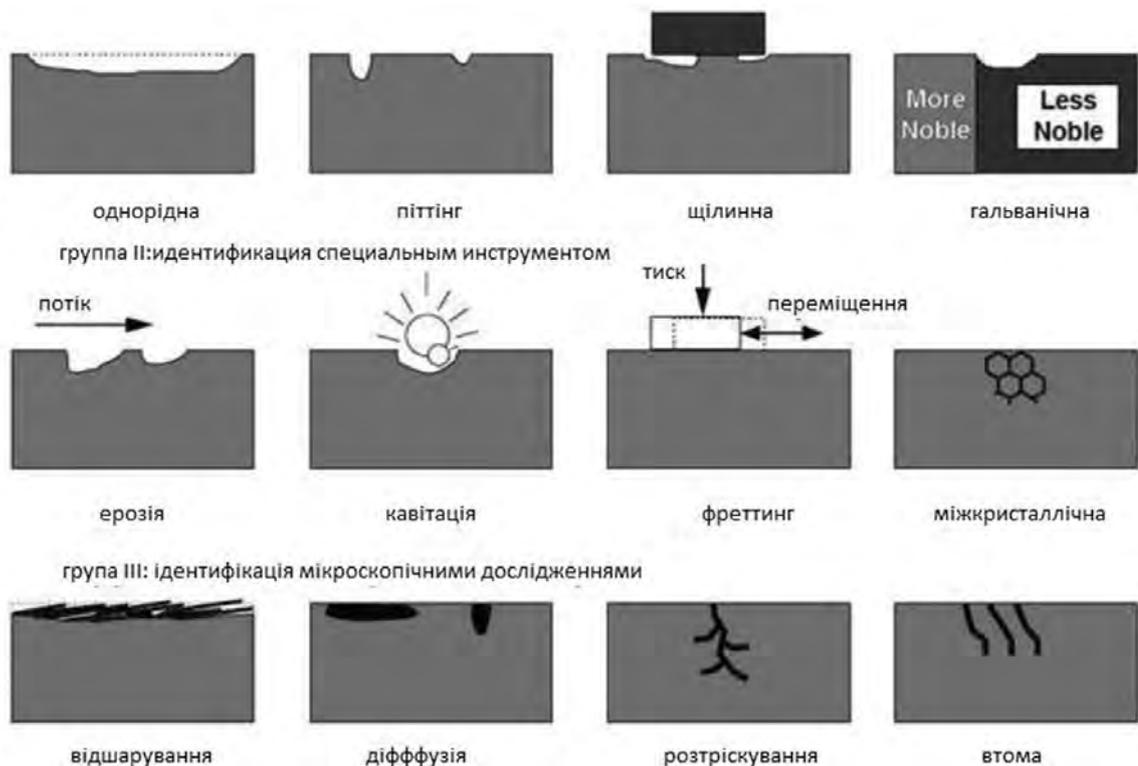


Рис.1. Види дефектiв

Таким чином, пошкодження стiнок i зварних з'єднань труб можуть мати виробниче, механiчне або корозiйне походження. Їх своєчасне виявлення i класифiкацiя є критично важливими для запобiгання аварiям, вибухам i витокам. Саме тому системи дiагностики та неруйнiвного контролю — це невід'ємна частина сучасної експлуатацiї трубопровiдних мереж.

1.5. Обґрунтування доцiльностi застосування методу ультразвукової дефектоскопiї

Сталевi безшовнi труби пiдлягають комплексному контролю якостi, який проводиться як на етапi виробництва, так i пiсля термiчної або механiчної обробки. Такi випробування дозволяють переконатися у вiдповiдностi матерiалу вимогам ДСТУ, ГОСТ, ISO та API, а також гарантують надiйностi i безпечностi трубопровiдних систем у складних умовах експлуатацiї.

Серед усiх методiв неруйнiвного контролю ультразвукова дефектоскопiя (УЗД) вважається найбільш ефективною для оцiнки внутрiшнього стану металу без пошкодження виробу. Метод ґрунтується на принципi вiдбиття ультразвукових хвиль вiд меж роздiлу середовищ iз рiзною

щільністю. У трубі ультразвук проходить крізь стінку, і якщо на його шляху є дефект (пора, тріщина, розшарування), частина сигналу відбивається. Відбитий імпульс реєструється дефектоскопом, а його амплітуда і час проходження дозволяють визначити розмір, форму і глибину дефекту.

Типи дефектів, що виявляються ультразвуком:

1. Внутрішні тріщини і пори (пов'язані з термічними або механічними напруженнями);
2. Розшарування і неметалеві включення, що впливають на однорідність структури;
3. Корозійні пошкодження у товщі стінки.
4. Дефекти зварних швів — непровари, пори, шлакові включення.

Деякі системи оснащені модульними фазованими решітками (Phased Array), що дає змогу отримувати тривимірне зображення внутрішньої структури труби. Це дозволяє з високою точністю визначати навіть найдрібніші дефекти, невидимі для класичних дефектоскопів.

1.6. Теоретичні основи методу ультразвукової дефектоскопії

1.6.1 Об'ємні хвилі

У будь-якому матеріальному середовищі, окрім вакууму, можуть виникати механічні коливання частинок, пов'язані з періодичними процесами стиснення та розтягування. Такі коливання створюють поздовжні (компресійні) хвилі, або хвилі розтягу-стиску. У твердих тілах під час поширення поздовжньої хвилі частинки речовини коливаються вздовж напрямку її розповсюдження, передаючи енергію через зміну об'єму матеріалу.

Окрім поздовжніх, у твердих тілах поширюються також зсувні (поперечні) хвилі, в яких частинки середовища рухаються перпендикулярно до напрямку поширення енергії. Через характер такого руху їх називають поперечними або зсувними хвилями.

Швидкість поширення поперечних хвиль у більшості металів приблизно в 1,8–2 рази менша, ніж швидкість поздовжніх. Наприклад, у сталі швидкість поздовжніх хвиль становить близько 5,92 мм/мкс, тоді як **поперечних — 3,23 мм/мкс. Ця різниця зумовлена різними типами пружних деформацій — об'ємною для поздовжніх та зсувною для поперечних хвиль.

Коли поперечні хвилі поширюються під певним кутом до поверхні або вздовж неї, розрізняють два типи поляризації:

SH-хвилі (горизонтально поляризовані) — коливання частинок відбуваються паралельно поверхні;

SV-хвилі (вертикально поляризовані) — частинки коливаються перпендикулярно поверхні.

Ці хвилі мають різну поведінку під час відбиття від меж матеріалу, дефектів чи структурних неоднорідностей, що активно використовується в ультразвуковій дефектоскопії. На практиці найчастіше застосовують SV-хвилі, оскільки вони забезпечують високу чутливість до змін структури металу. Однак у реальних умовах хвилі можуть мати змішану поляризацію, тобто містити як SV-, так і SH-компоненти, що враховується під час калібрування приладів і аналізу результатів контролю.

1.6.2. Хвилі Релея

У твердих тілах, окрім об'ємних хвиль, існують також поверхневі хвилі, які поширюються уздовж поверхні матеріалу. Найвідомішим типом таких коливань є хвилі Релея — вони становлять комбінацію поздовжніх і поперечних хвиль, що дозволяє забезпечити умову нульових напружень на вільній поверхні, вздовж якої хвиля поширюється. Швидкість хвиль Релея (c_p) трохи менша за швидкість поперечних хвиль — приблизно 0,9–0,93 від її значення. Наприклад, у сталі швидкість поширення хвилі Релея становить близько 3,0 мм/мкс. Рух частинок середовища в таких хвилях відбувається по еліптичних траєкторіях, причому велика вісь еліпса спрямована перпендикулярно до поверхні. Зі збільшенням глибини від поверхні еліпси

втягуються, а амплітуда коливань швидко зменшується — приблизно у 10 разів на глибині, що дорівнює довжині хвилі λ_s . Таким чином, енергія хвилі Релея зосереджена в тонкому приповерхневому шарі матеріалу. Хвилі Релея здатні поширюватися на значні відстані (до 1–2 метрів), повторюючи контури поверхні — огинаючи вигини, опуклості та западини. При цьому на опуклих ділянках швидкість їхнього поширення збільшується, а на увігнутих — зменшується, супроводжуючись посиленням загасанням енергії. Такі хвилі виникають на межі поділу двох середовищ, зазвичай твердого тіла й повітря або рідини.

Основні властивості хвиль Релея:

1. Мають низьке загасання, порівнянне з об'ємними поздовжніми хвилями, що дозволяє ефективно досліджувати великі поверхневі ділянки.
2. Існують лише в твердих тілах, оскільки потребують пружного середовища для поширення.
3. При зустрічі з кутом у 90° близько 50% енергії проходить, 37% відбивається, а решта 13% розсіюється.

Для ідентифікації хвиль Релея застосовується метод пальпування, який дозволяє визначати характер їхнього руху.

Якщо поверхня твердого тіла покрита рідиною, хвиля Релея перетворюється на змішану поверхнево-об'ємну хвилю, яка поширюється в обох середовищах одночасно, але має значно більшу швидкість загасання і меншу швидкість поширення, ніж у чистій рідині. Хвилі Релея широко застосовують у неруйнівному контролі матеріалів, особливо для виявлення тріщин, порушень адгезії покриттів та поверхневих дефектів, оскільки вони найбільш чутливі саме до пошкоджень, розташованих поблизу поверхні металу.

1.6.3. Підповерхневі головні хвилі

Підповерхневі або головні хвилі — це особливий тип ультразвукових хвиль, які поширюються поблизу поверхні об'єкта контролю (ОК), але не на самій поверхні, як хвилі Релея, а всередині матеріалу — на невеликій глибині, що становить приблизно $k\lambda$, де λ — довжина хвилі.

На відміну від поверхневих хвиль, головні хвилі зберігають властивості об'ємних хвиль, але водночас взаємодіють із поверхневими шарами матеріалу, що робить їх корисними для контролю дефектів, розташованих під поверхнею, на глибині до кількох міліметрів.

Основні характеристики і властивості головних хвиль:

1. Зона поширення. Хвилі розповсюджуються уздовж поверхні, але основна енергія зосереджена в приповерхневому шарі матеріалу. На самій поверхні амплітуда коливань практично відсутня.

2. Тип руху частинок. Коливання частинок середовища відбуваються по еліптичній траєкторії, причому вісь еліпса нахилена під певним кутом до поверхні тіла. Такий характер руху зумовлює складну взаємодію між поздовжніми та поперечними компонентами хвилі.

3. Середовище існування. Головні хвилі можуть поширюватися лише в твердих тілах, де є умови для передачі як зсувних, так і поздовжніх коливань.

4. Втрати енергії. В процесі руху головні хвилі безперервно випромінюють трансформовані об'ємні хвилі, що призводить до швидкого затухання енергії. Це обмежує їх ефективну дальність дії.

5. Швидкість поширення. Швидкість головних хвиль дорівнює швидкості об'ємних хвиль відповідного типу (поздовжніх або поперечних), оскільки вони є їх підповерхневими аналогами.

6. Чутливість до дефектів. Головні хвилі погано виявляють поверхневі дефекти, оскільки зона максимального енергетичного впливу розташована нижче від поверхні. Проте вони ефективні для виявлення підповерхневих тріщин, розшарувань і внутрішніх включень на невеликій глибині.

7. Обмеження у використанні. Через сильний вплив перешкод від трансформованих хвиль (відбитих і заломлених компонентів), головні хвилі

зазвичай застосовуються для контролю деталей товщиною понад 20 мм, де цей вплив менше позначається на точності результатів.

Завдяки своїй чутливості до неоднорідностей поблизу поверхні, головні хвилі дозволяють поєднувати переваги об'ємного та поверхневого контролю, що робить їх важливим інструментом у сучасних інтелектуальних системах ультразвукової діагностики трубопроводів.

1.6.4. Проходження і відображення УЗВ

При проходженні УЗВ через кордон розділу двох середовищ частина хвилі проходить, а частина — відбивається. Частка відбитої хвилі буде визначатися різницею акустичних властивостей середовища, які характеризуються акустичним імпедансом (акустичним опором).

Акустичний імпеданс Z , $\text{кг}\cdot\text{м}^{-2}/\text{с}$:

$$Z = \frac{P}{V_n} = \frac{(\rho * c)}{\cos(\theta)}$$

де P — акустичний тиск;

V_n — швидкість коливального руху;

ρ — щільність матеріалу.

Коефіцієнт відображення по амплітуді R :

$$R = \frac{z_1 - z}{z_1 + z}$$

де z_1 — акустичний імпеданс першої середовища, z — імпеданс другого середовища.

Коефіцієнт проходження по амплітуді D :

$$D = \frac{2z}{z_1 + z}$$

На практиці використовують коефіцієнти не по амплітуді, а по енергії:

Частка минулої хвилі:

$$\bar{D} = \frac{W_n}{W_0}$$

де W_0 — падаюча енергія,

W_{Π} — поглинута енергія.

Частка відбитої хвилі:

$$\bar{R} = \frac{W_{\text{отр}}}{W_0}$$

де $W_{\text{отр}}$ — відбита енергія.

При похилому падінні УЗВ у другому об'єкті існують поздовжні і поперечні хвилі.

Коефіцієнти відбиття і проходження визначаються формулами:

Коефіцієнт відображення:

$$\bar{R} = \left(\frac{z_e \cdot \cos^2 2\alpha + z_t \cdot \sin^2 2\alpha - z_1}{z_e \cdot \cos^2 2\alpha + z_t \cdot \sin^2 2\alpha + z_1} \right)^2$$

Для прямого ПЕП:

$$\bar{R}_1 = \left(\frac{z_e \cdot \cos^2 2\alpha - z_1}{z_e \cdot \cos^2 2\alpha + z_1} \right)^2$$

Для похилого ПЕП:

$$\bar{R}_t = \left(\frac{z_t \cdot \sin^2 2\alpha - z_1}{z_t \cdot \sin^2 2\alpha + z_1} \right)^2$$

Коефіцієнт проходження:

$$\bar{D} = \frac{4 \cdot z_1 \cdot z_t \cdot \sin^2 2\alpha}{(z_1 \cdot \cos^2 2\alpha + z_t \cdot \sin^2 2\alpha + z_1)^2}$$

Для прямого ПЕП:

$$\bar{D} = \frac{4 \cdot z_1 \cdot z_t \cdot \cos^2 2\alpha}{(z_1 \cdot \cos^2 2\alpha + z_1)^2}$$

Для похилого ПЕП:

$$\bar{D} = \frac{4 \cdot z_1 \cdot z_t \cdot \sin^2 2\alpha}{(z_t \cdot \sin^2 2\alpha + z_1)^2}$$

1.6.5. Закон Снеллиуса. Критичні кути

Якщо нижня і верхня середовища є твердими тілами, то при падінні пружної хвилі на межу поділу утворюються дві хвилі — поздовжня і поперечна. Явище, при якому один тип хвиль перетворюється в інший, називається - трансформація хвиль. Якщо хоча б одне з середовищ є рідиною

або газом, то поперечні хвилі в ньому не виникають, оскільки такі середовища не здатні передавати зсувні напруження.

Закон Снелліуса (закон синусів)

Напрямки відбитих і заломлених (поздовжніх і поперечних) хвиль визначаються законом Снелліуса:

$$\frac{\sin(\alpha_1)}{C_1} = \frac{\sin(\alpha_2)}{C_2}$$

α_1 — кут падіння хвилі,

α_2 — кут заломлення,

C_1, C_2 — швидкості поширення хвиль у відповідних середовищах.

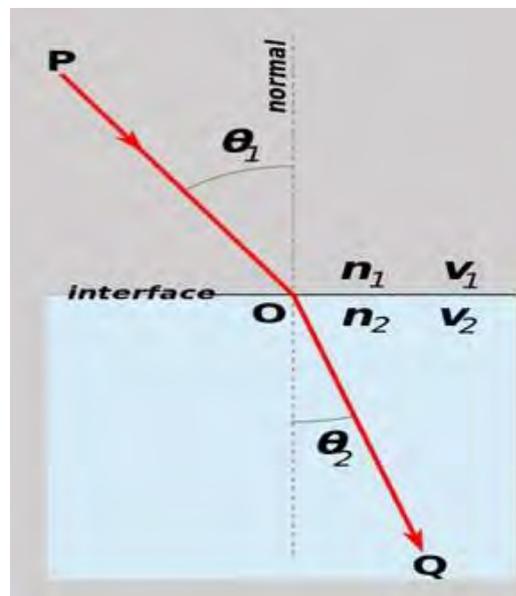


Рис.2. Закон Снелліуса

При ультразвуковому контролі (УЗК) найчастіше зустрічається ситуація, коли падає поздовжня хвиля, а в результаті заломлення та трансформації утворюються поздовжня і поперечна хвилі, швидкість поширення яких більша, ніж у первинної хвилі. Водночас виникають і відбиті хвилі:

- поздовжня, якщо верхнє середовище — рідке;
- поздовжня та поперечна, якщо верхнє середовище — тверде.

При збільшенні кута падіння α_1 до певного значення кут заломлення поздовжньої хвилі α_2 стає рівним 90° , тобто заломлена хвиля поширюється уздовж межі поділу середовищ — така хвиля називається головною. Відповідний кут падіння називають першим критичним кутом (α_1). Подальше збільшення кута падіння призводить до того, що в другому середовищі залишається лише поперечна хвиля. При другому критичному куті (α_2) поперечна хвиля також поширюється уздовж поверхні,

тобто відбувається повне внутрішнє відбиття для обох типів хвиль.

Перший критичний кут

$$\alpha_1 = \arcsin\left(\frac{C_1}{C_L}\right)$$

Другий критичний кут

$$\alpha_2 = \arcsin\left(\frac{C_1}{C_{II}}\right)$$

C_1 — швидкість хвилі в першому середовищі,

C_L — швидкість поздовжньої хвилі в другому середовищі,

C_{II} — швидкість поперечної хвилі в другому середовищі.

Найпоширеніший спосіб збудження поперечних хвиль у твердому виробі — за допомогою п'єзоелектричного перетворювача з призмою, кут якої знаходиться між першим і другим критичними кутами. Саме в цьому діапазоні забезпечується ефективне перетворення поздовжньої хвилі у поперечну, що дозволяє здійснювати точний ультразвуковий контроль матеріалів.

1.7 Завдання, що підлягають розв'язанню в подальших розділах роботи

На підставі виконаного аналізу об'єкта контролю, умов експлуатації трубопроводів, нормативних вимог, характерних дефектів і фізичних основ ультразвукового неруйнівного контролю, у подальших розділах магістерської дисертації необхідно розв'язати такі завдання:

1. Обґрунтувати вибір архітектури інтелектуальної ультразвукової системи контролю герметичності та корозійної стійкості трубопроводів з урахуванням вимог до точності, чутливості та автоматизації процесу контролю.
2. Розробити структурну схему інформаційно-вимірювальної системи ультразвукового контролю та визначити функціональне призначення її основних вимірювальних, керувальних і обчислювальних модулів.
3. Виконати розрахунок та обґрунтувати вибір параметрів ультразвукового каналу, зокрема типів і робочих частот ультразвукових перетворювачів, схем збудження та приймання сигналів, а також режимів контролю залежно від геометрії та матеріалу труб.
4. Розробити та розрахувати електронні вузли системи, що забезпечують формування зондуючих імпульсів, підсилення, фільтрацію та аналого-цифрове перетворення ультразвукових сигналів.
5. Обґрунтувати вибір апаратної платформи та засобів керування, необхідних для реалізації збору, синхронізації та обробки ультразвукових даних у реальному часі.
6. Розробити алгоритм функціонування інтелектуальної ультразвукової системи контролю, який забезпечує автоматизоване виявлення дефектів, оцінювання залишкової товщини стінки та аналіз корозійних пошкоджень трубопроводів.
7. Провести оцінювання точності, ефективності та надійності розробленої системи, а також визначити її переваги порівняно з традиційними методами ультразвукового контролю.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1

У першому розділі виконано комплексний аналіз об'єкта контролю, умов експлуатації, нормативних вимог, характерних дефектів та фізичних основ ультразвукового неруйнівного контролю сталевих безшовних гарячедеформованих труб, що є базовими елементами трубопровідних систем підвищеної відповідальності.

Встановлено, що сталеві безшовні гарячедеформовані труби широко застосовуються в нафтогазовій, теплоенергетичній, хімічній, машинобудівній та оборонній галузях, де вони працюють в умовах високих тисків, температур, вібраційних навантажень та агресивних середовищ. Відсутність зварних з'єднань значно підвищує їхню міцність і герметичність, проте не усуває ризику виникнення внутрішніх дефектів і корозійних пошкоджень, які можуть розвиватися протягом тривалого терміну експлуатації та призводити до аварійних ситуацій.

Аналіз нормативно-технічної бази (ГОСТ 8731-74, ГОСТ 8732-78, ISO, API) показав, що якість трубопровідної продукції регламентується за геометричними, механічними та експлуатаційними показниками, а також за вимогами до методів контролю. Особлива увага приділяється забезпеченню герметичності труб і збереженню мінімально допустимої товщини стінки, що є ключовими критеріями оцінювання залишкового ресурсу трубопроводів.

Розглянута класифікація дефектів і пошкоджень засвідчила, що найбільшу небезпеку для герметичності та корозійної стійкості труб становлять внутрішні та підповерхневі дефекти — тріщини, розшарування, неметалеві включення, а також локальне і рівномірне корозійне стоншення стінки. Такі дефекти, як правило, не можуть бути достовірно виявлені візуально або простими методами контролю, що обумовлює необхідність застосування високочутливих неруйнівних методів діагностики.

Обґрунтовано доцільність використання ультразвукової дефектоскопії як основного методу контролю герметичності та корозійної стійкості трубопроводів. Ультразвуковий метод забезпечує можливість виявлення внутрішніх, підповерхневих і поверхневих дефектів, визначення залишкової товщини стінки, оцінювання характеру та ступеня корозійних ушкоджень без порушення цілісності об'єкта контролю. Важливою перевагою ультразвукового контролю є можливість його автоматизації та інтеграції в інформаційно-вимірювальні системи.

Розгляд теоретичних основ поширення ультразвукових хвиль (поздовжніх, поперечних, хвиль Релея та підповерхневих головних хвиль), а також закономірностей їх відбиття, заломлення і трансформації на межах середовищ, створює наукове підґрунтя для раціонального вибору типів ультразвукових перетворювачів, кутів введення та алгоритмів обробки сигналів. Це є необхідною умовою побудови інтелектуальної ультразвукової системи, здатної адаптувати режими контролю до геометрії труби, типу матеріалу та характеру можливих дефектів.

Таким чином, результати першого розділу підтверджують актуальність і доцільність розроблення інтелектуальної ультразвукової системи контролю герметичності та корозійної стійкості трубопроводів, яка поєднує сучасні методи ультразвукового неруйнівного контролю з алгоритмами автоматизованого аналізу та інтерпретації даних. Отримані теоретичні та аналітичні положення є основою для подальшого розроблення структурної схеми, інформаційно-вимірювальних каналів і алгоритмічного забезпечення системи, що розглядаються в наступних розділах магістерської дисертації.

РОЗДІЛ 2. РОЗРАХУНКОВА ЧАСТИНА

2.1 Принцип дії системи

Надійність і стабільність функціонування трубопровідних систем значною мірою визначаються якістю виготовлення труб, умовами їх експлуатації, транспортування та зберігання. Тому на всіх етапах життєвого циклу труб дуже важливо забезпечити точний та своєчасний неруйнівний контроль. На практиці на багатьох підприємствах досі переважають методи ручної дефектоскопії, які значною мірою залежать від кваліфікації оператора й пов'язані з високим ризиком помилок. Лише окремі виробництва змогли впровадити сучасне, високовартісне автоматизоване обладнання, що істотно зменшує вплив людського фактора.

Системи ультразвукового контролю трубчастих конструкцій мають особливу цінність, оскільки вони дозволяють суттєво підвищити продуктивність традиційного УЗ-контролю. На відміну від класичного підходу, де звичайні п'єзоперетворювачі обстежують лише невелику ділянку матеріалу безпосередньо під робочою поверхнею ПЕП (що показано на рис. 20), контроль великих конструкцій таким способом є дуже повільним і часто потребує вибіркової перевірки. До того ж метод стає малоприматним, коли доступ до частини трубопроводу ускладнений — наприклад, якщо він прокладений під землею або закритий шаром ізоляції. Перевага спеціалізованих систем полягає в тому, що збудження спрямованих ультразвукових хвиль здійснюється таким чином, щоб вони поширювалися уздовж циліндричної поверхні труби, використовуючи матеріал стінки як хвилевід. Генерація таких хвиль забезпечується введенням ультразвуку під кутом, який розташований між першим і другим критичними кутами. Це дає можливість контролювати значну частину трубопроводу з одного положення перетворювачів. Подальший поворот системи дозволяє поетапно охопити всю окружність труби.

Для підтримання стабільного акустичного контакту з поверхнею застосовується спеціальний ролик, у середині якого розміщений ПЕП із контактною рідиною. Генерування коливань у каналах здійснюється шляхом подачі електричного імпульсу на відповідний п'єзоелектричний перетворювач, встановлений на клиноподібному звукопроводі. Амплітуда імпульсу підбирається з урахуванням коефіцієнта відбиття хвиль від дефекту бракувального рівня, умовно розташованого у зоні введення ультразвуку в матеріал об'єкта контролю.

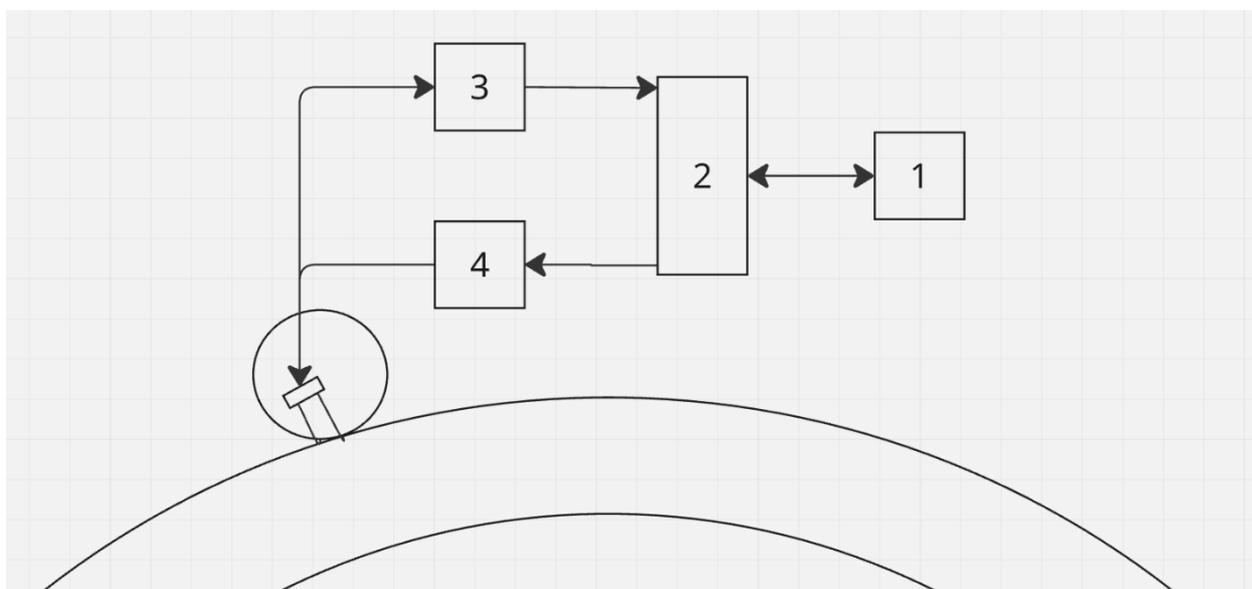


Рис.3 Структурна схема:

1. Інтерфейс, 2. Блок обробки і підсилення, 3. Блок приймального підсилювача, 4. Блок випромінювача

Функція випромінювача — генерація електричного сигналу, необхідного для активації п'єзокерамічного елемента. До його складу входять генератор коливань, електронний ключ та підсилювальний вихідний каскад. Генератор коливань попередньо налаштовується на резонансну частоту конкретного ультразвукового датчика, оскільки ця частота залежить від його типу. Електронний ключ керує роботою генератора, тобто він вмикає та вимикає його. Тривалість цього ввімкнення-вимкнення залежить від імпульсу

запуску, що дозволяє формувати послідовності випромінювальних імпульсів різної необхідної довжини. З виходу підсилювального каскаду ця напруга подається на п'єзоелемент.

Приймач відповідає за прийом, очищення та посилення надзвичайно слабких відбитих ультразвукових сигналів. Приймальний тракт включає обмежувач, підсилювач з регульованим коефіцієнтом посилення (AGC), селективний підсилювач, вихідний підсилювальний каскад та компаратор. Прийнятий сигнал від перетворювача може мати величезний діапазон амплітуд — від кількох мікрвольт (слабкі відлуння) до кількох вольт (потужний вхідний імпульс). Обмежувач захищає наступні каскади від перевантаження, зрізаючи амплітуди прийнятих сигналів до безпечних значень, зазвичай ці значення не перевищують 0.7В, що необхідне для коректної подальшої обробки.

Підсилювач із AGC (спільно зі схемою управління посиленням) має подвійну функцію: він пригнічує сильні сигнали, які є перешкодами, і компенсує природне зменшення амплітуди корисного відбитого сигналу зі збільшенням відстані до дефекту. Селективний підсилювач слугує фільтром: він відсіює випадкові чи сторонні ультразвукові сигнали, пропускаючи для подальшої обробки лише корисний сигнал на робочій частоті, далі цей сигнал демодулюється та детектується, після чого отримана огибаюча (інформація про амплітуду) посилюється.

На фінальному етапі компаратор порівнює амплітуду обвідної з попередньо встановленим порогом. Якщо напруга перевищує цей поріг, на виході формується імпульс, рівний напрузі живлення, який передається в блок обробки для аналізу.

Сучасна ультразвукова система не обмежується лише генерацією та прийомом — вона вимагає складної обробки сигналу та точного управління тимчасовими інтервалами, оскільки електронна частина датчика повинна вирішувати комплексні завдання управління, оптимальним рішенням є застосування мікропроцесорної схеми. Ключова перевага мікропроцесора

полягає у гнучкості - алгоритм обробки не є жорстко зафіксованим (апаратним), а реалізований як програма. Це дозволяє використовувати одну й ту ж схему для управління різними вихідними каскадами або застосовувати різні алгоритми обробки без зміни апаратної частини. Вбудований контролер зазвичай виконує наступні функції:

- Генерування тактової частоти.
- Керування тривалістю випромінювального імпульсу.
- Визначення часу поширення відбитого сигналу.
- Розпізнавання сигналів, спричинених перешкодами.
- Управління вихідним каскадом.
- Самодіагностика системи.

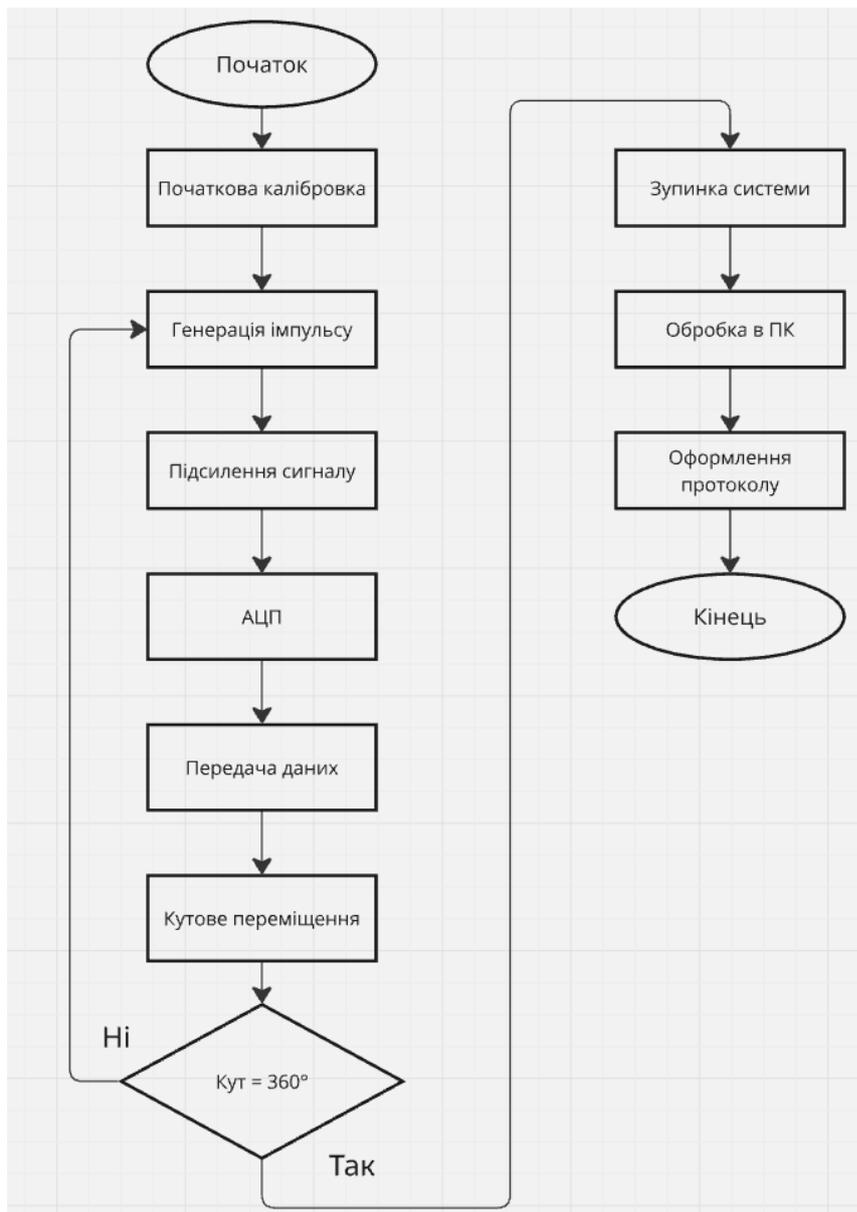


Рис.4 Алгоритм роботи системи

2.2 Опис функціональної схеми

У нашій автоматизованій системі використовується шість ультразвукових перетворювачів. Для підвищення ефективності пошуку дефектів ми застосовуємо три генератори зондуючих імпульсів. Кожен генератор формує пачку імпульсів, які подаються на три випромінюючі датчики. Під дією цих імпульсів збуджується п'єзоелемент, що створює акустичні хвилі в об'єкті контролю. Інші три датчики працюють у режимі приймачів, фіксують відбитий сигнал і передають його далі на аналоговий мультиплексор. Початок роботи системи задає мікроконтролер, який формує

стартовий імпульс для генератора. Завдяки електронному ключу, що вмикається і вимикається залежно від тривалості запускового сигналу, утворюються імпульси різної довжини. Після проходження через об'єкт частина енергії хвилі відбивається й надходить на приймальний тракт. Тут сигнал спочатку підсилюється: використовується як підсилювач з фіксованим коефіцієнтом, так і підсилювач із регульованим посиленням, який компенсує зменшення амплітуди при збільшенні відстані між датчиком та місцем відбиття. Далі сигнал проходить смуговий фільтр, який пропускає лише потрібний частотний діапазон. Щоб уникнути впливу амплітуди на визначення глибини дефекту, використовується схема ЧРЧ. Після цього аналоговий сигнал надходить на АЦП, де оцифровується, а отримані дані зберігаються в пам'яті. На завершальному етапі мікроконтролер проводить обробку інформації за заданим алгоритмом. Його перевага полягає в тому, що алгоритми можна змінювати програмно, що робить систему гнучкою. МК відповідає за формування тактових імпульсів, керування тривалістю зондуючих імпульсів, визначення часу проходження відбитих сигналів, фільтрацію перешкод, самодіагностику та керування всіма каскадами системи. Після обробки результати виводяться на дисплей.

надається за запитом до авторів

Рис.5 Функціональна схема

G – генератори (кілька штук зліва, підключені паралельно).

DC – блок комутації (можливо, Detector/Control, Distributor/Comm – у схемах УЗД часто використовується як блок перемикання каналів).

AMX – мультиплексор/аналоговий комутатор (Analog Multiplexer).

Підсилювач – каскад підсилення (зображено як трикутник).

Фільтри – блок смугових/селекційних фільтрів (значок хвилястих ліній).

Обмежувач / компаратор – елемент із трикутником і рисою (зазвичай позначає компаратор або детектор рівня).

A/# – аналого-цифровий перетворювач (ADC, A/D).

FIFO – буфер із принципом «перший увійшов — перший вийшов».

МК – мікроконтролер, центральний блок обробки.

LCD – рідкокристалічний дисплей.

Keyboard – клавіатура/панель керування.

2.3 Розрахунок акустичної частини

Робочі параметри ультразвукового контролю задаються з урахуванням необхідної роздільної здатності системи, тому частоту випромінювання обирають рівною 2,5 МГц, а мінімально допустимий для виявлення дефект приймають таким, що має еквівалентний розмір 2,5 мм. Виходячи з цих вимог, підбираються геометричні характеристики п'єзоелектричного перетворювача, насамперед діаметр його активної поверхні, який визначається компромісом між звуженням основної пелюстки діаграми спрямованості та зменшенням рівня бокових пелюсток, здатних спотворювати результати контролю.

Для роботи в діапазоні 1–10 МГц найбільш доцільним є використання п'єзокераміки типу ЦТС-19, яка забезпечує високий електромеханічний зв'язок і технологічну простоту виготовлення перетворювачів. Під дією електричного імпульсу, поданого на електроди, п'єзоелемент за рахунок зворотного п'єзоефекту деформується, унаслідок чого виникають механічні коливання пластини у напрямку, перпендикулярному до її поверхні. Такий перетворювач функціонує як дисипативна система, оскільки навантаження з боку поглинального шару та масивного матеріалу об'єкта контролю, з яким він контактує через тонкий шар рідини, спричиняє значні втрати енергії та швидке згасання коливального процесу.

З позиції електромеханічної моделі п'єзопластина еквівалентна резонансному коливальному контуру, в якому механічні втрати представлені активним опором, підключеним паралельно. Для забезпечення ефективної роботи робоча частота ультразвуку повинна збігатися з механічним

резонансом пластини, тому її товщину вибирають рівною половині довжини хвилі в матеріалі. Сформоване перетворювачем акустичне поле має ближню та дальню зони, причому в ближній зоні можливі області пониженого тиску, викликані інтерференцією хвиль, що зумовлює необхідність формування діаграми спрямованості за межами контрольованого об'єму.

Поширення ультразвуку в системі супроводжується відбиттям і проходженням хвиль на межах середовищ, тому для розрахунків визначають акустичні імпеданси п'єзокераміки, контактного середовища та матеріалу об'єкта контролю на основі їх густини та швидкості звуку. Це дозволяє оцінити коефіцієнти проходження й відбиття хвиль у прямому та зворотному напрямках. Додатково враховується затухання ультразвукових коливань під час проходження заданої відстані в матеріалі, яке визначається за табличними питомими значеннями для відповідної частоти.

Оскільки ослаблення сигналу призводить до зменшення точності визначення розмірів дефектів, у електронному тракті застосовується часова корекція підсилення, що компенсує втрати сигналу з глибиною. Регулювання здійснюється шляхом зміни співвідношення сигналів на входах диференційного підсилювача, зокрема за допомогою відповідного підбору резистивних елементів. Передача ультразвукових коливань у матеріал об'єкта здійснюється через водяний прошарок, який виконує роль акустичного контакту, причому при значній його товщині необхідно враховувати додаткові втрати на межах розділу середовищ.

Збудження п'єзоелектричного перетворювача реалізується коротким імпульсом напруги, сформованим електронним ключем, тривалість якого має бути не меншою за половину періоду резонансних коливань. За вихідний рівень приймають луносигнал від дефекту з відомими параметрами, після чого виконують акустичний розрахунок для визначення ослаблення сигналу, відбитого від дефекту бракувального розміру, розташованого на максимальній глибині. При цьому враховується розширення головної пелюстки діаграми

спрямованості в дальній зоні та майже повне відбиття ультразвуку від донної поверхні об'єкта контролю, зумовлене значною різницею акустичних імпедансів сталі та повітря; коефіцієнти відбиття визначаються за співвідношенням ефективних площ перерізів падаючої та відбитої хвиль, а також для дефектів у вигляді газових включень, розташованих поблизу верхньої й нижньої поверхонь матеріалу.

$$d = (6 - 7)\lambda = 22\text{мм}$$

λ - довжина хвилі коливань в середовищі об'єкта контролю.

$$r_{\text{бл}} = \frac{(R_{\text{п}})^2}{\lambda} = 45.45\text{мм}$$

$R_{\text{п}}$ - радіус диску перетворювача.

$$Z = p * C$$

$$K_{\text{п}} = \frac{4Z_1 * Z_2 * \cos\alpha}{(Z_1 + Z_2)^2} = 0.103$$

$K_{\text{п}}$ - коефіцієнт проходження ультразвуковим сигналом границі розділу двох середовищ

$$K_{\text{п}} = \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2}$$

$K_{\text{п}}$ - коефіцієнт відбиття ультразвуку від границі розділу середовищ

Враховуючи товщину шару води 40 мм і частоту 2,5 МГц коефіцієнт затухання становить:

$$K_{\text{зат}} = 25 * \frac{1}{2.5^2 * 40} = 0.1\text{Hn}$$

Коефіцієнт УЗ в сталі приймаємо як $k = 20$, при умові, що довжина ОК рівна 1м.

$$K_{\text{зат.ст.}} = 2 * 20 = 40\text{Hn}$$

$$U_{\text{зб}} = \frac{U_{\text{лс}}}{K_{\text{зта}}} \approx (10 \div 20)\text{В}$$

$U_{\text{лс}}$ - рівень луносигналу від дефекту на початку труби, який становить 10 мВ

$U_{\text{зб}}$ - амплітуда імпульсу збудження

$$\gamma = \arcsin\left(0.61 \frac{\lambda}{d_{\Pi}}\right) = 0.135$$

$$S_0 = \frac{\pi d^2}{4}$$

S_0 - площа січення ультразвукового сигналу прийнятого п'єзоелектричним перетворювачем після відбиття

$$K_{\text{дн}} = \frac{S_0}{S_{\text{н}}} = \frac{d_{\Pi}^2}{(d_{\Pi} + 2H * \text{tg}\gamma)^2}$$

$S_{\text{н}}$ - площа січення головної пелюстки діаграми

$K_{\text{дн}}$ - коефіцієнт відбиття від донної поверхні

На цьому етапі з'являється можливість оцінити параметри відбиття ультразвуку від дефекту, представленого газовою порожниною з ефективним діаметром, що відповідає гранично допустимому значенню, за умови його розташування на найменшій відстані від верхньої та нижньої меж об'єкта контролю.

$$k_{\text{Бр.Пов.}} = \frac{\Delta_{\text{Бр}}^2}{d_{\Pi}^2} \left(\frac{Z_{\text{ст}} - Z_{\text{вод}}}{Z_{\text{ст}} + Z_{\text{вод}}} \right)$$

$$k_{\text{Бр.Дон.}} = \frac{\Delta_{\text{Бр}}^2}{(d_{\Pi} + 2H * \text{tg}\gamma)^2} \left(\frac{Z_{\text{ст}} - Z_{\text{вод}}}{Z_{\text{ст}} + Z_{\text{вод}}} \right)$$

$$Z_{\text{вод}} = \rho_{\text{вод}} * C_{\text{вод}}; Z_{\text{ст}} = \rho_{\text{ст}} * C_{\text{ст}}$$

$$K_{\text{Бр.Пов.}} = K_{\text{пер}}^2 * K_{1\text{прох}}^2 * K_{\text{зв}}^2 * K_{2\text{прох}}^2 * k_{\text{Бр.Пов.}} = 1.896 * 10^{-4}$$

$$K_{\text{Бр.Дон.}} = K_{\text{пер}}^2 * K_{1\text{прох}}^2 * K_{\text{зв}}^2 * K_{2\text{прох}}^2 * K_{\text{зат.ОК}}^2 * k_{\text{Бр.Дон.}} = 6.36 * 10^{-4}$$

$K_{\text{Бр.Пов.}}; K_{\text{Бр.Дон.}}$ - Коефіцієнти ослаблення інтенсивності ультразвукового сигналу відбитого дефектом

$K_{1\text{прох}}$ - коефіцієнт проходження границі матеріалів п'єзоелектричного перетворювача і контактної рідини.

$K_{\text{зв}}$ - коефіцієнт затухання ультразвукового сигналу при проходженні матеріалу звукопроводу в одну сторону;

$K_{2\text{прох}}$ - коефіцієнт проходження ультразвукових коливань через границю розділу середовищ «вода - ОК»;

$K_{\text{зат.ОК}}$ - коефіцієнт затухання ультразвукового сигналу в матеріалі об'єкту контролю товщиною H

Для системи обробки сигналів обирається аналого-цифровий перетворювач із розрядністю 8 біт та входним діапазоном напруги від 0 до 1 В. Граничне значення, що відповідає бракувальному рівню, встановлюється на рівні 0,5 В на вході АЦП, з чого випливає необхідна величина коефіцієнта передачі сигналу в вимірювальному тракті системи: $K_{\text{пер}} = \frac{K_{\text{підс}}}{U_{\text{при}}} = 50$

При умові: $K_{\text{випр}} = 0.3$, початкове значення коефіцієнта підсилення:

$$K_{\text{п.п.}} = \frac{K_{\text{пер}}}{K_{\text{випр}}} = 167$$

Знайдемо коефіцієнт підсилення з врахуванням коефіцієнту затухання від дефекту бракувального рівня на кінці ствола $K_{\text{від.к.тр}} = 0.0057$

$$K_{\text{п.макс}} = K_{\text{п.п.}} + \frac{1}{K_{\text{від.к.тр}}} = 342$$

2.4. Розрахунок вузлів електричної схеми

2.4.1 Розрахунок генератора зондуючих імпульсів

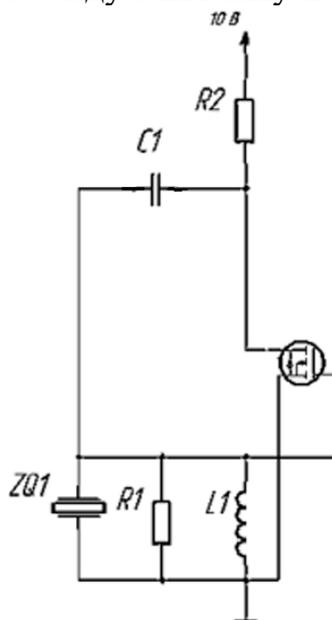


Рис.6 Генератор зондуючих імпульсів.

Ми підібрали схему ГЗІ з n-канальним DMOS-транзистором, обравши як ключ елемент 2N7000. Так як польовий транзистор у ролі ключа переходить у відкрите стан лише тоді, коли на його затвор подається додатна напруга потрібного рівня — у нашому випадку 3 В.

Обираємо з datasheet:

$$C_2 = 10^3 \text{ пФ}$$

$$C_3 = 4,7 \text{ мкФ}$$

$$C_4 = 0,1 \text{ мкФ}$$

При умові, що на електроді SW транзистора VT1 імпульс відсутній, даний транзистор буде закритим і під час цього – конденсатор C_1 заряджається до рівня $UC = +E$. Коли на керуючий електрод транзистора VT1 подається імпульс, транзистор відкривається і конденсатора C_1 розряджається викликаючи збудження резонансного контуру, а при збудженні – п'єзоелемент генерує акустичні коливання в об'єкті контролю. Зондуючу імпульсну напругу приймаємо рівною 30 мВ. Напруга, яку необхідно подати на генератор ударного збудження:

$$U_B \cong 0.4E; E = \frac{U_B}{0.4} = \frac{30 * 10^{-3}}{0,4} = 75\text{мВ}$$

Оскільки контроль необхідно здійснювати на всю глибину об'єкта, період заряджання конденсатора C_1 має бути не більшим за період надходження імпульсів збудження. Спираючись на попередні розрахунки, визначимо час зарядження конденсатора:

$$\tau_{\text{заряд}} \leq 2 * \frac{h_{\text{ок}}}{C_{\text{ок}}} = 2 * \frac{10 * 10^{-3}}{3230} = 6.19\text{мкс}$$

Процес зарядки конденсатора повинен відбуватися за $\approx 7\text{мкс}$. Приймаючи до уваги рекомендовані значення ємності - $C_1 = 1 \div 10 \text{ нФ}$, призначимо $C_1 = 4 \text{ нФ}$. Тоді, значення резистора R_2 :

$$R_2 = \frac{\tau_{\text{заряд}}}{3 * C_1} \approx 0.6\text{кОм}$$

Ємність п'єзоперетворювача:

$$C_{\text{пеп}} = \varepsilon_0 * \varepsilon_{\text{цтс}} * \frac{S}{h} = 8.854 * 10^{-12} * 1700 * \frac{50.34 * 10^{-6}}{0.33 * 10^{-3}} = 2.29 \text{нФ}$$

ε_0 - електрична постійна.

$\varepsilon_{\text{цтс}}$ - відносна діелектрична постійна.

h - товщина перетворювача.

S - площа поверхні дискового перетворювача.

Загальна ємність розраховується за формулою:

$$C_{\text{заг}} = \frac{C_1 * C_{\text{пеп}}}{C_1 + C_{\text{пеп}}} = 1.33 \text{нФ}$$

В datasheet транзистора 2N7000 вказано, що опір транзистора в відкритому стані = 5 Ом. Тепер ми можемо визначити час розрядки та порівняти його з визначеним вище часом зарядки конденсатора.

$$\tau_{\text{роз}} = C_{\text{заг}} * R_{VT1} = 6.6 \text{нс}$$

$$\tau_{\text{роз}} \ll \tau_{\text{заряд}}$$

Як бачимо з порівняння, час розрядки є набагато меншим, що задовольняє нашу умову.

Тепер знайдемо індуктивність котушки L_1 , з врахуванням робочої частоти п'єзодатчика, яка становить – 2.5МГц.

$$L_1 = \frac{1}{4 * \pi^2 * f_p^2 * C_{\text{пеп}}} = 5.6 \text{мкГн}$$

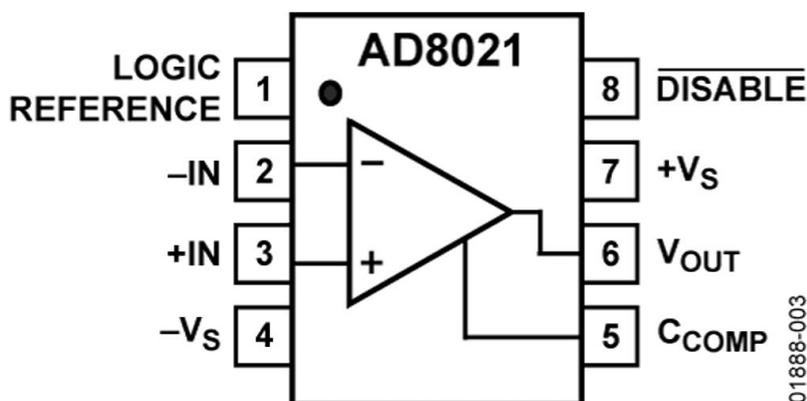
Тоді, тривалість збудження імпульсу перетворювача, котра повинна дорівнювати близько півперіоду частоти коливання п'єзопластинки перетворювача становить:

$$\tau_{\text{зі}} = \frac{1}{2 * f_p} = 200 \text{мкс}$$

2.4.2. Розрахунок операційного підсилювача

AD8021ARZ - це операційний підсилювач (ОП) загального призначення від Analog Devices, який відзначається своїм малошумним і високошвидкісним характером. Він розроблений для різноманітних

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



пристроях. []

Рис.7 Операційний підсилювач

Так як нам потрібно підсилити вхідну напругу так, щоб наша вихідна напруга не перевищувала 10В (має входити в діапазон від 0,1В до 10В). Проведемо розрахунки з метою отримання максимального коефіцієнта підсилення для $U_{пр}$.

$$K = \frac{U_{\max}}{U_{пр}} = 50$$

$$U_{\text{підс}} = K * U = 50 * 2 * 10^{-3} = 100\text{мВ}$$

U_{\max} - максимальна напруга яку повинні отримати на виході операційного підсилювача.

K – коефіцієнт підсилення.

U – напруга яка поступає на вхід операційного підсилювача.

Можна зробити висновок, що за такого коефіцієнта підсилення достатньо використати лише один підсилювальний каскад. У результаті на виході ми отримуємо сигнал, амплітуда якого приблизно у 30 разів більша за амплітуду вхідного.

Коефіцієнт підсилення визначають резистори:

$$K_U = \frac{R_3}{R_2}$$

Враховуючи, що коефіцієнт підсилення $K_U = 50$, підбираємо $R_2 = 2\text{кОм}$, $R_3 = 100\text{кОм}$.

2.4.3. Розрахунок смугового фільтру

Смуговий фільтр потрібен для того, щоб відсіювати різні завади та непотрібні частоти, залишаючи тільки корисний сигнал, який нам потрібен для подальшої обробки. Тому перед налаштуванням фільтра треба визначити, які саме частоти присутні в сигналі з п'єзоперетворювача, щоб правильно вибрати смугу пропускання. Відомо, що модель луна-імпульсного сигналу описується так:

$$U(t) = A * e^{-(g*w*t)^2} * \sin(w * t)$$

g – коефіцієнт швидкості згасання.

A – амплітуда прийнятого сигналу.

w – частота перетворювача.

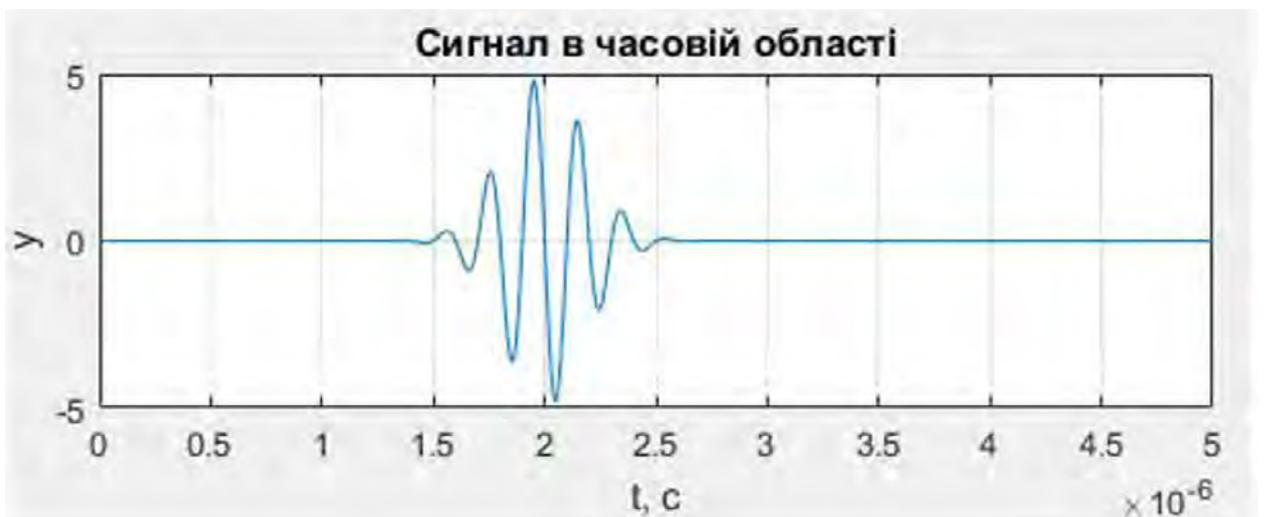


Рис.8 . Змодельований луна-імпульсний сигнал в середовищі Matlab для 4 коливань, $A = 4$: (вісь абсцис – час, вісь ординат – амплітуда).

За допомогою FilterPro спроектуємо наш смуговий фільтр:

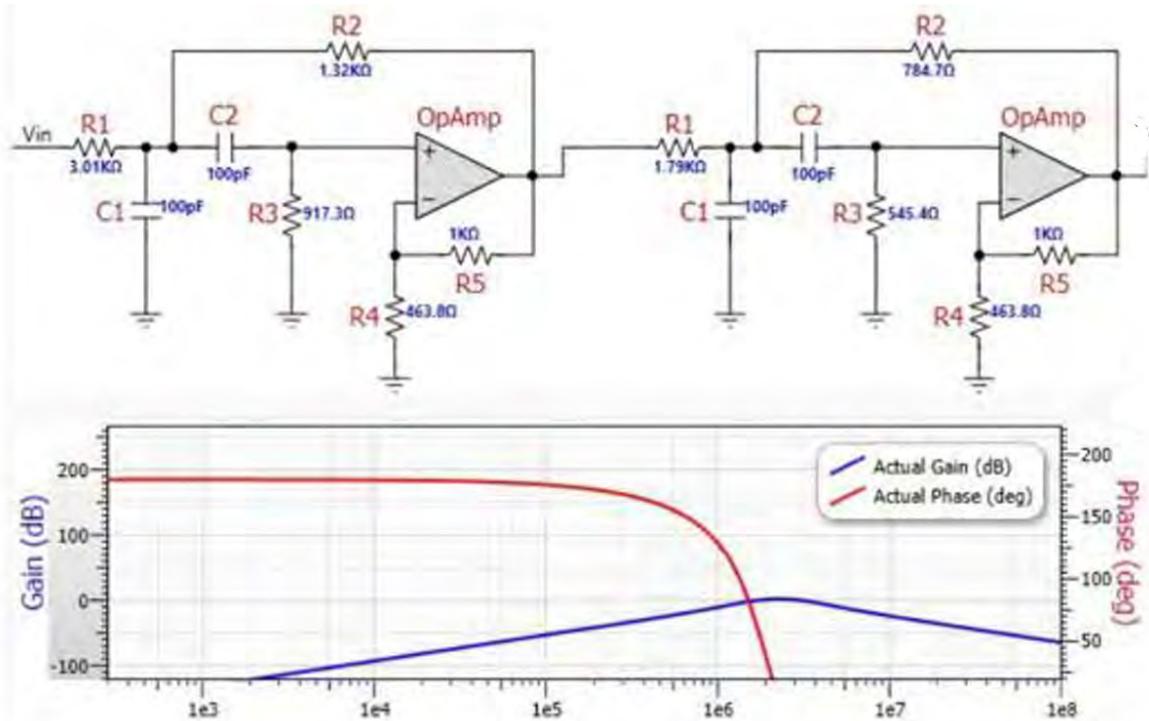


Рис.9. Двокаскадний смуговий фільтр змодельований в середовищі FilterPro.

2.4.4. Схема часового регулювання чутливості

У цьому розділі детально розглядається схема часового регулювання чутливості (ЧРЧ), реалізована на основі високоточних мікросхем компанії Analog Devices, які повністю відповідають функціональним вимогам системи. Застосована мікросхема забезпечує діапазон керованого підсилення від 0 до 54 дБ, що дозволяє точно адаптувати рівень підсилення в часі відповідно до зміни амплітуди вхідного сигналу. Часове регулювання чутливості використовується у приймальних трактах, де рівень початкового сигналу суттєво змінюється з часом — наприклад, в ультразвукових системах, радарх, ехолотах та вимірювальних комплексах. На початку прийому сигнал часто має значно більшу амплітуду, тому чутливість знижується, а із збільшенням відстані та ослабленням сигналу — поступово підвищується. Саме для цього й застосовується ЧРЧ. Для повноцінної інтеграції такого вузла важливо враховувати наступні характеристики:

Діапазон регулювання (Gain Range) — максимальна зміна підсилення, яку схема може забезпечити. У нашому випадку це 0...54 дБ.

Крутизна або швидкість наростання (Slope / dB per μ s) — визначає, з якою швидкістю змінюється підсилення в залежності від часу. Для різних застосувань потребуються різні профілі наростання.

Тип закону регулювання (Linear / Exponential TGC) — лінійний закон підходить для систем із приблизно рівномірним загасанням, тоді як експоненціальний використовується в середовищах, де ослаблення сигналу нелінійне.

Динамічний діапазон приймача — ЧРЧ повинна бути узгоджена з параметрами аналогового тракту, щоб уникнути перевантаження та втрати слабких сигналів.

Рівень шуму мікросхеми (Noise Figure) — критично важливий параметр, оскільки підсилення на пізніх етапах може збільшувати шум нарівні з корисним сигналом.

Точність формування кривої TGC — сучасні мікросхеми Analog Devices забезпечують високу повторюваність та мінімальні похибки регулювання.

Час відгуку (Response Time) — швидкість, з якою схема реагує на зміну керуючої напруги або цифрового сигналу.

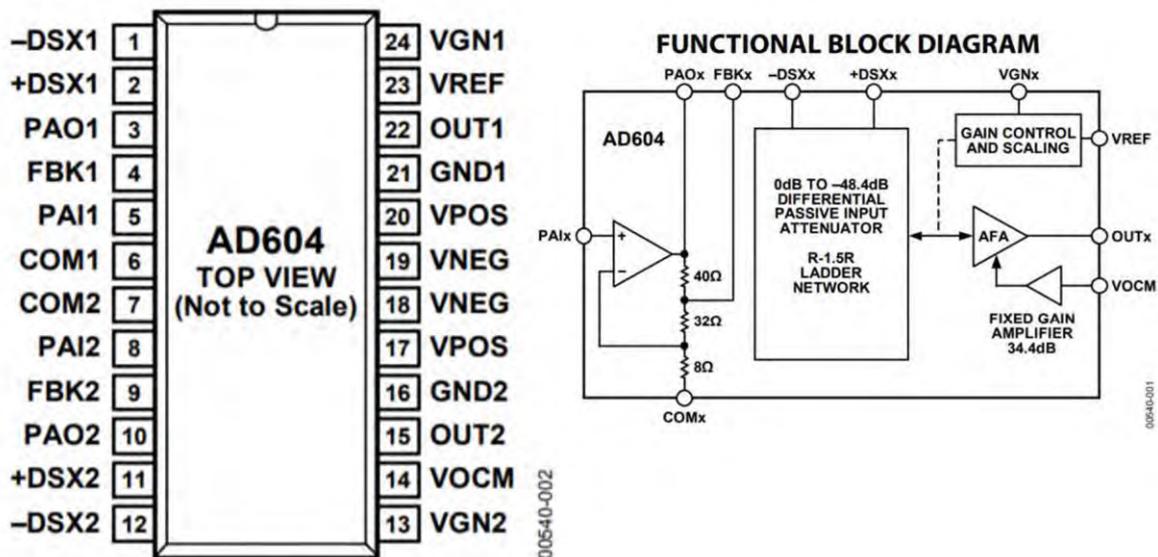


Рис. 10. Конфігурація виводів та функціональна діаграма мікросхеми часового регулювання чутливості.

2.4.5. Розрахунок та вибір АЦП

Під час вибору відповідного АЦП слід враховувати три ключові умови: розрядність перетворювача має забезпечувати необхідну точність, частота дискретизації повинна щонайменше удвічі перевищувати максимальну частоту вхідного сигналу, а сам сигнал має знаходитись у межах динамічного діапазону пристрою. Враховуючи прийняту частоту сигналу 5 МГц, мінімально допустима частота дискретизації повинна становити не менше ніж $f_e \geq 14$ МГц. Для подальших розрахунків визначаємо мінімальну амплітуду сигналу на вході АЦП, використовуючи відомі параметри: $x_{\min} = 2$ мВ, коефіцієнт підсилення $K_p = 50$, а максимальна напруга АЦП дорівнює 3,3 В.

Визначимо мінімальне значення сигналу на вході, знаючи значення коефіцієнт підсилення. $x_{\min} = 2$ мВ, $K_p = 50$, $U_{\text{АЦП}} = 3,3$ В:

$$X_{\min} = x_{\min} * K_p = 100 \text{ мВ}$$

Тоді, крок квантування, за умови не перевищення похибки в 1% становить:

$$Q = \frac{\delta_{xm} * X_{\min}}{100\%} = 1 \text{ мВ}$$

Тепер, знаючи крок квантування ми можемо дізнатися максимальну розрядність АЦП:

$$q_{\text{АЦП}} = \left[\log_2 \left(\frac{U_{\text{АЦП}}}{Q} \right) \right] + 1 = 11.96$$

З урахуванням проведених розрахунків можна зробити висновок, що оптимальним вибором є АЦП із розрядністю 12 біт та частотою дискретизації близько 35 МГц. Для виконання цих вимог доцільно використати MAX1206, оскільки він забезпечує частоту дискретизації 40 МГц, що створює необхідний запас для коректного відтворення сигналів та підвищує надійність вимірювання. АЦП MAX1206 також характеризується низьким рівнем шуму,

широким динамічним діапазоном, низьким енергоспоживанням та швидким часом встановлення, що робить його придатним для високочастотних систем збору даних.

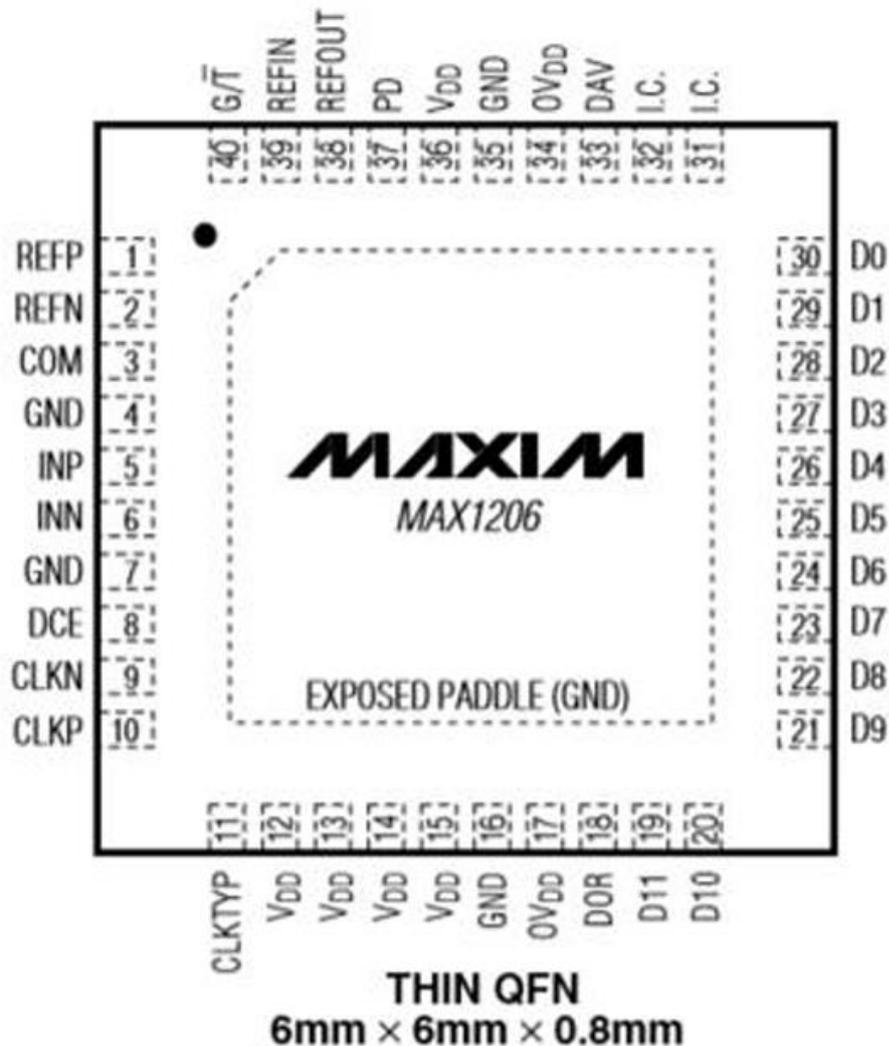


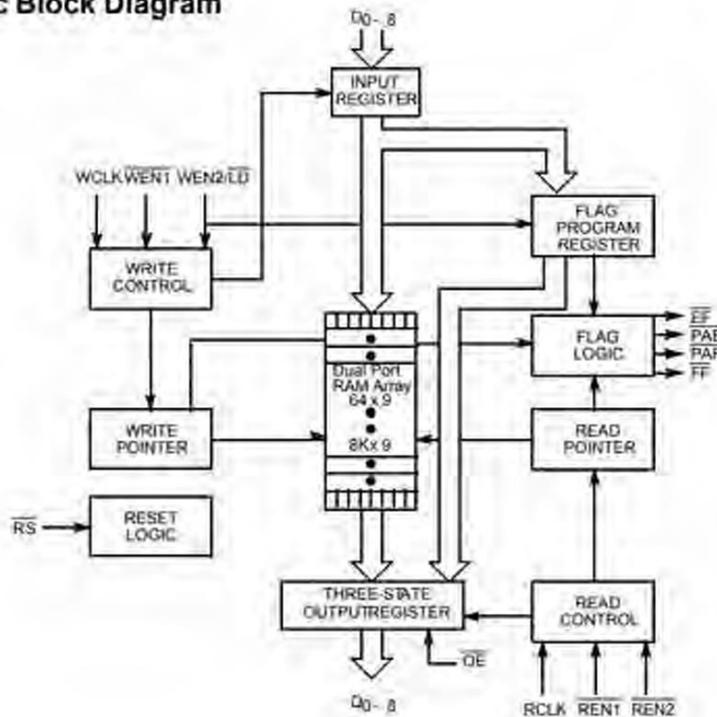
Рис.11 . Компонування виводів АЦП MAX1206.

2.4.6. Вибір пам'яті

Мікросхема CY7C4231V-25AXCT — це енергоефективна флеш-пам'ять від компанії Cypress Semiconductor, створена для застосувань, де критично важливі стабільність роботи та мінімальне енергоспоживання. Завдяки обсягу 256 МБ вона підходить для зберігання значних масивів даних у портативній техніці, вбудованих системах керування та медичному обладнанні. Пристрій забезпечує швидкість читання до 25 МГц і запису до 15 МГц, що гарантує швидкий доступ до інформації. Наявність інтерфейсів SPI та I²C розширює

можливості інтеграції з різними цифровими системами. Широкий діапазон робочої напруги 1,65 - 3,6 В, робить мікросхему універсальною для різних схемотехнічних рішень, а виконання у компактному корпусі SOIC-48 дозволяє легко впроваджувати її в сучасні друковані плати. Додаткову надійність забезпечують робочий температурний діапазон $-40...+85$ °С та ресурс не менше 100 000 циклів запису.

Logic Block Diagram



Pin Configuration

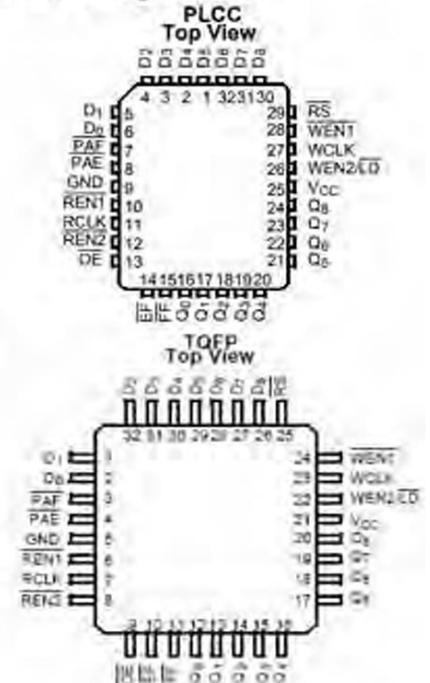


Рис. 12 Схема CY7C4231V-25AXCT

2.4.7 Підбір мікроконтролера

Мікроконтролер ESP32-S3 побудований на базі двоядерного процесора Tensilica LX7, що працює на частотах до 240 МГц. Обидва ядра можуть виконувати задачі паралельно: одне ядро оптимально підходить для обробки й аналізу отриманих сигналів, тоді як інше може бути задіяне для їхнього відображення на екрані. Такий поділ навантаження істотно підвищує швидкодію системи та забезпечує точніше й частіше оновлення даних у порівнянні з типовими мікроконтролерами. Додатково ESP32-S3 оснащений малопотужним допоміжним ядром ULP, яке дозволяє виконувати прості операції при мінімальному енергоспоживанні — це робить його особливо

привабливим для енергоефективних пристроїв. Щодо пам'яті, чип має 512 КБ вбудованої SRAM, а також підтримку Octal SPI Flash і зовнішньої PSRAM, що забезпечує збільшення доступного обсягу пам'яті та можливість зберігати чи обробляти значно більші масиви даних.

ESP32-S3-DevKitC-1

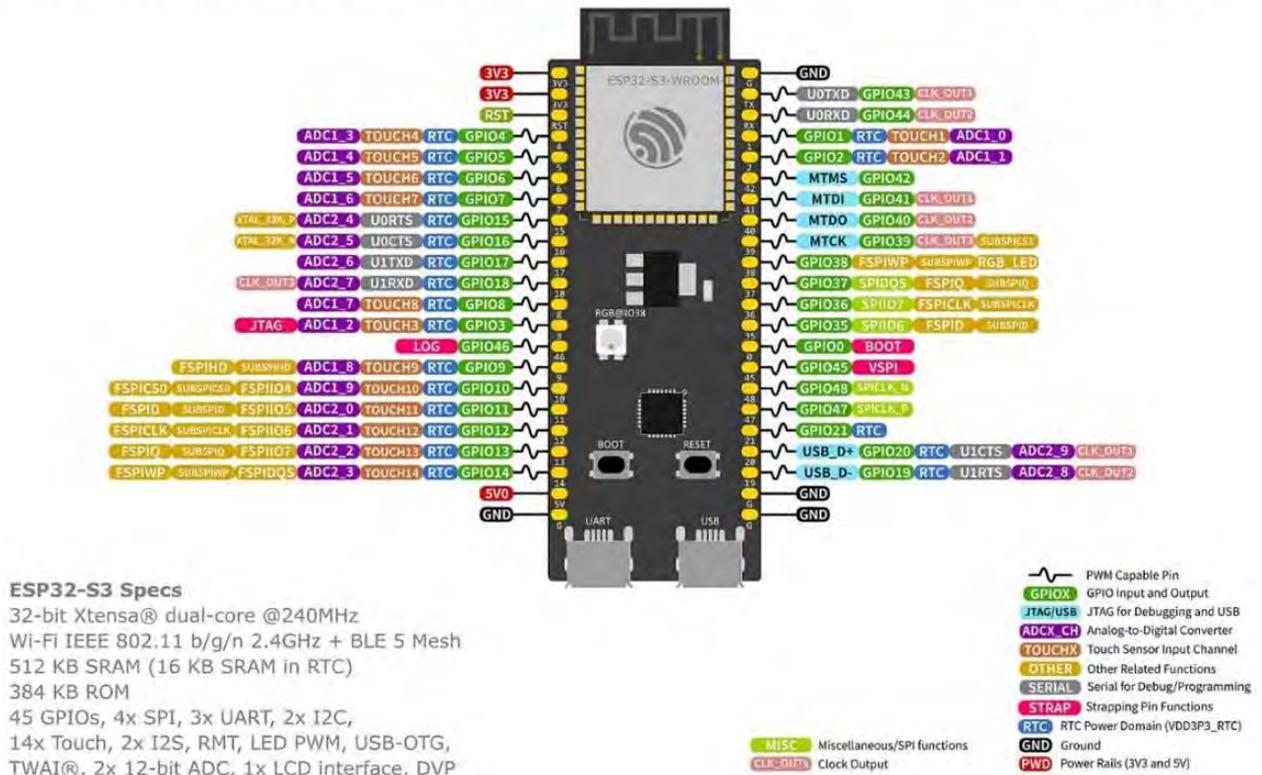


Рис.13 Мікроконтролер ESP32-S3

2.4.8 Підбір дисплею

Для моєї системи було підбрано дисплей — 4.0" IPS TFT LCD. Даний модуль забезпечує значно кращу якість зображення, ширші кути огляду та підвищену яскравість, що робить його більш ефективним для відображення отриманих результатів вимірювань ніж його конкуренти.

Тип контролера: ILI9488 або ST7701S (сучасні, з поліпшеною передачею кольорів);

Тип матриці: IPS TFT (насичені кольори, кути огляду до 170°);

Діагональ дисплея: 4.0";

Роздільна здатність: 480×800 пікселів (покращена чіткість у порівнянні з 480×320);

Інтерфейс: 16-бітний паралельний або RGB (сумісний із більшістю MCU, включно з ESP32-S3);

Підсвітка: 8–10 високояскравих білих світлодіодів;

Яскравість: до 450–550 ніт;

Габарити: близько 95×55 мм (практично ті ж розміри, що й 3.5" модулів);

Такий дисплей є кращим вибором для наочного та детального представлення даних, забезпечує вищу якість зображення та комфорт роботи з інтерфейсом.



Рис.14 . 4.0" IPS TFT-дисплей.

2.4.9 Підбір клавіатури

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

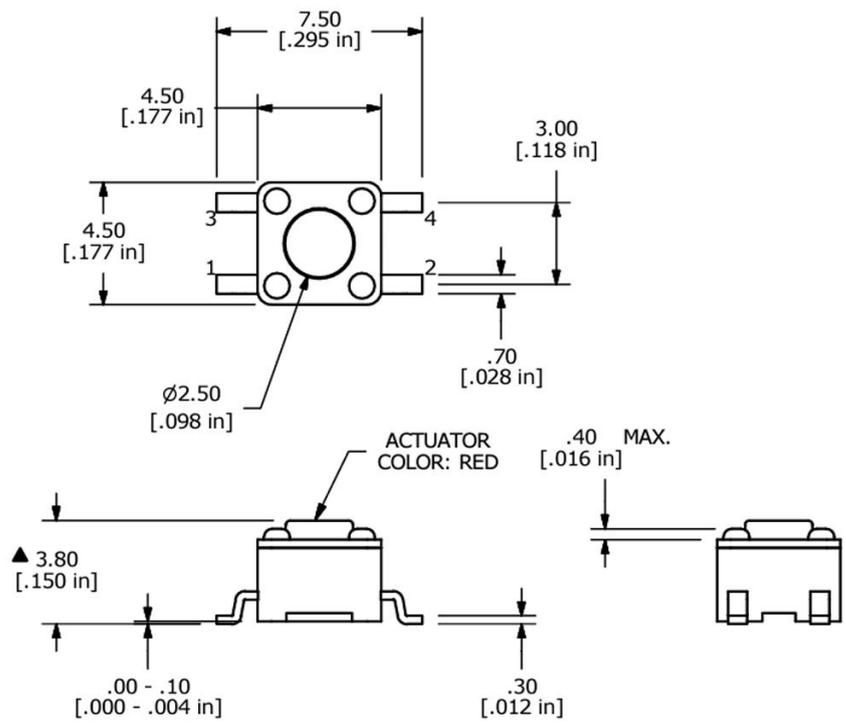


Рис.15 Схема кнопки TL3305AF260QG

ВИСНОВОК ДО РОЗДІЛУ 2

У другому розділі магістерської дисертації виконано розроблення та обґрунтування принципів побудови інтелектуальної ультразвукової системи контролю герметичності та корозійної стійкості трубопроводів на основі результатів аналітичних досліджень, наведених у першому розділі.

На підставі вимог до точності, чутливості та автоматизації процесу контролю обґрунтовано вибір архітектури інформаційно-вимірювальної системи ультразвукового контролю, що забезпечує комплексну оцінку технічного стану трубопроводів шляхом виявлення внутрішніх і підповерхневих дефектів, а також визначення залишкової товщини стінки як ключового показника корозійної стійкості.

Розроблено структурну схему інтелектуальної ультразвукової системи контролю та визначено функціональне призначення її основних модулів, зокрема ультразвукового вимірювального каналу, електронних вузлів формування та приймання сигналів, апаратних засобів керування, а також блоку обробки й аналізу даних. Запропонована структура забезпечує можливість масштабування системи та її адаптації до різних типорозмірів труб і умов експлуатації.

Обґрунтовано вибір параметрів ультразвукового каналу з урахуванням геометрії та матеріалу труб, характеру можливих дефектів і необхідної глибини контролю. Визначено доцільність використання поздовжніх і поперечних ультразвукових хвиль, а також можливість застосування поверхневих хвиль для підвищення чутливості до корозійних і приповерхневих пошкоджень.

Розглянуто принципи побудови електронної частини системи, що забезпечує формування зондуючих імпульсів, підсилення, фільтрацію та аналого-цифрове перетворення ультразвукових сигналів. Показано, що застосування сучасних мікроконтролерних і обчислювальних платформ дозволяє реалізувати синхронізований збір даних і первинну обробку сигналів у реальному часі.

Сформульовано загальні вимоги до алгоритмічного забезпечення інтелектуальної ультразвукової системи, зокрема щодо автоматизованого виявлення дефектів, оцінювання залишкової товщини стінки та аналізу корозійних пошкоджень на основі параметрів відбитих ультразвукових сигналів. Це створює передумови для подальшого впровадження інтелектуальних методів обробки даних і підтримки прийняття рішень.

РОЗДІЛ 3

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ТА АЛГОРИТМИ ОПРАЦЮВАННЯ СИГНАЛУ

3.1 Загальна методика моделювання та опрацювання сигналу

Ультразвукові спрямовані хвилі – це спеціальні ультразвукові хвилі, що поширюються вздовж напрямку розширення обмежених пружних середовищ, які називаються хвилеводами. Спрямовані хвилі мають унікальну характеристику, яка називається дисперсією, що описує явище, коли швидкість поширення спрямованої хвилі залежить від властивостей матеріалу, частоти збудження та структури матеріалу. У циліндричному хвилеводі існує багато мод спрямованої хвилі. Вибір найкращих мод для контролю є необхідним кроком у розумінні поширення спрямованої хвилі для чутливості контролю. Для опису мод спрямованої хвилі в трубах використовуються два індекси: порядок окружності M та номер моди n . Можливі три типи мод: поздовжні, крутильні та згинальні. Всі ці моди спрямованої хвилі поширюються в осьовому напрямку труби. Коли $M=0$, акустичні поля мод є осесиметричними вздовж кола циліндра, інакше моди є неосесиметричними. Поздовжні моди та крутильні моди є осесиметричними, а згинальні моди представляють неосесиметричні моди. При поширенні спрямованої хвилі фазова швидкість зазвичай відрізняється від швидкості поширення енергії, яка називається груповою швидкістю. Як фазова, так і групові швидкості змінюються залежно від товщини труби та частоти. На рисунку 1 показано криві дисперсії фазової швидкості для труби з вуглецевої сталі. На цій діаграмі дисперсії показано ряд поздовжніх мод та згинальних мод. В тілі контролю можливо мати кілька мод спрямованої хвилі з постійною частотою, але всі з різними швидкостями. Загальна кількість мод спрямованої хвилі для заданого значення частоти та товщини є рахунковою та збільшується зі збільшенням частоти.

Для циліндричного хвилеводу моди поширення можна класифікувати як осесиметричні (поздовжні та крутильні) та неосесиметричні (згинальні) моди.

Для більшості кутових балкових навантажень з п'єзоелектричними перетворювачами сила навантаження джерела прикладається в осьовому або радіальному напрямку, і в цьому випадку генеруються лише поздовжні та згинальні моди. При окружному осесиметричному навантаженні збуджуються лише осесиметричні моди, а при частковому навантаженні, наприклад, при використанні одного кутового клиноподібного перетворювача, також генеруються неосесиметричні спрямовані хвилі. Таким чином, ми матимемо поздовжню моду та групу згинальних мод з різними амплітудами та різними фазовими швидкостями.

Генерація різних мод залежить від умов навантаження джерела. Осесиметричні моди, такі як поздовжні моди, ретельно вивчалися в попередні роки через їх рівномірний розподіл енергії по колу. Широко використовувалися різні методи генерації осесиметричних мод, такі як масив перетворювачів, що складається з серії нормальних балкових перетворювачів. Неосесиметричне навантаження джерела також бажане за певних обставин, наприклад, коли доступна лише частина циліндра. Коли генеруються неосесиметричні спрямовані хвилі, акустичне поле є складнішим, і розподіл енергії хвилі необхідно знати, щоб оцінити здатність до контролю спрямованих хвиль та виконати налаштування частоти та кута. У цьому дослідженні часткове навантаження по окружній дузі та метод ультразвукового контролю імпульсно-луною використовувалися на відстані 50 см від кінця зразка труби з вуглецевої сталі. Кут падіння становив 31 градус, що відповідає фазовій швидкості 5200 м/с, отриманій за законом Снелліуса.

Отриманий сигнал від здійснення контролю потребує певної обробки, яку можна змоделювати використавши блок-схему:

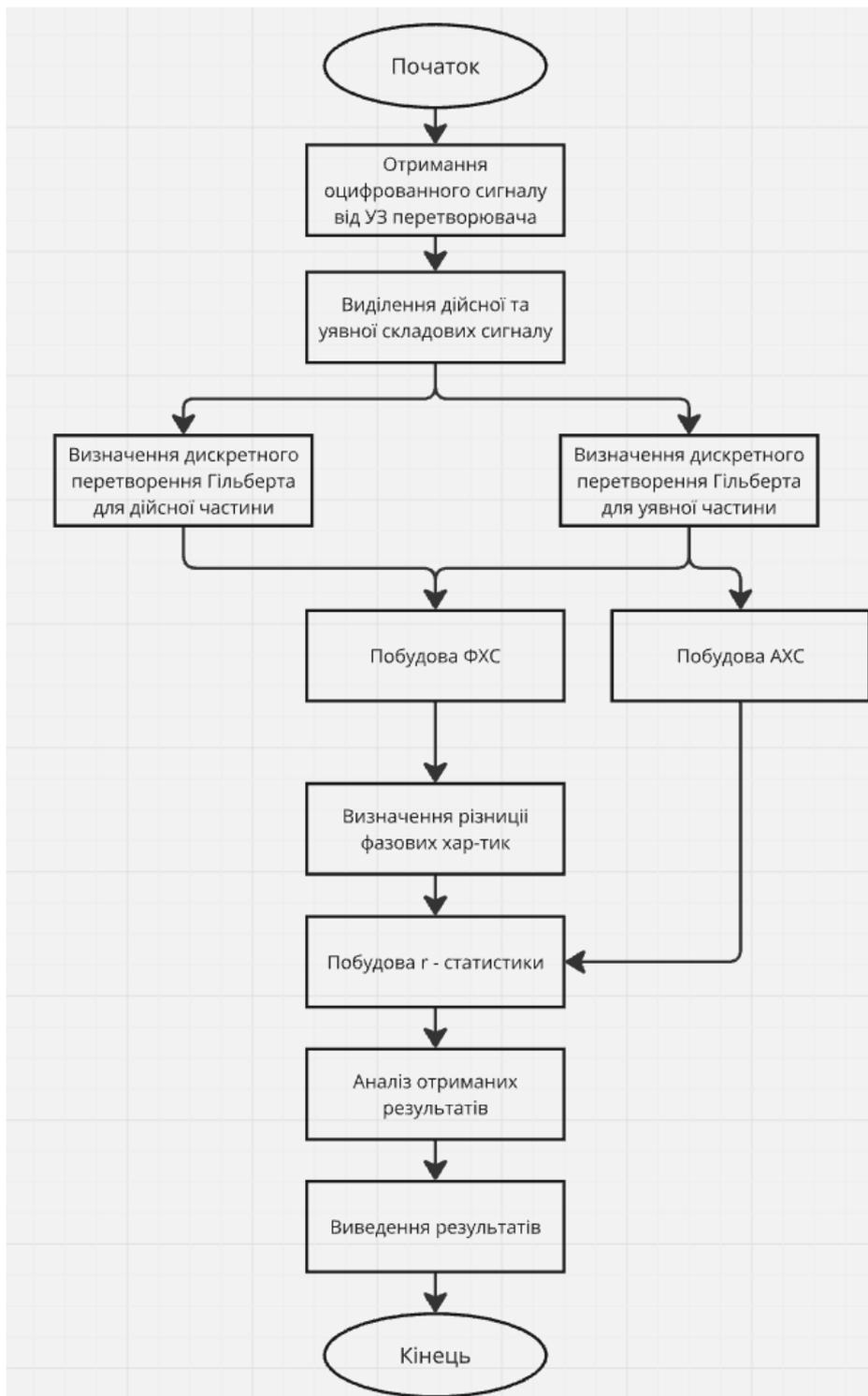


Рис.16 Алгоритм роботи системи

Після завершення всіх процедур попередньої обробки сигнал надсилається до комп'ютерної системи, де починається етап програмної інтерпретації. На цьому рівні сигнал, згенерований п'єзоелектричним

перетворювачем і поданий у цифровій формі як набір дискретних відліків, передається до персонального комп'ютера для подальшого числового аналізу.

Подальше опрацювання здійснюється із застосуванням спеціалізованого програмного забезпечення, яке реалізує дискретне перетворення Гільберта. У результаті формується аналітичне представлення сигналу, що дає змогу виділити його огибаючу та фазову складову. Саме ці параметри несуть основну інформацію про енергетичні та фазові властивості ультразвукових коливань під час їх поширення й відбиття в матеріалі.

На наступному кроці визначається різниця між фазовими залежностями оброблених сигналів, що інтерпретується як поточний фазовий зсув. Аналіз цього зсуву дозволяє з більшою точністю локалізувати моменти приходу корисних імпульсів, зокрема в умовах дії шумів і за низького співвідношення сигнал/шум.

Після цього виконується обчислення r -статистики з використанням ковзного полівіконного алгоритму, який забезпечує локальне статистичне узагальнення фазової інформації. Такий підхід підвищує стійкість методу до завад і покращує надійність виявлення донних відбиттів. Завершальним етапом є зіставлення амплітудних і фазових характеристик, візуальне представлення результатів обробки, а також оцінка й аналіз похибок вимірювань у задачах ультразвукової товщинометрії.

3.2 Моделювання обробки сигналу

Під час підготовчих робіт до етапу моделювання виникла потреба привести у відповідність характеристики досліджуваних сигналів до параметрів системи їх реєстрації та цифрового опрацювання. До параметрів сигналів належать форма і тривалість імпульсів, несуча частота, амплітудний рівень, а також часові й спектральні властивості. Параметри ж системи збору даних визначаються особливостями цифрової обробки, зокрема вибором типу та довжини віконної функції, частотою дискретизації, тривалістю

аналізованого інтервалу, кроком квантування та додатковими налаштуваннями алгоритмів.

Вибір і узгодження цих параметрів суттєво впливають на точність і надійність результатів дослідження ультразвукових методів вимірювання товщини. Невідповідність між характеристиками сигналу та режимами його оцифрування може спричиняти втрату інформації, збільшення похибок і зниження ефективності подальшого аналізу. З метою зменшення впливу методичних та зовнішніх чинників було виконано налаштування параметрів сигналів і системи збору даних, що забезпечує коректність моделювання та відтворюваність отриманих результатів.

На початковому етапі моделювання формується серія радіоімпульсів, які відтворюють ультразвукові сигнали, характерні для реальних умов контролю.

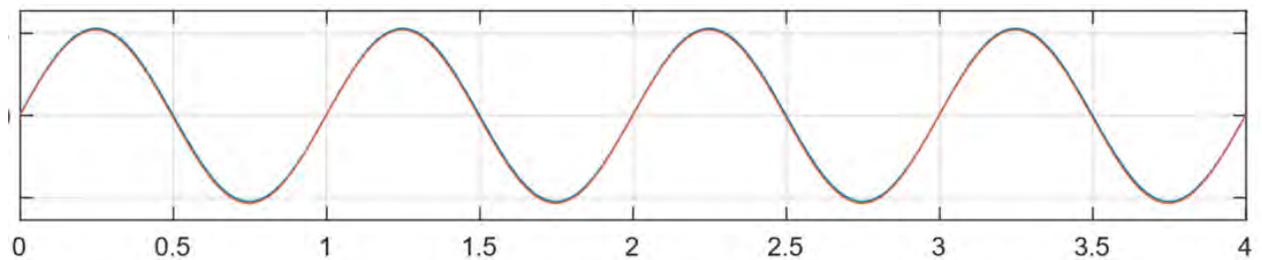


Рис. 17 Графік гармонійного сигналу

Сигнал, зображений на рисунку 17, використовувався для генерації послідовності радіоімпульсів, яка розглядалася як дискретна функція $\{u[j], j = 1, \dots, N\}$. Цей сигнал демонструє експоненціальне згасання, що відповідає реальним умовам поширення ультразвукових хвиль у матеріалі. Для наближення моделі до практичних вимірювань до сигналу було додано випадковий шум, створений відповідно до заданих статистичних характеристик. Результати формування радіоімпульсів і вплив шумової

складової показані на рисунку 18.

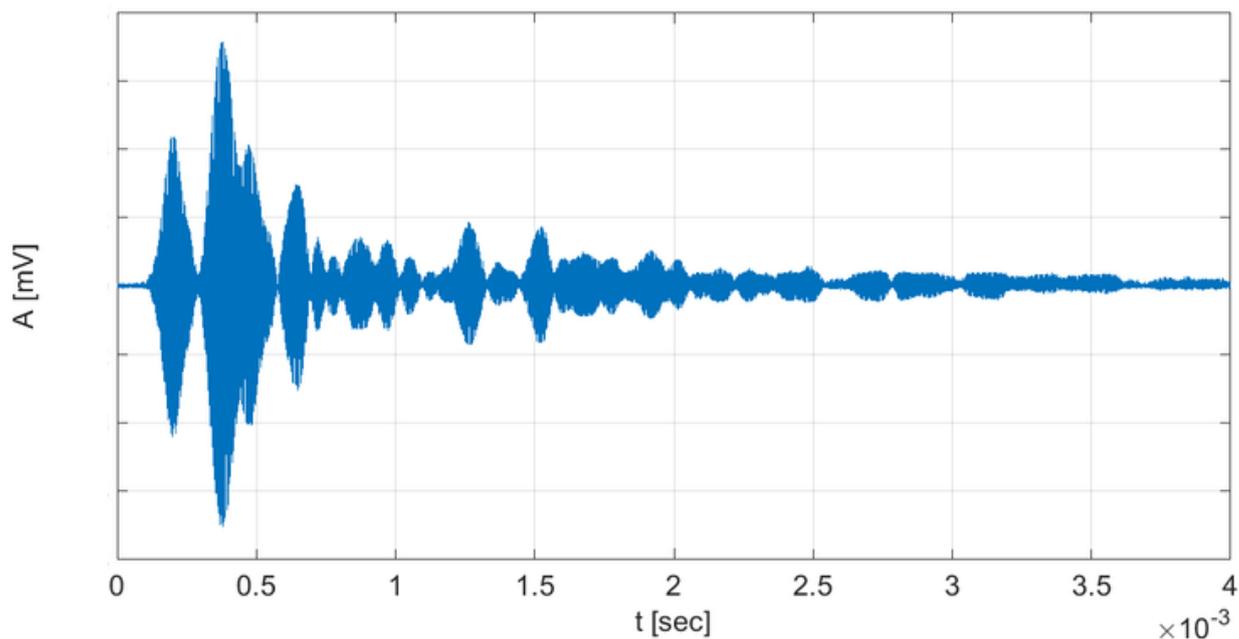


Рис. 18 Послідовність гаусових імпульсів з додаванням шуму.

На наступному етапі дослідження було виконано побудову гільбертового представлення сформованої послідовності радіоімпульсів. Для цього використовувалося дискретне перетворення Гільберта, яке є потужним інструментом цифрової обробки сигналів і дозволяє перейти від реального сигналу до його аналітичного подання. Аналітичний сигнал містить як дійсну, так і уявну компоненти, що дає змогу більш детально характеризувати його поведінку у часі та частотній області.

Основна мета застосування дискретного перетворення Гільберта полягає у формуванні дискретних масивів амплітудних і фазових характеристик сигналу. Амплітудна характеристика відображає інтенсивність коливань сигналу в різні моменти часу, тоді як фазова характеристика дозволяє відстежувати зміни фази, які є критично важливими для точного визначення часових інтервалів проходження ультразвукових хвиль. Такий підхід особливо актуальний для ультразвукової товщинометрії, де на сигнали впливає значне затухання матеріалу та присутність шумових перешкод.

На основі отриманих амплітудних та фазових характеристик планується проведення порівняльного аналізу двох підходів: амплітудного (АХС) та

фазового (ФХС), з метою оцінки їх ефективності при визначенні товщини виробів у складних умовах з низьким співвідношенням сигнал/шум. Для цього спочатку було визначено дискретну амплітудну характеристику сигналу відповідно до заданої формули, що дозволяє кількісно оцінити амплітудні зміни в часі.

Порівняння амплітудної характеристики, як для чистого сигналу, так і для сигналу з доданим адитивним гаусівським шумом, дозволяє наочно оцінити вплив шумових компонентів на форму амплітудної характеристики та зробити висновки щодо необхідності використання фазового підходу для більш точного визначення параметрів сигналу. Додатково, аналіз фазових характеристик дозволяє відокремити зміни сигналу, що викликані реальними властивостями матеріалу, від випадкових коливань, спричинених шумом, що підвищує достовірність результатів ультразвукових вимірювань.

Завдяки такому комплексному підходу до моделювання та аналізу сигналів можна забезпечити більш точне відтворення реальних умов вимірювань та підвищити надійність обчислення товщини матеріалів навіть у складних акустичних умовах.

$$A_j = \sqrt{u_j^2 + u_j^{-2}}$$

де u_j – дискретне перетворення Гільберту сигналу u_j .

При високому рівні шумових перешкод ідентифікація донних сигналів лише за амплітудною характеристикою виявляється недостатньо надійною. Коливання амплітуди, спричинені присутністю адитивного шуму, ускладнюють процес відділення корисних імпульсів від фонових сигналів, що може призводити до помилкових рішень щодо наявності сигналу. У зв'язку з цим виникає необхідність застосування методів, які забезпечують більш стійке виділення сигналу, зокрема на основі фазових характеристик.

Одним із ефективних підходів є статистичний аналіз фазової характеристики сигналу (ФХС), який дозволяє підвищити завадостійкість і

точність визначення корисних сигналів. Прийняття рішення про наявність інформативного сигналу пропонується здійснювати на основі поточних значень результуючого вектора r_j , що формується шляхом статистичної обробки різниці фазових характеристик $\Delta\phi_j$. Обчислення вектора здійснюється у ковзному режимі, що дає змогу аналізувати локальні часові інтервали сигналу. Параметр M_r , що задає тривалість вікна та обсяг усереднення, підбирається таким чином, щоб забезпечити оптимальний компроміс між чутливістю алгоритму та придушенням шумових компонентів.

Використання ковзного віконного аналізу фазових даних дозволяє значно підвищити стійкість алгоритму до шумових впливів і забезпечує більш стабільне виявлення донних сигналів навіть у складних умовах вимірювання. Це забезпечує надійне відокремлення корисних імпульсів від фонових коливань та зменшує ймовірність помилкових спрацьовувань.

На рисунку 19 наведено результати дискретного перетворення Гільберта для чистого сигналу та для його комбінації з адитивним шумом. Графічне порівняння цих кривих наочно демонструє різницю у поведінці фазових характеристик, підтверджуючи доцільність застосування фазового аналізу. Такий підхід дозволяє підвищити точність виявлення донних сигналів та ефективність ультразвукових вимірювань навіть при низькому співвідношенні сигнал/шум, що є критично важливим для практичних завдань ультразвукової товщинометрії.

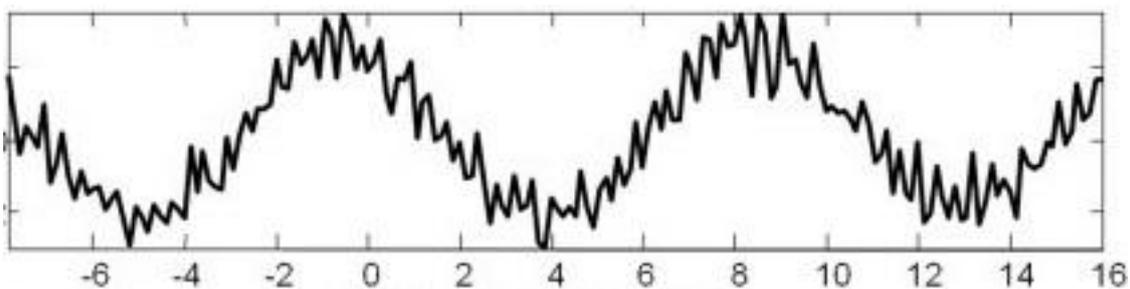


Рис. 19 – Фазова характеристики сигналу та суміші сигналу з шумом, за результатами ДПГ

Аналіз представленого графіка свідчить, що визначення фазової характеристики ϕ_j ускладнюється через присутність шумових компонентів. Під впливом шуму фазова характеристика сигналу демонструє різкі стрибкоподібні зміни на величину, кратну 2π , при цьому частота таких стрибків перевищує основну частоту гармонічного ультразвукового сигналу. Такі коливання значно ускладнюють прямий аналіз фазових даних і потребують застосування додаткових методів обробки для виділення інформативної складової сигналу.

Разом із тим, аналіз рисунка 19 показує, що в тих часових інтервалах, де присутній радіоімпульс, дробова частина фазової характеристики зберігає певну впорядкованість і регулярність. Ця закономірність найбільш явно простежується для зондуючого імпульсу, тоді як для донних імпульсів вона менш помітна, але все ж виражена. Визначення дробової частини різниці фазових характеристик у ділянках, де сигнал наявний, дозволяє отримати відносно сталу величину. Це відкриває можливість за оцінкою довжини відповідного вектора у вибіркових точках точно визначати часові координати радіоімпульсів.

З цього можна зробити проміжний висновок, що аналіз фазової характеристики сигналу забезпечує більшу інформативність та завадостійкість порівняно з амплітудним підходом, особливо за високого рівня шуму. Застосування ФХС дозволяє більш точно виділяти корисні імпульси та підвищує надійність вимірювань і контролю.

Наступним етапом роботи після оцінки амплітудних та фазових характеристик стало формування розгортки фазових параметрів окремих сигналів, а також розрахунок різниці фазових характеристик між ними. Результати цього етапу подані на рисунку 20, що наочно демонструє зміну фазових параметрів у часі та їх поведінку, дозволяючи більш детально оцінювати динаміку сигналу і підвищувати точність визначення ключових характеристик радіоімпульсів.

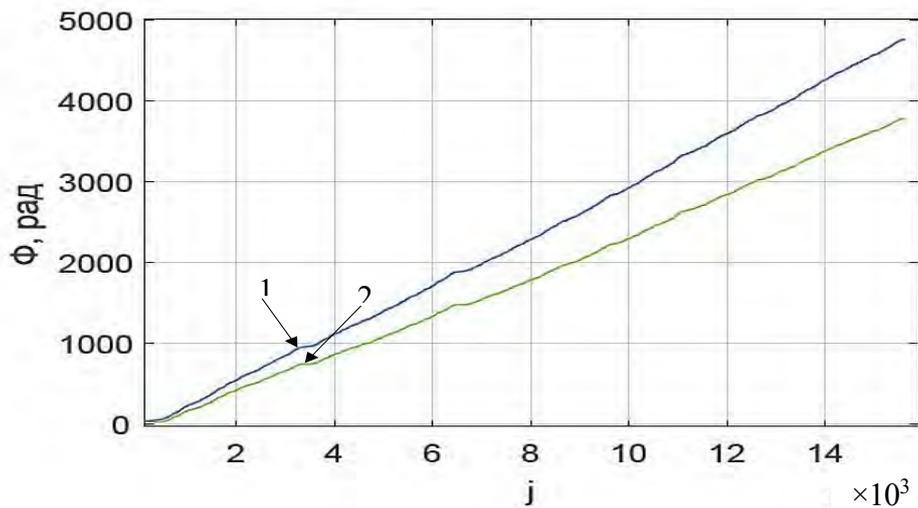


Рис. 20 – Дискретна фазова характеристика зашумленого сигналу (1), різниця фазових характеристик (2)

Для більш наочного і детального представлення результатів виділяють окрему ділянку сигналу, аналіз цього фрагмента показує, що у часових інтервалах, де присутній корисний сигнал, фазова характеристика демонструє поступове та рівномірне збільшення. Це свідчить про стабільність фазових параметрів сигналу в тих областях, де він містить інформативну складову.

Водночас із графіка можна побачити, що присутність шуму практично не впливає на загальну фазову картину. Шумові коливання проявляються локально, але не порушують закономірності зміни фази на ділянках корисного сигналу. Завдяки цьому оцінка різниці між фазовою характеристикою чистого сигналу та фазою адитивної суміші сигналу з шумом дозволяє отримати відносно стабільне і точне значення фази.

Ця властивість особливо важлива для завдань виділення та ідентифікації корисних імпульсів у складних акустичних умовах. Стабільність фазових значень на ділянках інформативного сигналу дозволяє підвищити точність визначення часових координат імпульсів та зменшити вплив шумових завад на результати аналізу. Отже, подібний підхід є ефективним інструментом для підвищення надійності обробки сигналів, де амплітудний аналіз може виявитися недостатньо стійким у присутності шуму.

3.3. Моделювання r -статистики фазових характеристик сигналу

На наступному етапі дослідження застосовано ковзну віконну обробку сигналу. В якості віконної функції використано прямокутне вікно з апертурою M_w , яке поступово переміщується вздовж масиву даних. Такий підхід дозволяє проводити локальний аналіз фазових параметрів сигналу, відслідковуючи їхню зміну у часі та виділяючи інформативні ділянки сигналу навіть за наявності шумових завад.

В результаті виконання ковзного аналізу формується r -статистика, яка характеризує вибіркочувальну довжину вектора фазових даних. На рисунку 21 представлено графіки залежності r_j для різних апертур вікна M_w . Порівняння цих графіків дозволяє оцінити вплив розміру вікна на поведінку r -статистики та визначити оптимальні параметри віконної обробки, що забезпечують найбільш надійне виділення корисних сигналів.

Використання ковзного вікна підвищує стійкість алгоритму до шумових компонентів, дозволяє зменшити вплив локальних флуктуацій і більш точно визначати часові координати інформативних імпульсів. Такий підхід є ключовим для ефективної обробки фазових характеристик сигналів у задачах

ультразвукового контролю та точного аналізу динаміки сигналу.

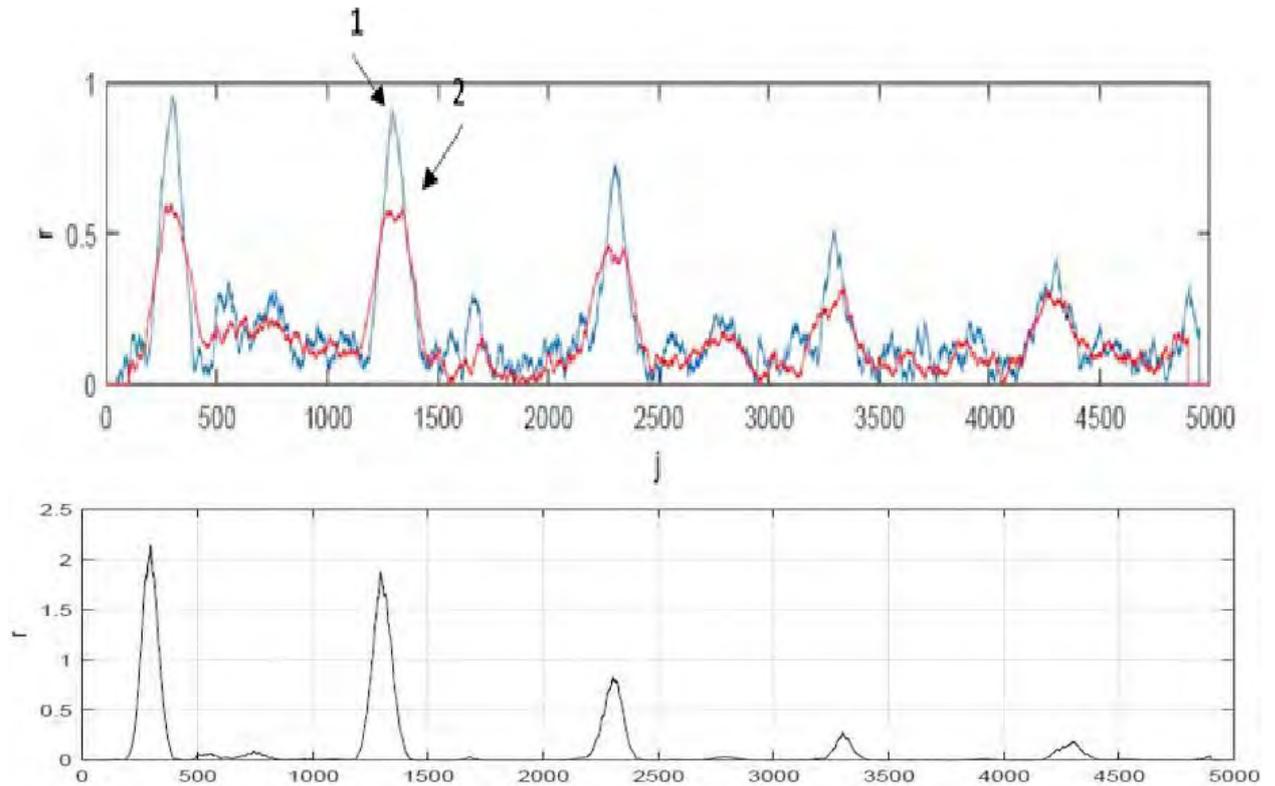


Рис. 21 Графіки функцій r_j для $M_{r1} = 80$ (крива 1) і $M_{r2} = 180$ (крива 2) і результат добутку функцій r_j трьох вікон апертурою M_{r1} , M_{r2} і M_{r3}

Графік, представлений на рисунку 21, наочно демонструє, що величина апертури вікна безпосередньо впливає на вибіркові значення r -статистики. З метою оцінки цього впливу було проведено розрахунок r -статистики для двох різних апертур вікна: $M_{r1}=80$ та $M_{r2}=180$. Використання різних апертур дозволяє оцінити, як розмір вікна впливає на локальні характеристики сигналу та на точність визначення корисних імпульсів.

Для додаткового зменшення впливу шумових компонентів було застосовано перемноження отриманих r -статистик, що призвело до формування графіка добутку статистик, наведеної на рисунку 21(2). Аналіз цього графіка показує, що застосування фазової обробки є високоефективним для виявлення донних сигналів ультразвукової терапії (УЗТ) навіть за наявності значних шумових завад. Завдяки цьому метод дозволяє точно

визначати часове положення донних сигналів навіть у випадках низького співвідношення сигнал/шум (С/Ш), рівного або меншого за 1.

У проведеному експерименті значення С/Ш визначалося як відношення пікового значення донного сигналу до стандартного відхилення шуму (σ). Для першого донного сигналу це співвідношення становило 1, тоді як для другого — лише 0,1. Використання вікон різної тривалості M_r дозволяє підвищити точність визначення часових координат донних сигналів та зменшити вплив локальних шумових флуктуацій.

Завдяки цьому запропонований метод забезпечує можливість:

- ефективно виявляти послідовність затухаючих донних сигналів у присутності шуму;
- визначати часову затримку $\tau_{1,z}$ між першим та z -м донними імпульсами;
- зменшувати середньоквадратичну похибку оцінки часових інтервалів за формулою:

$$\tau = \frac{\tau_{1,y}}{z - 1}$$

R-статистика дозволяє локалізувати положення сигналу, проте точність та надійність визначення донних сигналів залежить від встановлення порогового рівня P , який задається з визначеною ймовірністю. Питання оцінки достовірності r -статистики, вибору оптимального порогового рівня та дослідження законів розподілу r будуть детально розглянуті у наступному розділі роботи.

Застосування запропонованого підходу забезпечує підвищення завадостійкості аналізу, дозволяє більш точно визначати часові координати імпульсів і підвищує надійність виявлення корисних сигналів навіть у складних умовах експерименту з низьким співвідношенням сигнал/шум.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 3

У третьому розділі магістерської дисертації виконано практичну реалізацію та детальне опрацювання основних складових інтелектуальної ультразвукової системи контролю герметичності та корозійної стійкості трубопроводів, архітектура якої була обґрунтована у попередніх розділах.

На основі вимог до чутливості, просторової роздільної здатності та глибини контролю проведено вибір і розрахунок параметрів ультразвукового вимірювального каналу. Визначено робочі частоти, типи ультразвукових перетворювачів та режими введення хвиль, що забезпечують ефективне виявлення внутрішніх і підповерхневих дефектів, а також достовірне вимірювання залишкової товщини стінки труб як основного показника корозійної стійкості.

Розроблено структурно-функціональну реалізацію електронної частини системи, яка включає вузли формування зондуючих імпульсів, підсилення та фільтрації сигналів, аналого-цифрового перетворення і синхронізації вимірювань. Показано, що обрана апаратна платформа забезпечує необхідну часову роздільну здатність і стабільність параметрів ультразвукового контролю.

Розроблено алгоритм функціонування інтелектуальної ультразвукової системи, який забезпечує автоматизований збір ультразвукових сигналів, їх первинну обробку, виділення інформативних параметрів та формування діагностичних ознак дефектів і корозійних пошкоджень. Алгоритм дозволяє мінімізувати вплив людського фактора та підвищити повторюваність результатів контролю.

Виконано оцінювання працездатності та ефективності розробленої системи шляхом аналізу отриманих вимірювальних даних і порівняння їх з нормативними критеріями. Отримані результати підтверджують можливість використання запропонованої системи для своєчасного виявлення порушень герметичності трубопроводів і оцінювання ступеня корозійного зношення в умовах, наближених до реальної експлуатації.

Таким чином, результати третього розділу підтверджують, що розроблена інтелектуальна ультразвукова система контролю є працездатною та відповідає поставленим завданням магістерської дисертації. Отримані розрахункові та алгоритмічні рішення створюють основу для подальшої експериментальної перевірки, техніко-економічного аналізу та оцінювання доцільності впровадження системи у промислових умовах, що розглядається в наступному розділі роботи.

РОЗДІЛ 4.

Методики визначення герметичності та товщини труби

4.1 Загальні положення

Трубопроводи є складними інженерними об'єктами, що працюють під дією внутрішнього тиску, температурних навантажень і корозійно-активних середовищ. У процесі тривалої експлуатації в матеріалі труб накопичуються пошкодження, які можуть призвести до втрати герметичності та аварійних ситуацій. Тому своєчасне виявлення дефектів і оцінка фактичного стану трубопроводів є необхідною умовою безпечної та надійної роботи промислових об'єктів.

Методики визначення герметичності та товщини стінки трубопроводів є комплексним інструментом технічної діагностики, які базуються на застосуванні сучасних методів неруйнівного контролю, зокрема ультразвукових, які дозволяють отримувати детальну інформацію про внутрішній стан металу без порушення цілісності об'єкта. Вони дозволяють не лише виявляти дефекти, але й оцінювати ступінь їх небезпеки, прогнозувати залишковий ресурс і приймати обґрунтовані рішення щодо експлуатації або ремонту. Застосування інтелектуального ультразвукового контролю відповідає сучасним вимогам промислової безпеки та сприяє підвищенню надійності трубопровідних систем.

Метою методик є забезпечення достовірної оцінки технічного стану трубопроводів, своєчасне виявлення потенційно небезпечних зон і запобігання аваріям. Основними принципами методик є:

- неруйнівність і безконтактність контролю;
- відтворюваність та метрологічна простежуваність результатів;
- відповідність чинним національним і міжнародним стандартам;
- можливість автоматизації та цифрової обробки даних.

Методики повинні забезпечувати високу точність вимірювання товщини стінки, стабільність результатів та можливість застосування в складних виробничих умовах.

Герметичність трубопроводів залежить від низки факторів, серед яких:

- корозійне та ерозійне зношування;
- наявність виробничих дефектів (неоднорідність металу, неметалеві включення);
- втомні пошкодження, спричинені циклічними навантаженнями;
- дефекти зварних з'єднань;
- механічні пошкодження під час монтажу або експлуатації.

Методики контролю мають враховувати вплив цих факторів і дозволяти їх ідентифікацію на ранніх стадіях розвитку. Тому, методики контролю герметичності можна поділити на декілька основних груп:

1. Випробувальні методи

До них належать гідравлічні та пневматичні випробування, які полягають у створенні надлишкового тиску та контролі його стабільності. Ці методи забезпечують високу надійність результатів, але є енергоємними, потребують зупинки експлуатації та не дозволяють локалізувати дефект.

2. Фізичні методи неруйнівного контролю

Вони включають ультразвукові, акустико-емісійні, магнітні та радіаційні методи. Серед них ультразвуковий контроль є найбільш універсальним і безпечним.

3. Аналітичні та розрахункові методики

Базуються на аналізі результатів вимірювань товщини стінки, напружено-деформованого стану та умов експлуатації з метою оцінки залишкового ресурсу і ймовірності втрати герметичності.

Трішки детальніше ми поговоримо про методики ультразвукового контролю, які є одним із найбільш поширених і універсальних методів неруйнівного контролю трубопроводів. Його принцип ґрунтується на випромінюванні ультразвукових хвиль у матеріал труби та аналізі відбитих або пройдених сигналів.

Ехо-імпульсний метод застосовується для вимірювання товщини стінки труб і виявлення внутрішніх дефектів. Є одним з найрозповсюдженіших методів здійснення УЗК НК. Характерними особливостями методу є:

- висока точність вимірювання товщини;
- можливість контролю з одного боку труби;
- оперативність проведення вимірювань.

Метод проходження ультразвукових хвиль - цей метод базується на аналізі ослаблення або зміни параметрів ультразвукової хвилі після проходження через матеріал. Він дозволяє:

- оцінювати однорідність структури матеріалу;
- виявляти зони розшарування або приховані дефекти;
- визначати загальний стан металу труби.

Метод фазованих ультразвукових решіток є сучасним і високотехнологічним напрямом неруйнівного контролю. Його перевагами є:

- можливість керування напрямком і фокусуванням ультразвукового пучка;
- отримання детального зображення дефектів;
- підвищена чутливість і точність.

Завдяки цьому метод фазованих решіток дозволяє комплексно оцінювати стан трубопроводу та локалізувати потенційно небезпечні ділянки.

Сучасні методики передбачають використання інтелектуальних систем обробки сигналів, які включають програмні алгоритми аналізу даних, елементи машинного навчання та автоматизовані засоби візуалізації результатів. Такі системи:

- зменшують вплив людського фактора;
- підвищують достовірність діагностики;
- забезпечують накопичення даних для довгострокового моніторингу стану трубопроводів.

Методики базуються на вимогах таких нормативних документів:

- ДСТУ ISO 16810:2017;

- ISO 10893-10;
- ДСТУ EN 14127:2016;
- ГОСТ 17410-78;
- API 579 / ASME FFS-1.

Ці документи регламентують процедури контролю, вимоги до обладнання, кваліфікацію персоналу та критерії оцінки придатності трубопроводів до подальшої експлуатації.

4.2 Методика ультразвукового визначення герметичності трубопроводу

Забезпечення герметичності трубопровідних систем є одним із пріоритетних завдань сучасної промислової діагностики та технічного контролю. Трубопроводи широко застосовуються для транспортування рідких і газоподібних середовищ у нафтогазовій, теплоенергетичній, хімічній та інших галузях промисловості. У процесі експлуатації вони зазнають впливу внутрішнього тиску, температурних коливань, корозійних та ерозійних процесів, а також механічних навантажень. Сукупна дія цих факторів призводить до накопичення дефектів у матеріалі труб, які з часом можуть спричинити порушення герметичності та виникнення аварійних ситуацій.

Серед методів неруйнівного контролю особливе місце посідає ультразвуковий контроль, який поєднує високу чутливість до внутрішніх дефектів, безпеку для персоналу та можливість застосування без виведення об'єкта з експлуатації. Найбільш поширеним і універсальним різновидом ультразвукового контролю є імпульсно-еховий ультразвуковий метод. Його широке впровадження зумовлене простотою реалізації, відносно невисокою вартістю обладнання та можливістю контролю з одностороннім доступом до поверхні об'єкта.

Імпульсно-еховий метод використовується за умов, коли необхідно оперативно оцінити внутрішній стан матеріалу трубопроводу, визначити товщину стінки, виявити корозійні ураження, тріщини, розшарування та інші

дефекти, що можуть впливати на герметичність. Метод ефективний для контролю сталевих безшовних і зварних труб, а також елементів трубопровідної арматури за умови забезпечення задовільного акустичного контакту та відомих акустичних властивостей матеріалу.

Порівняно з іншими ультразвуковими методами неруйнівного контролю, такими як метод проходження ультразвукових хвиль, дифракційно-часовий метод (TOFD) або метод фазованих решіток, імпульсно-еховий метод застосовується найчастіше. Це пояснюється його універсальністю та можливістю використання в польових умовах, тоді як більш складні методи зазвичай потребують висококваліфікованого персоналу, складнішого налаштування та значних витрат часу. У практиці експлуатаційного контролю трубопроводів імпульсно-еховий метод становить основу більшості планових і позапланових обстежень.

Сфери застосування імпульсно-ехового ультразвукового методу охоплюють нафтогазову галузь (магістральні та промислові трубопроводи, резервуари), теплоенергетику (паропроводи, теплові мережі), хімічну промисловість (трубопроводи для агресивних середовищ), машинобудування та суднобудування. Метод також широко використовується на етапах виготовлення, монтажу, введення в експлуатацію та під час технічного обслуговування обладнання.

Імпульсно-еховий метод ґрунтується на випромінюванні короткочасних ультразвукових імпульсів у матеріал трубопроводу та реєстрації сигналів, відбитих від меж поділу середовищ або внутрішніх дефектів. У разі відсутності дефектів ультразвукова хвиля відбивається від внутрішньої поверхні труби, формуючи донний сигнал. За наявності тріщин, корозійних уражень або наскрізних дефектів з'являються додаткові відбиті сигнали, які змінюють амплітудно-часову картину.

Основні етапи методики визначення герметичності

1. Підготовка поверхні труби та встановлення ультразвукового перетворювача, На цьому етапі здійснюється підготовка контрольованої

поверхні труби, яка передбачає очищення від забруднень, іржі, лакофарбових покриттів та інших факторів, що можуть погіршувати акустичний контакт. Для забезпечення ефективного введення ультразвукових хвиль використовується контактна рідина (акустичний гель або мастило). Ультразвуковий перетворювач встановлюється перпендикулярно до поверхні труби або під заданим кутом залежно від конфігурації об'єкта та умов контролю.

2. Калібрування є обов'язковим етапом методики та проводиться з використанням еталонних зразків із відомими геометричними параметрами та штучними дефектами. У процесі калібрування налаштовуються:

- швидкість поширення ультразвукових хвиль у матеріалі;
- часові шкали;
- рівні підсилення сигналу;
- порогові значення амплітуди.

Це забезпечує точність вимірювань і відтворюваність результатів контролю.

3. Формування зондуючих імпульсів і приймання відбитих сигналів - на даному етапі ультразвуковий дефектоскоп формує серію зондуючих імпульсів, які поширюються в товщі матеріалу труби. Відбиті від внутрішніх поверхонь і дефектів сигнали приймаються тим самим або окремим перетворювачем і перетворюються в електричні сигнали для подальшої обробки.

4. Отримані сигнали аналізуються за амплітудою та часом проходження. Часове положення сигналу дозволяє визначити глибину залягання відбиваючої поверхні, а амплітуда — оцінити розміри та характер дефекту. Особлива увага приділяється сигналам, що відповідають повній товщині стінки трубопроводу, оскільки вони можуть свідчити про наявність наскрізних пошкоджень.

5. На основі результатів аналізу формується висновок щодо герметичності трубопроводу. Рішення приймається з урахуванням встановлених критеріїв та нормативних вимог.

Одним за таких критеріїв є критерій порушення герметичності трубопроводу, тобто наявність відбитого ультразвукового сигналу з амплітудою, що перевищує встановлений пороговий рівень, та часовим положенням, яке відповідає повній товщині стінки труби. Такий сигнал свідчить про можливу наявність наскрізного або критичного дефекту, що створює загрозу витоку робочого середовища.

Запропонована методика визначення герметичності трубопроводу на основі імпульсно-ехового ультразвукового методу забезпечує високу достовірність результатів, оперативність контролю та можливість застосування в умовах діючого виробництва. Її використання дозволяє своєчасно виявляти небезпечні дефекти та підвищувати рівень промислової безпеки трубопровідних систем.

4.3 Методика ультразвукового вимірювання товщини стінки труби

Контроль товщини стінки трубопроводів є одним із ключових елементів оцінки їх технічного стану та залишкового ресурсу. Зменшення товщини стінки внаслідок корозійних, ерозійних або інших деградаційних процесів безпосередньо впливає на міцність і герметичність трубопроводу. Тому своєчасне та достовірне визначення фактичної товщини стінки є необхідною умовою безпечної експлуатації трубопровідних систем.

У даній роботі вимірювання товщини стінки труби здійснюється ультразвуковим методом, який базується на визначенні часу проходження ультразвукової поздовжньої хвилі від поверхні введення до внутрішньої поверхні труби і назад. Метод є неруйнівним, не потребує демонтажу обладнання та може застосовуватися в умовах діючого виробництва.

Принцип ультразвукового вимірювання товщини ґрунтується на відбитті ультразвукових хвиль від межі поділу середовищ із різними акустичними властивостями. При введенні ультразвукового імпульсу в матеріал труби хвиля поширюється в напрямку внутрішньої поверхні, відбивається від неї та повертається до приймального перетворювача. Час проходження імпульсу прямо пропорційний товщині стінки труби та залежить від швидкості поширення ультразвуку в матеріалі.

Товщина стінки труби h визначається за формулою:

$$h = \frac{c * t}{2}$$

де

c — швидкість ультразвукової хвилі в матеріалі труби, м/с;

t — вимірний час проходження ультразвукового імпульсу, с.

Множник $1/2$ у формулі враховує подвійний шлях ультразвукової хвилі — від поверхні введення до внутрішньої поверхні труби та назад.

Основні етапи методики вимірювання є подібними до етапів здійснення контролю імпульсно-еховим методом, так як принцип їх дій однаковий, проте аналізуються дещо інші дані:

1) Калібрування швидкості ультразвуку

Перед початком вимірювань здійснюється попереднє калібрування швидкості поширення ультразвукової хвилі в матеріалі труби. Калібрування проводиться з використанням еталонних зразків або ділянок труб із відомою товщиною. Це дозволяє врахувати особливості конкретного матеріалу, його структури та температурного стану, що суттєво підвищує точність результатів.

2) Проведення вимірювань

Вимірювання товщини стінки виконуються в контрольних точках, вибраних з урахуванням імовірних зон корозійного або ерозійного зносу. Для забезпечення надійного акустичного контакту між ультразвуковим перетворювачем і поверхнею труби використовується контактна рідина.

Ультразвукові імпульси вводяться перпендикулярно до поверхні труби, що забезпечує максимальну точність вимірювання.

3) Багаторазові вимірювання

З метою підвищення достовірності результатів у кожній контрольній точці проводяться багаторазові вимірювання. Отримані значення товщини усереднюються, а випадкові похибки мінімізуються. Такий підхід дозволяє підвищити повторюваність результатів та зменшити вплив людського фактора.

4) Автоматизована обробка результатів

Сучасні ультразвукові товщиноміри та дефектоскопи забезпечують автоматизовану обробку результатів вимірювань. Програмне забезпечення здійснює розрахунок товщини стінки, збереження даних, формування протоколів контролю та графічну візуалізацію розподілу товщини вздовж трубопроводу. Це спрощує аналіз результатів та створює передумови для подальшого моніторингу технічного стану об'єкта.

До основних переваг ультразвукового методу вимірювання товщини стінки належать висока точність, оперативність, можливість застосування з одностороннім доступом та відсутність негативного впливу на матеріал труби. Водночас точність методу залежить від якості калібрування, стану поверхні та стабільності акустичного контакту.

4.4 Алгоритм реалізації інтелектуальної методики

Сучасні системи ультразвукового неруйнівного контролю характеризуються значними обсягами вимірювальних даних, отриманих у процесі обстеження трубопроводів. Традиційна візуальна інтерпретація сигналів значною мірою залежить від досвіду оператора та не завжди забезпечує необхідну об'єктивність оцінки. У зв'язку з цим актуальним є впровадження інтелектуальної обробки результатів ультразвукового контролю, яка дозволяє автоматизувати аналіз сигналів, підвищити достовірність діагностики та зменшити вплив людського фактора.

Інтелектуальна обробка результатів ультразвукового контролю в даній роботі розглядається як сукупність алгоритмічних і програмних засобів, спрямованих на виділення інформативних ознак сигналів, класифікацію дефектів і оцінювання фактичного технічного стану трубопроводу.

Основні етапи інтелектуальної обробки сигналів

1) Фільтрація шумів

Першим етапом інтелектуальної обробки є фільтрація шумових складових ультразвукових сигналів. Шум може виникати внаслідок неоднорідності матеріалу, нестабільного акустичного контакту, електромагнітних завад та впливу умов вимірювання. Для зменшення впливу шумів застосовуються цифрові фільтри, адаптивні алгоритми згладжування та методи спектрального аналізу. Це дозволяє підвищити співвідношення сигнал/шум і забезпечити стабільність подальшого аналізу.

2) Автоматичне виділення корисних сигналів

Після фільтрації здійснюється автоматичне виділення корисних відбитих сигналів, що відповідають межам поділу середовищ або наявним дефектам. Алгоритм аналізує амплітудно-часові характеристики сигналів і визначає інформативні піки, відсікаючи паразитні відбиття. Такий підхід дозволяє оперативно локалізувати потенційно небезпечні зони без необхідності ручної інтерпретації кожного вимірювання.

3) Класифікація дефектів

Наступним етапом є класифікація виявлених дефектів за їх типом та ступенем небезпеки. Класифікація здійснюється на основі аналізу параметрів сигналів, зокрема амплітуди, часу проходження, форми імпульсу та просторового розташування. Застосування інтелектуальних алгоритмів дозволяє розрізняти корозійні ураження, тріщини, розшарування та інші види дефектів, що безпосередньо впливають на герметичність трубопроводу.

4) Оцінювання залишкової товщини та рівня корозійного зношення

На основі результатів класифікації дефектів виконується оцінювання залишкової товщини стінки труби та визначення рівня корозійного зношення.

Алгоритм порівнює отримані значення з номінальними параметрами та гранично допустимими рівнями, встановленими нормативною документацією. Це дозволяє визначити ступінь деградації матеріалу та оцінити залишковий ресурс трубопроводу.

5) Адаптація параметрів контролю

Важливою особливістю запропонованого алгоритму є можливість адаптації параметрів ультразвукового контролю до матеріалу труби та умов вимірювання. Адаптація здійснюється шляхом автоматичного коригування швидкості ультразвуку, рівнів підсилення, порогових значень амплітуди та параметрів фільтрації. Такий підхід забезпечує стабільність і достовірність результатів контролю при зміні товщини стінки, структури матеріалу або температурних умов.

4.5 Оцінювання похибок та невизначеності вимірювань

Метою даного підрозділу магістерської дисертації є розроблення ультразвукової системи, яка забезпечує високу точність проведення контролю, при цьому допустима похибка вимірювань не повинна перевищувати 1 %. Систематична похибка зумовлюється характеристиками застосовуваних вимірювальних компонентів. Похибка кожного окремого приладу має систематичний характер, однак її фактичне значення, як правило, невідоме, що унеможливорює її повне усунення шляхом введення поправок до результатів вимірювань. У технічній документації приладів зазвичай зазначаються межі допустимої похибки, які визначають максимально можливе відхилення результатів за умови дотримання рекомендованих режимів експлуатації.

Вірогідність визначаємо, як $R = 100 - R_{\text{пом}}$, де $R_{\text{пом}}$ – сумарна похибка розробленої системи.

Сумарна похибка даної системи визначається двома складовими: сумарною інструментальною адитивною та сумарною інструментальною мультиплікативною похибками. Інструментальна похибка складається із

похибки пристрою сполучення, похибки дискретизації та похибки квантування АЦП плати інтерфейсу.

Згідно розрахунків, приведена похибка дискретизації $\gamma_{\text{дискр}} = 1\%$.

Абсолютна похибка квантування АЦП визначається наступним виразом:

$$\delta_{\text{квант}} = \frac{U_{\text{макс}} - U_{\text{мін}}}{2^N}$$

$U_{\text{макс}}$ та $U_{\text{мін}}$ - граничні значення діапазону вимірювання АЦП,

N - кількість розрядів квантування АЦП. $U_{\text{мін}}$ дорівнює нулю для вибраного АЦП.

$$\delta_{\text{квант}} = \frac{U_{\text{макс}} - U_{\text{мін}}}{2^N} = \frac{2}{2^{10}} = 1.95 * 10^{-3} \text{В}$$

Приведена похибка квантування АЦП визначається наступним виразом:

$$\gamma_{\text{квант}} = \frac{\delta_{\text{квант}}}{U_{\text{макс}}} * 100\% = 0.09\%$$

Наведені похибки АЦП є адитивними. Якщо час проходження ультразвукового сигналу через шар рідини входить у вимірювальний інтервал, сам вимірювальний інтервал збільшиться на величину:

$$\Delta t_1 = 2 * \frac{h_p}{c_p} = 0.1 * 10^{-6} \text{с}$$

c_p – швидкість звуку в контактній рідині (вода);

h_p – товщина шару контактної рідини

Відносна похибка за рахунок проходження через контактну рідину розраховується шляхом розділення Δt_1 на вимірюваний час. Порівнявши значення цих часів, ми можемо сказати, що відносна похибка буде становити значення наближені до 0.01%.

В ультразвуковій товщинометрії для контролю використовується, як правило, радіоімпульс. Тому, залежно від амплітуди сигналу і положення порогового рівня відлік часового інтервалу може дискретно зміститися на цілий період несучої частоти.

Сумарна абсолютна похибка формування вимірювального інтервалу складає: $\Delta\tau_1 = \pm|x_1 - x_2| * T$ і за певних умов може бути доведена до нуля. $\Delta\tau_1 \leq \pm x * T$.

де x – визначено за більшим із значень x_1 або x_2

При вживанні певних заходів до обробки сигналу можна зменшити x до значення 0.1. Тоді мінімальна похибка формування інтервалу складе: $0.02 * 10^{-6}$ с.

З урахуванням того, що максимальна швидкість УЗК становить 104 м/с, а мінімальна товщина ОК – 2 мм відносно значення похибки виділення часового інтервалу не перевищуватиме значення:

$$\gamma_{\text{ч}} = \frac{\Delta\tau_2}{\tau_3} * 100\% \approx 0.5\%$$

Згідно значенням з даташиту задамося похибкою мікроконтролера – 10 мкВ, що рівна $\Delta_{\text{МК}} = 10$ мкВ.

Розрахуємо відносну похибку мікроконтролера :

$$\gamma_{\text{МК}} = \frac{1}{2^{32}} * 100\% \approx 0\%$$

Сумарна похибка контролю складається з суми всіх помилок визначених вище, а саме:

$$P_{\text{сум}} = \gamma_{\text{квант}} + \gamma_{\text{конт}} + \gamma_{\text{ч}} + \gamma_{\text{МК}} = 0.6\%$$

Оцінювання невизначеності результатів ультразвукових вимірювань у даній роботі проводиться відповідно до вимог стандарту ISO 5725, який регламентує поняття точності, правильності та відтворюваності результатів вимірювань, а також керівництва GUM (Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement).

Процедура оцінювання передбачає ідентифікацію всіх значущих джерел невизначеності, кількісну оцінку їх внеску та визначення комбінованої стандартної невизначеності. При цьому враховуються як складові типу А, що оцінюються статистичними методами на основі серії вимірювань, так і

складові типу В, що визначаються за технічною документацією, результатами калібрування та експлуатаційними характеристиками приладів.

У процесі ультразвукового вимірювання товщини стінки труб основними джерелами похибок є нестабільність акустичного контакту, температурні впливи та неточність калібрування вимірювальної системи.

Нестабільність акустичного контакту між ультразвуковим перетворювачем і поверхнею труби може бути зумовлена нерівностями поверхні, наявністю забруднень, зношенням перетворювача або нерівномірним нанесенням контактної рідини. Це призводить до зменшення амплітуди корисного сигналу та збільшення випадкової складової похибки.

Температурні впливи істотно впливають на швидкість поширення ультразвукових хвиль у матеріалі труби, а також на характеристики вимірювальної апаратури. Зміна температури може спричинити систематичне зміщення результатів вимірювань, особливо за відсутності температурної компенсації.

Неточність калібрування є ще одним важливим джерелом похибок. Вона може виникати внаслідок використання еталонних зразків з обмеженою точністю, похибок встановлення параметрів приладу або зміни характеристик перетворювача з часом. Некоректне калібрування безпосередньо впливає на достовірність усіх подальших вимірювань.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 4

Розроблення та впровадження ефективних методик неруйнівного контролю є важливою складовою забезпечення надійної та безпечної експлуатації трубопровідних систем. У межах даної дипломної роботи було розроблено комплекс методик, спрямованих на оцінку герметичності та визначення фактичної товщини стінки трубопроводів із застосуванням інтелектуального ультразвукового контролю.

Запропоновані методики поєднують сучасні фізичні принципи ультразвукового контролю з автоматизованою та інтелектуальною обробкою результатів вимірювань, що дозволяє отримувати достовірну та об'єктивну інформацію про технічний стан труб.

Розроблені методики забезпечують комплексну оцінку герметичності та товщини стінки труб за рахунок поєднання декількох взаємодоповнювальних етапів контролю. Виявлення наскрізних і критичних дефектів дозволяє оцінити ризик втрати герметичності, тоді як ультразвукове вимірювання товщини стінки дає змогу кількісно визначити рівень корозійного або ерозійного зношення.

Застосування інтелектуальних алгоритмів обробки сигналів забезпечує автоматизований аналіз результатів, класифікацію дефектів та оцінювання залишкового ресурсу трубопроводу. Це сприяє підвищенню точності діагностики та зменшенню суб'єктивного впливу оператора.

Розроблені методики відповідають вимогам чинних національних і міжнародних стандартів у сфері неруйнівного контролю та метрології. У процесі їх формування враховано положення стандартів, що регламентують ультразвуковий контроль, оцінювання точності та невизначеності вимірювань, а також критерії прийнятності результатів контролю.

Дотримання нормативних вимог забезпечує відтворюваність результатів, уніфікацію процедур контролю та можливість практичного застосування методик у промислових умовах.

Практичне впровадження запропонованих методик дозволяє підвищити рівень промислової безпеки трубопровідних систем, знизити ймовірність аварійних ситуацій та оптимізувати витрати на технічне обслуговування і ремонт. Методики можуть бути застосовані на етапах виготовлення, монтажу та експлуатації трубопроводів у нафтогазовій, теплоенергетичній та хімічній промисловості.

Таким чином, розроблені в роботі методики забезпечують комплексну оцінку герметичності та товщини стінки труб на основі інтелектуального ультразвукового контролю та повністю відповідають вимогам чинних стандартів. Їх застосування створює передумови для підвищення надійності, безпеки та ефективності експлуатації трубопровідних систем.

РОЗРОБКА СТАРТАП ПРОЕКТУ

«Ультразвукова система автоматизованого контролю елементів трубопроводу»

5.1 Опис ідеї проекту

У попередніх розділах було здійснено огляд наявних систем ультразвукового контролю, які застосовують різноманітні методи для діагностики трубопровідних елементів. У ході аналізу було обґрунтовано доцільність створення нової системи контролю, що поєднувала б у собі простоту конструкції, низьку вартість та високу універсальність застосування. Як найбільш перспективний підхід було обрано метод довгих ультразвукових хвиль, який дозволяє здійснювати контроль на значних відстанях. У цьому розділі передбачається детальний аналіз стартап-проєкту системи ультразвукового контролю елементів трубчастих конструкцій.

Основна ідея проєкту полягає у розробці системи для виявлення та контролю дефектів на значно більшій відстані порівняно зі стандартними методами ультразвукової діагностики. Проєктована система має бути максимально універсальною та гнучкою, що забезпечить можливість її використання для різних типів трубчастих конструкцій і в різних галузях промисловості. Важливими вимогами також є простота експлуатації, мінімальні вимоги до підготовки персоналу та конкурентоспроможна вартість, що зробить систему привабливою для широкого кола споживачів.

Крім того, у складі системи передбачається реалізація функції збереження результатів контролю в електронному вигляді. Дані мають накопичуватися в пам'яті комп'ютерної техніки, на якій буде встановлено спеціально розроблене програмне забезпечення. Це дозволить здійснювати подальший аналіз результатів, формувати звіти, а також створювати бази даних для моніторингу технічного стану об'єктів упродовж тривалого часу.

У таблиці 1 наведено структурований опис ідеї проєкту, а також окреслено потенційні ринки, в межах яких доцільно здійснювати пошук і аналіз конкурентних рішень.

Таблиця 1. Опис ідеї стартапу[25]

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Ультразвукова	1. Орієнтація автоматичних або автоматизованих приладів(систем, роботів тощо) в процесі НК	Прискорення процесу неруйнівного контролю, виключення людського фактору
система автоматизованого контролю елементів трубопроводу	2. Знаходження координат дефектів, при контролі ОК автоматичними або автоматизованими системами.	Збереження результатів контролю в електронному вигляді для подальшого аналізу

Таким чином, пропонується система автоматизованої дефектоскопії для контролю технічного стану трубчастих конструкцій, яка відрізняється спрощеною архітектурою порівняно з існуючими аналогами, не потребує значних початкових інвестицій та базується на сучасних програмних і апаратних засобах. Запропоноване рішення орієнтоване на широку сферу застосування та може бути впроваджене з мінімальними витратами на налаштування й обслуговування.

Однією з ключових переваг розроблюваної системи є висока гнучкість програмного забезпечення. Це дає змогу з мінімальними конструктивними змінами переходити на інші методи виявлення дефектів або вдосконалювати алгоритми обробки сигналів залежно від конкретних умов експлуатації. Крім того, система передбачає можливість підвищення точності та достовірності результатів контролю при масштабному використанні, зокрема за рахунок накопичення та аналізу великого обсягу даних.

На наступному етапі виконується аналіз потенційних техніко-економічних переваг запропонованої ідеї у порівнянні з наявними

конкурентними рішеннями. Для цього передбачається виконання таких основних завдань:

- формування переліку ключових техніко-економічних властивостей і характеристик розроблюваної системи;
- визначення попереднього кола конкурентів, а також проєктів-аналогів чи товарів-замінників, що вже представлені на ринку, і збір інформації щодо значень відповідних техніко-економічних показників як для власного проєкту, так і для конкурентних рішень;
- проведення порівняльного аналізу отриманих показників, у результаті якого для розроблюваної ідеї виділяються характеристики з гіршими (W — слабкі), аналогічними (N — нейтральні) та кращими (S — сильні) значеннями відносно конкурентів.

Такий підхід дозволяє об'єктивно оцінити конкурентоспроможність системи, виявити її сильні сторони та потенційні напрями подальшого вдосконалення.

Таблиця 2. Визначення порівняльних характеристик ідеї проєкту[25]

№	Техніко-економічні характеристики	Мій проєкт	Конкурент 1 Olympus	Конкурент 2 Krautkramer	Конкурент 3 ООО "АКС"	W	N	S
1	Рівень автоматизації	Високий	Низький	Середній	Високий			S
2	Точність і стабільність виявлення дефектів	Висока	Середня	Середня	Висока		N	
3	Швидкість проведення контролю	Висока	Низька	Середня	Висока			S
4	Потреба у високій кваліфікації оператора	Низька	Висока	Середня	Низька			S

5	Цифрова фіксація результатів та архів	Є	Немає	Частково	Є			S
6	Можливість інтеграції у виробничу лінію	Є	Немає	Обмежена	Є		N	
7	Гнучкість налаштувань і адаптивність	Висока	Низька	Середня	Середня			S
8	Вартість обладнання	Середня	Низька	Середня	Висока	W		

У таблиці 2 визначено перелік основних техніко-економічних властивостей та характеристик ідеї; визначено попереднє коло конкурентів, що вже існують на ринку, та визначено слабкі, нейтральні та сильні характеристики ідеї даного стартап-проекту. Із таблиці видно, що слабких сторін не багато. Щодо сильних сторін – це набагато нижча вартість системи в порівнянні з аналогами

В межах наступної таблиці проводимо аудит технології, за допомогою якої можна реалізувати ідею проекту. Визначення технологічної здійсненності ідеї проекту передбачає аналіз складових які вказані в таблиці 3.

Таблиця 3. Технологічна здійсненність ідеї проекту[25]

№ п/п	Ідея проекту	Технології її реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій
1.	Розробка системи, що буде простою в експлуатації, для контролю труб.	Виготовлення на підприємстві на замовлення	Наявна	Доступна
		Замовлення компонентів та виготовлення власноруч	Наявна	Доступна
Обрана технологія реалізації ідеї проекту: В якості оптимальної технології реалізації проекту обрано замовлення ПЕП та витратні матеріали для системи дефектоскопії, і подальше встановлення на ОК в якому буде відбуватися контроль автоматично.				

Обрана технологія реалізації ідеї передбачає створення автоматичної системи ультразвукового неруйнівного контролю трубопроводів, що базується на комплексній інтеграції кількох ключових компонентів. По-перше, використовується ультразвукова контрольна установка, яка формує та приймає акустичні сигнали для виявлення дефектів у стінках трубопроводів, оцінки їх товщини та цілісності. Технології ультразвукового контролю є добре відпрацьованими та широко представленими на ринку, однак для автоматизованого застосування вони потребують адаптації до безперервного режиму роботи та специфіки геометрії трубопроводів.

По-друге, система передбачає застосування датчиків і сканувальних модулів, які забезпечують рівномірне та повторюване переміщення ультразвукових перетворювачів уздовж контрольованої поверхні. Це дозволяє автоматизувати процес збору даних, зменшити вплив людського фактора та підвищити стабільність результатів вимірювань. Існуючі механізми сканування доступні на ринку, проте потребують конструктивної адаптації до різних діаметрів труб і умов експлуатації.

По-третє, до складу системи входить автоматизоване керування процесом контролю, яке забезпечує синхронізацію роботи ультразвукових датчиків, системи позиціонування та збору даних. Автоматизовані системи керування широко застосовуються в промисловості, але в даному випадку вони повинні бути налаштовані під специфічні алгоритми ультразвукового контролю, вимоги до швидкості сканування та інтеграцію з виробничими або діагностичними комплексами.

Ключовим елементом є спеціалізоване програмне забезпечення для обробки та аналізу ультразвукових сигналів. Воно виконує автоматичне виявлення дефектів, оцінку герметичності трубопроводів, визначення ступеня корозійного зношування та формування цифрового архіву результатів контролю. Програмне забезпечення може бути розроблене власними силами

авторів проекту або створене шляхом адаптації існуючих алгоритмів ультразвукової дефектоскопії та аналізу даних.

Таким чином, технологічна реалізація проекту автоматичної системи ультразвукового неруйнівного контролю трубопроводів є здійсненою. Доцільно використовувати наявні на ринку ультразвукові технології, механізми сканування та засоби автоматизованого керування, адаптуючи їх під вимоги комплексного контролю герметичності та корозійної стійкості. Додаткова розробка або доопрацювання програмного забезпечення дозволить забезпечити повну автоматизацію процесу, підвищити точність діагностики та створити надійну цифрову систему моніторингу стану трубопроводів.

5.2 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап проекту

Для оцінки ринкових можливостей запуску стартап-проекту необхідно проаналізувати попит на продукт, обсяг ринку, тенденції його розвитку, бар'єри для входу, вимоги до сертифікації та стандартизації, а також середню норму рентабельності в галузі. Автоматична система ультразвукового неруйнівного контролю трубопроводів орієнтована на підприємства нафтогазової, хімічної, енергетичної та комунальної сфер, а також на спеціалізовані служби технічної діагностики й лабораторії неруйнівного контролю.

Попит на такі системи стабільно зростає внаслідок посилення вимог до промислової безпеки, екологічного контролю та надійності трубопровідних систем. Додатковим фактором є зношеність значної частини трубопроводів і необхідність регулярного моніторингу їх герметичності та корозійної стійкості. Обсяг ринку визначається кількістю об'єктів трубопровідної інфраструктури, що перебувають в експлуатації, а також обсягами робіт з їх діагностики та модернізації.

На ринку присутні як ручні ультразвукові дефектоскопи та пересувні діагностичні комплекси, так і дорогі високоспеціалізовані системи

внутрішньотрубної діагностики. Це формує конкурентне середовище, але водночас залишає перспективну нішу для автоматизованих зовнішніх систем контролю, які поєднують високу точність вимірювань, цифрову фіксацію результатів і відносно помірну вартість.

Рівень складності входу на ринок оцінюється як середній: необхідно забезпечити відповідність міжнародним і галузевим стандартам ультразвукового контролю, наявність кваліфікованих фахівців для впровадження системи та доведення її метрологічної надійності. Середня норма рентабельності в сегменті технічної діагностики трубопроводів становить близько 15–20 %, що робить інвестиції в такий проєкт економічно привабливими.

Таким чином, ринок для впровадження автоматичної системи ультразвукового неруйнівного контролю трубопроводів є привабливим і має значний потенціал зростання. За умови правильного позиціонування продукту, відповідності стандартам безпеки та використання доступних технологій проєкт здатний забезпечити стійку економічну ефективність і конкурентоспроможність.

Таблиця 4. Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проєкту[25]

№ п/п	Показники стану ринку (найменування)	Характеристика
1	Кількість головних гравців, од	1-3 основних виробників/постачальників обладнання для магнітопорошкового контролю в регіоні
2	Загальний обсяг продаж, грн/ум.од	~300-700 тис. грн на рік у сегменті автоматизованих систем
3	Динаміка ринку (якісна оцінка)	Зростає через автоматизацію та підвищені стандарти якості
4	Наявність обмежень для входу	Патент на проєкт, дозвіл на використання частот 0,8-2,0МГц діапазону
5	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	Перевірка системи з метою підтвердження працездатності в умовах реальних приміщень, та швидкості контролю
6	Середня норма рентабельності в галузі, %	80-90%

Отже , аналізуючи таблицю можна зробити висновок, що ринок є досить

привабливим для входження за попереднім оцінюванням.

Надалі визначаємо потенційні групи клієнтів, їх характеристики, та формуємо орієнтовний перелік вимог до товару для кожної групи (табл. 5)

Таблиця 5. Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту[25]

№ п/п	Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів до товару
1	Швидка та проста система орієнтації для приладів НК	Промислові підприємства нафтової та енергетичної промисловостей	Орієнтація на швидке та просте здійснення контролю; тривалі цикли закупівель	Висока продуктивність, надійність, інтеграція, технічна підтримка
2	Відповідність стандартам та документація	Металопрокатна промисловість	Висока увага до стандартів, документації та сертифікації	Точність, цифровий архів, відповідність стандартам ISO/ASTM/ГОСТ
3	Швидка адаптація та можливість обробки , та зберігання інформації про координати знайдених дефектів в електронному вигляді	Компанії підрядники, відповідальні за здійснення контролю та ремонту сталевих трубопроводу	Потреба у швидкому навчанні персоналу, мобільність системи	Простота експлуатації, адаптивність, технічна підтримка, навчання персоналу

Була визначена цільова аудиторія (див табл. 5) та її основні вимоги до товару, основні вимоги до системи, й основні характеристики системи, які формують поведінку клієнтів відносно розроблюваної системи.

Проте, існують і певні загрози при застосуванні даної технології. Для попередження таких ситуацій необхідно якісне обладнання, а також працювати з такими обладнанням повинні висококваліфіковані фахівці. Також, повинно своєчасне технічне обслуговування даного продукту (таблиця 2, 3). Після визначення потенційних груп клієнтів проводимо аналіз ринкового середовища. Складаємо таблиці факторів, що сприяють ринковому впровадженню проекту, та факторів, що йому перешкоджають (таблиці 6, 7).

Таблиця 6. Фактори загроз[25]

№ п/п	Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
1.	Конкуренція	Вихід на ринок конкурента	Знизити ціну на систему орієнтації за рахунок використання дешевших маячків; Запропонувати безкоштовну установку системи в приміщеннях
2.	Економічний фактор	Зростання цін на компоненти	Пошук нових постачальників, та можливий перехід на інші мікросхеми маячків
3.	Технічний фактор	Збої в вимірах координат, вихід з ладу ПЕП	Наявність кваліфікованої технічної підтримки
4.	Постачання	Невчасне постачання компонентів	Пошук нових постачальників, формування резерву компонентів на складах
5.	Інфляція	Зростання ціни на ПЕП, і відповідно дорожчання системи	Прив'язка ціни виробу до міжнародної валюти

Отже існує ціла низка загроз, що можуть спричинити проблеми реалізації стартапу. Було розглянуто кожен з факторів, проаналізовано, та запропоновано деякий комплекс дії компанії стартап-проекту для у відповідь

на виникнення тієї чи іншої загрози. Запропоновані варіанти реакції дозволять своєчасно та швидко нівелювати виниклі фактори загроз.

Таблиця 7. Фактори можливостей[25]

№ п/п	Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
1.	Конкуренція	Можливість підвищення точності вимірювання системою	Позиціонування системи в якості допоміжної, вдосконалення програмної частини системи
2.	Економічний	Зменшення податків на даний вид виробництва	Збільшення обсягів виробництва та зменшення ціни на продукцію
3.	Технічний	Можливість корекції знаходження	Впровадження нових алгоритмів розрахунку координат в програмну частину системи
4.	Ринок збуту	Можливість виходу на міжнародний ринок	Розробка та виготовлення системи у відповідності до закордонних стандартів якості.
5.	Попит	Збільшення попиту на даний вид товару	Збільшення виробництва та впровадження знижок та акцій на товар, виділення коштів на маркетинг проекту

В таблицях 6 та 7 були розглянуті основні фактори-загрози, та фактори-можливості стартап-проекту. Аналіз конкуренції на ринку дозволяє оцінити умови, в яких функціонуватиме стартап, визначити чинники, що впливають на його конкурентоспроможність, та окреслити можливі напрями зміцнення ринкових позицій. Ринок автоматизованих систем ультразвукового неруйнівного контролю трубопроводів має риси олігополістичної та монополістично-конкурентної структури: на ньому представлені кілька великих міжнародних і національних виробників діагностичного обладнання, а також спеціалізовані сервісні компанії, що надають послуги технічної діагностики.

За рівнем конкурентної боротьби ринок носить переважно національний і міжрегіональний характер, оскільки основними замовниками

є підприємства нафтогазової, енергетичної, хімічної та комунальної галузей, а постачальники обладнання та послуг зосереджені у великих промислових центрах. Галузева ознака конкуренції є внутрішньогалузевою, адже змагання відбувається між компаніями, що розробляють системи ультразвукового контролю або надають послуги діагностики трубопроводів.

За видами товарів спостерігається товарно-видова конкуренція між різними моделями автоматизованих ультразвукових систем контролю та товарно-родова конкуренція з боку альтернативних методів неруйнівного контролю, таких як магнітопорошковий контроль, радіографія та акустико-емісійні методи.

Конкурентні переваги формуються переважно за рахунок нецінових чинників, зокрема точності вимірювань, здатності визначати герметичність і ступінь корозійного зношування, рівня автоматизації, можливостей цифрової обробки й архівування даних, а також якості технічного сервісу та навчання персоналу. Цінова конкуренція присутня, проте не є визначальною, оскільки замовники орієнтуються насамперед на надійність, відповідність стандартам безпеки та довгострокову експлуатацію систем.

Інтенсивність конкуренції у більшості сегментів ринку має немарочний характер, хоча репутація та бренд великих виробників відіграють важливу роль у формуванні довіри клієнтів. Новий стартап може успішно зміцнити свої позиції завдяки технологічним інноваціям, гнучкій адаптації системи під специфічні умови експлуатації трубопроводів, а також розвиненій сервісній і консультаційній підтримці.

Далі(в табл. 8) проведемо аналіз пропозиції, визначивши загальні риси конкуренції на ринку.

Таблиця 8. Ступеневий аналіз конкуренції на ринку[25]

Особливості конкурентного середовища	В чому проявляється дана характеристика	Вплив на діяльність підприємства (можливі дії компанії, щоб бути конкурентоспроможною)
1. Тип конкуренції: олігополія	Існування невеликої кількості компаній, що працюють в даній сфері	Якісна продукція, правильна цінова політика, висока якість обслуговування
2. Рівень конкурентної боротьби: міжнародна	Представники в різних країнах	Вихід на міжнародний ринок
3. За галузевою ознакою: міжгалузева	Підприємства працюють в межах декількох галузей	Пропозиція товару за більш низькою ціною
4. Конкуренція за видами товарів: товарно-видова	Пропонують товари одного виду	Реклама, простота в користуванні
5. Конкуренція за характером конкурентних переваг: цінова	Вартість залежить від ціни на матеріали та комплектуючі елементи	Вибір оптимального варіанту ціна/якість комплектуючих елементів
6. Конкуренція за інтенсивністю: не марочна	Відомі виробники володіють більшими ресурсами і аудиторією клієнтів	Отримання держзамовлення й подальше розширення ринку

Отже сформувавши алгоритм дій компанії у відповідь на різні фактори конкурентного середовища, проведемо більш детальний аналіз умов конкуренції в

галузі за моделлю сил М. Портера.

Таблиця 9. Аналіз конкуренції за моделлю М. Портера[25]

Складові і аналізу	Прямі конкуренти в галузі	Потенційні конкуренти	Постачальники	Клієнти	Товари-замінники
Зміст аналізу	Навести перелік прямих конкурентів	Визначити бар'єри входження в ринок	Визначити фактори сили постачальників	Визначити фактори сили споживачів	Фактори загроз з боку замінників
Аналіз та висновки	Перелік конкурентів: Olympus (Японія).	Необхідність сертифікації за міжнародними та	Сила: середня. Ультразвукові перетворювачі – обмежена кількість виробників високого класу.	Сила: висока. Клієнти орієнтуються на точність визначення товщини	Загроза: середня. Внутрішня трубна діагност

	<p>Krautkramer / GE Inspection Technologies. ООО «АКС» (виробник і постачальник систем УЗК).</p> <p>Висновок: Інтенсивність конкуренції – середньо-висока. На ринку присутні сильні міжнародні бренди з високою репутацією, проте їхні рішення є дорогими та менш гнучкими до локальних умов експлуатації. Існує ринкова ніша в середньому сегменті: «автоматизований УЗК + цифрова діагностика герметичності та корозії за помірною ціною».</p>	<p>галузевими стандартами (ISO, ASTM, ГОСТ, API). Потреба у високоточних алгоритмах обробки ультразвукових сигналів. Інтеграція в діючі трубопровідні системи та виробничі процеси. Інвестиції в програмне забезпечення та аналітику даних. Можливість появи нових гравців: обмежена. Строки: 2–4 роки (за умови входу ІТ- та інжинірингових компаній).</p> <p>Висновок: Бар'єри входу середньо-високі, що стримує швидку появу нових конкурентів.</p>	<p>Електронні модулі збору та обробки сигналів – частково імпорتنі. Механічні системи позиціонування – широко доступні. Програмні компоненти – можливість власної розробки.</p> <p>Умови: Постачальники впливають на собівартість обладнання, але не мають критичної ринкової влади; основні ризики пов'язані з логістикою та постачанням імпортних компонентів.</p>	<p>стінок, герметичності та корозійного зносу. Високі вимоги до автоматизації, повторюваності результатів і цифрової звітності. Критична важливість мінімізації аварійних ризиків і простоїв трубопроводів.</p> <p>Умови: Клієнти активно формують технічні вимоги до системи, проте не можуть повністю диктувати ціну через високу значущість надійної діагностики.</p>	<p>ика (інтелектуальні поршні). Радіографічний контроль. Акустичні емісійні методи. Гідрравлічні випробування. Обмеження: Методозамінники часто є дорожчими, складнішими в експлуатації або менш придатними для безперервного моніторингу корозії та герметичності.</p>
--	--	--	--	--	---

На основі аналізу даних, наведених у таблицях, можна зробити висновок, що за сучасних умов ринкової конкуренції для успішного виходу на ринок і забезпечення конкурентоспроможності розроблюваний проєкт повинен не поступатися за якісними показниками системам, які пропонуються

відомими та вже усталеними компаніями. Водночас, з огляду на високу насиченість ринку подібними технічними рішеннями, важливою умовою привабливості нового продукту є його вартість, яка має бути дещо нижчою порівняно з аналогічними пропозиціями конкурентів. Саме поєднання високої якості та доступнішої ціни може стати визначальним чинником при виборі системи потенційними споживачами.

З урахуванням проведеного раніше аналізу конкурентного середовища, а також виходячи з основних технічних і експлуатаційних характеристик ідеї проєкту, вимог споживачів до функціональності та надійності товару, а також впливу факторів маркетингового середовища, доцільно визначити перелік ключових факторів конкурентоспроможності. Ці фактори дозволять комплексно оцінити позиції розроблюваної системи на ринку та сформувану стратегію її просування.

У таблиці 10 наведено узагальнений перелік факторів конкурентоспроможності, сформований на основі результатів аналізу конкуренції. Кожен із цих факторів обґрунтовано з точки зору його значущості для споживача та впливу на успішність проєкту, що дає змогу визначити пріоритетні напрями подальшого розвитку та вдосконалення системи.

Таблиця 10. Обґрунтування факторів конкурентоспроможності[25]

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Обґрунтування (чинники, які роблять фактор значущим для порівняння конкурентних проєктів)
1	Рівень автоматизації процесу контролю	Автоматизація зменшує вплив оператора, підвищує стабільність результатів, скорочує час обстеження трубопроводів, дозволяє безпечно дистанційне управління. Перевага над ручними або напівавтоматичними методами УЗК.
2	Точність і надійність виявлення дефектів	Висока точність виявлення тріщин, корозії та зон низької герметичності мінімізує ризик аварій, зменшує витрати на ремонт та продовжує ресурс трубопроводів.
3	Цифрова фіксація та архівування результатів	Забезпечує ведення історії обстежень, аналіз тенденцій деградації, підвищує контроль якості та відповідність нормативам безпеки й промисловим стандартам.
4	Продуктивність у потоковому режимі	Система здатна контролювати великі протяжності трубопроводів без значних

		простоїв. Висока швидкість обстеження економить час і ресурси підприємства.
5	Гнучкість налаштувань і адаптивність до різних деталей	Підтримка різних діаметрів, матеріалів та товщини труб дозволяє застосовувати систему на різних об'єктах, збільшуючи сферу використання.
6	Вартість володіння (створення + експлуатація)	Помірна ціна обладнання та обслуговування робить систему доступною для середнього й великого бізнесу, забезпечує конкурентоспроможність у порівнянні з імпортними системами.
7	Інтеграція з виробничими лініями та ПЗ підприємства	Можливість передачі даних в SCADA, MES, ERP та інші системи моніторингу трубопроводів забезпечує централізований контроль та аналітику стану об'єктів.
8	Сервісна підтримка та навчання персоналу	Технічна підтримка, документація та навчання підвищують ефективність роботи операторів, зменшують ризики помилок і збільшують довіру клієнтів.

За допомогою визначених факторів конкурентоспроможності, наведених в таблиці 4.10 проведемо аналіз сильних та слабких сторін нашого проекту.

Таблиця 11. Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін розробленої системи орієнтації[25]

№	Фактор конкурентоспроможності	Вага (1–20)	Рейтинг відносно конкурента 1	Рейтинг відносно конкурента 2	Рейтинг відносно конкурента 3
1	Рівень автоматизації	20	+2	+1	-1
2	Точність і стабільність виявлення дефектів	18	+3	+2	0
3	Цифрова фіксація та архівування	16	+1	+2	-1
4	Гнучкість налаштувань та адаптивність	14	+3	+2	+1
5	Вартість володіння	12	-1	0	+3
6	Інтеграція з виробничими лініями	15	+3	+2	0
7	Сервісна підтримка та навчання	10	0	+1	0

Отримані результати свідчать, що стартап-проект має суттєві переваги над ручними та напівавтоматичними методами контролю трубопроводів.

Найбільші відмінності спостерігаються у рівні автоматизації, точності виявлення дефектів та зон корозії, продуктивності у потоковому режимі та можливості цифрової фіксації результатів, що формує стабільну конкурентну позицію в середньому ціновому сегменті. Порівняно з промисловими зарубіжними комплексами УЗК проєкт демонструє співставний технічний рівень, зберігаючи при цьому нижчу вартість володіння та більшу гнучкість адаптації до труб різних діаметрів, товщини та матеріалів.

Єдиною відносно слабкою стороною у порівнянні з високовартісними промисловими установками є дещо нижчий рівень можливостей цифрової аналітики та звітності, проте ця різниця може бути мінімізована шляхом подальшого удосконалення програмного забезпечення та впровадження розширених модулів обробки даних і прогностного аналізу.

У цілому зведена оцінка підтверджує конкурентоспроможність стартап-проєкту, його здатність зайняти нішу доступних автоматизованих систем з високою точністю контролю трубопроводів і потенціал для масштабування на підприємствах із різними технологічними вимогами та протяжністю мереж.

Фінальним етапом ринкового аналізу є складання SWOT-аналізу стартап-проєкту, який узагальнює результати дослідження внутрішніх характеристик продукту та зовнішніх умов ринку. Матриця SWOT поєднує сильні та слабкі сторони розробленої автоматизованої системи УЗК (визначені за результатами порівняльної оцінки конкурентоспроможності), а також ринкові можливості й загрози, що впливають із факторів маркетингового та конкурентного середовища.

На відміну від самих факторів, ринкові загрози й можливості є прогнозованими наслідками впливу цих факторів і мають певну ймовірність реалізації. Такий підхід дозволяє визначити стратегічні орієнтири та окреслити напрями розвитку стартапу в умовах змінного ринку. Матрицю SWOT наведено у відповідному розділі дослідження.

Таблиця 12. SWOT – аналіз стартапу[25]

S – Сильні сторони	W – Слабкі сторони
Простота установалення системи	Порівняно невисока точність виміру координат
Низька ціна компонентів, що зумовлює формування нижчої ціни ніж в конкурентів	Залежність ціни продукції від ціни постачальників на комплектуючі елементи
Якісне сервісне обслуговування.	Можливість збоїв в роботі системи при наявності в приміщенні працюючих на тій же частоті випромінювачів
Нижча вартість володіння порівняно з дорогими зарубіжними комплексами.	
Сервісна підтримка й навчання персоналу.	
O – Можливості	T – Загрози
Зростання потреби у високоточному автоматизованому контролі якості.	Зростання ціни на маячки, і відповідно дорожчання системи.
Вихід на міжнародний ринок	Поява нових конкурентів на ринку з більш досконалою системою.
Поява нових каналів збуту та партнерських програм.	Невчасне постачання компонентів
Державна підтримка інновацій і програм модернізації підприємств.	Збої в вимірах координат, вихід з ладу маячків
Підвищення вимог до безпеки та стандартів якості продукції.	Поява нових технологій контролю, які можуть частково замінити УЗК у специфічних випадках.

Проведений SWOT-аналіз демонструє, що стартап-проект має значний потенціал ринкового зростання завдяки поєднанню сильних внутрішніх характеристик та сприятливих зовнішніх тенденцій у сфері автоматизації та цифровізації промислового контролю трубопроводів. Основні переваги проекту зосереджені у високому рівні автоматизації процесу контролю, точності виявлення дефектів та зон корозії, а також продуктивності у потоковому режимі, що забезпечує його конкурентну позицію у середньому ціновому сегменті.

Водночас окремі слабкі сторони, пов'язані насамперед із потребою вдосконалення програмного забезпечення для розширеної цифрової аналітики та частковою залежністю від імпортованих ультразвукових датчиків, можуть бути компенсовані використанням ринкових можливостей. Серед них – державні програми підтримки інновацій, партнерства з технологічними

постачальниками та впровадження розширених аналітичних модулів для прогнозування стану трубопроводів.

Наявні загрози ринку потребують постійного моніторингу та гнучкої стратегії адаптації. Особливо це стосується конкуренції з боку зарубіжних виробників високопродуктивних автоматичних систем УЗК та можливих змін нормативних вимог щодо безпеки та контролю трубопроводів. Однак за умови реалізації технологічних переваг, високої точності контролю та активної маркетингової діяльності стартап має всі передумови для успішного комерційного впровадження.

На основі проведеного SWOT-аналізу формуються можливі альтернативи ринкової поведінки, які можуть бути використані для виходу стартап-проєкту на ринок. Для кожної альтернативи визначається комплекс заходів, необхідні ресурси, ймовірність їх отримання та орієнтовні строки реалізації з урахуванням потенційної активності конкурентів.

Таблиця 13. Альтернативи ринкового впровадження стартапу[25]

№ п/п	Альтернатива (комплекс заходів)	Ймовірність отримання ресурсів	Строки реалізації
1	Швидкий вихід на ринок (MVP): запуск робочого прототипу з базовими функціями – автоматизація контролю, цифрова фіксація результатів, пілотне впровадження на 1–2 підприємствах з невеликою протяжністю трубопроводів.	Висока	Короткі (6–9 місяців)
2	Повна версія після доопрацювання ПЗ: розвиток аналітики для прогнозування корозії та герметичності, покращення архіву, інтеграція з MES/ERP та SCADA, позиціонування як «інтелектуальна УЗК-система трубопроводів».	Середня	Середні (12–18 місяців)
3	Партнерська модель через інтеграторів та дилерів НК-обладнання: кооперація з виробниками датчиків та ультразвукових модулів, сертифікація за ISO/ASTM, розширення мережі збуту для обстеження промислових об'єктів.	Середня	Довші (18–24 місяці)
4	Преміальна стратегія: створення повністю автоматизованого комплексу з високою швидкістю контролю, модулем прогнозу аналітики, дистанційним управлінням,	Низька	Дуже довгі (24–36 місяців)

	конкурування з глобальними брендами автоматичних УЗК-систем.		
--	--	--	--

Порівняння показує, що альтернативи виходу на ринок значно відрізняються за строками реалізації, рівнем ресурсної складності та ризиками. Найдовші цикли властиві преміальній стратегії, яка потребує значних інвестицій, складної сертифікації ультразвукових модулів та високої технологічної готовності системи, тоді як швидкий вихід із базовою версією забезпечує мінімізацію ризиків і оперативне закріплення на ринку.

З урахуванням аналізу конкурентів, які можуть розширити свою присутність у сфері автоматичного УЗК трубопроводів протягом найближчих 1–3 років, пріоритетними стають стратегії зі стислими строками запуску та високою ймовірністю отримання необхідних ресурсів.

Обрана для впровадження Альтернатива 1 — швидкий вихід на ринок із базовою версією системи (MVP). Такий вибір зумовлений тим, що ця стратегія передбачає найвищу ймовірність оперативного отримання необхідних датчиків і обладнання, а також дозволяє реалізувати мінімальні строки проекту. Вона дає змогу швидко зайняти вільну нішу на ринку промислового контролю трубопроводів та сформувати початкову клієнтську базу серед підприємств із невеликою та середньою протяжністю трубопроводів.

Крім того, запуск базової версії створює можливість у подальшому послідовно розширювати функціональність системи: удосконалювати аналітику стану трубопроводів, інтегрувати з MES/ERP та SCADA, додавати модулі прогнозування корозії та втрат герметичності, адаптуючи систему до нових технологічних умов та вимог ринку.

5.3 Розроблення ринкової стратегії проекту

Розроблення ринкової стратегії першим кроком передбачає визначення стратегії охоплення ринку: опис цільових груп потенційних споживачів.

Таблиця 15. Вибір цільових груп потенційних споживачів[25]

№ п/п	Опис профілю цільової групи	Готовність споживачів сприйняти продукт	Орієнтовний попит у сегменті	Інтенсивність конкуренції	Простота входу у сегмент
1	Промислові підприємства нафтогазової та хімічної галузі	Висока	Високий (регулярний контроль довгих трубопроводів і резервуарів)	Середня	Середня
2	Енергетичні та теплові компанії (ТЕС, ГЕС, промислові котельні)	Висока	Високий (контроль великої протяжності трубопроводів та магістралей)	Висока	Низька
3	Сервісні та ремонтні компанії трубопровідних систем	Середня	Середній – низький	Низька	Середня – висока

За результатами аналізу доцільно зосередитися на тих сегментах ринку, де поєднуються високий попит на контроль стану трубопроводів, достатня готовність споживачів до впровадження автоматизованих систем та прийнятний рівень конкуренції. Основними сегментами для первинного входу на ринок обрано промислові підприємства нафтогазової та хімічної галузі та енергетичні компанії (ТЕС, ГЕС, промислові котельні), оскільки вони демонструють значний обсяг потреби у контролі герметичності та корозійної стійкості трубопроводів та характеризуються високою готовністю до автоматизації.

Лабораторії неруйнівного контролю та сертифікаційні центри також є перспективним сегментом, проте їхній попит є більш фрагментованим і залежить від спеціалізації та обсягів проведених робіт. Сервісні та ремонтні компанії трубопровідних систем залишаються вторинним сегментом, який може бути охоплений на подальших етапах розвитку проєкту.

З огляду на те, що для різних сегментів потрібні відмінні акценти у просуванні, технічній підтримці та навчанні персоналу, стратегія охоплення

ринку належить до диференційованого маркетингу, коли для кожної цільової групи визначаються окремі програми ринкового впливу та сервіси, адаптовані до специфіки їхніх потреб.

Таблиця 16. Визначення базової стратегії розвитку

№ п/п	Обрана альтернатива розвитку проекту	Стратегія охоплення ринку	Ключові конкурентоспроможні позиції відповідно до обраної альтернативи	Базова стратегія розвитку*
1	Впровадження системи у великих промислових підприємствах нафтогазової та хімічної галузі	Широкий сегмент (масовий ринок)	Висока точність виявлення дефектів і зон корозії, скорочення часу контролю трубопроводів, цифрова фіксація результатів, інтеграція з MES/ERP/SCADA, економія витрат на ручний контроль	Лідерство по витратах
2	Пропозиція кастомізованих рішень для енергетичних компаній (ТЕС, ГЕС, котельні)	Сегментований ринок (вибрані сегменти)	Адаптація під специфіку трубопроводів і технологічних процесів, гнучкі налаштування УЗК-алгоритмів, підтримка після впровадження	Спеціалізація
3	Розробка преміальної версії для високотехнологічних підприємств з високими вимогами до безпеки та контролю	Вибраний нішевий сегмент	Інноваційні алгоритми аналізу дефектів, інтеграція з AI-модулями прогнозу аналітики, висока надійність та точність, преміальна сервісна підтримка	Диференціація

Вибір базової стратегії розвитку для проекту «Автоматична система УЗК трубопроводів» здійснено з урахуванням особливостей ринку, цільових сегментів та конкурентних переваг системи.

Для впровадження продукту у великих промислових підприємствах нафтогазової та хімічної галузі обрана стратегія лідерства по витратах. Це дозволяє забезпечити конкурентоспроможність на масовому ринку за рахунок високої точності контролю дефектів і корозії, скорочення часу обстеження

трубопроводів, цифрової фіксації результатів та інтеграції з MES/ERP/SCADA. Така стратегія дає можливість отримати більшу маржу та витримати конкурентну цінову політику на ринку.

Для енергетичних компаній (ТЕС, ГЕС, котельні), де потрібна адаптація продукту під специфіку трубопроводів і технологічних процесів, оптимальною є стратегія спеціалізації. Вона передбачає концентрацію на потребах конкретного сегмента, що дозволяє надавати кастомізовані рішення, підвищувати ефективність впровадження та забезпечувати додаткову цінність завдяки гнучким налаштуванням алгоритмів УЗК та сервісній підтримці після впровадження.

Для високотехнологічних підприємств із підвищеними вимогами до безпеки та точності контролю доцільно застосувати стратегію диференціації. Система відрізняється інноваційними алгоритмами аналізу дефектів і корозії, високою надійністю, інтеграцією з AI-модулями прогнозу аналітики, що дозволяє зайняти преміальний сегмент ринку, де клієнти готові платити за високу якість та розширені функціональні можливості.

Таким чином, комбіноване застосування трьох базових стратегій розвитку дозволяє стартапу ефективно охопити різні ринкові сегменти, одночасно забезпечуючи конкурентні переваги як за витратами, так і за якістю продукту.

На основі визначеної базової стратегії (лідерство по витратах та спеціалізація) необхідно конкретизувати модель поведінки компанії в конкурентному середовищі. Це передбачає вибір тактики взаємодії з лідерами ринку, визначення джерел залучення клієнтів та поступове розширення функціональності системи для завоювання преміального сегмента.

Таблиця 17. Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

№ п/п	Чи є проект «першопрохідцем» на ринку?	Чи буде компанія шукати нових споживачів, або забирати існуючих у конкурентів?	Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурента, і які?	Стратегія конкурентної поведінки*
1	Так, проект впроваджує автоматизовану систему УЗК трубопроводів із визначенням герметичності та корозійної стійкості, що є новаторською для багатьох промислових підприємств	Орієнтація на розширення первинного попиту – залучення нових споживачів, формування попиту на автоматизовані рішення для контролю трубопроводів	Не копіює; застосовуються власні алгоритми обробки УЗ-сигналів і технології оцінки стану труб	Стратегія лідера – розширення первинного попиту
2	Частково – на ринку існують окремі системи УЗК та контроль герметичності, проте повністю автоматизовані рішення з цифровою аналітикою є новими	Компанія може частково залучати клієнтів конкурентів у середньому сегменті через адаптовані рішення для конкретних типів трубопроводів і протяжностей	Використовуються стандарти інтеграції з MES/ERP/SCADA, але алгоритми аналізу дефектів і функціонал системи відрізняються	Стратегія виклику лідера – флангова атака на сегменти конкурентів
3	Ні, у преміальному сегменті існують конкурентні розробки високотехнологічних систем УЗК	Основний фокус на задоволенні специфічних потреб нішевого сегмента – точний контроль корозії та герметичності, нові споживачі формуються через якість і інновації	Не копіює, продукт відрізняється інноваційними алгоритмами прогнозу аналітики та високою точністю	Стратегія заняття конкурентної ніші (нішевий фокус)

За результатами аналізу обрана стратегія нішевого комутанта, що дозволяє уникнути прямої конкуренції з великими виробниками автоматичних УЗК-систем. Фокусування на специфічних потребах цільових сегментів – промислових підприємств нафтогазової та хімічної галузі, енергетичних компаній та лабораторій – та гнучкість налаштувань системи забезпечують

швидку адаптацію до змін на ринку та стабільний розвиток стартапу на етапі становлення.

Така стратегія дозволяє ефективно використовувати наявні ресурси, одночасно формуючи лояльну клієнтську базу та закладаючи підґрунтя для майбутнього розширення частки ринку.

На основі вимог споживачів обраних сегментів, а також з урахуванням обраної базової стратегії розвитку та стратегії конкурентної поведінки формується стратегія позиціонування стартап-проекту. Вона полягає у визначенні ринкової позиції та комплексу асоціацій, за якими клієнти ідентифікуватимуть систему УЗК. Позиціонування забезпечує виділення унікальної торговельної пропозиції (УТП), демонструє відмінність від конкурентів і підкреслює цінність продукту для кінцевого користувача – точний контроль герметичності та корозійної стійкості трубопроводів із високою ефективністю та автоматизацією.

Таблиця 5.19. Визначення стратегії позиціонування

№ п/п	Вимоги до товару цільової аудиторії	Базова стратегія розвитку	Ключові конкурентоспроможні позиції власного стартап-проекту	Вибір асоціацій, які мають сформувати комплексну позицію власного проекту (три ключових)
1	Висока точність виявлення дефектів, зон корозії та порушень герметичності трубопроводів, інтеграція з MES/ERP/SCADA	Лідерство по витратах	Автоматизація контролю трубопроводів, скорочення часу обстеження, цифрова фіксація результатів	«Точність», «Ефективність», «Надійність»
2	Гнучкість налаштувань під специфіку	Спеціалізація	Кастомізовані рішення під конкретні типи труб,	«Гнучкість»,

	трубопроводів та технологічних процесів, легкість адаптації		підтримка після впровадження, адаптивні алгоритми УЗК	«Адаптивність», «Підтримка»
3	Інноваційність алгоритмів прогнозування стану трубопроводів, преміальна якість для високотехнологічних підприємств	Диференціація	Інноваційні алгоритми прогнозування аналітики, висока точність оцінки корозії та герметичності, інтеграція з AI-системами, преміальна підтримка	«Інновації», «Прогресивність», «Преміум-якість»

5.4. Бізнес-модель реалізації стартап-проекту та оцінювання його економічної ефективності

На основі попереднього аналізу ринку, конкурентоспроможності товару та потреб цільових сегментів формується маркетингова концепція продукту. Концепція відображає фізичні та невлімові характеристики товару, які сприймаються споживачем, а також набір вигод, що обіцяє певній групі користувачів. Таблиця 20 підсумовує ключові потреби споживачів та пропоновані вигоди, а також виділяє конкурентні переваги продукту на ринку.

Таблиця 5.20. Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

№ п/п	Потреба	Вигода, яку пропонує товар	Ключові переваги перед конкурентами (існуючі або такі, що потрібно створити)
1	Висока точність виявлення дефектів, зон корозії та порушень герметичності трубопроводів	Зменшення ризику аварій, підвищення надійності та безпеки трубопроводів	Використання алгоритмів обробки УЗ-сигналів для автоматичного виявлення дефектів та корозії; скорочення людського фактору; швидка цифрова обробка даних
2	Зниження витрат на контроль стану трубопроводів	Скорочення витрат на ручну перевірку, підвищення рентабельності	Лідерство по витратах завдяки автоматизації та інтеграції з MES/ERP/SCADA
3	Адаптивність під специфіку трубопроводів та технологічних процесів	Можливість налаштування під власні виробничі процеси	Кастомізовані рішення, гнучкі алгоритми УЗК, підтримка після впровадження
4	Преміальна якість для високотехнологічних підприємств	Надійність, передові технології, точність	Інноваційні алгоритми прогнозування аналітики, інтеграція з AI-модулями, преміальна підтримка

5	Легкість інтеграції та швидкий запуск	Мінімізація часу на впровадження та навчання персоналу	Простий інтерфейс, готові модулі інтеграції, документація та підтримка клієнтів
---	---------------------------------------	--	---

За результатами аналізу визначено, що маркетингова концепція продукту стартапу базується на поєднанні високої точності, ефективності та адаптивності. Основні конкурентні переваги включають автоматизацію контролю стану трубопроводів, використання алгоритмів обробки УЗ-сигналів та прогнозної аналітики, гнучкість налаштувань під потреби середніх підприємств та преміальну якість для високотехнологічних клієнтів. Ця концепція дозволяє сформувати чіткий образ системи у свідомості споживачів, підвищує лояльність до торгової марки та створює основу для успішного впровадження маркетингових стратегій.

Для систематизації ключових елементів створення та комерціалізації стартапу використано шаблон Lean Canvas, який дозволяє компактно відобразити проблеми ринку, ціннісну пропозицію, цільові сегменти споживачів, конкурентні переваги, канали збуту, структуру витрат і джерела доходів. Узагальнену бізнес-модель реалізації стартапу наведено в таблиці 20.

Таблиця 20. побудова бізнес-моделі за шаблоном Lean canvas

Високий ризик аварій та втрат через дефекти, корозію та порушення герметичності трубопроводів; трудомісткий і неточний ручний контроль; відсутність цифрової фіксації та аналітики; складність контролю трубопроводів великої	Інтегрована автоматизована УЗК-система з цифровим модулем обробки сигналів, ультразвуковими датчиками, механізованими скануючими пристроями та програмним модулем прогнозної аналітики для оцінки герметичності та корозійної	Автоматизована система УЗК трубопроводів із високою точністю виявлення дефектів та корозії, цифровою фіксацією результатів, зменшенням впливу людського фактору та можливістю адаптації під різні типи трубопроводів.	Поєднання глибокої спеціалізації в УЗК методах з власними алгоритмами обробки сигналів; адаптація системи під конкретні типи трубопроводів та технологічні процеси; накопичення бази даних дефектів і корозійних зон.	Промислові підприємства нафтогазової та хімічної галузі; енергетичні компанії (ТЕС, ГЕС, котельні); лабораторії неруйнівного контролю та сертифікаційні центри; сервісні та ремонтні компанії трубопроводів..
---	---	---	---	---

протяжності та різних діаметрів.	стійкості трубопроводів.			
	Точність виявлення дефектів та корозії; час обстеження трубопроводів; відсоток хибних спрацювань; кількість впроваджених систем; повторні замовлення; економія витрат клієнтів.		Прямі продажі промисловим підприємствам; демонстраційні пілотні проєкти на виробництвах; участь у галузевих виставках і конференціях; співпраця з інтеграторами та сервісними компаніями.	
Розробка та удосконалення програмного забезпечення; закупівля ультразвукових датчиків і механізованих пристроїв сканування; виготовлення конструктивних вузлів; заробітна плата команди; сертифікація та маркетинг.			Продаж обладнання та ліцензій на ПЗ; сервісне обслуговування та модернізація систем; навчання персоналу замовника; преміальні модулі прогнозовної аналітики..	

Представлена бізнес-модель демонструє, що стартап орієнтований на промисловий сегмент із високими вимогами до безпеки, надійності та відтворюваності неруйнівного контролю трубопроводів. Основна цінність продукту полягає у зменшенні впливу людського фактора, підвищенні точності виявлення дефектів і корозії та цифровій фіксації результатів, що формує стабільні передумови для комерційного впровадження та масштабування проєкту.

На основі концепції продукту та маркетингового аналізу розробляється трирівнева модель товару. Вона включає:

Перший рівень – товар за задумом: основна функціональна вигода для споживача – високоточний та автоматизований контроль стану трубопроводів.

Другий рівень – товар у реальному виконанні: характеристики, властивості та стандарти, включаючи інтеграцію з MES/ERP/SCADA, адаптивні алгоритми УЗК та цифрову фіксацію результатів.

Третій рівень – товар із підкріпленням: додаткові послуги, такі як навчання персоналу, сервісна підтримка, преміальні модулі прогнозно-аналітики та захист від копіювання технології.

Таблиця 21. Опис трьох рівнів моделі товару

Рівні товару	Сутність та складові
I. Товар за задумом	Базова потреба споживача: точне, швидке та надійне виявлення дефектів, зон корозії та порушень герметичності трубопроводів для підвищення безпеки та зменшення аварійних витрат. Основна функціональна вигода: автоматизація контролю, скорочення часу на обстеження трубопроводів, економія витрат на ручну перевірку, підвищення рентабельності та безпеки виробництва.
II. Товар у реальному виконанні	Властивості/характеристики: – Економічні: зменшені витрати на ручну перевірку, можливість масштабування для довгих трубопроводів, ефективна інтеграція в виробничі процеси; – Технічні: швидка обробка ультразвукових сигналів, точність виявлення дефектів і корозії >95%, інтеграція з MES/ERP/SCADA; – Надійність: безвідмовна робота до 10 000 циклів перевірки, гарантійний термін 12 місяців; – Технологічні: оптимізовані алгоритми для мінімізації обчислювальних витрат; – Ергономічні: інтуїтивний інтерфейс, зручність моніторингу стану трубопроводів, адаптація до робочих станцій; – Естетичні: сучасний дизайн панелі управління; – Транспортабельність: компактна модульна конструкція для перевезень і установки на різних об'єктах; – Екологічність: низьке енергоспоживання, мінімальний вплив на довкілля; – Безпека: вбудовані механізми блокування, сертифікована електробезпека. Якість: відповідає стандартам ISO 9001 та галузевим нормам. Пакування: компактний модульний корпус, маркування із назвою стартапу та продукту.
III. Товар із підкріпленням	До продажу: демонстраційні модулі, навчальні матеріали, сертифікати відповідності; Після продажу: гарантійне та сервісне обслуговування, оновлення алгоритмів, підтримка інтеграцій; Захист від копіювання: патент на алгоритми обробки УЗ-сигналів, ноу-хау щодо методів оцінки корозії та герметичності, комплексне поєднання технічних, ергономічних та сервісних характеристик.

Формування трирівневої моделі дозволяє чітко визначити цінність продукту для споживача на кожному етапі взаємодії та підкреслити конкурентні переваги стартапу. Захист від копіювання досягається поєднанням патентної охорони алгоритмів обробки УЗ-сигналів,

технологічного ноу-хау щодо оцінки корозії та герметичності, а також сервісних переваг, що унеможлиблює пряме відтворення продукту конкурентами. Такий підхід створює основу для ефективного виходу на ринок та забезпечує стабільність позицій компанії у довгостроковій перспективі.

Визначення цінових меж є важливим етапом формування маркетингової програми, оскільки від правильного ціноутворення залежить конкурентоспроможність системи УЗК та можливість її впровадження у цільових сегментах. При встановленні цін враховуються рівень вартості аналогічних та замінних рішень на ринку, а також середній рівень доходів потенційних споживачів. Для точного визначення цінових меж застосовується експертна оцінка з урахуванням специфіки промислових підприємств та технологічних особливостей стартап-проєкту.

Таблиця 22. Визначення меж встановлення ціни

№ п/п	Рівень цін на товари-замінники	Рівень цін на товари-аналоги	Рівень доходів цільової групи споживачів	Верхня та нижня межі встановлення ціни на товар/послугу
1	200–300 тис. грн	250–400 тис. грн	Середній дохід 300 тис. грн	225–350 тис. грн
2	350–650 тис. грн	450–700 тис. грн	Середній дохід 500 тис. грн	400–675 тис. грн
3	400–500 тис. грн	500–600 тис. грн	Середній дохід 450 тис. грн	450–550 тис. грн

Результати аналізу дозволяють визначити оптимальні межі ціни, у межах яких система УЗК трубопроводів залишатиметься доступною для цільових сегментів та водночас забезпечуватиме економічну ефективність стартапу. Верхня межа визначається платоспроможністю потенційних споживачів у промисловому та енергетичному сегменті, нижня межа – мінімальною ціною, що покриває витрати на виробництво, розробку ПЗ та

забезпечує конкурентоспроможність продукту. Остаточне встановлення ціни буде здійснено на етапі фінансово-економічного аналізу з урахуванням усіх витрат, масштабування системи та ринкової кон'юнктури.

Вибір оптимальної системи збуту є критично важливим етапом маркетингової програми, оскільки від ефективності каналів розподілу залежить доступність продукту для цільових клієнтів, швидкість його надходження на ринок та рівень задоволеності споживачів. При прийнятті рішень щодо каналів збуту оцінюються специфіка закупівельної поведінки клієнтів, необхідні функції доставки та оптимальна глибина і ширина каналів розподілу. Для стартапу передбачено комбіновані канали продажу: прямі продажі промисловим підприємствам, демонстраційні пілотні проєкти та співпраця з інтеграторами і сервісними компаніями. Такий підхід дозволяє збільшити охоплення ринку та мінімізувати ризики при виході на нові сегменти.

Таблиця 23. Формування системи збуту

№ п/п	Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів	Функції збуту, які має виконувати постачальник товару	Глибина каналу збуту	Оптимальна система збуту
1	Прямі замовлення від великих промислових підприємств та енергетичних компаній	Консультації щодо інтеграції системи, доставка та монтаж обладнання, навчання персоналу, післяпродажне обслуговування	Нульовий рівень	Прямий продаж через команду продажу стартапу та технічних консультантів
2	Замовлення через інтеграторів та сервісні компанії, що обслуговують промислові підприємства	Організація руху системи до кінцевого клієнта, технічна підтримка, фінансування проєктів, підтримка лояльності клієнтів	Дворівневий канал	Продаж через інтеграторів та партнерів, що надають сервіс і консультації
3	Пілотні впровадження та демонстраційні проєкти на підприємствах середнього сегмента	Доставка, монтаж, гарантійне обслуговування, навчання персоналу	Канал одного рівня	Прямі демонстраційні проєкти та співпраця з сервісними компаніями для

				середніх підприємств
--	--	--	--	----------------------

Оптимальна система збуту дозволяє забезпечити максимальну доступність автоматизованої УЗК-системи для цільової аудиторії та ефективно реалізувати всі функції каналу розподілу: встановлення контактів із промисловими клієнтами, стимулювання продажів, організація доставки та монтажу обладнання, фінансування проєктів і управління ризиками. Вибір глибини та ширини каналу дистрибуції визначається кількістю посередників, необхідних для досягнення бажаного охоплення ринку, та можливостями стартапу контролювати продаж і сервіс. Для стартапу доцільно поєднувати прямий продаж промисловим підприємствам із залученням обмеженої кількості інтеграторів та сервісних партнерів, що дозволяє швидко адаптуватися до ринкових умов і мінімізувати витрати.

Розроблення концепції маркетингових комунікацій є завершальним етапом маркетингової програми стартапу. На цьому етапі визначається ідея рекламного звернення, яка базується на обраному позиціонуванні продукту та специфіці поведінки цільових клієнтів. Концепція комунікацій забезпечує узгодженість рекламних повідомлень, вибір оптимальних каналів доведення інформації до промислових замовників та формування бажаних асоціацій із брендом і продуктом.

Як зазначав Д. Огілві, основа успішного рекламного звернення полягає у глибокому розумінні продукту, його ключових переваг і контексту використання клієнтами. Саме на цьому ґрунтується вибір теми, стилю та формату рекламного повідомлення, яке має привернути увагу і сформувати позитивне сприйняття автоматизованої системи УЗК трубопроводів.

Таблиця 24. Концепція маркетингових комунікацій

№ п/п	Специфіка поведінки цільових клієнтів	Канали комунікацій, якими користуються	Ключові позиції, обрані для	Завдання рекламного повідомлення	Концепція рекламного звернення
-------	---------------------------------------	--	-----------------------------	----------------------------------	--------------------------------

		я цільові клієнти	позиціонування		
1	Інженери та технічні спеціалісти на великих промислових підприємствах, зацікавлені у цифровізації та автоматизації контролю	Професійні форуми, LinkedIn, вебінари, галузеві конференції	Інноваційність, точність, автоматизація	Інформування про технологічні переваги та точність системи	Динамічні демонстрації роботи УЗК-системи, кейси реальних впроваджень, інтерактивні презентації
2	Середні промислові підприємства, що шукають ефективні та економічні рішення для контролю трубопроводів	Професійні портали, email-розсилки, вебінари, галузеві виставки	Економія часу та ресурсів, надійність	Пояснити вигоди автоматизації контролю, скорочення простоїв та зменшення аварійних витрат	Презентації, демонстраційні проєкти, порівняння з ручними та застарілими методами контролю
3	Сервісні компанії та лабораторії неруйнівного контролю, які цінують якість і надійність	Професійні журнали, галузеві портали, семінари	Точність, стабільність, інтеграція з існуючими системами	Підкреслити переваги продукту для надання сервісу та підвищення якості обслуговування клієнтів	Кейси впровадження, демонстраційні навчальні модулі, технічні брошури з характеристиками системи

Результатом розроблення концепції маркетингових комунікацій є комплексне планування взаємодії з цільовими клієнтами промислового та сервісного сегментів через оптимальні канали комунікацій. Це дозволяє сформувати у споживачів бажані асоціації щодо автоматизованої УЗК-системи, підкреслити її конкурентні переваги – точність, надійність та ефективність – та забезпечити цілісність маркетингового впливу.

У межах розробленої програми здійснюється узгодження товарної, цінової, збутової та просувної політики стартапу, що забезпечує комплексний підхід до впровадження системи на ринку промислових підприємств,

енергетичних компаній та лабораторій неруйнівного контролю, а також формує стабільні передумови для масштабування проекту.

Таблиця 25. Орієнтовні витрати на створення стартап-проекту

№ п/п	Стаття витрат	Опис витрат	Орієнтовна сума (грн)
1	Обладнання	УЗ-датчики, скануючі механізми, комп'ютери для обробки сигналів, монтажні конструкції	1 800 000
2	Програмне забезпечення	Розробка ПЗ для обробки УЗ-сигналів, алгоритми визначення герметичності та корозійної стійкості, ліцензії на аналітичні модулі	600 000
3	Офісні витрати	Оренда приміщень, меблі, комунальні послуги	200 000
4	Зарплата персоналу	Інженери, розробники ПЗ, технічний персонал (6 місяців)	1 300 000
5	НДДКР	Дослідження, калібрування та тестування системи на трубопроводах, підготовка демонстраційних зразків	450 000
6	Маркетинг та просування	Реклама, участь у галузевих виставках, демонстраційні проекти на підприємствах	350 000
7	Сертифікація та стандартизація	Витрати на проходження ISO/ASTM/ГОСТ, сертифікація промислового застосування	180 000
Всього			4 880 000

Наведені витрати демонструють розподіл коштів на ключові напрямки стартапу. Основна частина фінансування передбачена для закупівлі обладнання та забезпечення роботи висококваліфікованого персоналу. Це гарантує надійність і точність майбутньої автоматизованої системи контролю.

На основі розрахованих витрат визначено необхідний обсяг інвестицій для повної реалізації проекту. Він включає резерви на непередбачені витрати, маркетингову підтримку та сертифікацію системи відповідно до міжнародних стандартів.

Таблиця 26. Необхідні обсяги інвестицій

№ п/п	Напрямок фінансування	Сума (грн)	Частка від загального бюджету (%)
1	Закупівля обладнання	1 800 000	36.9
2	Розробка ПЗ	600 000	12.3
3	Зарплата персоналу	1 300 000	26,.6
4	НДДКР	450 000	9,2
5	Маркетинг	350 000	7,2
6	Сертифікація	180 000	3,7
7	Офісні витрати	200 000	4,1
Всього інвестицій		4 880 000	100

Розраховані показники ефективності дозволяють оцінити фінансову доцільність стартапу. Внутрішня норма рентабельності, чиста приведена вартість та період окупності демонструють потенційну прибутковість та привабливість проекту для інвесторів.

Таблиця 5.28. Основні показники ефективності стартап-проекту

№ п/п	Показник	Значення	Опис
1	Період окупності (PP)	3–4 роки	Час, необхідний для повернення вкладених коштів
2	Чиста приведена вартість (NPV)	1 300 000 грн	Оцінка фінансової вигоди проекту з урахуванням дисконту
3	Внутрішня норма рентабельності (IRR)	18–20 %	Очікувана рентабельність проекту
4	Рентабельність продажу	15–20 %	Відношення прибутку до обсягу продажу
5	Точка беззбитковості	2–3 місяці після старту серійного виробництва	Обсяг продажу, при якому проект починає приносити прибуток

На основі наведених таблиць видно, що основну частину витрат займає закупівля обладнання та оплата праці персоналу. Це обумовлено високою

вартістю магнітопорошкової установки, цифрової камери високої роздільної здатності та залученням кваліфікованих інженерів і розробників програмного забезпечення.

Необхідний обсяг інвестицій становить **4 880 000 грн**, що забезпечує покриття всіх ключових напрямів проекту: від розробки та тестування системи до маркетингового просування та сертифікації. Така структура фінансування дозволяє збалансовано розподілити ресурси та зменшити ризики нецільового використання коштів.

Показники ефективності демонструють перспективність стартапу: очікувана внутрішня норма рентабельності (IRR) на рівні 18–20 % свідчить про привабливість інвестицій, а чиста приведена вартість (NPV) понад 1 млн грн підтверджує економічну доцільність реалізації проекту. Період окупності 3–4 роки та досягнення точки беззбитковості вже на ранніх етапах виробництва вказують на потенційну стабільність і прибутковість системи.

Таким чином, фінансове планування показує, що стартап має реалістичні перспективи для залучення інвесторів та подальшого розвитку на ринку автоматизованих систем магнітопорошкового контролю.

ВИСНОВОК ДО РОЗДІЛУ 5

У межах розділу обґрунтовано доцільність розроблення та виведення на ринок стартап-проєкту з автоматизованої системи ультразвукового контролю трубопроводів, яка поєднує сучасні технології збору та обробки УЗ-сигналів, цифрової фіксації результатів та програмного аналізу герметичності і корозійної стійкості. Запропоноване рішення спрямоване на усунення ключових недоліків традиційного ручного контролю, зокрема залежності результатів від кваліфікації інспектора, низької повторюваності вимірювань та відсутності цифрової простежуваності результатів. Автоматизація процесу забезпечує стабільну точність діагностики, швидкість перевірки трубопроводів та зменшення ризику аварій, що є критично важливим для підприємств з великими мережами трубопроводів у промислових, енергетичних та транспортних секторах.

Проведений технологічний аудит підтвердив реальну здійсненність проєкту з використанням доступних на ринку технічних рішень. Ультразвукові датчики, скануючі механізми, цифрова обробка сигналів та програмне забезпечення для автоматичного визначення дефектів і формування архіву результатів є доступними для впровадження. Ключовим інноваційним компонентом виступає спеціалізоване програмне забезпечення з алгоритмами AI, що дозволяє автоматично оцінювати герметичність та корозійну стійкість трубопроводів.

Аналіз ринкових можливостей показав, що ринок автоматизованих УЗК-систем трубопроводів перебуває на стадії зростання, що зумовлено загальносвітовою тенденцією до автоматизації та цифровізації технічного контролю, підвищенням вимог до безпеки та надійності інфраструктури, а також потребою у скороченні витрат на аварійне обслуговування. Вільна ніша у середньому сегменті доступних автоматизованих рішень створює сприятливі умови для реалізації стартап-проєкту. Середня рентабельність галузі підтверджує економічну привабливість інвестицій.

Визначені цільові сегменти споживачів – промислові підприємства з трубопроводами, енергетичні компанії, лабораторії неруйнівного контролю та сервісні компанії – мають різні потреби, але їх об'єднує інтерес до підвищення точності, надійності та швидкості контролю. Запропонована система здатна задовольнити ці вимоги за рахунок автоматизації ключових операцій, зручного програмного інтерфейсу, цифрової фіксації та формування звітності, що створює умови для ефективного позиціонування продукту як сучасного інструмента контролю якості трубопроводів.

Аналіз конкурентного середовища показав, що переваги стартап-проєкту формуються переважно за рахунок нецінових чинників – високого рівня автоматизації, стабільності результатів, можливості інтеграції в існуючі системи моніторингу та розвитку сервісної підтримки. Ідентифіковані загрози пов'язані з конкуренцією з боку великих іноземних виробників, змінами нормативних вимог та фінансовими ризиками. Запропоновані заходи дозволяють мінімізувати негативний вплив цих факторів через гнучку адаптацію продукту, активну маркетингову політику та подальші науково-дослідні розробки.

У цілому розроблений стартап-проєкт характеризується високим рівнем технологічної готовності, економічною доцільністю та значним ринковим потенціалом. Його впровадження сприятиме підвищенню надійності трубопроводів, зниженню ризику аварій, цифровізації контролю та підвищенню ефективності технічного обслуговування. Реалізація проєкту є перспективним напрямом розвитку вітчизняних інноваційних рішень у сфері автоматизованого технічного контролю трубопроводів.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У магістерській дисертації виконано комплексне дослідження проблеми забезпечення герметичності та корозійної стійкості трубопроводів великого діаметра засобами ультразвукового неруйнівного контролю. Проведено ґрунтовний аналіз об'єкта контролю, умов експлуатації трубопровідних систем, характерних дефектів та чинної нормативної бази, що регламентує вимоги до їх діагностики та безпечної експлуатації. Обґрунтовано доцільність використання ультразвукових методів, зокрема технології LRUT, як базового інструменту для виявлення внутрішніх, підповерхневих та корозійних пошкоджень, а також для оцінювання залишкової товщини стінки труб.

У роботі розроблено структурну та функціональну схему автоматизованої інтелектуальної системи ультразвукового контролю, виконано необхідні інженерні розрахунки акустичної та електронної частин, а також сформовано алгоритмічне забезпечення системи. Проведене моделювання процесів поширення сигналу та обробки результатів підтвердило працездатність обраних технічних рішень і продемонструвало можливість підвищення точності та надійності діагностування дефектів у режимі реального часу. Запропоновані методики визначення герметичності та вимірювання товщини стінки труби дозволяють здійснювати об'єктивне оцінювання технічного стану трубопроводів та прогнозувати їх залишковий ресурс.

Інтелектуальний підхід до аналізу даних, інтеграція методів автоматизації та використання комп'ютерного моделювання забезпечили підвищення ефективності процесу контролю, мінімізацію впливу людського фактора та створили передумови для практичного впровадження розробленої системи у промислових умовах. Додатковою перевагою роботи є опрацювання питань комерціалізації технології в рамках стартап-проєкту, що свідчить про її прикладну спрямованість та ринкову перспективність.

У цілому, поставлена у дисертації мета досягнута, всі основні завдання виконані, отримані результати мають наукову новизну та практичне значення

і можуть бути використані у системах технічної діагностики та неруйнівного контролю трубопровідних мереж.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

- [1] Olympus. Thickness Gage Tutorial. – Режим доступу URL: <https://www.olympus-ims.com/en/ndt-theory/thickness-gage/>
- [2] Notch Frequency Prediction of Prestressed Seven-Wire Steel Strand Based on Ultrasonic Guided Wave – Режим доступу URL: <https://www.mdpi.com/2075-5309/15/17/3166>
- [3] Systematic Evaluation of Ultrasonic In-Line Inspection Techniques for Oil and Gas Pipeline Defects Based on Bibliometric Analysis. – Режим доступу URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/24/9/2699>
- [4] Non-destructive testing technology for corrosion wall thickness reduction defects in pipelines based on electromagnetic ultrasound. – Режим доступу URL: <https://www.frontiersin.org/journals/earth-science/articles/10.3389/feart.2024.1432043/full>
- [5] Electronic Components Datasheet Search. – Режим доступу URL: <https://www.alldatasheet.com/datasheetpdf/pdf/1642038/ESPRESSIF/ESP32S3.html>
- [6] Куц, Ю. В. Новітні системи та технології. Частина I. Загальні питання побудови та опрацювання даних в комп'ютерно-інтегрованих системах НКТД [Електронний ресурс] / Ю. В. Куц, Ю. Ю. Лисенко, А. С. Момот ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 123 с
- [7] Сучков Г.М. Математичне моделювання процесу реєстрації ультразвукових хвиль у сталевому металопрокаті перетворювачем електромагнітного типу. Частина 1/Г.М. Сучков, М.І. Романюк, О.М. Петрищев та ін // Електроніка та зв'язок. Київ: НТУУ "КПІ", 2012. - № 6. - С. 94-108.
- [8] Карлова О.В. Інформаційна технологія аналізу характеристик сигналів вихроstromового неруйнівного контролю: дис... магістр. техн. наук ; М-во освіти і науки, молоді та спорту України, «Національний Авіаційний Університет», наук. кер. Куц Ю.В. – Київ, 2012, - 103с.

- [9] Бистра І.М. Вдосконалення методу та засобів ультразвукової товщинометрії виробів з матеріалів зі значним загасанням: дис... канд. техн. наук ; М-во освіти і науки, молоді та спорту України, «Національний Авіаційний Університет», наук. кер. Куц Ю.В. – Київ, 2014, - 162с.
- [10] Сучасні методи та засоби ультразвукового контролю з використанням статистичної обробки сигналів. Навч. посібник / В.К. Качанов, О.В. Мозговий, О.І. Пітолін, В.П. Попко, Г.Ю. Рябов /за ред. В.П. Бабака. – К.: ІСДО, 1994. 132 с. 6. Галаган Р. М. Теоретичні основи ультразвукового неруйнівного контролю [Електронний ресурс]: підручник / Р. М. Галаган. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 263 с.
- [11]. Куц Ю. В. Статична фазометрія / Ю.В. Куц, Л.М. Щербак – Тернопіль: Вид-во Тернопільського технічного ун-ту імені Івана Пулюя, 2009. – 383с.
- [12] Близнюк О.Д. Застосування методу статистичної фазометрії в ультразвуковому неруйнівному контролі / О.Д. Близнюк, В.С. Єременко, Ю.В. Куц, І.М. Лапіга, С.В. Шенгур // Збірник наук. праць «Неруйнівний контроль матеріалів і конструкцій» Серія: Фізичні методи та засоби контролю середовищ, матеріалів та виробів. НАНУ Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка. – Випуск 14. –2009. – С. 50–55.
- [13]. Ричард Лайонс. Цифровая обработка сигналов: Второе издание. Пер. с англ. –М.: ООО «Бином-Пресс», 2007. – 656 с.
- [14]. Поверхнева хвиля Релея [Електронний ресурс]. – Режим доступу до ресурсу:https://studme.org/206764/tehnika/uprugie_volny_ogranichennyh_sreda
- [15]. A Complete Guide To Ultrasonic Flaw Detection Technique [Електронний ресурс]. – Режим доступу до ресурсу: <https://www.modsonic.com/ultrasonicflaw-detectionguide/#:~:text=Ultrasonic%20Testing%20or%20Ultrasonic%20Flaw,%2C%20characterize%20materials%2C%20and%20more.>
- [16]. Сучков Г.М. Математичне моделювання процесу реєстрації ультразвукових хвиль у сталевому металопрокаті перетворювачем електромагнітного типу. Частина 1/Г.М. Сучков, М.І. Романюк, О.М. Петрищев та ін // Електроніка та зв'язок. Київ: НТУУ "КПІ", 2012. - № 6. - С. 94-108.

- [17]. Богданов Є.А. "Основи технічної діагностики нафтогазового обладнання". – К.: Вища школа 2006 р. 21. Kuts, Y., Protasov, A., Lysenko, L., Alexiev, A. and Dugin O., 2019, "Optimization of Analysis Time of Pulsed Eddy Current Non-destructive Testing Signals", Bulgarian Society for NDT. Int. Journal "NDT Days". 2(1). pp. 58-63.
- [18]. Баженов В.Г. Електроніка. Лабораторний практикум: навчальний посібник / В. Г. Баженов, Є. Ф. Суслов, Ю. Ю. Лисенко, А.С. Момот; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 70 с.
- [19]. Куц Ю.В. Новітні системи та технології: навчальний посібник / Ю. В. Куц, Ю. Ю. Лисенко, А.С. Момот; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 123 с.
- [20]. Маєвський С.М. Основи побудови систем аналізу сигналів у неруйнівному контролі / С.М. Маєвський, В.П. Бабак, Л.М. Щербак. – К.: Либідь, 1993. – 200 с. 96
- [21]. Розроблення стартап-проекту [Електронний ресурс] : Методичні рекомендації до виконання розділу магістерських дисертацій для студентів інженерних спеціальностей / За заг. ред. О.А. Гавриша. – Київ : НТУУ «КПІ», 2016. – 28 с
- [22]. Гавриш, О. А. Розробка стартап-проектів. Конспект лекцій [Електронний ресурс] : навчальний посібник для студентів спеціальностей 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» та 152 – «Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка» / О. А. Гавриш, К. О. Бояринова, К. О. Копішинська ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові данні (1 файл: 2,88 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 188 с. – Назва з екрана.
- [23]. Антонюк В. С., Полонський Л. Г., Аверченков В. І., Малахов Ю. А. Методологія наукових досліджень : навч. посіб. Київ : НТУУ КПІ, 2015. 276 с.
- [24]. Галаган Р. М. Теоретичні основи ультразвукового неруйнівного контролю: підручник / Р. М. Галаган. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 263 с.
- [25]. Галаган Р.М. Ультразвукова система діагностики технічного стану порцелянових ізоляторів / Р.М. Галаган, В.С. Єременко // Вісник

Національного Технічного Університету України «КПІ». Серія приладобудування. – Київ. – 2011. – № 42. – С. 62-70.

[26]. Спеціальні розділи математики: конспект лекцій : навч. посіб. / КПІ ім. Ігоря Сікорського ; уклад.: Ю. В. Куц, Ю. Ю. Лисенко, В. М. Сокурєнко. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2024. – 192 с.

[27]. Enhancing neural network efficiency in automated image analysis for thermal nondestructive testing / D. Storozhyk, A. Protasov, Y. Kuts, O. Muraviov, I. Lysenko, Y. Mirchev // Journal of Theoretical and Applied Mechanics, Sofia, Vol.54 (2024) pp. 242-252

[28]. Статистичні методи визначення залежностей між випадковими величинами: навчальний посібник / Ю. В. Куц, Ю. Ю. Лисенко; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. – 115 с.

[29]. Using the RedPitaya platform in automated eddy current testing / Levchenko O., Aleksiev A., Kuts Y., Lysenko I. // International Journal “NDT Days”, BSNDT: Bulgaria, 2023. – Volume 6, Issue 4. – 194-201 pp.

[30]. G. Mook. Studies of eddy current probes for inspection of aluminium alloy structure welds using smartphone-based flaw detector / G. Mook, V. Uchanin, Ju. Lysenko //The Paton Welding Journal, 2024, 12, 2024, pp. 42–48.

[31]. Lysenko I. Investigation of Phase Signal Processing Method for Ultrasonic Echo-Impulse Thickness Measuring / I. Lysenko, A. Aleksiev, H. Bohdan, R. Halagan, Y. Kuts // International Journal “NDT Days”, BSNDT: Bulgaria, 2024. – Volume 7, Issue 4. – 161-165 pp. ISSN: 2603-4018, eISSN: 2603-4646

[32]. Investigation of the Impact of Limited Penetration Depth on the Effectiveness of Eddy Current Testing of Aluminum Alloys / V. Uchanin, I. Lysenko, Y. Kuts, Y. Mirchev // International Journal “NDT Days”, BSNDT: Bulgaria, 2024. – Volume 7, Issue 4. – 213-217 pp. ISSN: 2603-4018, eISSN: 2603-4646

[33]. Effectiveness of the technology of automated eddy current flaw detection with array probe / Iu. Lysenko, Yu. Kuts, Y. Mirchev, O.E. Levchenko, S.M. Glabets // The Paton Welding Journal, 2024, 11, 2024, pp. 30–35.

