


**Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу**



На правах рукопису

УДК 620.179

**РИБЦЬКИЙ ІГОР ВОЛОДИМИРОВИЧ**

**УДОСКОНАЛЕННЯ АКУСТИЧНОГО МЕТОДУ КОНТРОЛЮ  
ТОВЩИНИ МЕТАЛОКОНСТРУКЦІЙ**

**Спеціальність 05.11.13 – Прилади і методи контролю та  
визначення складу речовин**

**Дисертація на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук**

**Науковий керівник:  
доктор технічних наук,  
професор Карпаш О. М.**

**Івано-Франківськ – 2008**



d 332

## ЗМІСТ

<b>ВСТУП .....</b>	<b>5</b>
<b>РОЗДІЛ 1</b>	
<b>АНАЛІЗ МЕТОДІВ ТА ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ КОНТРОЛЮ</b>	
<b>ТОВЩИНИ МЕТАЛОКОНСТРУКЦІЙ.....</b>	<b>11</b>
1.1 Характеристика об'єкта контролю.....	11
1.2 Аналіз методів та засобів контролю товщини металоконструкцій.....	21
1.2.1 Магнітні методи та засоби контролю товщини.....	22
1.2.2 Контроль товщини металоконструкцій радіохвильовими методами.....	23
1.2.3 Радіаційний метод товщинометрії.....	25
1.2.4 Акустичні методи та засоби контролю товщини.....	27
1.3 Вибір методу та аналіз проблем, які виникають при розробці акустичних методів контролю товщини металоконструкцій.....	35
1.4 Вибір та обґрунтування напрямку досліджень.....	39
<b>РОЗДІЛ 2</b>	
<b>ТЕОРЕТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ БЕЗКОНТАКТНОГО</b>	
<b>АКУСТИЧНОГО МЕТОДУ КОНТРОЛЮ ТОВЩИНИ</b>	
<b>МЕТАЛОКОНСТРУКЦІЙ .....</b>	<b>41</b>
2.1 Розроблення фізичної моделі процесу безконтактного акустичного контролю металоконструкцій.....	41
2.2 Розроблення математичної моделі узгоджуючого шару безконтактного п'єзоперетворювача.....	45
2.3 Визначення фізичних та геометричних параметрів та вибір матеріалу узгоджуючого шару.....	52

2.4	Методика розрахунку втрат енергії акустичних коливань при безконтактному акустичному вимірюванні товщини елементів металоконструкцій.....	57
2.4.1	Визначення втрат енергії акустичних коливань при односторонньому доступі до поверхні об'єкта контролю.....	59
2.4.2	Визначення втрат енергії акустичних коливань при двосторонньому доступі до поверхонь об'єкта контролю.....	63
2.5	Побудова діаграми направленості безконтактного акустичного перетворювача та визначення її впливу на чутливість методу.....	64
2.6	Розроблення методу безконтактного акустичного контролю залишкової товщини та величини корозійних втрат металу металоконструкцій.....	68
	Висновки до розділу .....	69

### **РОЗДІЛ 3**

#### **ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЩОДО РОЗРОБЛЕННЯ НОВОГО МЕТОДУ ОБРОБЛЕННЯ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИГНАЛІВ.....**

3.1	Розроблення теоретичних основ методу оброблення дефектоскопічної інформації.....	71
3.2	Взаємкореляційний метод оброблення дефектоскопічної інформації.....	74
3.3	Розроблення нового методу оброблення дефектоскопічної інформації.....	78
	Висновки до розділу.....	85

### **РОЗДІЛ 4**

#### **ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ УДОСКОНАЛЕНОГО АКУСТИЧНОГО МЕТОДУ КОНТРОЛЮ ТОВЩИНИ**

	<b>ЕЛЕМЕНТІВ МЕТАЛОКОНСТРУКЦІЙ.....</b>	<b>87</b>
4.1	Опис експериментальної установки.....	88

4.2	Методика експериментальних досліджень.....	95
4.3	Порівняльні лабораторні вимірювання товщини елементів металоконструкцій різними методами.....	109
4.4	Метрологічна оцінка удосконаленого методу контролю товщини .....	115
	Висновки до розділу .....	120

## **РОЗДІЛ 5**

### **РОЗРОБЛЕННЯ ДОСЛІДНОГО ВЗІРЦЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЇ УСТАНОВКИ ДЛЯ КОНТРОЛЮ ТОВЩИНИ ЕЛЕМЕНТІВ**

#### **МЕТАЛОКОНСТРУКЦІЙ ТА МЕТОДИКИ ЇЇ ВИКОРИСТАННЯ.....**

122

5.1	Розроблення дослідного взірця установки для контролю товщини елементів металоконструкцій.....	123
5.2	Методика неруйнівного контролю товщини металоконструкцій в промислових умовах.....	128
5.3	Промислові випробування дослідно-експериментальної установки та методики контролю.....	130
	Висновки до розділу.....	134

#### **ВИСНОВКИ.....**

135

#### **СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....**

137

#### **ДОДАТКИ.....**

149

## ВСТУП

**Актуальність теми.** Аналіз технічного стану обладнання та машин у вітчизняній промисловості, проведений Радою національної безпеки і оборони України, показав, що його спрацювання перевищує 60%. Більшість нафтогазопроводів в Україні експлуатуються у важких умовах понад 30 років без суттєвого оновлення.

Забезпечення технологічної безпеки обладнання та машин є одним із пріоритетних завдань промисловості.

Застосування методів технічної діагностики та неруйнівного контролю є одним з найефективніших методів попередження відмов металоконструкцій.

Базовим параметром, що характеризує технічний стан металоконструкцій, є товщина його відповідальних елементів. Операція контролю товщини є найпоширенішою у технічному діагностуванні і входить практично в усі розрахункові вирази для визначення несучої здатності конструкції. Серед існуючих методів неруйнівного контролю товщини елементів металоконструкцій найбільш ефективним є акустичний.

Проте, необхідність забезпечення якісного акустичного контакту між п'єзоперетворювачем та поверхнею об'єкта контролю (ОК) за допомогою контактних рідин значно обмежує його застосування.

Принципове вирішення даного завдання може бути знайдене шляхом використання безконтактних акустичних методів, що можуть базуватися на ефектах термоакустичного, електричного та електромагнітного полів, а також на використанні повітряного акустичного зв'язку. Проте всі вказані методи мають технічні, технологічні та вартісні обмеження у застосуванні.

Таким чином, питання удосконалення акустичних методів та засобів контролю залишкової товщини, ерозійного та корозійного пошкодження металоконструкцій є актуальним, а його вирішення дасть можливість одержати достовірну інформацію, необхідну для визначення фактичного

технічного стану, підвищити продуктивність контролю та знизити його вартість.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.**

Дисертаційна робота виконувалася у рамках Державної науково-технічної програми «Ресурс» (затвердженої постановою КМУ від 8.10.2004, № 1331), галузевої науково-технічної програми НАК «Нафтогаз України на 2002 – 2007 рр. «Створення, освоєння випуску та впровадження у виробництво комплексу технічних засобів і технологій неруйнівного контролю та технічної діагностики трубних колон, бурового та нафтогазапромислового обладнання й інструменту в процесі розроблення нафтових родовищ. Організаційне, технічне, методичне та кадрове забезпечення» та науково-дослідної роботи «Розробка, виготовлення та впровадження приладу для вимірювання корозійного зносу трубних виробів» (договір № 53НДР/2004 НВФ «Зонд» із ДК «Укртрансгаз»). Ці роботи виконувалися за безпосередньою участю автора.

**Мета роботи** полягає у вирішенні науково-практичної задачі в галузі приладів та методів неруйнівного контролю матеріалів та виробів - удосконаленні акустичного методу безконтактного контролю товщини стінки металоконструкцій та розробці експериментального взірця приладу для його реалізації.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі **задачі**:

- проаналізувати сучасний стан досліджень у галузі акустичних методів і засобів неруйнівного контролю матеріалів та конструкцій;
- удосконалити метод безконтактного акустичного контролю товщини металоконструкцій;
- провести математичне моделювання процесу поширення ультразвукових коливань від перетворювача до ОК, у тілі ОК та здійснити розрахунок втрат енергії акустичних коливань з метою визначення характеристик узгоджуючого шару безконтактних перетворювачів;

- розробити новий метод оброблення дефектоскопічної інформації для підвищення чутливості безконтактного акустичного способу вимірювання товщини металоконструкцій;

- розробити, виготовити та здійснити промислову апробацію експериментального зразка пристрою для контролю товщини стінки металоконструкцій та методики його застосування.

*Об'єктом дослідження* є технічний стан металоконструкцій довготривалої експлуатації.

*Предметом дослідження* є методи і засоби акустичного контролю металоконструкцій.

*Методи дослідження.* Для вирішення поставлених в роботі задач використовувались методи неруйнівного контролю, математичного моделювання, кореляційного аналізу та сучасні методи статистичного оброблення експериментальних даних (штучні нейронні мережі). Методи планування експерименту та теорії ймовірності використовувались у ході виконання експериментальних досліджень. Для розроблення технічного засобу використовувались методи схемо- та системотехніки. Для розроблення програмного забезпечення для оброблення вимірювальної інформації використовувались методи алгоритмізації та програмування.

**Наукова новизна одержаних результатів** полягає в тому, що:

- вперше запропоновано зменшення втрат енергії акустичних коливань здійснювати одночасно шляхом застосування узгоджувачів та сучасного методу оброблення дефектоскопічної інформації на базі штучних нейронних мереж, що дало змогу підвищити чутливість методу порівняно зі стандартним на 32 дБ;

- вперше розроблено новий інтелектуальний спосіб оброблення дефектоскопічної інформації, що передбачає використання штучних нейронних мереж, який, порівняно з традиційним взаємкореляційним методом, дав змогу збільшити діапазон вимірювання товщини стінки

металоконструкцій на 37,5% та на 4,6% зменшити приведену до діапазону (8,98мм) похибку вимірювань;

- удосконалено математичну модель для розрахунку характеристик узгоджуючого шару безконтактного ультразвукового перетворювача шляхом врахування втрат енергії акустичних коливань на межі розподілу п'єзоелемент/повітря, у повітрі, на межі розподілу повітря/ОК та в матеріалі ОК, що дало змогу здійснити вибір матеріалу узгоджуючого шару за умов відомих характеристик об'єкта контролю та теоретично обґрунтувати можливість проведення контролю;

- знайшов подальший розвиток метод безконтактного акустичного контролю, який полягає у використанні повітря як середовища для створення акустичного контакту між перетворювачем та ОК, що дало змогу розробити конструкцію ультразвукового п'єзоелектричного перетворювача (ПЕП) для безконтактного вимірювання товщини.

**Практичне значення одержаних результатів** полягає в розробленні технічного засобу, який дає можливість проводити акустичний контроль металоконструкцій без використання контактної рідини, що розширює можливості застосування методу в тому числі і за від'ємних температур (пройшов успішну дослідно-виробничу апробацію на виробничих об'єктах ДК «Укртрансгаз», акт промислової апробації від 4.06.2008р.), а також проекту методики його застосування. Розроблений метод, завдяки використанню нової конструкції п'єзоперетворювача, є корисним інструментом для швидкого одержання точних значень товщини металоконструкцій різного призначення. Даний матеріал впроваджено в навчальний процес на кафедрі технічної діагностики та моніторингу (акт впровадження від 22.07.2008р.).

**Особистий внесок здобувача.** Основні положення та результати дисертаційної роботи одержані автором самостійно. Зокрема, в опублікованих у співавторстві роботах, автором особисто:



- запропоновано новий підхід до удосконалення безконтактного акустичного методу контролю товщини металоконструкцій, який передбачає комплексне використання розроблених методів зменшення втрат енергії акустичних коливань за допомогою узгоджувачих шарів та сучасних методів оброблення дефектоскопічної інформації на базі штучних нейронних мереж, а також запропоновано шляхи реалізації удосконаленого методу контролю товщини стінки металоконструкцій у вигляді експериментальної установки;

- розроблено методику та проведено комплекс експериментальних досліджень з метою перевірки адекватності математичної моделі, що дало змогу вибрати матеріал для виготовлення узгоджувачих шарів, а також визначено дійсні характеристики розробленого безконтактного перетворювача та методу контролю загалом;

- розроблено конструкцію безконтактного ультразвукового перетворювача та функціональні схеми експериментальної установки, а також розроблено алгоритм її роботи;

- виконано метрологічну оцінку результатів вимірювань, отриманих за допомогою експериментальної установки.

**Апробація роботи.** Основні результати дисертаційної роботи доповідались і обговорювались на 10-ій міжнародній конференції-виставці «Неруйнівний контроль-2008» (м. Київ, 2008р.), на 9-ій міжнародній конференції виставці «Проблеми корозії та протикорозійного захисту матеріалів «Корозія-2008» (м. Львів, 2008р.), на 8-ій міжнародній науково-практичній конференції «Нафта і газ України-2004» (м. Київ, 2004р.), на міжнародних конференціях «Фізичні методи та засоби контролю середовищ, матеріалів та виробів «Леотест-2007» та «Леотест-2008» (м. Славське, Львівської області), на міжнародній науково-технічній конференції «Ресурсозберігаючі технології в нафтогазовій енергетиці» «ІФНТУНГ-40» (м. Івано-Франківськ, 2007р.), на 4-ій науково-технічній конференції і виставці «Сучасні прилади і технології для неруйнівного контролю і технічної діагностики промислового обладнання» (м. Івано-Франківськ,

2005р.), на міжнародній науково-технічній конференції молодих учених «Техніка і прогресивні технології в нафтогазовій інженерії» (м. Івано-Франківськ, 2008р.) та на семінарах кафедри «Методи та прилади контролю якості і сертифікації продукції» Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу (ІФНТУНГ) у 2006-2008 р.р..

**Публікації.** За темою дисертаційної роботи опубліковано 15 друкованих праць, з них 8 – статей у фахових наукових виданнях, затверджених ВАК України, в тому числі 1 – одноособова, 7 - тез доповідей на конференціях.

**Структура та об'єм роботи.** Дисертація складається зі вступу, 5 розділів, списку використаних джерел та додатків. Дисертація викладена на 125 сторінках. Крім того робота проілюстрована 57 рисунками, включає 7 таблиць, список використаних джерел із 108 найменувань та 8 додатків.

## РОЗДІЛ 1

### АНАЛІЗ МЕТОДІВ ТА ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ КОНТРОЛЮ ТОВЩИНИ МЕТАЛОКОНСТРУКЦІЙ

#### 1.1 Характеристика об'єкта контролю

Незалежність держави та розвиток економіки на сучасному етапі залежать від її забезпеченості енергоресурсами. Ефективність роботи паливно-енергетичного комплексу визначається на технічному рівні швидкістю впроваджень нових досягнень науки і техніки та рівнем підготовки інженерного складу. На забезпечення паливно-енергетичного комплексу високоефективними технічними засобами і технологіями та кваліфікованими фахівцями робиться наголос в Енергетичній стратегії України до 2030 року [1].

Україна після розпаду СРСР в спадщину отримала розгалужену мережу металоконструкцій різноманітного призначення. Лише на об'єктах базових галузей експлуатується понад 35 млн. тонн несучих металевих конструкцій і понад 250 млн. м<sup>3</sup> залізобетонних конструкцій, значна частина яких вичерпала свій ресурс [2]. Газотранспортна система України включає 37 тис. км газопроводів, 121 компресорну станцію, в яких встановлено 800 газоперекачувальних агрегатів загальною потужністю 5.5 млн. кВт, 1324 газорозподільчі станції, 13 підземних газосховищ з активною ємністю 43 млрд. м<sup>3</sup> [3] і на сьогоднішній день є найбільшою та водночас найстарішою в Європі. Спрацювання більшої частини обладнання та машин у вітчизняній промисловості перевищує 60% і за останні 15-20 років не оновлювалося [4]. В основному такий стан речей пов'язаний з двома проблемами: технічного та організаційного характеру. Відповідно, шляхи вирішення даної проблеми є наступними:

- реконструкція (модернізація) існуючого парку металоконструкцій, що, зважаючи на вартість та обсяги робіт, здійснити на даний час

практично не можливо;

- розроблення наукових основ та впровадження в практику створених методів та засобів визначення фактичного технічного стану металоконструкцій з метою прогнозування їх залишкового ресурсу.

Через низький рівень фінансування ремонтних робіт та складний фінансовий стан суб'єктів господарської діяльності, заміна та оновлення основних фондів практично припинилося. Ця проблема в основному пов'язана з постійним зростанням вартості як будівництва та ремонту так і введення в експлуатацію нових об'єктів. Показовим є те, що наприклад на початку 90-их років минулого століття заміна прокородованої труби нафтоперегонної установки становила декілька сотень доларів, а недовиробіток продукції за час простою спричиняв збитки до 20 000 доларів в годину. Заміна пошкодженого корозією котла або конденсатора на великій електростанції потужністю 300 МВт на той час могла призвести до не виробітку електроенергії на 60 000 доларів в день. Загальна вартість недовиробітку електроенергії і тепла із-за корозійних простоїв складала десятки мільйонів доларів в рік [5]. В деяких випадках вартість ліквідації наслідків аварій може значно перевищувати вартість будівництва об'єктів, що вийшли з ладу. Так, наприклад, у 1987 році на нафтопереробному комплексі в Японії внаслідок часткового розриву днища і відриву стінки від днища резервуара ємністю 50 тис. м<sup>3</sup> сталося аварійне витікання значної кількості нафтопродуктів. Збитки із врахуванням витрат на очистку акваторії склали 150 млн. доларів, що в 250 раз більше кошторисної вартості будівництва резервуара [6].

Отже, низькі темпи оновлення зазначених об'єктів та невідповідаючі обсяги заходів їх технічного обслуговування вимагають прийняття рішень щодо питань управління експлуатаційним строком їх надійного та безпечного використання шляхом визначення фактичного технічного стану і встановлення нових строків експлуатації, які перевищують передбачені

проектною та експлуатаційною документацією строки, а також обов'язкових умов реалізації експлуатації в цей період [7, 8].

Актуальність проблеми визначення фактичного технічного стану споруд, конструкцій, обладнання та інженерних мереж в основних галузях економіки нашої держави зумовлена незадовільним їх технічний станом, що може призвести не тільки до зупинки об'єкту, але і спричинити виникнення аварій та надзвичайних ситуацій техногенного характеру.

Відомо, що в Україні протягом 2007 року зареєстровано 196 надзвичайних ситуацій техногенного характеру, в наслідок яких орієнтовні матеріальні збитки перевищили 153,5 млн. грн. та загинуло 495 осіб (в тому числі 48 дітей). За масштабами надзвичайні ситуації техногенного характеру, які сталися протягом 2007, розподілилися на: державного рівня – 3; регіонального рівня – 11; місцевого рівня – 96; об'єктового рівня – 86 [9].

Що до аварій, які виникають в нафтогазовому секторі та їх причин, коротко проаналізуємо основні типи відмов металоконструкцій довготривалої експлуатації, виділимо основні параметри, що впливають на фактичний технічний стан металоконструкції і які необхідно контролювати.

Магістральні трубопроводи є найбільш капіталомісткі споруди нафтогазового комплексу. Продовження терміну експлуатації магістральних трубопроводів має велике значення, оскільки вартість кожного нового газопроводу є на порядок вищою, чім побудованих раніше. Трубно сталі під впливом внутрішніх і зовнішніх навантажень, неперервно високих напружень в стінках трубопроводів піддаються процесам старіння [10]. В наслідок довготривалої експлуатації відбуваються незворотні деградаційні процеси, підвищується можливість крихкого та повільного руйнування металу, що є наслідком накопичення дефектів, внутрішніх мікронапружень і зниження захисних властивостей ізоляційних покриттів. Середній термін експлуатації магістральних газопроводів досягає 23 років [11].

Причини аварій на магістральних газопроводах в 1990-2000 роках в частках від загальної кількості були наступні: зовнішня корозія – 28,9 %

(рис. 1.1), механічне пошкодження – 19,0 %, брак будівельно-монтажних робіт – 21,9 %, дефекти труб – 11,4 %, стихійні лиха – 9,5%. Для Європейських країн розподіл аварій на газопроводах за 1970-1998 роки в частках від загальної кількості наступний: зовнішній вплив – 50 %, дефекти будівництва та матеріалу труб – 18 %, корозія – 15 %, рух ґрунтів – 6 %, помилка експлуатації – 5 %, інше – 6 % [10].

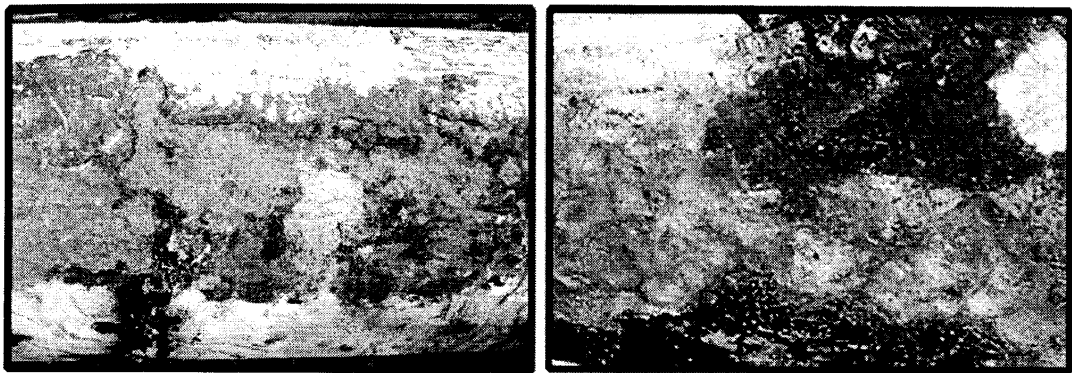


Рис. 1.1. Корозійні пошкодження зовнішньої поверхні труби магістрального газопроводу

Резервуарні парки є найважливішими ланками нафтопровідної системи. Технічний стан резервуарів і їх корисна місткість визначає стійке безперебійне постачання нафти (нафтопродуктів) споживачам і організацію планових зупинок магістральних трубопроводів для проведення ремонтних робіт з усунення виявлених внутрішньо трубним діагностуванням дефектів [12].

На всіх основних етапах життєвого циклу – у процесі виготовлення, монтажу, та експлуатації – в елементах конструкції металевих вертикальних резервуарів можуть виникати і розвиватись дефекти. У процесі експлуатації резервуари зазнають мало циклове навантаження, зумовлене процесами наливання-зливання продукту, що зберігається, а також пов'язаного з ним впливом корозійно-активних середовищ. Під дією цих чинників у конструктивних елементах резервуарів відбуваються накопичення втомних і

корозійних пошкоджень, які сприяють зростанню дефектів, що з'явилися під час виготовлення, монтажу і зародженню нових дефектів.

Основною причиною виводу резервуара з експлуатації є корозійні пошкодження, які складають 72,2 % від загальної кількості. Інші причини виходу з ладу резервуара складають значно менші частки від загальної кількості, зокрема: відмова обладнання – 22 %, дефекти зварного шва – 3,2 %, дефекти основного металу – 2 %, втрата геометричної форми – 0,6 % [6].

Іншим характерним прикладом є причини аварійності насосно-компресорних труб. Аналіз причин відмов даних труб показав, що корозійне пошкодження складає 40 % від загальної кількості аварій, пов'язаних з відмовою насосно-компресорних труб [13, 14].

Проведений аналіз показав, що зменшення товщини стінки металоконструкції, як інтегральної характеристики її несучої здатності, спричинене, як правило, корозійними пошкодженнями є одною з основних причин їх відмов та виникнення аварій.

Згідно із статистичним даними, щорічні втрати металу, спричинені корозією, в Україні складають 12% від загальної маси металофонду, що відповідає втраті до 30% щорічного виробництва металу [15, 16].

Досвід показує, що контроль корозійних пошкоджень дозволяє вірно складати графіки та скоротити простої обладнання при ремонтно-профілактичних роботах, запобігати непередбачуваним виходам обладнання з ладу та отримувати інформацію, необхідну для розробки ефективних засобів боротьби з корозією [17, 18].

Як бачимо з наведених фактів, в більшості випадків саме зменшення залишкової товщини стінки металоконструкції, яке спричинене корозійним та ерозійним зносом призводить до виходу з ладу обладнання та виникнення аварійних ситуацій. Аварії на таких об'єктах супроводжуються значними матеріальними та людськими втратами, я також можуть загрожувати енергетичній незалежності держави (рис. 1.2).



Рис.1.2. Розрив магістрального газопроводу, спричинений зменшенням товщини стінки

Своєчасне проведення контролю технічного стану та виявлення дефектів у металі обладнання дасть можливість запобігти даним аварійним ситуаціям та зменшити негативні наслідки від їх виникнення. На забезпечення технологічної безпеки машин, споруд та обладнання промисловості, зокрема у нафтогазпромисловому комплексі, спрямована державна науково-технічна програма "Ресурс", затверджена постановою Кабінету Міністрів N 1331 від 8 жовтня 2004 року та галузева науково-технічна програма на 2004-2008 рр. "Створення, освоєння випуску та впровадження у виробництво комплексу технічних засобів і технологій неруйнівного контролю та технічної діагностики трубних колон, бурового та нафтопромислового інструменту при розробці нафтогазових родовищ. Організаційне, наукове, методичне та кадрове забезпечення" [19]. Забезпечення технологічної безпеки в основних галузях економіки, запобігання виникненню аварій і надзвичайних ситуацій техногенного характеру є складовою створення екологічно та техногенно-безпечних умов життєдіяльності кожної особи зокрема і суспільства загалом, а отже, невід'ємною частиною державної політики національної безпеки і державного будівництва [20].



Визначення фактичного технічного стану та залишкового ресурсу старіючих металоконструкцій та обладнання є комплексною задачею, яку можна зобразити структурною схемою зображеною на рис. 1.3 [21].

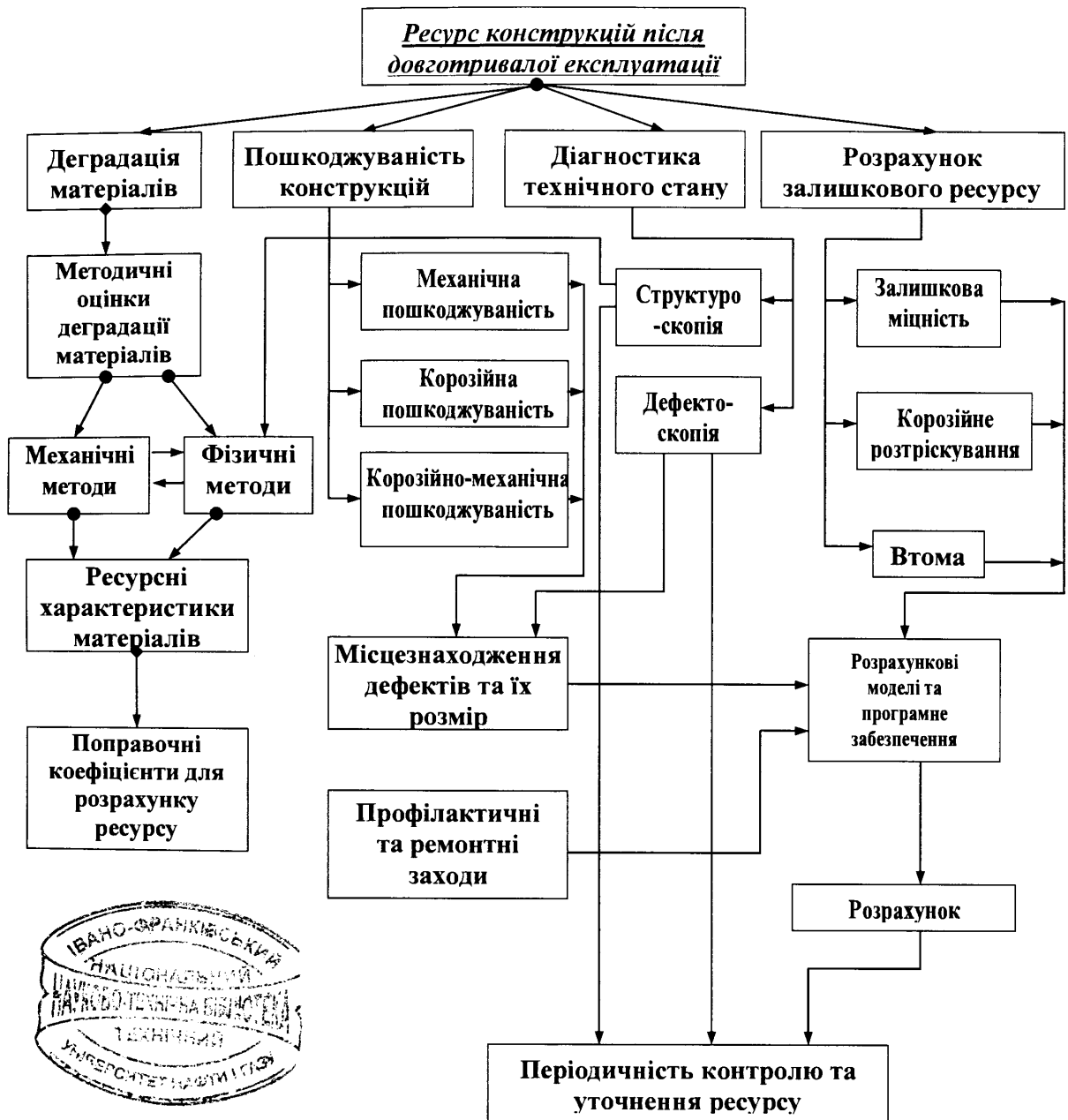


Рис.1.3. Структурна схема визначення залишкового ресурсу старіючих конструкцій

Згідно з цією схемою виділимо такі основні задачі, які необхідно вирішувати для достовірного визначення залишкового ресурсу:

- а) оцінка деградації конструкційних матеріалів у процесі експлуатації;
- б) встановлення характеру пошкоджуваності елементів конструкції та методи її усунення;
- в) розробка інструменту для діагностики технічного стану матеріалів і елементів конструкції;
- г) розробка методології оцінки напружено-деформованого стану елементів конструкцій з конструктивними концентраторами напружень і дефектами типу тріщин при дії експлуатаційних навантажень і середовищ та методів розрахунку їх залишкового ресурсу.

Зрозумілим є те, що тільки у випадку, коли оперативний персонал володіє достовірною інформацією про стан кожного елемента конструкції, він може найбільш ефективно керувати роботою того чи іншого об'єкта, а саме: приймати рішення, які направлені на мінімізацію затрат на експлуатацію системи; своєчасно виявляти несправності окремих елементів і локалізувати їх; провести ремонт у найкоротші терміни. Використання методів регулярної діагностики обладнання знижує витрати запасних частин приблизно в п'ять разів, у той час вартість поточного ремонту зменшується і збільшується міжремонтний період у два рази, знижується втрата енергоресурсів [6].

Таким чином, підсумовуючи вищесказане, для визначення фактичного технічного стану металоконструкції довготривалої експлуатації необхідно мати її дійсні значення фізико-механічних характеристик та геометричних розмірів, зокрема товщини відповідальних елементів, а також результати дефектоскопічного обстеження. Для підвищення точності визначення фактичного технічного стану необхідно проводити не точковий, а неперервний контроль конструкції, оскільки розрахунок проводиться на основі мінімально допустимих значень зазначених характеристик.

На даний час для неруйнівного визначення фізико-механічних характеристик існує ряд системи та приладів, які дають змогу швидко та якісно оцінити як структуру матеріалу так і його міцнісні характеристики. В основі даних приладів можуть бути покладені такі методи: акустичний,

магнітний, вихреструмний та термоелектричний [22, 23]. Проте найбільш широкого застосування найшли магнітні та вихреструмні методи контролю фізико-хімічних характеристик металоконструкцій.

Вимірювання товщини елементів металоконструкцій є найпоширенішою операцією при визначенні фактичного технічного стану будь-якої металоконструкції, оскільки вона:

- а) найбільш технологічно проста операція вимірювання, яка не потребує фахівців високої кваліфікації;
- б) промисловість достатньо забезпечена засобами вимірювання товщини. На ринку приладів знаходяться понад ста типів товщиномірів різних конструкцій та різних фірм виробників;
- в) значення товщини виробу входить практично у всі розрахункові вирази для оцінки міцнісних характеристик матеріалів та виробів.

Контроль геометричних розмірів металоконструкцій проводиться як при виготовленні так і при експлуатації та включає вимірювання наступних параметрів (рис. 1.4).

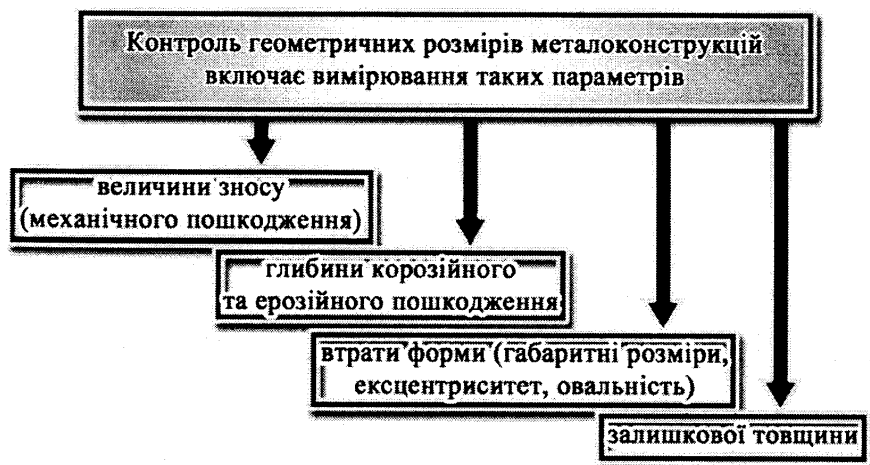


Рис.1.4. Параметри, які визначаються при контролі геометричних розмірів металоконструкцій

Для контролю геометричних розмірів та дефектоскопії тіла металоконструкції в основному використовують акустичний метод, який

володіє високою точністю вимірювань, може проводити контроль споруд та обладнання без їх демонтажу та зупинки, а також не спричиняє шкідливого впливу на обслуговуючий персонал [6, 13, 14, 16]. Проте необхідність забезпечення якісного акустичного контакту перетворювача з об'єктом контролю за допомогою контактних рідин, значно звужує сферу використання акустичного методу контролю, зменшує продуктивність та унеможлиблює його застосування на об'єктах зі складною геометрією та пористою структурою, металоконструкціях, які працюють при високих температурах, тобто на тих об'єктах де не допустимий контакт перетворювача з дослідним зразком чи цей контакт може вплинути на властивості матеріалу та на об'єктах де забезпечення традиційного ультразвукового контакту є не можливим [24, 25].

Вирішення проблеми діагностики даних об'єктів може бути знайдене шляхом використання безконтактних методів збудження та передачі ультразвукових коливань без використання акустичних рідин.

Безконтактні методи збудження акустичних коливань розширюють можливості акустичного контролю при великих швидкостях і об'ємах контролю, високих і низьких температурах, шорстких і брудних поверхнях об'єкта. Ці методи можуть базуватися на ефектах використання повітряного акустичного зв'язку, ефектів термоакустичного, електричного та електромагнітного полів [26, 27].

З огляду на проведений аналіз, можемо встановити вимоги до методів та технічних засобів контролю товщини елементів металоконструкцій:

- вони повинні реалізувати неруйнівні безконтактні методи;
- підхід, на якому базуватиметься метод, повинен бути таким, щоб його можна було поширити як для контролю металоконструкцій, так і для контролю інших не металічних об'єктів;
- технічні засоби повинні бути переносними (портативними) для забезпечення оперативності контролю.

## 1.2 Аналіз методів та засобів контролю товщини металоконструкцій

Своєчасне виявлення та правильне визначення фактичних геометричних розмірів (товщини, величини зношення) у нафтогазовому обладнанні є однією з вимог забезпечення його безперервної експлуатації, а прогнозування залишкового ресурсу різних видів обладнання має здійснюватись з дійсної величини зношення та його характеру [13].

Рішення задачі визначення величини зношення (залишкової товщини, ступеня корозійного пошкодження) металоконструкцій може бути знайдене шляхом використання різноманітних методів, які базуються на взаємодії з об'єктом контролю магнітного поля, електричного струму, рентгенівського чи ядерного проникаючого випромінювання, а також за допомогою високочастотних акустичних (ультразвукових) коливань [28, 29]. На даний час ця задача в основному вирішується через визначення залишкової товщини, тому величину зношення отримують здебільшого шляхом віднімання від виконавчого значення товщини металоконструкції вимірюваного значення товщини, отриманого за допомогою відповідного технічного засобу.

Дослідження щодо контролю товщини металоконструкції акустичними методами проводили багато зарубіжних та вітчизняних вчених – Маєвський С.М., Малайчук В.П., Криничний П.Я., Карпаш О.М., Вісков О.В., Козоріз А.В., Горохов Е.В., Ключев Ф.Р., Соснин В.Н., Чуйков С.П., Філінов В.Н., Єгоров Н.Н., Коллакот Р., Т. Е. Gómez, F. Montero, Aindow A.M., Dewhurst R.J., Palmer S.B., Scruby, C.B., Junho Song, D. E. Chimenti та багато інших. Аналіз сучасного стану речей в світовій теорії та практиці неруйнівного контролю показав, що найбільшого поширення одержали наступні методи вимірювання товщини контрольованих об'єктів: методи електромагнітного контролю (магнітний та вихреструмний); методи контролю випромінюванням (радіохвильовий та радіаційний); акустичні методи. Загалом ці методи можна поділити на дві групи: контактні (перетворювач безпосередньо контактує з об'єктом контролю – сухий

контакт, або цей контакт забезпечується за допомогою контактних речовин) та безконтактні (перетворювач розміщується на певній відстані від об'єкта контролю).

У даному підрозділі буде наведено аналіз сучасних методів визначення геометричних параметрів металоконструкцій, зокрема товщини [16, 26].

### 1.2.1 Магнітні методи та засоби контролю товщини

Магнітні методи вимірювання товщини виробів з феромагнітних матеріалів у порівнянні з магнітними методами товщинометрії покриттів одержали значно менше поширення. Це пояснюється складністю створення давачів з малою похибкою, особливо при вимірюванні великих товщин [30] та обмеженнями сфери застосування методу (контроль тільки феромагнітних матеріалів). За принципом дії магнітні товщиноміри розділяють на три групи: магнітовідривні (пондеромоторної дії), магнітостатичні та індукційні [13, 31]

Типова схема магнітостатичного методу вимірювання товщини зображена на рис. 1.5. Перетворювачі являють собою двополюсні циліндричні магніти з перетворювачами Холла чи інших чутливих до магнітних полів елементів. За допомогою даного методу можна проводити вимірювати товщини феромагнітних матеріалів від 0 мм до 3 мм.

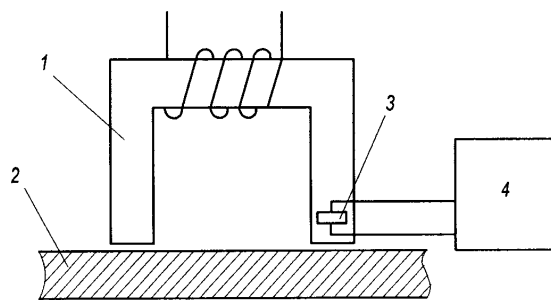


Рис. 1.5. Конструкція П-подібного електромагніту для магнітостатичного методу вимірювання товщини:

- 1 - електромагніт; 2 - феромагнітна деталь; 3 - датчик Холла;  
4 - вимірювальний пристрій.

Використання конструкції перетворювача, у якого два плеча складають еталонні та контрольовані взірці, два інших – осердя та електромагніт, робить можливим значне розширення діапазону вимірювань. Такий метод вимірювань носить назву метод магнітного моста. У перемичці моста як вимірювальний елемент застосований ферозонд або давач Холла.

Перевагами даного методу є відсутність контактної речовини, можливість контролю листів металу малої товщини, можливість проведення двостороннього вимірювання зносу при односторонньому доступі до поверхні контролю.

До недоліків даного методу можна віднести значний вплив на результати вимірювань неоднорідності фізико-хімічних характеристик металоконструкції, зазору між електромагнітом та об'єктом контролю, стану поверхні контролю та вплив зовнішніх електромагнітних полів, а також використання електромагнітів створює складність виготовлення скануючого блоку для неперервної товщинометрії із-за необхідності забезпечення постійного контакту електромагніту з поверхнею контролю.

Незважаючи на деякі переваги методу магнітної товщинометрії, широкого промислового впровадження в приладах та системах він не отримав значною мірою із-за неможливості вимірювання великих товщин та недостатньої точності. Існують тільки окремі розробки приладів. Зокрема інститут доктора Ф. Ферстера (ФРН) розробив товщиноміри металічних листів – Лептоскоп Т-500 і Лептоскоп універсал SMG-8 [31].

### 1.2.2 Контроль товщини металоконструкцій радіохвильовими методами

Радіохвильовим методам можна вимірювати і контролювати товщину діелектричного шару, одного діелектричного шару на іншому, діелектричного шару на металі і товщину металічного листа.

Вимірювання можна проводити при технологічному процесі виготовлення виробу (лист скла, термозахисного покриття), послідовно контролюючи товщину

по всій поверхні чи в окремих точках і подаючи відповідні сигнали на виконавчі механізми [13, 32, 33].

Спосіб вимірювання товщини за допомогою радіохвиль забезпечує високу швидкість, що залежить тільки від засобів індикації, високу точність вимірювань, можливість дистанційного контролю, проведення вимірювань при односторонньому (вимірювання товщини шару не феромагнітного покриття) і двосторонньому доступі (вимірювання товщини металоконструкції) до контрольованих поверхонь. Інформація про товщину може бути закладена в амплітуді, фазі, зсуві резонансної кривої, часу поширення імпульсу, положенні максимуму відбитої хвилі.

Залежно від початкових умов контролю існують два способи вимірювання: з обов'язковим контактом (у вигляді опорних роликів) давача енергії надвисокої частоти (НВЧ) із контрольованою поверхнею і безконтактний, коли відсутній фізичний контакт давача з об'єктом контролю.

На даний час відомо декілька радіохвильових методів вимірювання товщини металевих листів, основні з яких пов'язані із застосуванням НВЧ-резонаторів напіввідкритого (квазізамкнутого) типу і випромінюючих пристроїв. Реалізація цих методів вимагає наявності доступу електромагнітної енергії до обох сторін металевого листа. У цих приладах використовується явище дзеркального відображення хвилі від металевої поверхні. Чутливість приладів може досягати 0,05 мм [34, 35].

Перевагами даного методу є висока швидкість та точність проведення вимірювання, незалежність результатів від фізико-механічних характеристик металоконструкції, можливість проведення контролю безпосередньо на виробництві під час виготовлення металопрокату.

Недоліки: необхідність двостороннього доступу до поверхні контролю, складність інтерпретації результатів вимірювання, яка пов'язана з використанням високочастотного електромагнітного випромінювання.

Найбільш типовими є НВЧ товщиноміри СТ-31И та СИТ-1 [32].



### 1.2.3 Радіаційний метод товщинометрії

Радіаційний метод контролю товщини базується на властивості іонізуючого випромінювання проходити крізь ОК. За характером вимірюваної величини прилади, які працюють на основі цієї властивості, поділяють на товщиноміри і дефектоскопи [33]. Окрім того, класифікаційними ознаками є умови вимірювання (поглинання випромінювання і його зворотне розсіювання), вид використовуваного іонізуючого випромінювання (рентгенівські трубки, ізотопні джерела, прискорювачі) і конструктивно-експлуатаційні особливості [34, 35].

Іонізуюче (електромагнітне) випромінювання розглядається в двох аспектах: як хвильове випромінювання або як корпускулярне, яке складається з частинок, які називають фотонами або квантами. Деякі явища більш краще можна пояснити, якщо розглядати гальмівне випромінювання або гамма-промені як потік квантів, інші явища тлумачаться краще хвильовою теорією [36]. Інтенсивність рентгенівських або гамма-променів, які проходять через об'єкт, зменшується за експоненціальним законом:

$$J = J_0 e^{-\mu x}, \quad (1.1)$$

де  $J_0$  - початкова інтенсивність випромінювання;  $J$  - інтенсивність вузького пучка випромінювання після проходження через об'єкт;  $x$  - товщина виробу;  $\mu$  - лінійний коефіцієнт послаблення випромінювання [34, 37].

У радіометричному методі контролю детекторами випромінювання є різного роду лічильники, іонізаційні камери, сцинтиляційні перетворювачі.

У радіометричних приладах може бути використаний аналоговий чи дискретний (рахунковий) метод представлення інформації. Вибір методу обумовлений швидкодією, точністю, числом каналів, вихідним пристроєм аналізу й ухвалення рішення.

Дискретний метод вимірювань полягає у визначенні числа імпульсів на виході детектора. При роботі аналоговим методом вимірюють сумарний заряд детектора, викликаний іонізацією реєстрованого випромінювання.

Радіометричні товщиноміри звичайно працюють при малих сумарних відносних похибках. При роботі аналоговим методом можливі два режими: стаціонарний і нестаціонарний. Перший з них є режимом товщинометрії, коли вимірювання проводиться по сталому вихідному сигналу.

Принцип роботи радіометричних товщиномірів наступний. Вузький (колімований) пучок гальмівного або  $\gamma$ -випромінювання сканує контрольований об'єкт, послідовно просвічуючи всі його ділянки (рис. 1.6). Випромінювання що пройшло через контрольовану ділянку, реєструється детектором, далі перетворюється в електричний сигнал, пропорційний інтенсивності (щільності потоку) випромінювання, що падає на детектор. Електричний сигнал через підсилювач надходить на реєструючий пристрій. У якості вихідних реєструючих пристроїв звичайно застосовують міліамперметр, механічний лічильник одиночних імпульсів, осцилограф, самописний потенціометр.

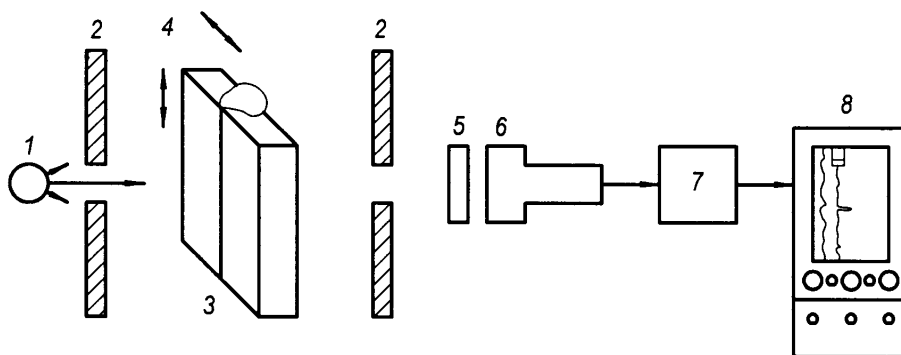


Рис. 1.6. Схема радіометричного контролю:

- 1 - джерело випромінювання; 2 - коліматори; 3 - контрольований об'єкт; 4 - напрямок переміщення; 5 - сцинтиляційний кристал; 6 - фотоелектронний помножувач; 7 - підсилювач; 8 - реєструючий пристрій.

При зменшенні товщини або наявності дефектів у матеріалі (порожнина), реєструючий пристрій показує зростання інтенсивності (поток) випромінювання. Зміна товщини або наявність дефектів може відобразитись

відхиленням стрілки приладу, записом на самописному приладі, спрацьовуванням реле, що приводить у дію виконавчий механізм, що відзначає на виробі дефектні ділянки. Джерело випромінювання і детектор установлюють із протилежних сторін (робота в прямому пучку) контрольованого об'єкта й одночасно пересувають паралельно поверхні просвічуваного матеріалу і увесь час на однаковій відстані від нього [38].

Відмінності дефектоскопії від товщинометрії обумовлені тим, що товщину деталей можна виміряти при наявності еталонів, оскільки режим товщинометрії розрахований на абсолютні вимірювання.

Перевагами радіаційного методу товщинометрії є незалежність результатів від фізико-механічних характеристик та стану поверхні об'єкту контролю, можливість контролю товщини металоконструкцій з не плоско паралельними поверхнями, висока швидкість вимірювання та можливість проведення неперервної товщинометрії. Основним недоліком даного методу є необхідність використання еталонних зразків для калібрування приладу. Наявність іонізуючого випромінювання, вимагає відповідної кваліфікації оператора та спричиняє шкідливий вплив на обслуговуючий персонал.

Найбільш широке застосування знайшли товщиноміри типу ИТХ-5688, ИТ-5460, ТОР-3, Бета скоп, ФРАТ-2 та інші.

#### 1.2.4 Акустичні методи та засоби контролю товщини

Найпоширенішого застосування знайшли акустичні методи вимірювання геометричних розмірів. Акустичні товщиноміри за характером фізичних принципів, які використовуються для вимірювання товщини, поділяють на:

- імпульсні, у яких товщина вимірюється за часом проходження ультразвукового імпульсу у виробі чи шарі;
- імпульсні або з безперервним випромінюванням, у яких товщина визначається за зміною амплітуди ультразвукових хвиль які пройшли через виріб;

- з безперервним випромінюванням, у яких товщина виміряється за фазою пройшовших через виріб ультразвукових хвиль;

- резонансні, у яких для виміру товщини використовується локальний резонансний метод чи локальний метод вільних коливань, а також інші інтерференційні явища, що виникають при поширенні акустичних хвиль у виробі [30, 35].

За способом передачі пружних коливань розрізняють товщиноміри контактні, імерсійні і безконтактні.

Найбільш розповсюджені контактні акустичні товщиноміри - ехо-імпульсні, що дають змогу проводити контроль виробу як із гладкими плоскопаралельними, так і з грубо обробленими, кородованими, еродованими, криволінійними і непаралельними поверхнями.

Резонансні товщиноміри застосовуються тільки для контролю виробів з шорсткістю поверхонь  $Rz \ll 40$  мкм при відхиленні від паралельності поверхонь не більш  $2-3^\circ$ . Промислове використання резонансних товщиномірів у даний час обмежено контролем товщини в діапазоні 0,15 – 2 мм в установках автоматизованого контролю тонкостінних труб і інших виробів. Товщиноміри інших видів є спеціалізованими і не одержали широкого поширення. В останні роки ехо-імпульсні товщиноміри практично повсюдно витіснили всі різновиди ультразвукових товщиномірів, включаючи і резонансні [13, 32].

Імпульсними товщиномірами, як правило, вимірюють час між зондуючим і одним з відбитих імпульсів або між двома ехо-імпульсами. При цьому вимірювана товщина визначається за формулою:

$$d = \frac{vt}{2}, \quad (1.2)$$

де  $t$  - час поширення ультразвукового імпульсу у виробі,  $v$  - швидкість поширення ультразвукового імпульсу у виробі.

Похибка вимірювання за допомогою ехо-імпульсних товщиномірів викликана зміною товщини контактного шару; рівня сигналу; тривалості переднього фронту ехо-імпульсу [36, 39]. В останньому випадку похибка

виникає в зв'язку з тим, що затухання ультразвукових коливань в акустичному тракті залежить від частоти. У першу чергу затухання зазнають високочастотні складові спектра імпульсу, що утворюють його передній фронт. Похибка індикаторного пристрою, що залежить від класу точності, помилка настроювання і вимірювання, зміна швидкості звуку внаслідок неоднорідності хімічного складу і властивості матеріалу та інші причини (зміна температури, розмірів перетворювача і виробу) також впливають на точність вимірювань за допомогою ехо-імпульсних товщиномірів.

Для вимірювання товщини використовуються два способи, що розрізняються областю застосування, зі своїми спеціальними приладами і перетворювачами.

У першому способі використовуються широкополосні перетворювачі для одержання дуже короткого акустичного імпульсу. Час пробігу в цьому способі визначається по двох або більше відображеннях від протилежної стінки виробу (донної поверхні). Мінімальне вимірюване значення товщини виробу визначається частотою зонduючого імпульсу і буде тим менше, чим вища частота. Недолік способу полягає в тому, що вимірювання можливе у випадку, коли є серія ехо-імпульсів від задньої стінки виробу, тому до стану поверхні контрольованого виробу пред'являються дуже високі вимоги. Вимірювати товщину стінки з "грубими" поверхнями (наприклад прокородованими) описаним способом не можливо, тому що на нерівностях поверхні, корозійних виразках відбувається значне розсіювання ультразвуку, що не дозволяє одержати багаторазові відображення [35, 40].

В другому способі для вимірювань товщини використовується тільки перший відбитий імпульс. Цей спосіб не забезпечує точності попереднього, але він забезпечує вимірювання при поганій якості поверхні [37, 41, 42].

Функціональна схема ехо-імпульсного ультразвукового товщиноміра зображена на рис. 1.7. Синхронізатор, генератор імпульсів збудження, перетворювач і підсилювач, що входять до складу товщиноміра, виконують функції, аналогічні однойменним вузлам ехо-імпульсного дефектоскопа.

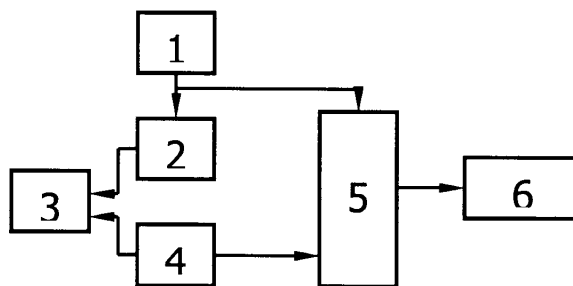


Рис. 1.7. Функціональна схема ехо-імпульсного ультразвукового товщиноміра:

1 – синхронізатор; 2 - генератор імпульсів збудження; 3 – перетворювач; 4 - підсилювач; 5 - вимірювальна схема; 6 – індикатор.

На даний час на ринку засобів неруйнівного контролю присутня велика кількість контактних акустичних товщиномірів: А 1209 (МНПО «Спектр», Москва), СКАТ-4000 (НПП «Політест», Москва, Центр «Дик», Николаев), ТУЗ-1 (НПК «Луч», Москва), 26MG і 36DL PLUS (Panametrics, США), DM 4 E і DMS (Krautkramer, Німеччина), Sonagage II I Alphagage (Sonatest, Англія). Цей перелік, зрозуміло, не вичерпує всі пропонувані прилади, але показує діапазон можливостей ультразвукових товщиномірів.

Безконтактні методи збудження акустичних коливань розширюють можливості акустичного контролю при великих швидкостях і об'ємах контролю, високих і низьких температурах, шорстких і брудних поверхнях об'єкта, проте на даний час вони мало поширені. Ці методи можуть базуватися на ефектах використання повітряного акустичного зв'язку, термоакустичного, ефектів електричного та електромагнітного полів (рис. 1.8) [30, 33, 36, 43].

Ультразвукові дослідження фактично розпочались з того часу, як були відкриті п'єзоелектричні властивості деяких матеріалів подружжям К'юрі в 1876 році [44] та вперше застосовані ці властивості Річардсоном в 1913 році для створення гідролокаторів [45]. Стрімко розвиватись ультразвукова технологія почалась тільки з 1963 року, коли було відкрито можливість генерації пружних акустичних коливань у твердих матеріалах за допомогою

імпульсного нагрівання поверхні об'єкта, в наслідок чого виникають змінні в часі термомеханічні напруження, спричинені нерівномірним і нестационарним розподілом температур [30, 33]. Недоліком цього методу є те, що його можна використовувати тільки на тих об'єктах, які могли витримувати таке нагрівання в процесі контролю.

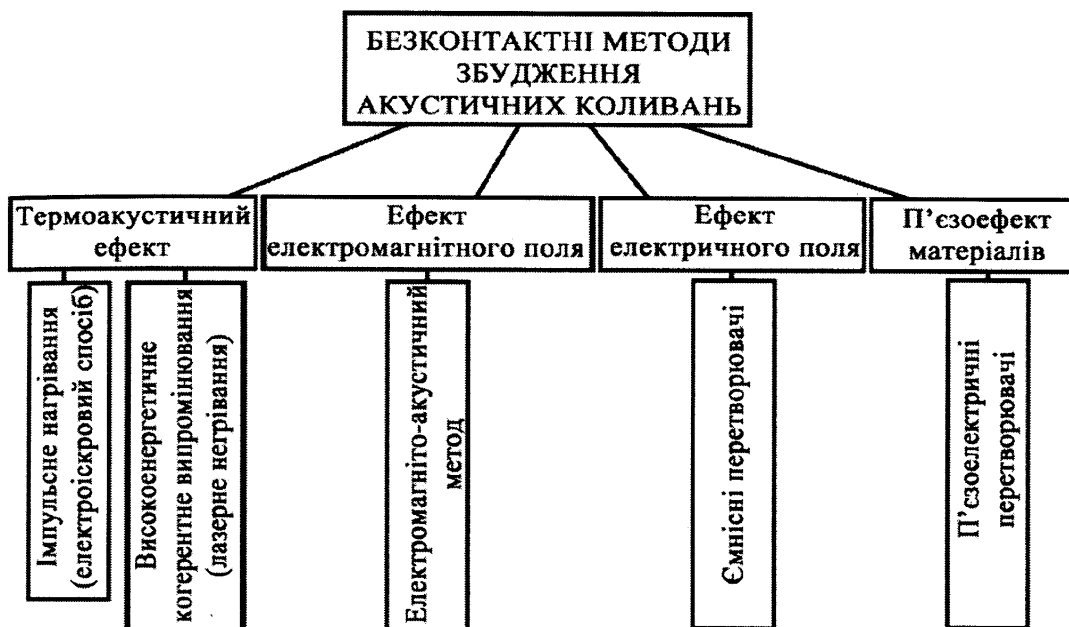


Рис. 1.8. Безконтактні методи збудження акустичних коливань

Наступний період був присвячений використанню імпульсних лазерів для збудження ультразвукових коливань. Цей метод за фізикою виникнення пружних коливань є аналогічний до попереднього, з тією відмінністю, що для передачі тепла використовується високоенергетичне когерентне випромінювання. Даний спосіб є дуже перспективним, враховуючи те, що на даний час стрімко розробляються нові типи напівпровідникових лазерів, якими набагато простіше здійснювати управління, та які мають набагато більший коефіцієнт корисної дії у порівнянні з традиційними рубіновими лазерами [36, 46, 47]. Теоретична оцінка та експерименти показують, що при енергії світлового потоку 4 Дж, коефіцієнті відбиття 0,8 та діаметрі світлового променя 10 мм є можливим збудження акустичних імпульсів, які

створюватимуть тиск  $2 \cdot 10^8$  Па. Порівняння з імерсійним п'єзоелектричним способом при напрузі генератора 100 В, показує що лазерним способом є можливість збудити акустичні коливання амплітудою в 100-1000 раз більшою, ніж п'єзоперетворювачем [30]. Проте цей метод також має обмеження і його неприпустимо використовувати для контролю об'єктів, поверхні яких можуть втратити свої властивості під впливом високоенергетичного лазерного випромінювання. Крім того, даний метод є досить дорогий та складний у реалізації на практиці для промислового контролю.

Також знайшов своє застосування метод генерації акустичних коливань, який базується на ефекті електромагнітного поля – електромагнітоакустичний метод [48, 49, 50]. За останні роки безконтактні методи збудження акустичних хвиль та системи безконтактного неруйнівного контролю в основному розроблялись на основі названого методу. Проте недоліком даного методу є необхідність розташування електромагнітно-акустичних перетворювачів безпосередньо біля поверхні об'єкта контролю та неможливість генерації пружні коливання у не феромагнітних матеріалах [23, 30].

Спробам збудження ультразвукових коливань, при використанні повітря для акустичного зв'язку ультразвукових перетворювачів з ОК, заважає слабка передача ультразвукової енергії через велике розходження в акустичному опорі між повітрям і по суті будь-яким твердим досліджуваним об'єктом [51, 52]. На даний час для реалізації більшості безконтактних ультразвукових методів також використовують традиційні п'єзоелектричні перетворювачі або ємнісні перетворювачі.

Акустичні коливання струмопровідної поверхні виробу можуть бути спричинені силами взаємодії електричних зарядів, якщо цю поверхню зробити одною з пластин конденсатора [30, 37, 53]. Приймання акустичних коливань здійснюється в результаті зворотного ефекту – виникнення змінного електричного опору на пластинах конденсаторного перетворювача при зміні



відстані між пластинами, одна з яких є поверхнею виробу. Цей метод найчастіше використовують для досліджень, наприклад для безконтактного вимірювання розподілу амплітуди коливань поверхні у широкому діапазоні частот. Проте такий спосіб збудження пружних коливань вимагає наявності електричного контакту з поверхнею об'єкта контролю та дозволяє контролювати тільки електропровідні об'єкти.

Також відомий спосіб збудження акустичних коливань за допомогою ємнісних ультразвукових перетворювачів, які складаються з тонкої металізованої полімерної мембрани і провідної опорної пластини (рис. 1.9). За фізикою збудження пружних коливань цей спосіб аналогічний до попереднього, проте він не вимагає наявності електричного контакту з поверхнею контролю, а акустичні коливання передаються від металічної мембрани через повітряний шар до об'єкта контролю. Такий спосіб збудження акустичних коливань, на відміну від попередньо описаного, дозволяє генерувати та приймати тільки ультразвукові коливання строго визначеної частоти [53, 54].

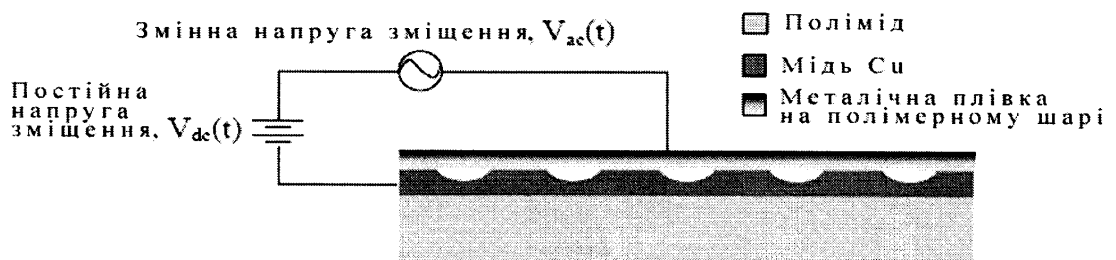


Рис. 1.9. Будова та схема підключення ємнісного ультразвукового перетворювача

Порівняно з п'єзoeлектричними перетворювачами, ємнісні ультразвукові перетворювачі мають набагато меншу акустичну невідповідність акустичного опору між мембраною і повітрям, унаслідок дуже малого механічного опору тонкої мембрани.

Незважаючи на високі характеристики ємнісних ультразвукових перетворювачів, їх використання утруднюється із-за складності процесу виготовлення самого перетворювача. Для роботи в мегагерцовому діапазоні металічна мембрана та опорна пластина повинні мати досить малі товщини, а необхідність застосування мікро обробки опорної пластини, спричиняє труднощі у виготовленні перетворювачів з однаковими характеристиками та їх повторюваність.

Ще один спосіб для безконтактного збудження ультразвукових коливань може бути здійснений шляхом використання традиційних п'єзокерамічних перетворювачів [55]. Технологія виготовлення п'єзоелектричних пласти перетворювачів на даний час дуже розвинута, що спрощує виготовлення самого перетворювача та не створює додаткових вимог до генераторно-приймальної апаратури. Проте залишається проблема узгодження акустичного опору п'єзопластини, повітря та об'єкта контролю. Дана проблема може бути вирішена шляхом використання п'єзопластин з низьким механічним опором, високою чутливістю та використанням одного чи декількох узгоджувачих шарів, які наносяться на п'єзокераміку чи на об'єкт контролю, і які призначені для зменшення акустичного опору та збільшення чутливості [26, 54]. Будова такого перетворювача зображена на рис. 1.10.

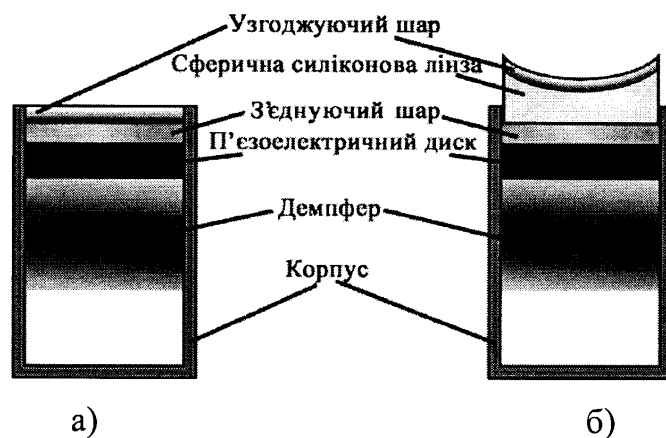


Рис. 1.10. Будова безконтактного а) плоского та б) фокусуєчого ультразвукового перетворювача

Конструктивно перетворювач складається з корпусу, в якому до демпфера кріпиться п'єзоелектричний елемент. Узгоджувач шар за допомогою з'єднуючого матеріалу кріпиться до іншої сторони п'єзопластини. У фокусуємих перетворювачах між узгоджувачем шаром та п'єзоелектричною пластиною розміщують сферичну акустичну лінзу.

Основними перевагами ультразвукових методів вимірювання товщини в порівнянні з іншими є незалежність результатів вимірювань від неоднорідності і непостійності магнітної і електричної структури матеріалу виробу, можливість контролю сумарної товщини біметалічних виробів (наприклад, виробів з феромагнітних і не феромагнітних матеріалів і сплавів), можливість вимірювання внутрішньої та зовнішньої корозії при односторонньому доступі до об'єкту контролю, відсутність шкідливої дії випромінювань на людину (ядерних або рентгенівських) і принципова можливість вимірювання як малих, так і великих (до декількох метрів) товщин. Недоліками ультразвукових методів є вимоги до стану поверхні контролю, для ультразвукових п'єзоелектричних перетворювачів обов'язкова наявність контактної речовини (для контактних методів), неможливість отримання значення товщини металоконструкцій з не плоскопаралельними поверхнями.

### 1.3 Вибір методу та аналіз проблем, які виникають при розробці акустичних методів контролю товщини металоконструкцій

Для зручності вибору оптимального методу контролю товщини металоконструкцій об'єднаємо переваги та недоліки проаналізованих методів в таблиці 1.1. Проведений аналіз методів та засобів контролю товщини металоконструкцій показав, що у порівнянні з іншими методами, акустичні методи характеризуються більшою універсальністю і можуть бути використані для контролю різного роду матеріалів при односторонньому доступі до поверхні об'єкта контролю, володіють високою точністю,

широким діапазоном вимірювань, не спричиняють шкідливого впливу на обслуговуючий персонал.

Таблиця 1.1

### Методи контролю товщини металоконструкцій

Методи контролю товщини	Переваги	Недоліки
<i>Магнітні</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>+ відсутність контактної речовини;</li> <li>+ можливість контролю листів металу малої товщини;</li> <li>+ можливість проведення двостороннього вимірювання корозійних втрат при односторонньому доступі до поверхні контролю.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- значний вплив на результати вимірювань неоднорідності фізико-хімічних характеристик металоконструкцій;</li> <li>- вплив зазору між електромагнітом та об'єктом контролю;</li> <li>- вплив стану поверхні контролю та вплив зовнішніх електромагнітних полів.</li> </ul>
<i>Радіохвильові</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>+ висока швидкість та точність проведення вимірювання;</li> <li>+ незалежність результатів від фізичних характеристик металоконструкції;</li> <li>+ можливість проведення контролю безпосередньо на виробництві під час виготовлення металопродукту.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- необхідність двостороннього доступу до поверхні контролю;</li> <li>- складність інтерпретації результатів вимірювання, яка пов'язана з використанням високочастотного електромагнітного випромінювання.</li> </ul>
<i>Акустичні</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>+ незалежність результатів вимірювань від неоднорідності і непостійності магнітної і електричної структури матеріалу виробу;</li> <li>+ можливість контролю сумарної товщини біметалічних;</li> <li>+ можливість вимірювання внутрішньої та зовнішньої корозії при односторонньому доступі до об'єкту контролю;</li> <li>+ відсутність шкідливої дії на людину випромінювань;</li> <li>+ можливість вимірювання як малих, так і великих товщин.</li> <li>+ можливість створення засобі безконтактного вимірювання товщини</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- високі вимоги до стану поверхні контролю;</li> <li>- для ультразвукових контактних п'єзоелектричних перетворювачів обов'язкова наявність контактної речовини;</li> <li>- неможливість отримання значення товщини металоконструкцій з не плоско паралельними поверхнями;</li> <li>- значні втрати енергії акустичних коливань при безконтактному контролі утруднюють інтерпретацію результатів.</li> </ul>
<i>Радіаційні</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>+ незалежність результатів від фізико-механічних характеристик та стану поверхні об'єкту контролю;</li> <li>+ можливість контролю товщини металоконструкцій з не плоско паралельними поверхнями;</li> <li>+ висока швидкість вимірювання та можливість проведення неперервної товщинометрії.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- наявність іонізуючого випромінювання, що вимагає відповідної кваліфікації оператора;</li> <li>- необхідність використання еталонних зразків для калібрування приладу.</li> </ul>

З акустичних методів контролю вибір доцільно зробити на користь безконтактних способів передачі та збудження ультразвукових коливань за допомогою п'єзоелектричних перетворювачів.

Отже, підсумовуючи вищесказане, незважаючи на різноманітність методів безконтактного збудження ультразвукових коливань у об'єкті контролю, їх переваги та недоліки, головною проблемою залишається мінімізування неспівпадання акустичного опору перетворювача, повітря та самого об'єкта. При розробці систем безконтактного ультразвукового контролю кожен з дослідників вибирає власний метод і намагається запропонувати найбільш оптимальну схему передачі акустичних коливань. Проте, значна різниця швидкості звукових хвиль в повітрі, яка складає близько 330 м/с і об'єкті контролю, для сталених виробів вона складає 5900 м/с та високий коефіцієнт затухання ультразвукових хвиль в повітрі, спричиняє дуже високе зростання коефіцієнта відбиття, зменшує чутливість та співвідношення амплітуди корисного сигналу до шуму [24, 56, 57].

З іншої сторони, внаслідок дуже великої різниці між швидкостями поширення звуку в повітрі та об'єкті контролю, кут входження акустичного променя, при якому відбувається повне відбиття (граничний кут), є дуже малим [55, 58]. Цей кут визначається за законом синусів:

$$\frac{\sin \theta_1}{v_1} = \frac{\sin \theta_2}{v_2}, \quad (1.3)$$

де  $v$  це фазова швидкість, а  $\theta$  кут. Якщо хвилі поширюються з середовища 1 в середовище 2, то  $\theta_1$  це кут падіння, а  $\theta_2$  це кут відбивання.

Зрозуміло, що кут відбивання залежить лише від співвідношення швидкостей у двох середовищах. Наприклад, для поверхні розподілу повітря/полімер він складає більше  $9^\circ$ , і є меншим  $4^\circ$  для більшості поверхонь розподілу повітря/метал. Цей факт потрібно враховувати при проведенні контролю зразків з нерівною або кривою поверхнею, а також при розробці безконтактних фокусуємих ультразвукових перетворювачів.

Ще одна проблема, з якою доводиться стикатися при розробці безконтактних ультразвукових перетворювачів, пов'язана з втратами, які виникають внаслідок великого значення коефіцієнту відбивання та малого значення коефіцієнту проходження, що спричиняє втрати енергії акустичних коливань на границі розподілу твердий матеріал/повітря від 55 та 88 дБ. Це призводить до значного відбивання енергії і тільки незначна її кількість потрапляє у тіло об'єкта контролю. Якщо врахувати той факт, що при безконтактній передачі ультразвукових коливань завжди існує дві границі розподілу, п'єзопластина/повітря та повітря/б'єкт контролю, то ці втрати можуть сягати 150 дБ [58], що унеможлиблює використання традиційних методів обробки дефектоскопічної інформації.

Наступна проблема пов'язана з значним затуханням ультразвукових коливань у повітрі. На рис. 1.11 показані залежності величини затухання коливань від відстані до випромінювача для зазначених частот [24, 57].

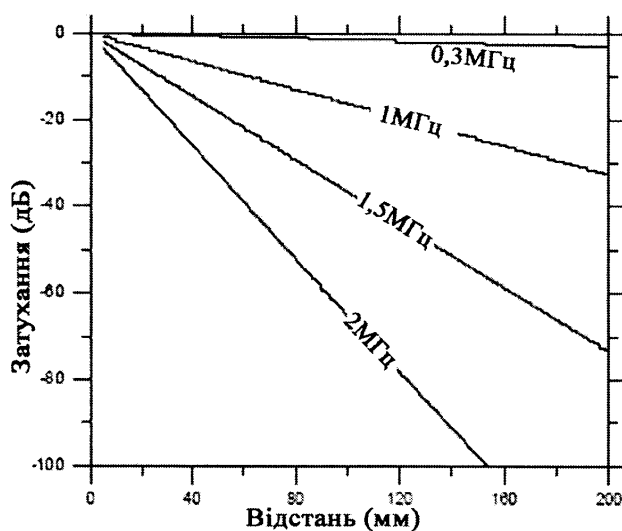


Рис. 1.11. Затухання ультразвукових хвиль частотою 0,3; 1; 1,5 та 2 МГц в повітрі за нормальних умов

Знизити затухання ультразвукових хвиль в повітрі можна за допомогою збільшення тиску, проте при нормальних умовах це неможливо.

Врахування вище перелічених проблем, які виникають при безконтактному способі передачі ультразвукових коливань та зменшення їх впливу, дасть можливість розробити безконтактний акустичний спосіб контролю виробів, виготовити перетворювачі з потрібними характеристиками та дозволить спростити системи контролю і збільшити його продуктивність.

#### 1.4 Вибір та обґрунтування напрямку досліджень

Проведений аналіз об'єкта досліджень показав, що для забезпечення технологічної безпеки обладнання та металоконструкцій довготривалої експлуатації в базових галузях вітчизняної промисловості, необхідно проводити контроль геометричних параметрів (залишкової товщини), які забезпечують міцність конструкції та зазнають деградації.

Аналіз відомих методів та засобів показав, що:

1) загалом існує чотири методи контролю товщини елементів металоконструкцій: акустичний, магнітний, радіохвильовий та радіаційний. Переваги та недоліки кожного з них подано в таблиці 1.1;

2) з проаналізованих методів найбільшого застосування знайшов акустичний метод контролю товщини металоконструкцій з використанням контактних рідин, як такий, що володіє високою точністю та широким діапазоном вимірювань, дозволяє проводити контроль товщини різного роду матеріалів, є безпечним у використанні;

3) необхідність забезпечення якісного акустичного контакту ультразвукового перетворювача з об'єктом контролю за допомогою контактних речовин значно звужує сферу використання ультразвукових систем контролю, зменшує їх продуктивність та унеможливає їх застосування на об'єктах зі складною геометрією, металоконструкціях, які працюють за критичних температур, тобто на тих об'єктах, де неможливо забезпечити якісний контакт перетворювача з дослідним зразком чи цей контакт може вплинути на властивості матеріалу;

4) підвищення продуктивності акустичного методу контролю та розширення сфери його застосування можливе шляхом удосконалення даного методу та розроблення способів зменшення втрат енергії акустичних коливань;

5) значні втрати енергії акустичних коливань при використанні безконтактних ультразвукових перетворювачів унеможливають застосування традиційних способів оброблення дефектоскопічної інформації та локалізації зашумлених ехо-сигналів.

Тому метою роботи є удосконалення акустичного методу безконтактного контролю товщини стінки металоконструкцій та розробці експериментального взірця приладу для його реалізації.



## РОЗДІЛ 2

### ТЕОРЕТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ БЕЗКОНТАКТНОГО АКУСТИЧНОГО МЕТОДУ КОНТРОЛЮ ТОВЩИНИ МЕТАЛОКОНСТРУКЦІЙ

#### 2.1 Розроблення фізичної моделі процесу безконтактного акустичного контролю металоконструкцій

З метою вибору та обґрунтування напрямків удосконалення акустичного методу та подальших досліджень побудуємо описову фізичну модель процесу безконтактного акустичного контролю товщини елементів металоконструкцій при односторонньому доступі до поверхні ОК з використанням одного п'єзоелектричного перетворювача (ПЕП) (рис. 2.1) та фізичну модель процесу безконтактного акустичного контролю товщини елементів металоконструкцій при двосторонньому доступі до поверхонь ОК з використанням двох ПЕП (рис. 2.2).

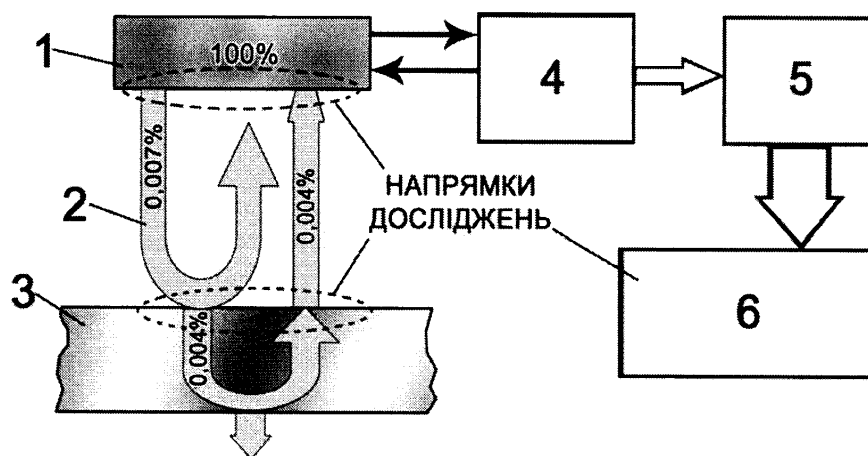


Рис. 2.1. Фізична модель методу вимірювання товщини при односторонньому доступі до поверхні ОК:

1 – ПЕП, 2 – акустичні коливання, 3 - ОК , 4 – генераторно-приймальний тракт, 5 – аналого-цифровий перетворювач, 6 – блок оброблення та візуалізації результатів контролю.

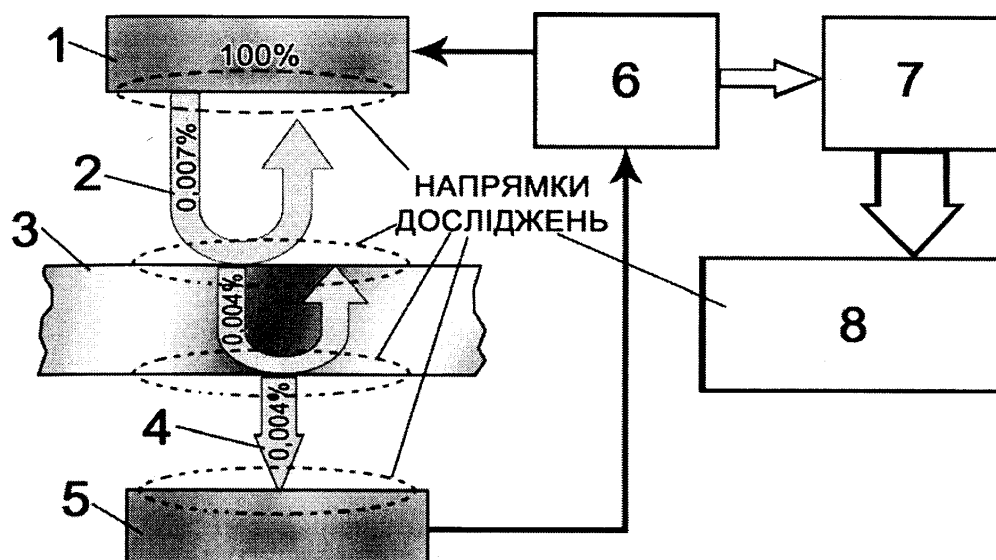


Рис. 2.2. Фізична модель методу вимірювання товщини при двосторонньому доступі до поверхонь ОК:

1 – випромінюючий ПЕП, 2 – акустичні коливання, 3 - ОК, 4 – пройшовші через ОК акустичні коливання, 5 – приймаючий ПЕП, 6 – генераторно-приймальний тракт, 7 – аналого-цифровий перетворювач, 8 – блок оброблення та візуалізації результатів контролю.

Вимірювання товщини елементів металоконструкцій при односторонньому доступі до поверхні ОК здійснюється наступним чином. Генератор акустичних коливань, який входить в генераторно-приймальний тракт, формує імпульси напруги визначеної тривалості та частоти, які збуджують акустичні коливання в п'єзопластині ПЕП. Акустичні коливання від ПЕП через шар повітря поширюються до об'єкта контролю. На границі повітря/ОК (зовнішня поверхня ОК) акустичні коливання зазнають часткового відбивання та заломлення. Відбиті від зовнішньої поверхні ОК акустичні коливання проходять зворотній шлях через шар повітря і потрапляють на ПЕП. Заломлені акустичні коливання проходять через об'єкт контролю, зазнають відбивання від границі розділу ОК/повітря (внутрішня поверхня ОК) і, пройшовши зворотній шлях через об'єкт контролю та шар повітря, потрапляють на ПЕП (рис.2.1). Акустичні коливання, потрапивши на п'єзоелектричний перетворювач, збуджують в ньому електричні коливання

напруги, які підсилюються за допомогою підсилювача акустичних коливань (входить в склад генераторно-приймального тракту). Підсилені коливання напруги потрапляють на аналого-цифровий перетворювач, який здійснює оцифрування сигналу і далі у цифровому вигляді потрапляють у блок оброблення та візуалізації результатів контролю. Останній за значенням часу проходження акустичних коливань в тілі об'єкта контролю визначає його товщину.

Вимірювання товщини елементів металоконструкцій при двосторонньому доступі до поверхонь ОК (рис. 2.2) здійснюється аналогічно до попереднього, з тією різницею, що реєструється не час поширення відбитих від поверхонь ОК акустичних коливань, а час поширення пройшовших через ОК акустичних коливань.

Основними проблемами при передачі ультразвукової енергії через повітря в досліджуваний матеріал є значне неспівпадання акустичного опору п'єзопластини, повітря та досліджуваного матеріалу та високе значення коефіцієнта затухання ультразвукових коливань в повітрі. Внаслідок чого тільки 0,007% енергії акустичних коливань, яка випромінюється ПЕП, передається через шар повітря до ОК. На границі розділу повітря/ОК також втрачається значна частина енергії акустичних коливань – тільки 0,004% енергії акустичних коливань, які потрапили на поверхню ОК, проходить через границю розділу повітря/ОК [59].

Дані проблеми призводять до зменшення величини енергії акустичних коливань на виході перетворювача (на кожній границі розділу п'єзоелемент/повітря та повітря/об'єкт контролю втрачається біля 99,99% енергії акустичних коливань) [23, 59], співвідношення сигнал-шум, чутливості методу та унеможливають використання традиційних методів обробки дефектоскопічної інформації.

Таким чином, для реалізації безконтактного акустичного методу контролю необхідно вирішити дві проблеми, що дасть можливість компенсувати зменшення втрат енергії акустичних коливань:

- на границі розділу п'єзоелемент/повітря;
- у повітрі (зменшення коефіцієнта затухання) та на границі розділу повітря/об'єкт контролю.

Шляхом аналізування описової фізичної моделі процесу безконтактного акустичного контролю елементів металоконструкцій визначимо напрямки удосконалення акустичного методу контролю товщини:

- необхідність використання узгоджуючого шару (чи шарів), визначення його характеристик в залежності від матеріалу об'єкта контролю та характеристик п'єзоелемента перетворювача, що дасть можливість компенсації суттєвих втрат енергії акустичних коливань на границі розділу п'єзоелемент/повітря;

- компенсація втрат енергії акустичних коливань в повітрі та на границі розділу повітря/об'єкт контролю шляхом використання технологій штучних нейронних мереж для оброблення вимірювальної інформації, що дасть можливість підвищення чутливості методу.

В техніці ультразвуку можливі наступні способи узгодження акустичних опорів [60], що дає можливість зменшити втрати енергії акустичних коливань на границі розділу:

1) за допомогою проміжної узгоджуючої ланки (чи декількох) акустичні властивості якої постійні по всій довжині; акустичні властивості і довжина узгоджуючої ділянки повинні мати певні значення;

2) за допомогою проміжної узгоджуючої ланки визначеної довжини з плавно, за певним законом, змінними характеристиками.

Узгоджуючі ланки доцільно використовувати на границі розділу п'єзоелемент/повітря. Використання ж їх на границі розділу повітря/об'єкт контролю є недоцільним, оскільки, як правило, вони виготовляються з дорогих матеріалів, що призводить до значних матеріальних затрат при великих об'ємах контролю та необхідність введення додаткової підготовчої операції. Зменшити втрати енергії акустичних коливань у повітрі можливо шляхом збільшення тиску повітря. Проте за нормальних умов, при

неперервному контролю, збільшення тиску є неможливим. Рішення тільки однієї з трьох проблем утруднює реалізацію безконтактного акустичного методу контролю геометричних характеристик металоконструкцій, оскільки із-за значних втрат енергії акустичних коливань, амплітуда пройшовших через об'єкт контролю акустичних сигналів буде знаходитись нижче рівня власних шумів перетворювача та підсилювача ультразвукових коливань. В такому випадку використання традиційних методів оброблення вимірювальної інформації та локалізації пройшовших акустичних коливань не дасть можливості отримання дійсного значення товщини ОК. Рішення даної проблеми може бути знайдене шляхом використання нових методів оброблення вимірювальної інформації.

Поєднання методів зменшення втрат енергії акустичних коливань та нових методів оброблення вимірювальної інформації дасть можливість розроблення технічного засобу для безконтактного акустичного контролю товщини елементів металоконструкцій.

## 2.2 Розроблення математичної моделі узгоджуючого шару безконтактного п'єзоперетворювача

В попередньому підрозділі було визначено основні проблеми, які виникають при розробці безконтактного акустичного методу контролю товщини елементів металоконструкцій та подано напрямки подальших досліджень.

Таким чином, з метою удосконалення безконтактного акустичного методу контролю товщини металоконструкцій та вибору оптимальних параметрів контролю необхідно провести математичне моделювання процесу поширення ультразвукових коливань від перетворювача до об'єкта контролю та в об'єкті контролю і розрахувати втрати енергії акустичних коливань, що дасть можливість визначити фізичні та геометричні характеристики узгоджуючого шару, вибрати тип матеріалу узгоджуючого шару, зменшити втрати енергії акустичних коливань на границі розділу п'єзоелемент/повітря та теоретично доказати можливість

проведення контролю товщини металоконструкцій безконтактним методом при використанні повітря в якості середовища для створення акустичного контакту п'єзоперетворювача з об'єктом контролю.

Збудження і приймання ультразвукових коливань базується на перетворенні одного виду енергії в інший. При збудженні енергія зовнішнього джерела перетворюється в енергію ультразвукових коливань, а при прийманні енергія пружних коливань перетворюється в такий вид енергії, до якого чутливий вимірвальний прилад [55].

В загальному випадку ПЕП можна представити у вигляді багат шарової структури, яка складається з певним чином послідовно розміщених п'єзоелектричних активних і пасивних плоско паралельних шарів (рис. 2.3). В практиці така конструкція п'єзоперетворювача у вигляді пластин і плоских узгоджуючих шарів отримала найбільше поширення [24].

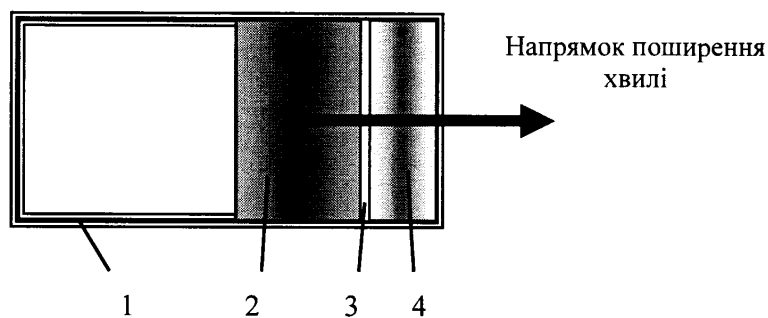


Рис. 2.3. Конструкція п'єзоелектричного перетворювача:

- 1 – корпус, 2 – п'єзоелектрична пластина,
- 3 – з'єднуючий шар, 4 – узгоджуючий шар.

Як сказано вище, величина ультразвукової енергії, що випромінюється п'єзоперетворювачем в основному залежатиме від акустичних опорів п'єзопластини, узгоджуючого шару (декількох шарів) та середовища в яке випромінюються пружні коливання. Правильний вибір геометричних та фізичних характеристик узгоджуючого шару дозволить отримати максимальне значення акустичної енергії на виході перетворювача, що в свою

чергу дасть можливість отримати більше значення інтенсивності акустичних коливань на поверхні та в тілі ОК.

Для побудови математичної моделі процесу поширення акустичних коливань в системі п'єзопластина, узгоджуючий шар, середовище навантаження (для безконтактних п'єзоперетворювачів – повітря) розіб'ємо її на окремі ділянки (шари), з однорідними акустичними властивостями та запишемо рівняння поширення акустичних коливань в цих середовищах та системи рівнянь на межах ділянок.

Для однонаправленої плоскої хвилі потенціал коливальної швидкості залежить від координати  $x$  та часу  $t$ . В такому випадку рівняння для плоскої хвилі має вигляд:

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} = \frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2}, \quad (2.1)$$

де  $\varphi$  - потенціал коливальної швидкості,  $c_0$  - швидкість поширення хвилі.

При умові, що початковий зсув фази в момент часу  $t = 0$  рівний нулю та напрямком поширення хвилі  $x$  є додатній, розв'язок рівняння (2.1) буде таким [36, 55]:

$$\varphi(x, t) = \varphi_{\max} e^{i2\pi \left( ft - \frac{fx}{c_0} \right)} = \varphi_{\max} e^{i(\omega t - kx)}, \quad (2.2)$$

або

$$\varphi(x, t) = \varphi_{\max} \sin 2\pi \left( ft - \frac{fx}{c_0} \right) = \varphi_{\max} \sin(\omega t - kx), \quad (2.3)$$

де  $\omega = 2\pi f$  - кругова (циклічна) частота,  $k = \frac{2\pi f}{c_0} = \frac{2\pi}{\lambda}$  - хвильове число,  $\lambda$  -

довжина хвилі в матеріалі,  $f$  - частота акустичних коливань.

При проходженні хвилі через границю розподілу двох середовищ з різними фізичними властивостями в залежності від характеристик середовища можливі два випадки:

- повне або часткове відбивання, заломлення та проходження хвилі;
- можливе розділення на поперечну та повздовжню хвилю (наприклад на межі розподілу середовищ вода-метал).

При проходженні хвилі через границю розподілу двох твердих тіл виникають по дві відбитих і заломлених хвиль (повздовжні і поперечні).

В нашому випадку, враховуючи те, що одне із середовищ є газом, а напрямок поширення хвилі перпендикулярний границі розділу середовищ надалі розглядатимемо тільки повздовжні хвилі, оскільки поперечні хвилі не виникатимуть.

Запишемо наступні рівняння взаємодії хвилі (ультразвукових коливань) з межею розподілу середовищ.

Для коливальної швидкості частинок середовища  $v$ :

$$v(x, t) = -\frac{\partial \varphi}{\partial x} = k\varphi_{\max} e^{i(\omega t - kx)} = k\varphi_{\max} \cos(\omega t - kx) = v_{\max} \cos(\omega t - kx). \quad (2.4)$$

Крім того залежність акустичного тиску  $p$  від похідної потенціалу коливальної швидкості  $\varphi$  по часу та густини середовища  $\rho_0$  має вигляд [23, 36, 61, 62]:

$$p(x, t) = \frac{\partial \varphi}{\partial x} \rho_0 = \rho_0 \omega \varphi_{\max} e^{i(\omega t - kx)} = \rho_0 \varphi_{\max} \cos(\omega t - kx) = p_{\max} \cos(\omega t - kx). \quad (2.5)$$

Як видно з рівнянь (2.4) та (2.5), коливальна швидкість частинок середовища та зміна акустичного тиску повздовжньої хвилі знаходяться в одній фазі та зв'язані співвідношенням:

$$p(x, t) = \rho_0 c_0 v(x, t) = \rho_0 c_0 v_{\max} e^{i(\omega t - kx)} = \rho_0 c_0 v_{\max} \cos(\omega t - kx) = p_{\max} \cos(\omega t - kx). \quad (2.6)$$

Вираз  $\rho_0 c_0 = Z_0$  характеризує акустичний опір середовища.

Розглянемо випадок поширення коливань в безкінечному однорідному середовищі та їх проходження через границю розділу двох середовищ з різними акустичними властивостями (рис. 2.4).

Середовище 1 характеризується певним значенням швидкості поширення акустичних коливань  $c_1$  та густиною  $\rho_1$ , падаюча хвиля – акустичним тиском  $p_1$  та коливальною швидкістю  $v_1$ . Хвиля, відбита від межі розподілу двох середовищ описується акустичним тиском  $p_{12}$  та коливальною швидкістю частинок середовища  $v_{12}$ . Середовище 2 та пройшовша хвиля –  $c_2$ ,  $\rho_2$ ,  $p_2$ ,  $v_2$  швидкістю поширення акустичних коливань, густиною,



акустичним тиском та коливальною швидкістю частинок середовища відповідно.

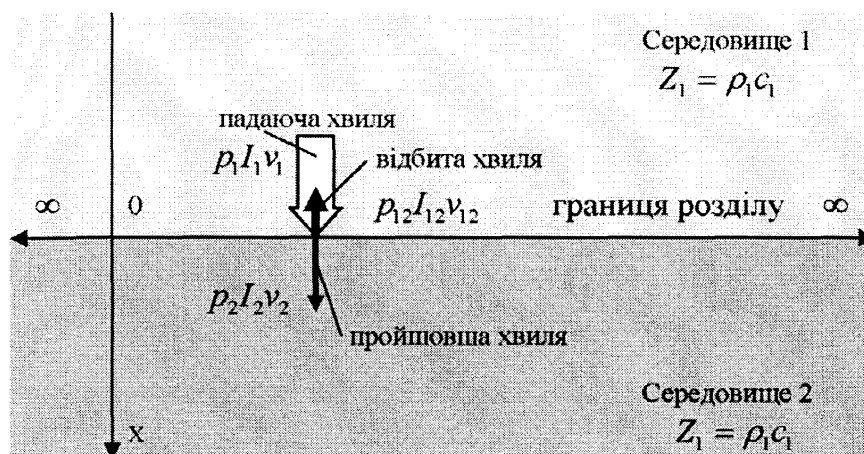


Рис. 2.4. Відбивання та проходження нормально падаючої хвилі на границі розподілу двох середовищ з різними акустичними властивостями

Падаюча хвиля на границі розподілу двох середовищ спричиняє коливання частинок цієї границі, що породжує дві хвилі, відбиту та пройшовшу, які поширюються в протилежних напрямках. На границі розподілу двох середовищ сума коливальних швидкостей частинок середовища  $v$  падаючої та відбитої хвиль повинна бути рівною коливній швидкості пройшовшої акустичної хвилі та з умови рівності сил, що діють на границі розподілу, сума тисків падаючої та відбитої хвилі повинна бути рівною тиску, який спричинений пройшовшою хвилею. Також потрібно взяти до уваги баланс енергій  $I_1, I_{12}, I_2$  - енергія падаючої, відбитої та пройшовшої хвиль відповідно. Ці твердження дають можливість записати наступні граничні умови (при  $x=0$ ) [23, 63]:

$$\left. \begin{aligned} v_1 + v_{12} &= v_2 \\ p_1 + p_{12} &= p_2 \\ I_1 - I_{12} &= I_2 \end{aligned} \right|_{x=0} \quad (2.7)$$

Провівши відповідну підстановку в систему рівнянь (2.7) вирази (2.4), (2.5) та (2.6) при  $x=0$  та  $t=0$  отримаємо наступні формули для розрахунку

коефіцієнтів відбиття  $R_p$ ,  $R_v$  та проходження  $T_p$ ,  $T_v$  (які в першому та другому випадку залежать від відношення тисків та коливної швидкості частинок середовища пройшовшої та падаючої хвиль відповідно):

$$\begin{aligned} R_p &= \frac{p_{12}}{p_1} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1}, & R_v &= \frac{v_{12}}{v_1} = -\frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1}, \\ T_p &= \frac{p_2}{p_1} = \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1}, & T_v &= \frac{v_2}{v_1} = \frac{2Z_1}{Z_2 + Z_1}, \end{aligned} \quad (2.8)$$

та коефіцієнти відбиття та проходження енергії акустичних коливань:

$$\begin{aligned} R &= \frac{I_{12}}{I_1} = R_p^2 = \left( \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} \right)^2, \\ T &= \frac{I_2}{I_1} = 1 - R^2 = \frac{4Z_1 Z_2}{(Z_1 + Z_2)^2}, \end{aligned} \quad (2.9)$$

оскільки енергія акустичних коливань  $I$  пропорційна квадрату тиску  $p$  -  $I \sim p^2$ .

Розглянемо випадок проходження ультразвукової хвилі через тонку нескінчену пластину. Хвиля, що проходить через пластину зазнає багатократного відбивання в середині пластини від її поверхонь. Ці відбиті хвилі взаємодіють одна з одною та з пройшовшою хвилею (рис. 2.5). Тому є певна залежність між товщиною пластини, довжиною хвилі, акустичним тиском та коефіцієнтами пропускання та проходження.

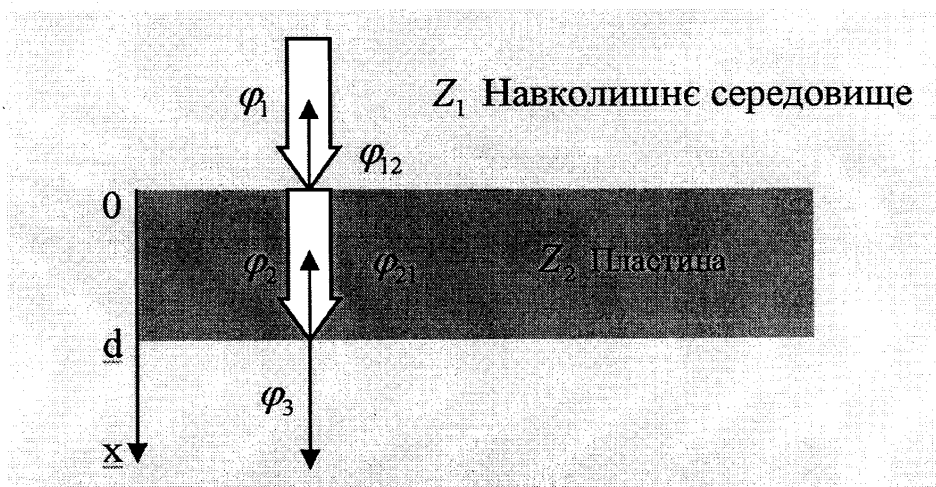


Рис. 2.5. Проходження акустичних хвиль через нескінченну пластину

У випадку проходження акустичних коливань через тонку нескінченну пластину перша границя розподілу проходить перпендикулярно до осі поширення хвилі через точку  $x = 0$ , друга – аналогічно в точці  $x = d$ .

Хвильові рівняння для перпендикулярної падаючої, відбитої та пройшовшої хвилі на границі розділу двох середовищ ( $x = 0$ ) є відповідно наступними:

$$\varphi_1(x, t) = \varphi_{1\max} e^{i(\omega t - k_1 x)}; \quad (2.10)$$

$$\varphi_{12}(x, t) = \varphi_{12\max} e^{i(\omega t + k_2 x)}; \quad (2.11)$$

$$\varphi_2(x, t) = \varphi_{2\max} e^{i(\omega t - k_2 x)}. \quad (2.12)$$

На другій границі розділу акустичних середовищ ( $x = d$ ) пройшовша хвиля знову зазнає відбивання. Для таких граничних умов хвильові рівняння відбитої та пройшовшої хвилі відповідно матимуть такий вигляд:

$$\varphi_{21}(x, t) = \varphi_{21\max} e^{i(\omega t + k_2 x)}; \quad (2.13)$$

$$\varphi_3(x, t) = \varphi_{3\max} e^{i(\omega t - k_1 x)}. \quad (2.14)$$

З граничних умов (2.7), на межі розділу двох середовищ ( $x = 0$ ) потенціал коливальної швидкості описується рівняннями:

$$\left. \begin{aligned} \rho_1(\varphi_1 + \varphi_{12}) &= \rho_2(\varphi_2 + \varphi_{21}) \\ k_1(\varphi_1 - \varphi_{12}) &= k_2(\varphi_2 - \varphi_{21}) \end{aligned} \right|_{x=0}. \quad (2.15)$$

На другій межі розподілу середовищ при  $x = d$ , де  $d$  - товщина пластини:

$$\left. \begin{aligned} \rho_2(\varphi_2 e^{-ik_2 d} + \varphi_{21} e^{ik_2 d}) &= \rho_1 \varphi_3 e^{-ik_1 d} \\ k_2(\varphi_2 e^{-ik_2 d} - \varphi_{21} e^{ik_2 d}) &= k_1 \varphi_3 e^{-ik_1 d} \end{aligned} \right|_{x=d}. \quad (2.16)$$

Розв'язавши системи рівнянь (2.15) та (2.16), отримаємо загальний коефіцієнт відбиття по тиску та коефіцієнт проходження енергії акустичних коливань:

$$R_p = \frac{\varphi_{12}}{\varphi_1} = \frac{\frac{Z_1}{Z_2} - \frac{Z_2}{Z_1}}{\sqrt{\left(\frac{Z_1}{Z_2} + \frac{Z_2}{Z_1}\right)^2 + 4 \cot^2(d \cdot k)}}; \quad (2.17)$$

$$T_l = 1 - (R_p)^2 = \frac{1}{1 + \frac{1}{4} \left( \frac{Z_1}{Z_2} - \frac{Z_2}{Z_1} \right)^2 \sin^2(d \cdot k)}. \quad (2.18)$$

Як бачимо з рівняння (2.18) при  $d = \lambda n/2$  коефіцієнт проходження  $T_l = 1$ , в такому випадку акустичні коливання проходять крізь пластину без відбиття від неї. Отже, збільшити коефіцієнт проходження ультразвукових коливань через границю розподілу п'єзоелемент/повітря можна розмістивши узгоджуючий шар з певними фізичними та геометричними характеристиками між ними.

Таким чином, записавши системи рівнянь (2.15) та (2.16) для ультразвукового перетворювача (рис. 2.3), який навантажений на повітря та складається з п'єзоелемента і узгоджуючого шару, після їх розв'язку отримаємо загальний коефіцієнт проходження енергії акустичних коливань [63, 64]:

$$T = \frac{4 \cdot Z_1^{-1} \cdot Z_3}{\left( \frac{Z_3}{Z_1} + 1 \right)^2 - \left( \left( \frac{Z_3}{Z_2} \right)^2 - 1 \right) \cdot \left( \left( \frac{Z_2}{Z_1} \right)^2 - 1 \right) \cdot \sin^2(k \cdot d)}, \quad (2.19)$$

де  $Z_1, Z_2, Z_3$  - акустичний опір п'єзоелемента, узгоджуючого шару та повітря відповідно.

При проведенні даних розрахунків з метою їх спрощення не враховувалось затухання акустичних коливань в матеріалах.

### 2.3. Визначення фізичних та геометричних параметрів та вибір матеріалу узгоджуючого шару

Згідно з виразу (2.19) у випадках коли  $\lambda \ll d$  чи  $kd \ll 1$  або  $\sin kd = 0$  коефіцієнт проходження для трьох середовищ не залежить від товщини узгоджуючого шару. В загальному випадку, якщо два середовища розділені третім шаром, товщиною  $d$ , то коефіцієнт відбивання та проходження залежать від співвідношення товщини шару та довжини хвилі. При

перпендикулярному введенні хвилі півхвильовий шар (чи кратний йому) не впливає на її проходження [22]. Чвертьхвильовий шар (або кратній йому) спричиняє погіршення проходження, коли акустичний імпеданс шару більший або менший імпедансів середовищ, між якими він розміщений. Це й же шар забезпечує збільшення коефіцієнта проходження, якщо акустичний імпеданс шару менший імпедансу першого середовища, але більший імпедансу другого середовища.

У випадку коли  $\sin kd = 1$ , ( $d = (2n+1)\lambda/4$ ),  $n = 0, 1, 2, \dots$ , різниця між фазами падаючої і відбитої хвиль є рівною половині довжини хвилі, що призводить до генерації хвилі з протилежної сторони, при цьому рівняння (2.19) можна записати у вигляді:

$$T = \frac{4 \cdot Z_1^{-1} \cdot Z_3}{Z_2^2 \left( 1 + \frac{Z_1 \cdot Z_3}{Z_2^2} \right)}. \quad (2.20)$$

Коефіцієнт проходження стає рівним 1 і енергія ультразвукової хвилі передається без втрат від п'єзокераміки до повітря при  $Z_2 = \sqrt{Z_1 \cdot Z_3}$  (рис. 2.3). Взявши відомі значення акустичних імпедансів п'єзометеріалу ( $Z_1 = 25 \cdot 10^6 \text{ кг/м}^2\text{с}$  - титанат барію ТКБ-3 [33, 65]) та повітря ( $Z_3 = 0,00043 \cdot 10^6 \text{ кг/м}^2\text{с}$ ), визначимо оптимальне значення акустичного імпедансу узгоджуючого шару:  $Z_2 = 0,104 \cdot 10^6 \text{ кг/м}^2\text{с}$ . При визначеному значенні акустичного опору узгоджуючого шару та його товщині, кратній чверті довжини хвилі акустичних коливань в даному матеріалі, коефіцієнт проходження стає рівним 1 і енергія ультразвукових коливань передається без втрат від п'єзокераміки до повітря (рис. 2.6).

Проведений аналіз довідкових даних показав, що не існує матеріалу з таким значенням акустичного опору (рис. 2.6, позиція 4), тому для вибору матеріалу узгоджуючого шару перетворювача побудуємо згідно формули (2.19) графік залежності коефіцієнта проходження енергії акустичних коливань від частоти для узгоджуючих шарів, виготовлених з матеріалів, значення акустичних опорів яких є найбільш близькими до розрахованого

(рис. 2.7). Товщина узгоджувачих шарів рівна чверті довжини хвилі акустичних коливань у відповідному матеріалі.

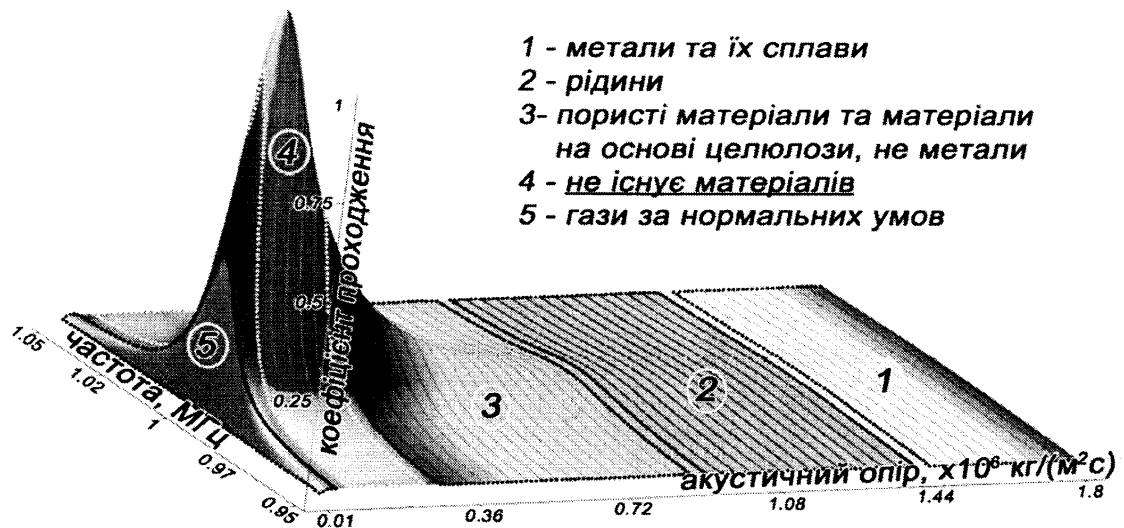


Рис. 2.6. Залежність коефіцієнта проходження від частоти та акустичного опору узгоджувачого шару для п'єзоелемента, виготовленого з титанату барію ТБК-3

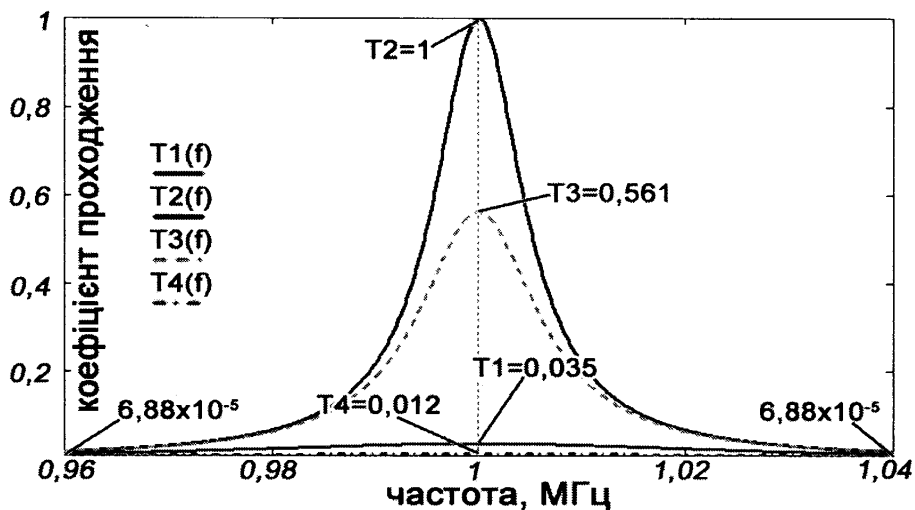


Рис. 2.7. Залежність коефіцієнта проходження від частоти для вказаних матеріалів узгоджувачих шарів:

T1(f) - вулканізована гума ( $Z_2 = 1,4 \cdot 10^6 \text{ кг/м}^2\text{с}$ ); T2(f) - узгоджувачий шар з розрахованим значенням акустичного опору ( $Z_2 = 0,104 \cdot 10^6 \text{ кг/м}^2\text{с}$ ); T3(f) - целюлоза (вторинна переробка,  $Z_2 = 0,26 \cdot 10^6 \text{ кг/м}^2\text{с}$ ); T4(f) - епоксидна смола ( $Z_2 = 1,9 \cdot 10^6 \text{ кг/м}^2\text{с}$ ).

Також побудуємо графік залежності коефіцієнта проходження енергії акустичних коливань від товщини узгоджувачих шарів, виготовлених з матеріалів, значення акустичних опорів яких є найбільш близькими до розрахованого (рис. 2.8).

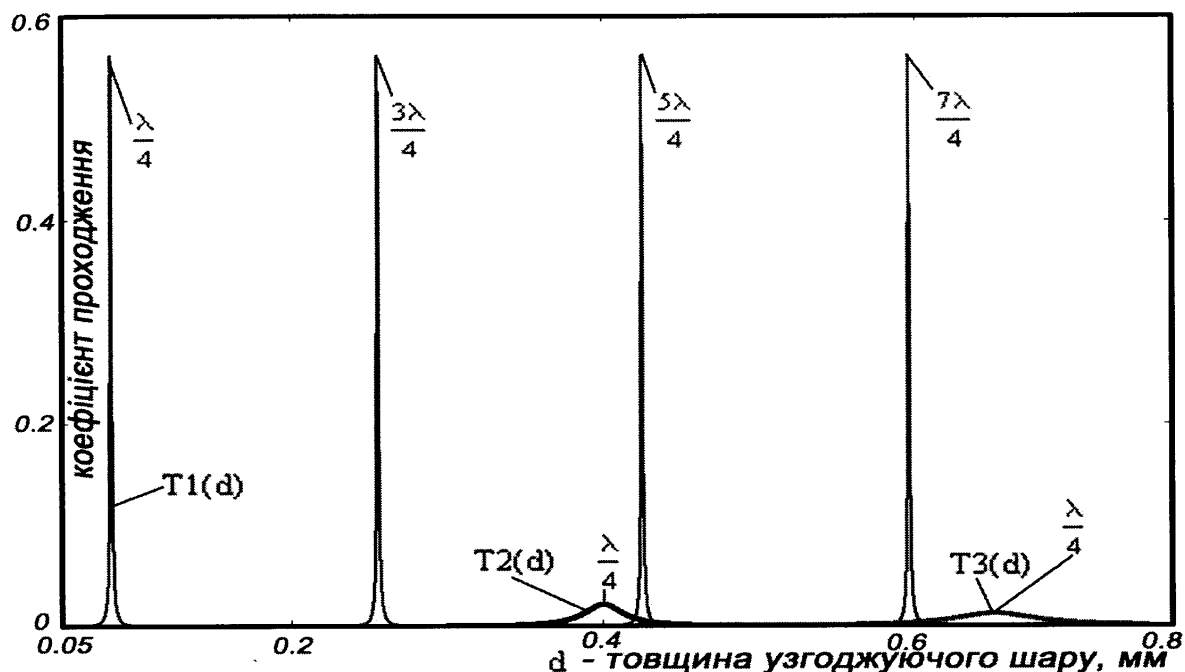


Рис. 2.8. Залежність коефіцієнта проходження від товщини узгоджувачих шарів:

T1(d) – целюлоза (вторинна переробка);

T2(d) - вулканізована гума; T3(d) – епоксидна смола.

Отже, як видно з графіків (рис. 2.6–2.8), для досягнення максимального значення коефіцієнта пропускання важливим є як вибір матеріалу узгоджувачого шару так і виготовлення такого шару з відповідним значенням товщини.

Для порівняння, згідно з формулою (2.9), розрахуємо коефіцієнт проходження енергії акустичних коливань для п'єзопретворювача без узгоджувачого шару навантаженого на повітря:

$$T_l = \frac{4Z_1 Z_3}{(Z_1 + Z_3)^2} = \frac{4 \cdot 25 \cdot 10^6 \cdot 0,00043 \cdot 10^6}{(25 \cdot 10^6 + 0,00043 \cdot 10^6)^2} = 0,0000688, \quad (2.21)$$

де  $Z_1 = 25 \cdot 10^6 \text{ кг/м}^2\text{с}$ ,  $Z_3 = 0,00043 \cdot 10^6 \text{ кг/м}^2\text{с}$  - акустичні імпеданси п'єзопластини (виготовленої з титанату барію ТКБ-3) та повітря відповідно. Таким чином для безконтактних акустичних перетворювачів, як бачимо з рис. 2.7, коефіцієнт проходження енергії акустичних коливань збільшується в 508 раз, при використанні для виготовлення узгоджуючого шару вулканізованої гуми та в 8150 раз при використанні целюлози.

Розрахунок товщини узгоджуючого шару  $h_{\text{ум}}$  проводитимемо за умови, що вона повинна бути рівною (кратною) чверті довжини хвилі акустичних коливань в даному матеріалі (в нашому випадку – целюлоза вторинної переробки):

$$h_{\text{ум}} = \frac{(2n+1)\lambda}{4}, \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad (2.22)$$

Оскільки:

$$\lambda = \frac{c}{f}, \quad (2.23)$$

де  $c$  - швидкість поширення акустичних коливань в матеріалі (в нашому випадку для целюлози вторинної переробки  $c = 340 \text{ м/с}$  [66]),  $f$  - частота акустичних коливань, отримаємо наступний вираз для визначення товщини матеріалу узгоджуючого шару:

$$h_{\text{ум}} = \frac{(2n+1)c}{4f}, \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad (2.24)$$

Для ультразвукового перетворювача, робоча частота якого в нашому випадку складає 1 МГц, розрахуємо товщини узгоджуючого шару: 0,085мм; 0,255мм; 0,425мм... Враховуючи суттєве значення втрат енергії акустичних коливань в самому матеріалі узгоджуючого шару, які виникають в наслідок затухання, з обчисленого ряду вибираємо найменше значення товщини матеріалу узгоджуючого шару. Таким чином узгоджуючий шар необхідно виготовляти у вигляді круглої пластини, товщиною 0,085мм, діаметр якої рівний діаметру п'єзоелемента перетворювача.

Отже проведене математичне моделювання та побудовані графічні залежності дали можливість вибрати матеріал для виготовлення



узгоджуючого шару безконтактного перетворювача – целюлоза вторинної переробки, та розрахувати його геометричні характеристики.

2.4 Методика розрахунку втрат енергії акустичних коливань при безконтактному акустичному вимірюванні товщини елементів металоконструкцій

Для збільшення коефіцієнта передачі енергії на границі розподілу повітря/досліджуваний об'єкт також можливо використати узгоджувач шар. Проте виготовлення та прикріплення узгоджувач шарів є досить дорогою та тривалою процедурою, що унеможливує їх використання при великих об'ємах контролю та вимагає введення додаткової операції по підготовці об'єкта контролю. Тому при використанні безконтактних методів контролю необхідно враховувати величину втрат енергії акустичних коливань на границі розподілу повітря/ОК, в повітрі та об'єкті контролю (рис. 2.9).

Для проведення розрахунку в якості збуджуючого елемента виберемо п'єзопластину виготовлену з титанату барію ТБК-3 діаметром  $a = 20\text{мм}$ , резонансна частота якої складає  $f = 1\text{МГц}$ . В якості матеріалу для узгоджуючого шару - целюлозу вторинної переробки, товщиною  $0,085\text{мм}$ . Об'єкт контролю переставляє собою сталю пластину, товщиною  $10\text{мм}$ .

Для елементарного п'єзоперетворювача з круглою (дископодібною) пластиною діаграма направленості описується формулою [22, 67]:

$$\frac{p}{p_a} = \left| \frac{2J_1(ak \sin \theta)}{(ak \sin \theta)} \right|, \quad (2.25)$$

де  $\theta$  - кут між напрямком променя і акустичною віссю,  $J_1$  - функція Бесселя першого порядку,  $p_a$  - амплітуда поля на акустичній осі,  $a$  - радіус п'єзопластини.

При розрахунках будемо користуватися спрощеною формулою для обчислення поля на акустичній осі дископодібного перетворювача:

$$\frac{p}{p_0} = 2 \cdot \left| \sin \frac{\pi a^2}{2\lambda r} \right|, \quad (2.26)$$

де  $p_0$  - амплітуда акустичного сигналу на поверхні середовища, яке дотикається до перетворювача,  $r$  - відстані від п'єзопластини до точки спостереження.

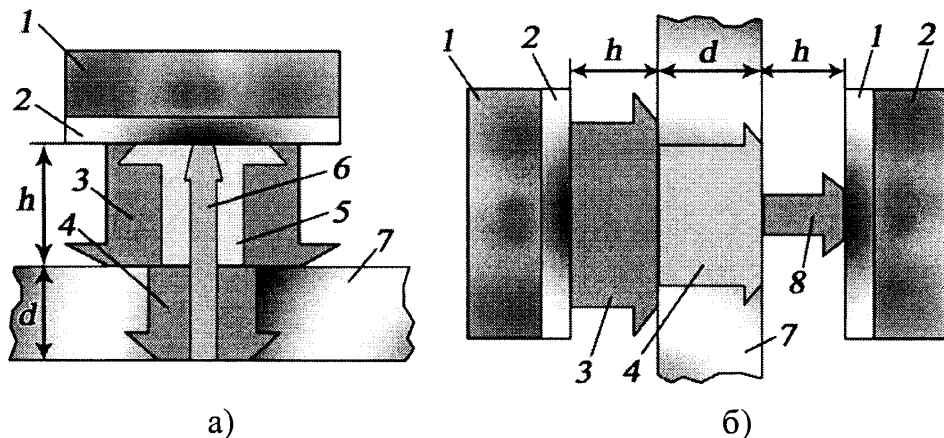


Рис. 2.9. Ультразвуковий безконтактний спосіб вимірювання товщини матеріалів при односторонньому а) та двосторонньому б) доступі до поверхні об'єкта контролю:

1 – п'єзоелектрична пластина, 2 – узгоджувачий шар, 3 – падаюча хвиля, 4 – пройшовша хвиля, 5 – хвиля відбита від зовнішньої поверхні, 6 - хвиля відбита від внутрішньої поверхні, 7 – дослідний зразок (сталевий зразок), 8 – пройшовша через об'єкт контролю (ОК) хвиля,  $h$  – відстань від перетворювача до ОК,  $d$  – товщина пластини.

Графік залежності амплітуди акустичних коливань на осі перетворювача, який випромінює енергію в повітря, від відстані для п'єзопластини діаметром 20мм зображено на рис. 2.10.

Для запропонованого перетворювача, що випромінюватиме енергію в повітря, приблизне значення границі ближньої зони обчислюється за формулою:

$$r = \frac{a^2}{\lambda} = \frac{a^2 \cdot f}{c} = \frac{(0,01\text{м})^2 \cdot 1 \cdot 10^6 \text{с}^{-1}}{331\text{м/с}} = 0,302\text{м}, \quad (2.27)$$

де  $c$  - швидкість поширення акустичних коливань в повітрі.

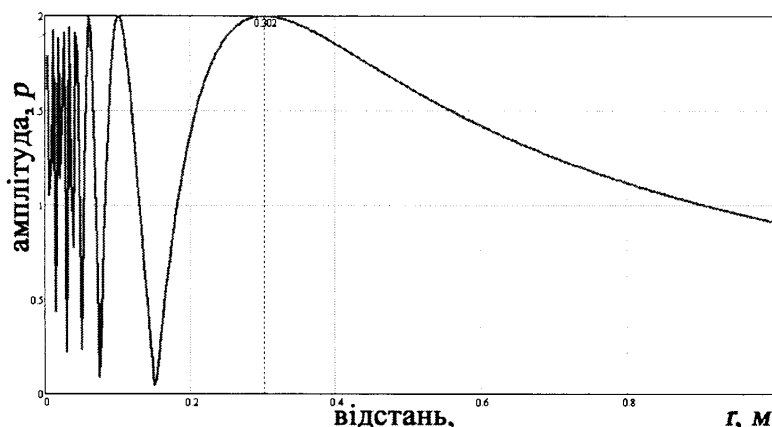


Рис. 2.10. Амплітуда поля на акустичній осі перетворювача

Отже, враховуючи те, що акустичні коливання поширюються від перетворювача до ОК і відбившись від ОК до перетворювача, в нашому випадку відстань від перетворювача до об'єкта контролю (рис. 2.9) повинна бути не меншою  $r/2 = 15$  см. Вибір відстані пов'язаний також з тим, що в ближній зоні спостерігається зумовлена інтерференцією немонотонна зміна амплітуди акустичного поля, а в дальній зоні амплітуда монотонно зменшується з віддалю. Виходячи з цього виберемо відстань від перетворювача до ОК -  $h = 16$  см.

#### 2.4.1 Визначення втрат енергії акустичних коливань при односторонньому доступі до поверхні об'єкта контролю

Втрати енергії акустичних коливань для даного способу вимірювання можна записати наступним чином:

- для акустичних коливань відбитих від зовнішньої поверхні ОК [68, 69]:

$$N_1|_{дб} = 2 \cdot (T_T + A_{нов}) + R_1, \quad (2.28)$$

де  $T_T$  - втрати у перетворювачі через узгоджуючий шар,  $A_{нов}$  - зменшення інтенсивності ультразвукової хвилі в повітрі,  $R_1$  - втрати енергії відбитої

хвилі на границі повітря/ОК (зовнішня поверхня). Множник 2 вказує на те що втрати виникають при прямому (від перетворювача) та зворотному (до перетворювача) напрямках:

- для акустичних коливань відбитих від внутрішньої поверхні:

$$N_2|_{Дб} = 2 \cdot (T_T + A_{нос} + A_{ОК} + T_1) + R_2 = N_1|_{Дб} + 2(A_{ОК} + T_1), \quad (2.29)$$

де  $A_{ОК}$  - зменшення інтенсивності ультразвукової хвилі в ОК,  $T_1$  - втрати енергії пройшовшої хвилі на границі ОК/повітря (внутрішня поверхня),  $R_2$  - втрати енергії відбитої хвилі на границі ОК/повітря.

Втрати у перетворювачі через узгоджуючий шар  $T_T$  товщиною чверті довжини хвилі можна виразити через коефіцієнт проходження енергії акустичних коливань (2.19) наступним чином:

$$T_T = 10 \lg \frac{I_2}{I_1} = 10 \lg T_T = 10 \lg \frac{4 \cdot Z^{-1} \cdot Z_3}{\left(\frac{Z_3}{Z_1} + 1\right)^2 - \left(\left(\frac{Z_3}{Z_2}\right)^2 - 1\right) \cdot \left(\left(\frac{Z_2}{Z_1}\right)^2 - 1\right) \cdot \sin^2(k \cdot h_{ш})}, \quad (2.30)$$

де  $I_1, I_2$  - енергія акустичних коливань падаючої та пройшовшої хвиль відповідно,  $Z_1, Z_2, Z_3$  - акустичні опора п'єзопластини, узгоджуючого шару та повітря відповідно.

Втрати енергії відбитої хвилі на границі на границі розподілу двох середовищ (повітря /ОК та ОК/повітря) можна визначити:

$$R_{1,2} = 10 \lg \frac{I_{12}}{I_1} = 10 \lg \left( \frac{Z_3 - Z_4}{Z_4 + Z_3} \right)^2, \quad (2.31)$$

де  $I_1, I_{12}$  - енергія акустичних коливань падаючої та відбитої хвиль відповідно,  $Z_3, Z_4 = 46,2 \cdot 10^6 \text{ кг/м}^2 \text{ с}$  - акустичний опір повітря та ОК (стальна пластина) відповідно.

Втрати енергії пройшовшої хвилі (2.9) на границі розподілу двох середовищ (повітря – ОК) обчислюються за формулою:

$$T_1 = 10 \lg \frac{I_2}{I_1} = 10 \lg \frac{4Z_3Z_4}{(Z_3 + Z_4)^2}. \quad (2.32)$$

Втрати, які пов'язані з зменшенням інтенсивності ультразвуку в матеріалі, визначаються затуханням. Це зменшення інтенсивності відбувається за законом [52]:

$$I = I_0 e^{-2\delta x}, \quad (2.33)$$

де  $\delta$  - коефіцієнт затухання, визначається віддалю, на якій амплітуда хвилі зменшується в  $e = 2,718$  раз і залежить від частоти ультразвукових коливань. Іноді затухання характеризують параметром  $N_a$  (числом від'ємних децибел), на яке зменшується амплітуда сигналу на відстані 1 м:

$$N_a = 8,686 \cdot \delta. \quad (2.34)$$

Тоді:

$$A_{OK} = 8,686 \cdot \delta_{OK} = 8,686 \cdot 0,45 = 3,9 \text{ дБ/м}, \quad (2.35)$$

де  $\delta_{OK} = 0,45 \text{ м}^{-1}$  - коефіцієнт затухання ультразвукових коливань в ОК.

Затухання ультразвуку в повітрі можна приблизно визначити при нормальних умовах з наступного рівняння [68]:

$$A_{нов} = 1,64 f^2 10^{-10} \text{ дБ/м}, \quad (2.36)$$

де  $f$  - частота акустичних коливань. При частоті 1 МГц це затухання становить 164 дБ/м.

Таким чином, втрати енергії акустичних коливань відбитих від зовнішньої та внутрішньої поверхонь ОК можна записати:

$$N_{1, \text{дб}} = 2 \cdot (10 \lg \frac{4Z_1^{-1}Z_3}{\left(\frac{Z_3}{Z_1} + 1\right)^2 - \left(\left(\frac{Z_3}{Z_2}\right)^2 - 1\right) \cdot \left(\left(\frac{Z_2}{Z_1}\right)^2 - 1\right) \cdot \sin^2(k \cdot h_{yu})} - 8,686 \delta_{нов} h) + 10 \lg \left(\frac{Z_3 - Z_4}{Z_4 + Z_4}\right)^2, \quad (2.37)$$

$$N_{2, \text{дб}} = N_{1, \text{дб}} + 2 \left( 8,686 \cdot \delta_{OK} d + 10 \lg \frac{4Z_3 Z_4}{(Z_3 + Z_4)^2} \right). \quad (2.38)$$

Після проведення розрахунків згідно з формул (2.37) та (2.38) отримаємо наступні значення (для товщини пластини  $d = 10 \text{ мм}$ ):

- для п'єзоперетворювача з узгоджувачим шаром, виготовленим з целюлози вторинної переробки:

$$N_{1|_{дб}} = 2 \cdot (10 \lg 0,474 - 164 \cdot 0,16) + 10 \lg \left( \frac{0,00043 \cdot 10^6 - 46,2 \cdot 10^6}{0,00043 \cdot 10^6 + 46,2 \cdot 10^6} \right)^2 = -58,96 \text{ дБ}; \quad (2.39)$$

$$N_{2|_{дб}} = -58,965 + 2 \left( -3,9 \cdot 0,01 + 10 \lg \frac{4 \cdot 0,00043 \cdot 10^6 \cdot 46,2 \cdot 10^6}{(0,00043 \cdot 10^6 + 46,2 \cdot 10^6)^2} \right) = -148,32 \text{ дБ}; \quad (2.40)$$

- для п'єзоперетворювача без узгоджувачого шару:

$$N_{1|_{дб}} = 2 \cdot (10 \lg 0,0000688 - 164 \cdot 0,16) + 10 \lg \left( \frac{0,00043 \cdot 10^6 - 46,2 \cdot 10^6}{0,00043 \cdot 10^6 + 46,2 \cdot 10^6} \right)^2 = -135,73 \text{ дБ}; \quad (2.41)$$

$$N_{2|_{дб}} = -135,729 + 2 \left( -3,9 \cdot 0,01 + 10 \lg \frac{4 \cdot 0,00043 \cdot 10^6 \cdot 46,2 \cdot 10^6}{(0,00043 \cdot 10^6 + 46,2 \cdot 10^6)^2} \right) = -225,09 \text{ дБ}; \quad (2.42)$$

Побудуємо за формулами (2.37) та (2.38) графічну залежність величини втрат енергії акустичних коливань від частоти для п'єзоелектричного перетворювача з узгоджувачим шаром товщиною чверть довжини хвилі, який виготовлений з целюлози вторинної переробки та для перетворювача без узгоджувачого шару при вимірюванні безконтактним акустичним методом товщини сталеві пластини (рис. 2.11).

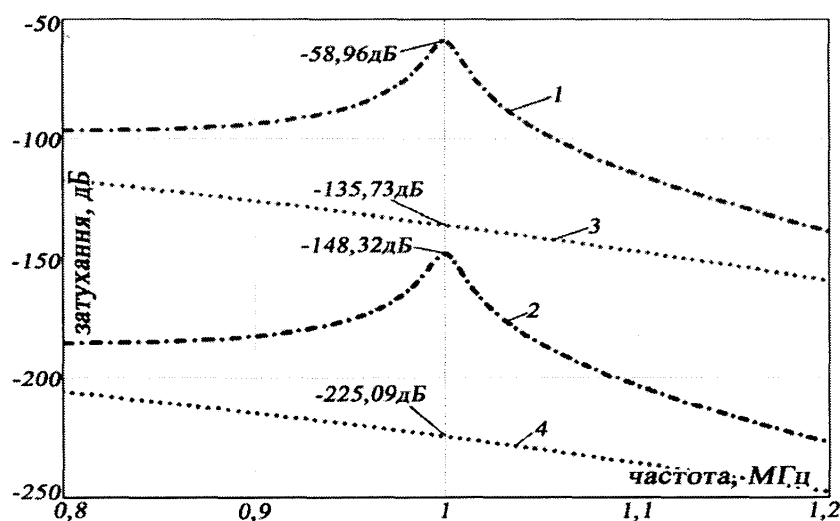


Рис. 2.11. Залежність величини втрат енергії акустичних коливань від частоти для п'єзоелектричного перетворювача з узгоджувачим шаром (позиція 1, 2) та без узгоджувачого шару (позиція 3, 4) при вимірюванні безконтактним акустичним методом товщини сталеві пластини :

1, 3 – акустичні коливання відбиті від зовнішньої поверхні ОК,

2, 4 – від внутрішньої поверхні ОК

Таким чином з формул (36) – (41) та рис. 2.11 можна зробити висновок про те, що використання узгоджуючого шару виготовленого з целюлози вторинної переробки зменшує втрати енергії акустичних коливань при безконтактному вимірюванні товщини елементів металоконструкцій більш ніж на 77дБ.

#### 2.4.2 Визначення втрат енергії акустичних коливань при двосторонньому доступі до поверхонь об'єкта контролю

При вимірюванні товщини ОК безконтактним акустичним методом при двосторонньому доступі до його поверхонь визначаються втрати енергії акустичних коливань пройшовших через ОК. Перетворювачі (випромінюючий та приймаючий) розміщуються один навпроти одного так щоб їхні акустичні осі співпадали на відстані від поверхонь ОК, яка визначена попередньо (рис. 2.9, б). Також в даному випадку необхідно враховувати втрати енергії акустичних коливань в повітрі, на границях розділу повітря/ОК, ОК/повітря, в матеріалі ОК та втрати у випромінюючому та приймаючому перетворювачі через узгоджуючий шар.

Таким чином, втрати енергії акустичних коливань пройшовших через ОК можна записати:

$$N \Big|_{дб} = 2 \cdot (10 \lg \frac{4 \cdot Z_1^{-1} \cdot Z_3}{\left(\frac{Z_3}{Z_1} + 1\right)^2 - \left(\left(\frac{Z_3}{Z_2}\right)^2 - 1\right) \cdot \left(\left(\frac{Z_2}{Z_1}\right)^2 - 1\right) \cdot \sin^2(k \cdot h_{yш})} - 8,686 \cdot \delta_{нос} \cdot h) + \\ + 8,686 \cdot \delta_{ОК} \cdot d + 20 \lg \frac{4Z_3Z_4}{(Z_3 + Z_4)^2} \quad , \quad (2.43)$$

Після проведення розрахунків згідно з формули (2.43) отримаємо наступне значення втрат енергії акустичних коливань при вимірюванні товщини ОК (для товщини пластини  $d = 10 \text{ мм}$ ) при двосторонньому доступі до поверхні ОК:

- для п'єзоперетворювачів з узгоджуючими шарами:

$$N_{дб} = -147.5 дБ; \quad (2.44)$$

- для п'єзоперетворювачів без узгоджуючих шарів:

$$N_{дб} = -224,4 дБ. \quad (2.45)$$

Зрозуміло, що при такому значенні втрат амплітуда інформаційних сигналів буде нижчою рівня власних шумів перетворювача та підсилювача акустичних коливань. Оціночні розрахунки показують, що очікуване значення відношення сигнал/шум буде в діапазоні від -2 дБ до -9 дБ при товщині ОК до 10 мм [69].

2.5 Побудова діаграми направленості безконтактного акустичного перетворювача та визначення її впливу на чутливість методу

Для розроблення конструкції та визначення характеристик перетворювача проведемо розрахунок характеристик акустичного поля. Як говорилось вище, в акустичному полі перетворювача виділяють дві зони: ближня і дальня. В ближній зоні більше 80% енергії коливань знаходиться в межах циліндра, який обмежений краями п'єзопластини. В дальній зоні поле має вигляд променів, які розходяться з точки, що має назву ефективного акустичного центру. Нормований за максимумом акустичного тиску графік залежності амплітуди (або інтенсивності) поля в дальній зоні функції від напрямку поширення хвилі називається діаграмою направленості.

Для нашого випадку діаграму направленості п'єзоелектричного перетворювача з одним узгоджуючим шаром, який навантажений на повітря побудуємо згідно з формули (2.25). Центральна частина діаграми направленості, в межах якої амплітуда зменшується від одиниці до нуля, називається основною пелюсткою перетворювача (рис. 2.12) [70, 71].

Половину кута розкриття основної пелюстки п'єзоелектричного перетворювача можна приблизно визначити за формулою [70]:

$$\theta = \arcsin\left(0,61 \frac{\lambda}{a}\right) = \arcsin\left(0,61 \frac{331 м/с}{0,01 м \cdot 1 \cdot 10^6 с^{-1}}\right) = 1,14^\circ. \quad (2.46)$$



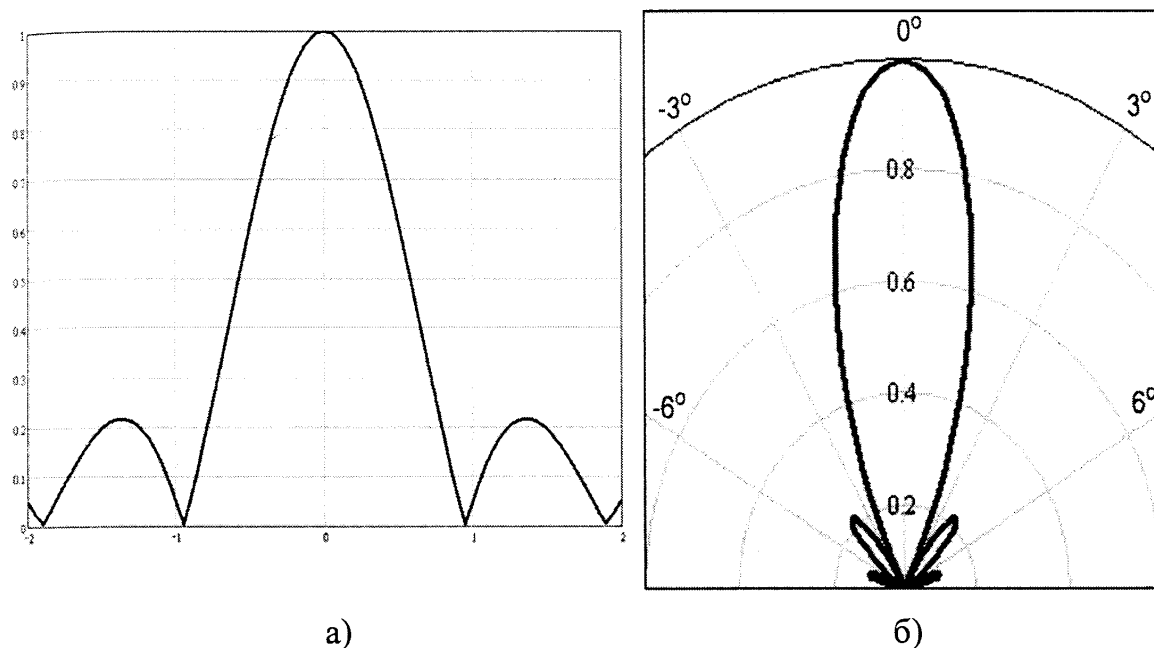


Рис. 2.12. Діаграми направленості поля п'єзоелектричного перетворювача навантаженого на повітря в прямокутних (а) та полярних (б) координатах

Отже з ефективного акустичного центру ультразвукові коливання розходяться у вигляді променів під кутом  $1,14^\circ$  до акустичної осі перетворювача. На границі розподілу повітря – ОК акустичні коливання зазнають часткового відбивання та заломлення.

В нашому випадку, при нормальному вводиті акустичних коливань, кут падіння променя  $\alpha$  на поверхню ОК та величина кута відбитого променя  $\beta$  буде рівною куту розходження акустичних променів  $\theta$  (рис. 2.13).

Величину кута заломлення  $\gamma$  пройшовших в ОК акустичних коливань отримаємо з закону синусів:

$$\frac{\sin \alpha}{c_1} = \frac{\sin \gamma}{c_2} \Rightarrow \gamma = \arcsin \frac{c_2 \cdot \sin \alpha}{c_1} = \arcsin \frac{5800 \text{ м/с} \cdot \sin 1,14^\circ}{331 \text{ м/с}} = 21,1^\circ, \quad (2.47)$$

де  $c_1, c_2$  - швидкості поширення повздовжніх хвиль у повітрі та ОК (сталь) відповідно.

Поширюючись в тілі ОК, акустичні коливання зазнають також відбивання та заломлення на межі ОК – повітря та поширюються в

зворотному напрямку до зовнішньої поверхні. Величина кута відбивання  $\gamma'$  на внутрішній поверхні (точка В, рис. 2.13) буде рівною величині кута заломлення на зовнішній межі розподілу середовищ повітря – ОК (точка А), величині кута відбивання на внутрішній межі розподілу середовищ ОК – повітря (точка В) та величині кута падіння акустичного променя на зовнішню межу розподілу ОК – повітря в точці С. Величина кута заломлення акустичного променя на зовнішній межі розподілу ОК – повітря (точка С) визначається аналогічно за формулою (2.47) і буде рівною куту падіння акустичного променя на зовнішню поверхню:  $\alpha = \alpha' = 1,14^\circ$ .

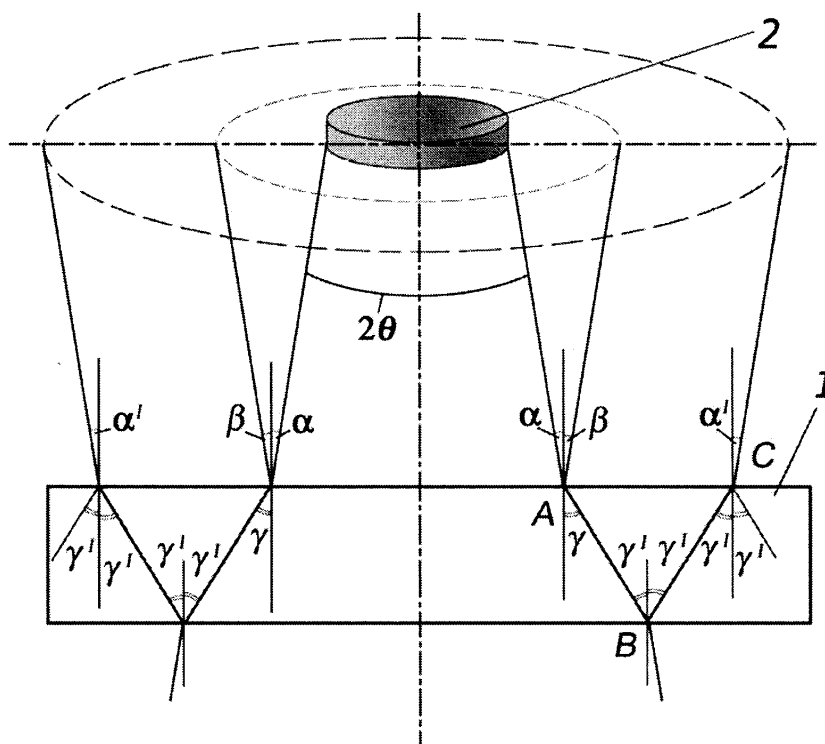


Рис. 2.13. Поширення акустичних променів у повітрі та ОК:

1 – ОК; 2 – п'єзоперетворювач.

Якщо зобразити акустичні промені у вигляді зрізаного конуса з кутом при вершині рівним  $\theta$ , то діаметр плями акустичних променів  $d_1$  на поверхні ОК можна визначити за наступною формулою:

$$d_1 = 2(a + h \cdot \operatorname{tg} \alpha). \quad (2.48)$$

В площині перетворювача діаметр плями  $d_2$  акустичних променів отримуємо з формули:

$$d_2 = 2(a + 2h \cdot \operatorname{tg} \alpha). \quad (2.49)$$

Діаметр плями акустичних променів  $D$  відбитих від внутрішньої поверхні ОК в площині перетворювача отримуємо з формули:

$$D = 2(a + 2 \cdot h \cdot \operatorname{tg} \alpha + 2 \cdot d \cdot \operatorname{tg} \gamma). \quad (2.50)$$

Якщо припустити, що густина відбитих від зовнішньої та внутрішньої поверхні ОК акустичних променів в площині перетворювача буде однаковою в кожній точці цієї площини, то співвідношення їх енергій до енергій вихідної хвилі буде відповідно рівне відношенню квадратів діаметрів плям акустичних променів. Провівши певні розрахунки згідно з формул (2.49) та (2.50) та розрахувавши площу випромінювання та приймання поверхні перетворювача, з попереднього твердження можна зробити висновок про те, що в нашому випадку на п'єзоелемент потрапить тільки 37% та 17% випроміненої енергії від зовнішньої та внутрішньої поверхні ОК відповідно.

Тому для збільшення чутливості перетворювача необхідно зменшити кут розкриття основної пелюстки перетворювача щоб акустичні промені поширювались паралельно до акустичної осі перетворювача. Дану проблему можна вирішити шляхом використання акустичної лінзи, яка виготовлена з відповідного матеріалу та має товщину чверть довжини акустичної хвилі в центральній частині [72]. Акустичну лінзу розміщують між п'єзопластиною та узгоджуючим шаром і виготовляють з матеріалу, акустичний імпеданс якого близький до акустичного імпедансі п'єзопластини для збільшення коефіцієнту передачі енергії акустичних коливань. Проте, в такому випадку, виникає певна трудність з виготовленням та кріпленням узгоджуючих шарів до акустичної лінзи, оскільки вони повинні мати увігнуту форму.

Для збільшення чутливості та зменшення втрат енергії акустичних коливань, які виникають в наслідок розходження акустичних променів, в нашому випадку доцільно розмістити перетворювач ближче до об'єкта контролю, таким чином, щоб відстань від ОК до ПЕП була меншою половини

довжини ближньої зони перетворювача. В ближній зоні акустичні промені поширюються паралельно до акустичної осі перетворювача.

2.6 Розроблення методу безконтактного акустичного контролю залишкової товщини та величини корозійних втрат металу металоконструкцій

Спосіб акустичного безконтактного одночасного вимірювання залишкової товщини та ступеня ерозійного та корозійного пошкодження металоконструкцій базується на тому, що ультразвукові коливання З (УЗК) від ПЕП, розміщеного зовні над ОК (рис. 2.9), через шар повітря направляється в зону контролю.

УЗК на грані розділу двох середовищ (повітря/метал) зазнають часткового відбивання і заломлення, тобто промінь УЗК З, відбивається від зовнішньої ОК і, пройшовши зворотній шлях, попадає на ПЕП. Заломлений промінь УЗК 6, пройшовши через ОК, відбивається від його внутрішньої поверхні і, поширюючись в зворотному напрямку через ОК і шар повітря, попадає на ПЕП. При розміщенні ультразвукового п'єзоперетворювача над поверхнею ОК на ділянці з відсутніми зовнішніми та внутрішніми ерозійними пошкодженнями, проводять вимірювання часу проходження УЗК від ПЕП до ОК і час проходження УЗК в тілі ОК та приймають ці значення за базові.

При паралельному переміщенні ультразвукового перетворювача відносно поверхні виробу (наприклад, для трубних виробів паралельно осі) і його розміщенні на ділянкою з ерозійним чи корозійним пошкодженням зовнішньої та внутрішньої поверхні ОК час проходження ультразвукового променя в шарі повітря збільшується, а час проходження УЗК в тілі ОК зменшується. Шляхом віднімання відповідних базових значень часових інтервалів, заміряних на некоронованій ділянці і на коронованій, які відповідають часу проходження ультразвукового променя в шарі повітря та тілі ОК, отримують часові інтервали які будуть пропорційні величині зовнішнього та внутрішнього ерозійного чи корозійного пошкодження

відповідно. Час проходження УЗК в тілі металокопструкції буде пропорційний її залишковій товщини.

Таким чином, глибина зовнішньої та внутрішньої корозії визначається за формулами:

$$\Delta h = \frac{(t_{p1} - t_{p2}) \cdot c_p}{2}, \quad (2.51)$$

$$\Delta H = \frac{(t_{M1} - t_{M2}) \cdot c_M}{2}, \quad (2.52)$$

а значення величини залишкової товщини металічного виробу визначатиметься за формулою:

$$H_3 = \frac{t_{M2} \cdot c_M}{2}, \quad (2.53)$$

де  $\Delta h$ ,  $\Delta H$  - величина глибини зовнішнього та внутрішнього корозійного пошкодження відповідно,  $t_{p1}$ ,  $t_{p2}$  - час проходження УЗК в повітрі в першому та другому випадках відповідно,  $t_{M1}$ ,  $t_{M2}$  - час проходження УЗК в металічному виробі першому та другому випадках відповідно,  $c_p$  - швидкість поширення УЗК в повітрі,  $c_M$  - швидкість поширення УЗК в металічному виробі,  $H_3$  - залишкова товщина металічного виробу.

#### Висновки до розділу.

В ході проведених теоретичних досліджень щодо удосконалення акустичного безконтактного методу контролю товщини елементів металокопструкцій отримано наступні результати:

1) розроблено фізичну модель процесу безконтактного акустичного контролю товщини металокопструкцій, що дозволило визначити напрямки подальших досліджень щодо удосконалення методу, шляхом зменшення втрат енергії акустичних коливань на границі розділу п'єзоелемент/повітря та

компенсацією втрат енергії акустичних коливань на границі розділу повітря/об'єкт контролю та в повітрі шляхом використання узгоджувачів шарів та нових методів оброблення дефектоскопічної інформації;

2) розроблено математичну модель узгоджувача шару безконтактного ультразвукового перетворювача, що дало змогу розрахувати його геометричні та фізичні характеристики та вибрати матеріали для його виготовлення;

3) проведено розрахунок втрат енергії акустичних коливань при безконтактному вимірюванні товщини елементів металоконструкцій та побудовано діаграму направленості акустичного поля безконтактного перетворювача, що дало змогу визначити оптимальні параметри контролю;

4) розроблено новий спосіб безконтактного акустичного контролю одночасно таких параметрів, як залишкова товщина та величина корозійного та ерозійного пошкодження елементів металоконструкцій.

### РОЗДІЛ 3

## ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЩОДО РОЗРОБЛЕННЯ НОВОГО МЕТОДУ ОБРОБЛЕННЯ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИГНАЛІВ

У попередньому розділі було запропоновано шляхи вирішення однієї з двох проблем для реалізації безконтактного акустичного методу контролю товщини металоконструкцій. Теоретично доведено можливість проведення безконтактного контролю акустичним методом та розраховано вхідні параметри для розроблення методу оброблення вимірювальної інформації. В даному розділі будуть подані результати теоретичних досліджень, що дадуть змогу вибрати метод оброблення дефектоскопічної інформації, який дасть можливість підвищити чутливість безконтактного методу контролю товщини.

### 3.1 Розроблення теоретичних основ методу оброблення дефектоскопічної інформації

Як було сказано в другому розділі, при безконтактному вимірюванні товщини за допомогою ультразвукових перетворювачів відбиті від зовнішньої та внутрішньої поверхонь сигнали можуть, в залежності від характеристик підсилювального тракту, знаходитися нижче рівня шуму, або знаходяться в суміші з випадковим білим шумом, що було розраховано в попередньому розділі. В такому випадку традиційні методи оброблення вимірювальної інформації та локалізації ехо-імпульсів не дають змогу визначити час поширення акустичних коливань та розрахувати товщину виробу.

Проблема виявлення таких ехо-імпульсів близька до існуючої в традиційній дефектоскопії проблеми підвищення чутливості ехо-імпульсної дефектоскопії. Однак, існуючі методи підвищення чутливості не вирішують проблеми виявлення ехо-імпульсів, замаскованих шумом і виділення їх з випадкового шуму. Збільшення чутливості за рахунок збільшення амплітуди

зонduючого сигналу має межу, що визначається вихідним каскадом генератора або максимальною допустимою напругою на перетворювачі [22, 67].

Виходячи з вищесказаного, при контролі виробів за допомогою безконтактних акустичних перетворювачів виникає проблема виявлення імпульсів відбитих від поверхонь ОК, що знаходиться нижче рівня шумів.

Виділення ехо-імпульсів з білого шуму залежить не від амплітуди, а від енергії зонduючого сигналу. Очевидно, що виділити ехо-імпульс з шуму можна при зменшенні частоти зонduючого сигналу, оскільки затухання залежить від частоти. Отже чутливість до виявлення прямо пропорційна енергії зонduючого імпульсу і обернено пропорційна частоті сигналу.

Такого роду проблеми, як підвищення чутливості приладу, комплексно вирішують при використанні відомих в радіотехніці складномодульованих сигналів і методів їх обробки – оптимальної фільтрації, синхронного детектування або накопичення [73].

При вимірюванні товщини ехо-імпульсним методом за допомогою безконтактного суміщеного перетворювача з повітряно-акустичним зв'язком, що було описано в роботах [69, 74], перетворювач розміщуються над поверхнею ОК на певній відстані. Відстань від перетворювача до поверхні ОК, яку було розраховано в другому розділі, складає 160 мм товщина ОК – 10 мм. Частота акустичних коливань становить 1 МГц. В ідеальному випадку, при вимірюванні товщини ехо-імпульсним методом, за відсутності шумів, на екрані осцилографа отримаємо наступну послідовність імпульсів: збуджуючий імпульс 1 та ехо-імпульси, відбиті від зовнішньої 2 та внутрішньої 3 поверхонь (рис. 3.1). Час поширення акустичних коливань від перетворювача до зовнішньої поверхні і в зворотному напрямку  $t_{нов}$  та в матеріалі ОК (сталь 40ХНМ)  $t_{ок}$  можна обчислити за формулами:

$$t_{нов} = \frac{2h_{нов}}{c_{нов}} = 969,7_{мкс}, \quad (3.1)$$



$$t_{OK} = \frac{2h_{OK}}{c_{OK}} = 3,39 \text{ мкс}, \quad (3.2)$$

де  $h_{нов} = 160 \text{ мм}$  - відстань від перетворювача до поверхні ОК,  $h_{OK} = 10 \text{ мм}$  - товщина ОК,  $c_{нов} = 330 \text{ м/с}$ ,  $c_{OK} = 5900 \text{ м/с}$  - швидкість поширення акустичних коливань в повітрі та матеріалі ОК відповідно.

Як видно з (3.1) та (3.2) велика різниця в часі між імпульсами 1, 2 та 3 виникає в основному із-за значної різниці між швидкостями поширення акустичних коливань в повітрі та матеріалі ОК.

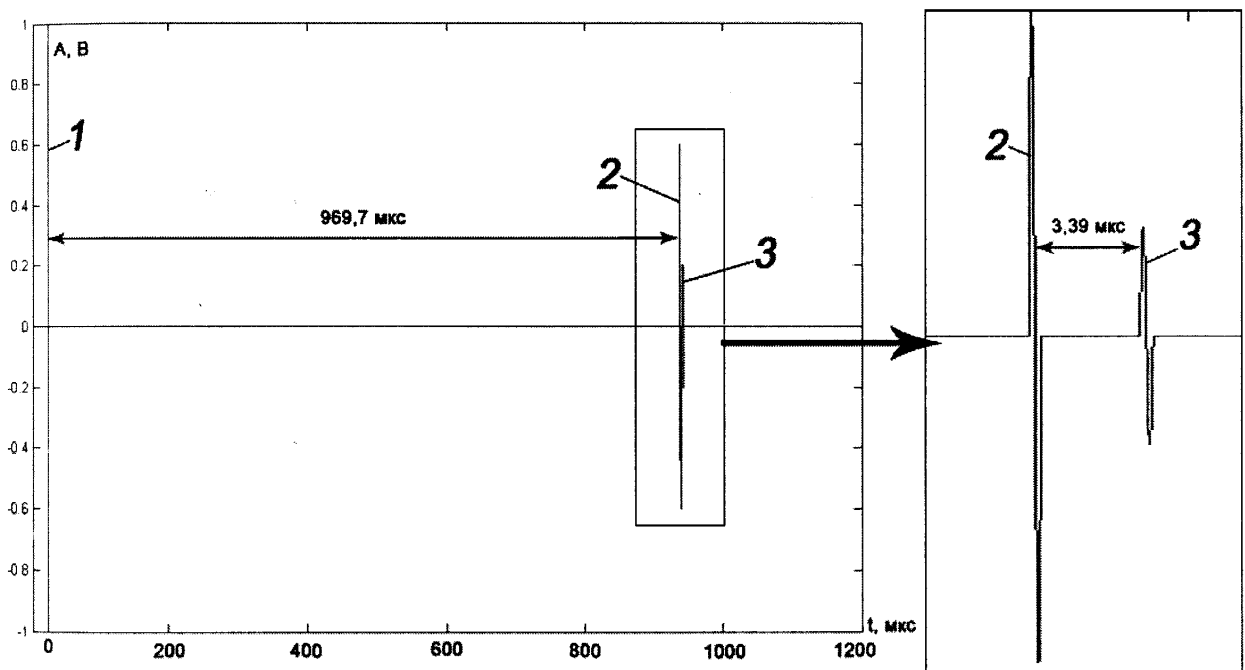


Рис. 3.1. Осцилограма ехо-імпульсів при вимірюванні товщини безконтактним способом

Проте, як було сказано попередньо, внаслідок присутності власних шумів перетворювача, теплових шумів підсилювача, інших завад та значних втрат енергії акустичних коливань на границях розподілу (п'єзометеріал/повітря, повітря/метал та метал/повітря) отримати на екрані осцилографа ехо-імпульси та чітко їх локалізувати, як правило, не можливо. Інформаційний сигнал в такому випадку маскується шумом (рис.3.2).

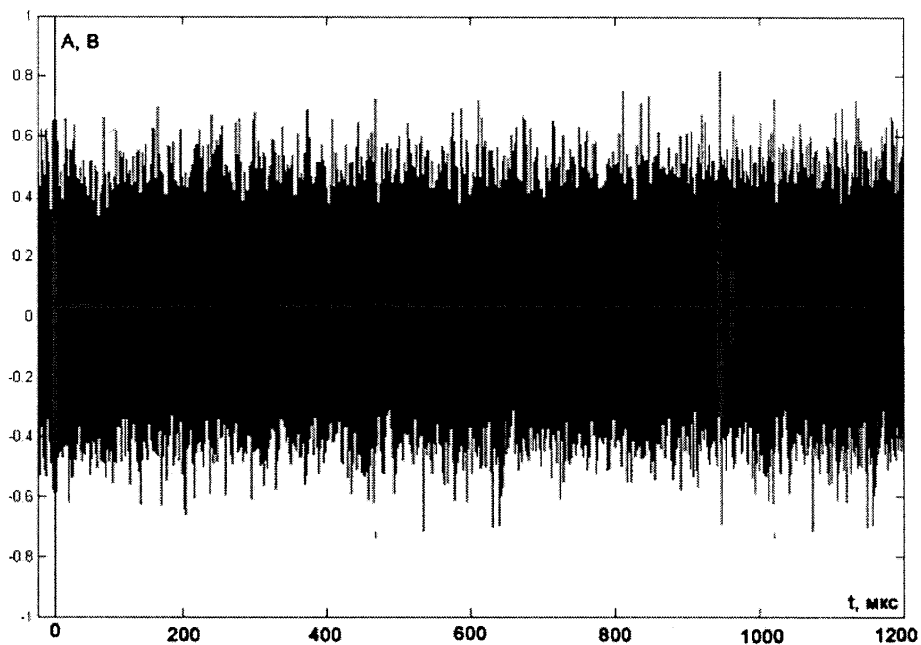


Рис. 3.2. Зашумлений та ідеальний сигнал. Рівень шуму більший за рівень поверхневого та донного ехо-імпульсів

Корисний сигнал для наглядності на рис. 3.2 виділено додатково. В дійсності візуально виділити його практично неможливо.

Проведений аналіз літературних джерел показав, що для підвищення чутливості, зменшення впливу шумів та виділення корисного сигналу, використовуються вейвлет-перетворення [75], М-последовності [73, 76], штучні нейронні мережі [77, 78], коди Баркера [79, 80] та інші методи представлення та обробки дефектоскопічної інформації.

### 3.2. Взаємкореляційний метод оброблення дефектоскопічної інформації

Аналіз існуючих методів обробки та фільтрації дефектоскопічних сигналів, який подано в роботі [74], показав, що одним із найефективніших методів вирішення вказаної задачі є взаємкореляційний. Суть зазначеного методу полягає у розрахунку значень кореляції отриманої вибірки (рис. 3.2) із ідеальним сигналом. Найчастіше, для підвищення інформативності та

чутливості методу ідеальний сигнал певним чином кодується. Найкращими для цієї задачі є коди Баркера. Такий підхід найчастіше використовують для радіолокації в цивільній та військовій інженеріях [76, 80, 81].

Використання кодів Баркера для модуляції зондуючих сигналів ЕМА-перетворювачів при дефектоскопії різьбових з'єднань дає можливість підвищити чутливість та відношення сигнал/шум до 6 дБ [82, 83]. Відношення сигнал/шум також зростає до 17 дБ із збільшенням довжини коду Баркера.

Проте, якщо для дефектоскопії різьбових з'єднань збільшення довжини коду принципового значення не має, то для товщинометрії ехо-імпульсним методом вона спричиняє збільшення тривалості збуджуючого та ехо-імпульсу, що унеможливорює розпізнання донного та поверхневого ехо-імпульсів при малих товщинах ОК. Так, наприклад, якщо товщина ОК становить 10мм, швидкість поширення акустичних коливань в матеріалі ОК складає 5900 м/с, то при частоті зондуючих імпульсів 1 МГц, розрізнити поверхневий та донний ехо-імпульси, тривалість яких більша 3 періоди практично не можливо, оскільки вони накладаються.

Виходячи з вищесказаного, для нашого випадку доцільно вибрати код мінімальної довжини. Найбільш придатним для застосувань при модуляції збуджуючого імпульсу є код типу „+1 -1”, який може бути представлений звичайною синусоїдою (рис. 3.3). Це пояснюється специфікою роботи п'єзокераміки [35]. Числу +1 кодової послідовності Баркера відповідає додатній, а числу -1 від'ємний півперіод синусоїди.

Теоретична перевірка можливості використання взаємокореляційного підходу для підвищення чутливості ультразвукового безконтактного способу вимірювання товщини проводилась шляхом чисельного моделювання в програмному пакеті MATLAB процесу поширення акустичних коливань від перетворювача до ОК з врахуванням втрат енергії ультразвукових коливань, які були розраховані в попередньому розділі.

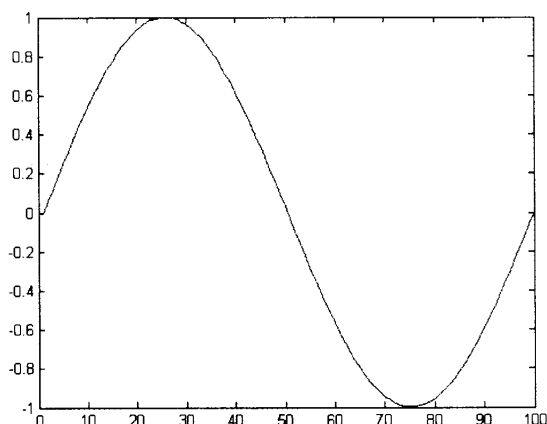


Рис. 3.3. Модулюючий код Баркера (+1 -1 послідовність)

Було проведено чисельне моделювання процесу вимірювання товщини при різних значеннях рівня шуму, з метою виявлення такого значення відношення сигнал/шум вхідного сигналу при якому відношення сигнал/шум вихідного сигналу стає рівним 0 дБ. До корисного сигналу додавався білий шум, рівень якого більший за рівень поверхневого та донного ехо-імпульсів (рис. 3.2).

Після цього розраховувалась взаємно кореляційна функція (ВКФ) зашумленого сигналу та модулюючого коду (рис. 3.4).

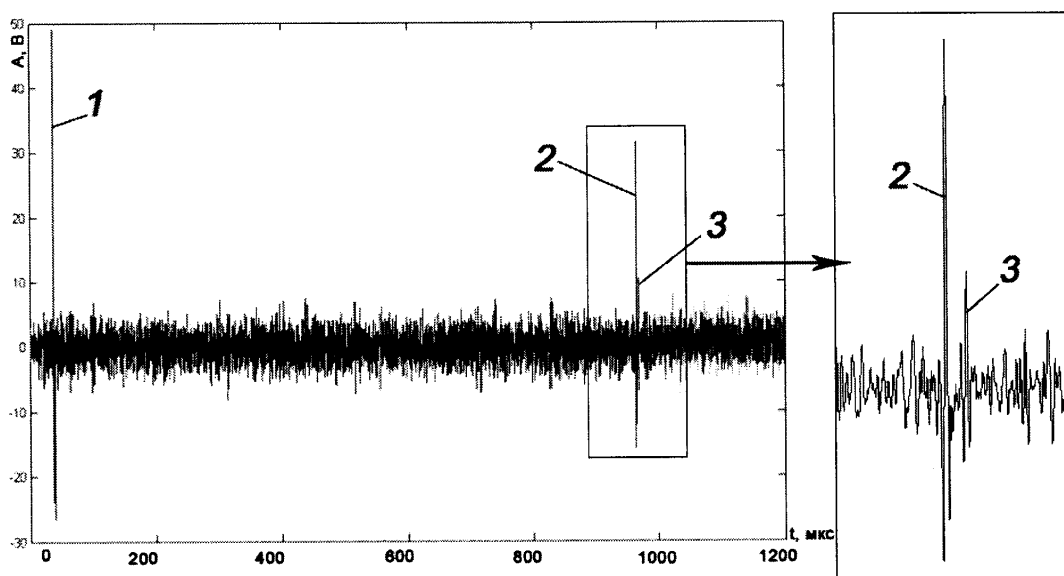


Рис. 3.4. ВКФ зашумленого сигналу та модулюючого коду

Як видно з рис. 3.4 розрахована взаємкореляційна функція зашумленого сигналу та модулюючого коду дала можливість, в даному випадку, чітко виділити ехо-імпульс від зовнішньої 2, локалізувати ехо-імпульс від внутрішньої 3 поверхонь ОК та підняти рівень ехо-імпульсів на 18 дБ у порівнянні з рівнем вхідного сигналу, тобто використання взаємкореляційна функція дає можливість додатково підсилити корисний сигнал. Відношення сигнал/шум вхідного сигналу при цьому складало - 2,1 дБ.

Аналогічно було проведено близько 20 досліджень, за результатами яких можна було чітко виділити донний та поверхневий ехо-сигнали. При цьому відношення сигнал/шум вхідного сигналу змінювалось в діапазоні від 0 дБ до -6 дБ.

Проте збільшення відношення сигнал/шум вхідного сигналу до значення -6,1дБ, призвело до того, що відношення сигнал/шум вихідного сигналу стало рівним 0 дБ (рис. 3.5).

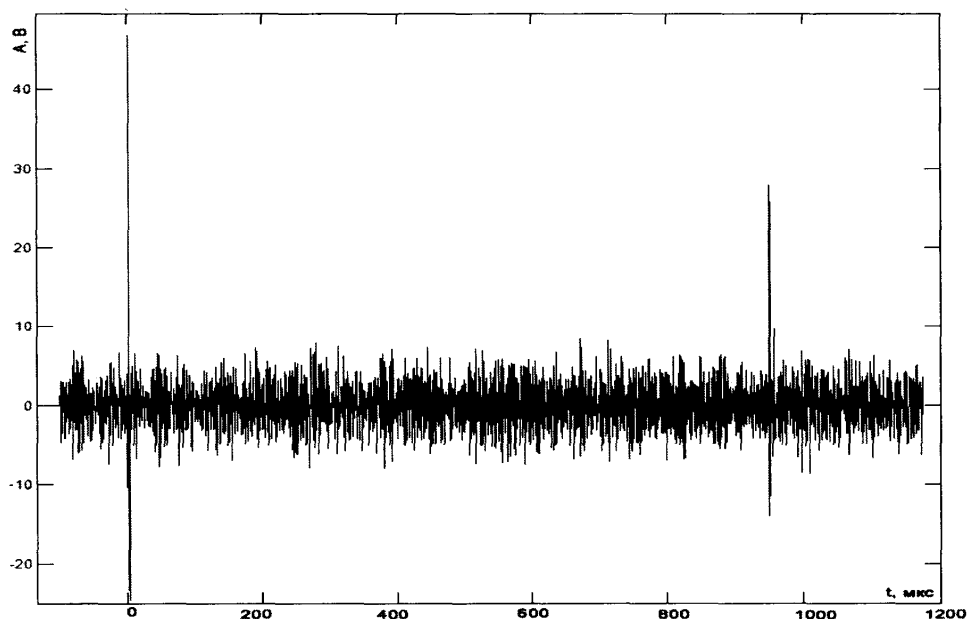


Рис. 3.5. ВКФ зашумленого сигналу та модулюючого коду. Відношення сигнал/шум для ехо-сигналу від внутрішньої поверхні ОК рівне 0 дБ

В такому випадку другий відбитий сигнал після обробки вже не можливо було виявити. Таким чином шляхом математичного моделювання було визначено таке значення відношення сигнал/шум вхідного сигналу при якому класичний метод з використанням ВКФ не давав бажаного результату. Тому, було вирішено продовжити дослідження та знайти інший більш стійкий до завад метод.

### 3.3. Розроблення нового методу оброблення дефектоскопічної інформації

Проведений аналіз існуючих методів оброблення вимірювальної інформації показав, що для виявлення в корисного сигналу застосовуються також штучні нейромережі [84, 85]. Теоретичні дослідження з використанням нейромереж проводились аналогічно. Відношення сигнал/шум вхідного сигналу було таке, при якому за допомогою взаємкореляційного методу з використанням кодів Баркера, не можливо чітко локалізувати ехо-імпульс від донної поверхні.

Штучні нейронні мережі (ШНМ) – це розділ штучного інтелекту, в якому для оброблення сигналів використовуються явища, аналогічні тим, які відбуваються в нейронах живих істот. Найважливіша особливість мережі, яка вказує на її широкі можливості та великий потенціал, полягає в паралельному обробленні інформації всіма розгалуженнями. Велика кількість міжнейронних взаємозв'язків дозволяє значно пришвидшити процес оброблення інформації [86, 87]. Друга не менш важлива особливість ШНМ полягає в здатності до навчання і узагальнення накопичених знань. Нейронна мережа володіє властивостями, які притаманні штучному інтелекту. Нейрони штучної мережі пов'язані між собою синаптичними з'єднаннями. ШНМ в процесі роботи, перетворює вхідні в часі, в результаті чого змінюється внутрішній стан мережі і відбувається формування вихідних параметрів.

Для класифікації і розпізнавання образів мережа накопичує в процесі навчання знання про основні властивості цих образів, таких як геометричне

відображення структури образу, розподіл головних компонентів або інших характеристик. При узагальненні акцентується увага на відмінностях образів один від одного, які складають основу для вибору класифікаційних рішень [88, 89, 90]. Саме ця особливість ШНМ є важливою для оброблення зашумлених сигналів при безконтактному акустичному контролі геометричних характеристик елементів металоконструкцій.

Перед початком роботи більшість штучних нейронних мереж потребують тренування, яке полягає в підборі параметрів мережі, при яких мережа найкращим чином вирішує поставлені задачі. Для вирішення задачі тренування ШНМ існує досить багато алгоритмів [91].

Загалом нейронні мережі підлаштовуються, або навчаються так, що певний вихід повинен відповідати певному входу. В загальному випадку, така ситуація зображена на рис. 3.6.

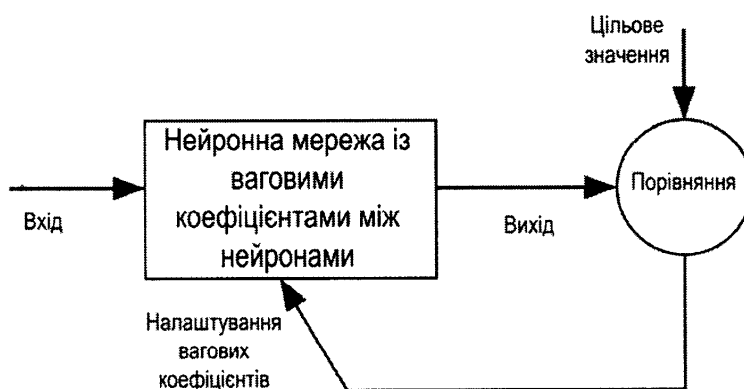


Рис. 3.6. Навчання нейронної мережі

Для розв'язання з допомогою нейронних мереж прикладних задач необхідно зібрати достатній і репрезентативний об'єм даних для того, щоб навчити нейронну мережу вирішувати такі задачі. Навчальний набір даних - це набір спостережень, які містять ознаки досліджуваного об'єкта [92].

Для більшості реальних задач буває достатньо кількох сотень або тисяч спостережень. Для складних задач може бути необхідною більша кількість спостережень, проте дуже рідко зустрічаються задачі, де необхідно менше 100 спостережень.

Процедура побудови нейронної мережі складається із наступних кроків:

- вибору початкової конфігурації мережі; наприклад, у вигляді одного шару із кількістю нейронів, рівною половині кількості входів і виходів;
- моделювання і навчання мережі із оцінюванням контрольної похибки і використання додаткових нейронів або проміжних шарів;
- виявлення ефекту перенавчання і коректування конфігурації мережі [93, 94].

Шляхом аналізу способів побудови структури нейромереж, алгоритмів роботи та типів ШНМ та проведених теоретичних досліджень було обрано архітектуру нейромережі, яка найкращим чином вирішувала поставлені задачі.

Суть нового методу, розробленого на базі штучних нейронних мереж, полягає в наступному.

По вибірці із сигналами (рис. 3.2) реалізується так званий метод „плаваючого вікна”. Тобто аналізується весь сигнал по частинам, розмір яких відповідає розміру виконання корисного сигналу (рис. 3.3), який необхідно виявити. Плаваюче вікно пересувається вздовж всього сигналу із кроком одиниця.

В такому разі, задача зводиться до аналізу вибірки із сигналу, яка може містити корисний сигнал або шум. Іншими словами, необхідно розпізнати в зашумленому сигналі корисний – в нашому випадку синусоїду.

Для цього було побудовано і проведено тренування ряду нейронних мереж типу із оберненим поширенням помилки.

За використання алгоритму зворотного поширення мережа розраховує похибку, яка виникає у вихідному шарі і вираховує вектор градієнта як функцію вагових коефіцієнтів і зміщень. Цей вектор вказує напрямок найкоротшого спуску по поверхні для даної точки, тому якщо просунутись в цьому напрямку, то помилка зменшиться [95]. Послідовність таких кроків загалом призведе до мінімуму того чи іншого типу. Певні труднощі викликає вибір величини кроку.



За більшої довжини кроку збіжність буде більш швидкою, але існує небезпека перескочити через розв'язок або піти в невірному напрямку. Класичним прикладом такого явище при навчанні нейронної мережі є ситуація, коли алгоритм дуже повільно просувається по вузькому рову із крутими схилами, перескакуючи з одного схилу на інший. І навпаки, за малого кроку, ймовірно, буде обрано вірний напрямок, проте при цьому необхідно буде виконати дуже багато ітерацій. На практиці величину кроку обирають пропорційною крутизні схилу (градієнту функції помилки); такий коефіцієнт пропорційності називається параметром швидкості налаштування. Правильний вибір параметру швидкості налаштування залежить від конкретної задачі і зазвичай здійснюється дослідним шляхом; цей параметр може тепер залежати від часу, зменшуючись за ходом виконання алгоритму.

Алгоритм діє ітераційно, і його кроки прийнято називати епохами або циклами. На кожному циклі на вхід мережі послідовно подаються всі навчальні спостереження, вихідні значення порівнюються із цільовими значеннями і розраховується функція помилки. Значення функції помилки, а також її градієнту використовуються для коректування вагових коефіцієнтів та зміщень, після чого всі дії повторюються. Початкові значення вагових коефіцієнтів і зміщень мережі обираються випадковим чином, і процес навчання припиняється або коли реалізована певна кількість циклів, або коли помилка досягає певного малого значення або більше не зменшується [96, 97]. Даний алгоритм на сьогоднішній час вважається одним із найбільш ефективним алгоритмом навчання.

Архітектура (структура) нейромережі була наступною: один прихований шар із кількістю нейронів у ньому, яка рівна 100; на виході один нейрон, який видає результати роботи мережі в межах  $[-1 \dots +1]$  (рис. 3.7).

Мережа тренувалась таким чином, щоб при подачі на її вхід зашумленого корисного сигналу на виході показувала „+1”, або близьке до нього значення, і „-1” – при подачі на вхід шуму.

Для тренування нейромережі на її вхід подавались зашумлені із різни рівнем шуму корисні сигнали та шуми. При подаванні на вхід нейромережі зашумленого корисного сигналу на вихід подавалось значення +1, а при подаванні на вхід нейромережі шуму, на вихід подавалось значення -1. Оскільки задача такої класифікації не є лінійною (шум Гаусовий, корисний сигнал – нелінійний), то в нейронах в якості функції перетворення було використано функцію *tansig*.

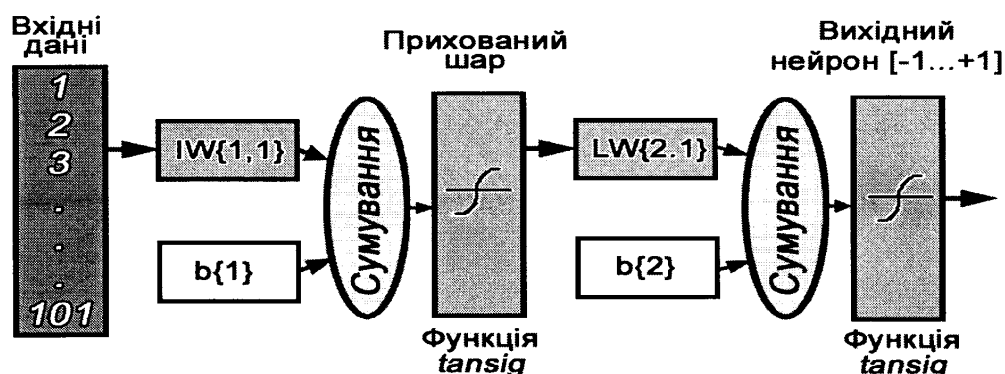


Рис. 3.7. Структура нейромережі:

$IW\{1,1\}$  – вагові коефіцієнти першого шару нейронів – матриця  $100 \times 1$ ;  
 $b\{1\}$  – затримки першого шару – матриця  $100 \times 1$ ;  $LW\{2,1\}$  – вагові коефіцієнти  
 другого шару нейронів – матриця  $100 \times 1$ ;  $b\{2\}$  – затримки другого шару –  
 матриця  $100 \times 1$ .

Тестування нейромережі здійснювалось на вибірці із 500 зашумлених корисних сигналів та 500 відрізків шуму.

Результати при цьому були наступними (рис. 3.8).

Класифікація вхідних сигналів здійснювалась наступним чином: вихід нейромережі в діапазоні  $0 \dots +1$  символізував про наявність у вибірці корисного сигналу; при виході нейромережі в діапазоні  $0 \dots -1$ , результат інтерпретувався як відсутність корисного сигналу у даній вибірці.

З рисунка 7 видно, що якщо при розпізнанні шуму у нейромережі практично не виникає труднощів, то при розпізнанні корисних сигналів трапляються помилки, рівень яких склав – 4,2% (21 із 500 вибірок, що

містили корисний сигнал, на виході нейромережі дали результат в діапазоні  $0 \dots -1$ ). Таким чином точність розпізнання зашумлених сигналів склала 95,8 %. При цьому, для 500 вибірок сигналів шуму, вихід нейромережі знаходився в діапазоні  $-0,85 \dots -1$ .

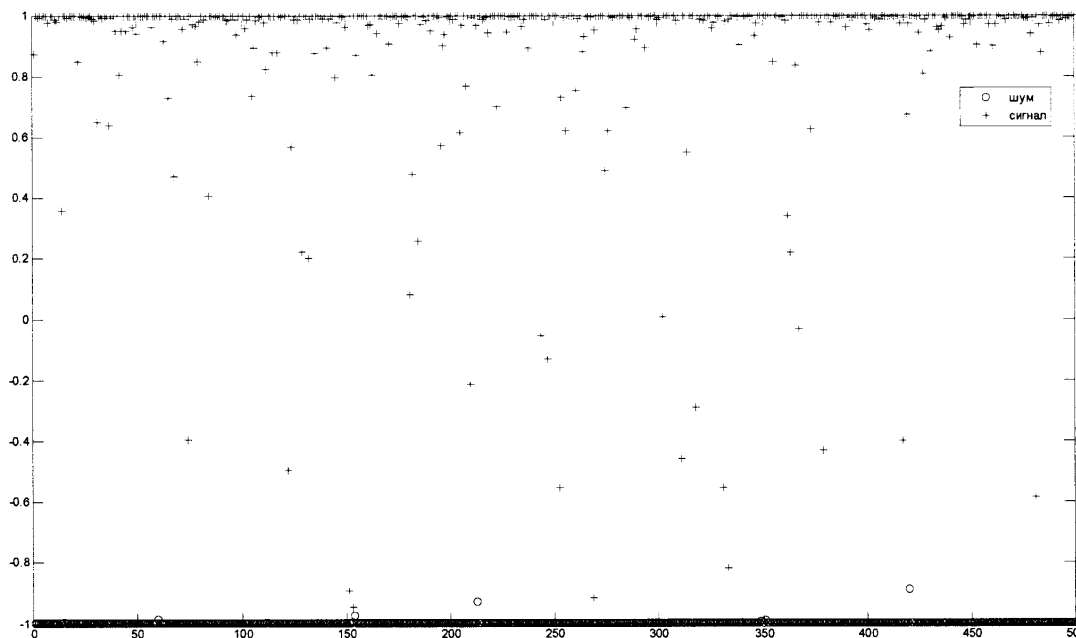


Рис. 3.8. Значення виходів нейромережі

Додатково, з метою підвищення інформативності запропонованого методу (результати якого уже порівнювані із результатами застосування кореляційного підходу у поєднанні із кодами Баркера), було запропоновано використовувати перед подачею тестових сигналів на нейромережу процедуру згладжування [98].

На основі проведеного аналізу літературних джерел, згладжування було запропоновано виконувати по 11 точках методом фільтрації Савіцького-Голя. Згладжуючі фільтри Савіцького-Голя, які також поліноміальними згладжуючими фільтрами або згладжуючими фільтрами із мінімальною квадратичною помилкою, як правило, використовують для „згладжування” зашумлених сигналів із широким спектром [99, 100]. В даному випадку згладжуючі фільтри Савіцького-Голя працюють набагато краще, ніж

звичайні усереднюючі не рекурсивні фільтри, які мають тенденцію разом із шумом видаляти значну частку високочастотних складових. Фільтри Савіцького-Голя краше зберігають високочастотні складові сигналу, проте забезпечують гірше подавлення шуму у порівнянні із звичайними не рекурсивними фільтрами [101].

Фільтри Савіцького-Голя здійснюють поліноміальну апроксимацію окремих кадрів вхідного сигналу за критерієм мінімуму квадратичної помилки [102]. В цьому сенсі вони є оптимальними.

Результати застосування процедури згладжування дозволили підвищити точність розпізнання між корисними сигналами та шумами (рис.3.9).

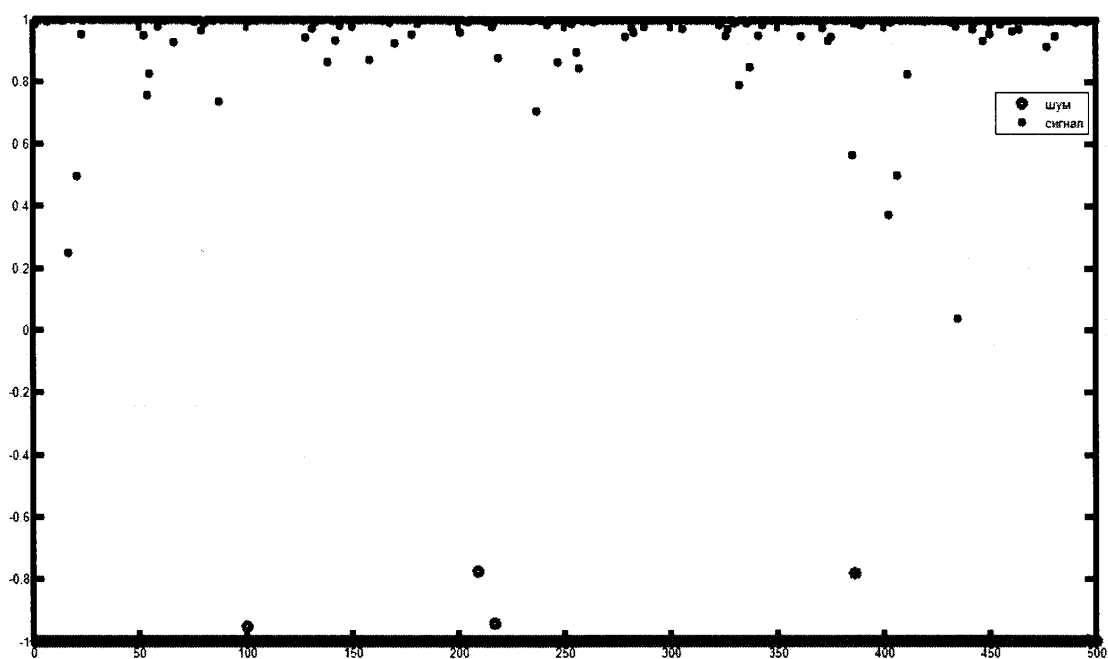


Рис.3.9. Значення виходів неймережі після процедури згладжування вхідного сигналу

Точність розпізнання зашумлених сигналів при використанні процедури згладжування склала 99,8 %, при відношенні сигнал/шум вхідного сигналу -6,1дБ (1 із 500 сигналів був невірною класифікований). При роботі із шумами проблем у розпізнанні не було виявлено.

При зменшенні відношення сигнал/шум на вході до значень близьких - 8дБ точність розпізнання зашумлених сигналів склала 95%, а при відношенні сигнал/шум -8,5дБ – близько 82%. При такому рівні завад взаємкореляційний метод із застосуванням кодів Баркера вже не дозволяв виявляти корисні сигнали.

Таким чином, можемо сказати, що нами запропоновано новий метод виявлення зашумлених сигналів, результати порівнювані із результатами кореляційного підходу у поєднанні із кодами Баркера.

Проте, до характерних переваг зазначеного нейромережевого методу у порівнянні із класичним підходом слід віднести наступне: незалежність від форми вхідного сигналу і її характеру; можливість удосконалення шляхом зміни в архітектурі нейромережі, застосування більш досконалих методів тренування та згладжування; простота апаратної реалізації методу на базі мікропроцесорної техніки, на якій побудовані практичні усі сучасні технічні засоби неруйнівного контролю та технічної діагностики

#### Висновки до розділу.

Отже, за результатами проведених теоретичних досліджень можна зробити наступні висновки:

1) проведено чисельне моделювання процесу оброблення виміральної інформації підтвердило можливість використання ВКФ для додаткового підсилення корисних сигналів, відношення сигнал/шум для яких не більше -6,1дБ. При збільшенні рівня шуму, використання ВКФ не дає позитивного результату;

2) проведене моделювання довело можливість використання нейромереж для виявлення корисного сигналу в шумі при відношенні сигнал/шум -6,1 дБ, з рівнем помилки 4,2 %;

3) використання процедури згладжування вхідних сигналів методом фільтрації Савицького-Голя, дало можливість зменшити рівень помилки до 0,2%, при відношенні сигнал/шум -6,1 дБ.

## РОЗДІЛ 4

### ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ УДОСКОНАЛЕНОГО АКУСТИЧНОГО МЕТОДУ КОНТРОЛЮ ТОВЩИНИ ЕЛЕМЕНТІВ МЕТАЛОКОНСТРУКЦІЙ

Експериментальні дослідження були проведені з метою перевірки основних теоретичних положень, які були отримані в другому та третьому розділах, а саме, щодо реалізації удосконаленого безконтактного акустичного методу контролю товщини елементів металоконструкції необхідно вирішити дві проблеми: зменшення втрат енергії акустичних коливань на границі розділу п'єзоелемент/повітря та компенсація втрат енергії акустичних коливань в повітрі та на границі розділу повітря/об'єкт контролю. Рішення даних проблем можна отримати шляхом комплексного використання узгоджуючого шару (чи шарів) та розробленого нового методу оброблення вимірювальної інформації, що дасть можливість розроблення технічного засобу для безконтактного акустичного контролю товщини металоконструкцій.

Таким чином для вирішення поставлених завдань та з метою забезпечення достовірності результатів експериментальних досліджень, була розроблена методика проведення експериментальних досліджень щодо:

- експериментальної перевірки адекватності розробленої математичної моделі узгоджуючого шару, визначення дійсних значень втрат енергії акустичних коливань на границі розділу п'єзоелемент/повітря та технічних характеристик розробленого безконтактного ультразвукового перетворювача;
- експериментальної перевірки взаємкореляційного та розробленого нового методу оброблення вимірювальної інформації на базі штучних нейронних мереж для підвищення чутливості методу вимірювання товщини;
- метрологічної оцінки удосконаленого методу безконтактного акустичного контролю товщини металоконструкцій.

#### 4.1 Опис експериментальної установки

На основі отриманих в другому та третьому розділах висновків, для удосконалення акустичного методу контролю товщини металоконструкцій необхідно забезпечити зменшення втрат енергії акустичних коливань на границі розділу п'єзоелемент/повітря та компенсацію втрат в повітрі та на границі розділу повітря/об'єкт контролю.

Для розроблення методики експериментальних досліджень з перевірки удосконаленого методу контролю товщини елементів металоконструкцій необхідно розробити технічні засоби або використати існуючі, які дадуть можливість провести експериментальні дослідження для підтвердження адекватності математичної моделі та правильності вибору методів зменшення та компенсації втрат енергії акустичних коливань.

Для вирішення поставленого завдання було розроблено та виготовлено експериментальну установку, загальний вигляд якої зображено на рис. 4.1.

Експериментальна установка для контролю товщини матеріалів складається з акустичного блоку, генераторно-приймального тракту та блоку візуалізації, оцифрування та оброблення акустичних сигналів. До акустичного блоку входять два безконтактні ультразвукові перетворювачі: випромінюючий, приймаючий, конструкцію яких подано вище та штангенциркуль.

До складу генераторно-приймального тракту входять: блок живлення, високовольтний генератор, генератор ультразвукових коливань, синхронізатор та попередній підсилювач.

Блок візуалізації оцифрування та оброблення акустичних сигналів містить цифровий осцилограф Tektronix TDS1012 та персональний комп'ютер. Блок-схема експериментальної установки для вимірювання товщини металоконструкцій подана на рис. 4.2.



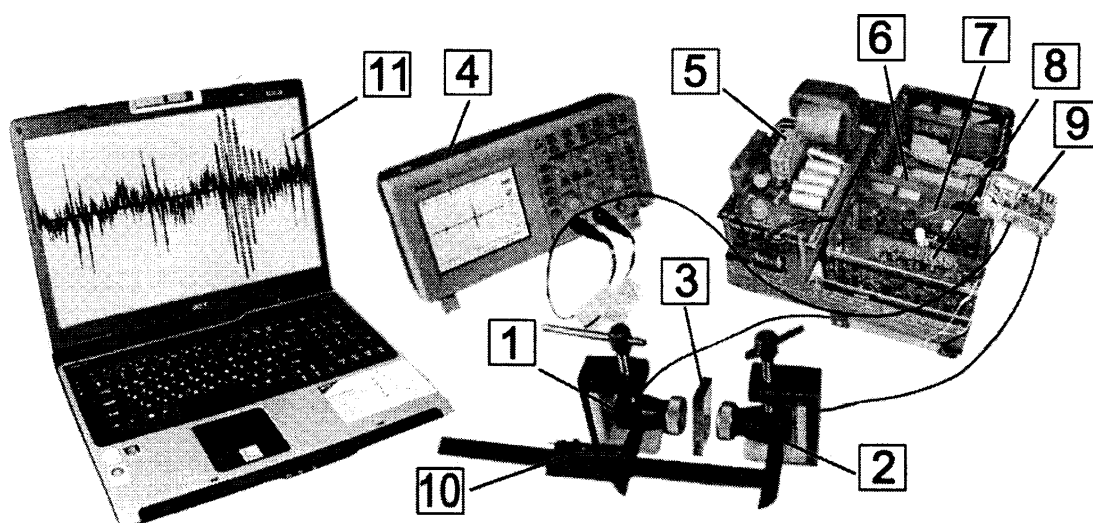


Рис. 4.1. Загальний вигляд експериментальної установки:

1, 2 – випромінюючий та приймаючий безконтактний ультразвуковий перетворювач відповідно, 3 – об’єкт контролю, 4 – цифровий осцилограф, 5 – блок живлення, 6 – високовольтний перетворювач, 7 – генератор ультразвукових коливань, 8 – синхронізатор, 9 – попередній підсилювач, 10 – штангенциркуль, 11- персональний комп’ютер.

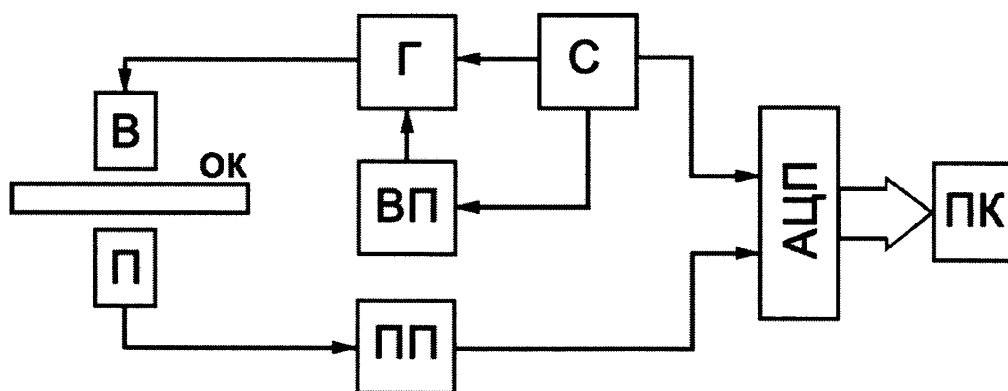


Рис. 4.2. Блок схема експериментальної установки:

ОК – об’єкт контролю, В, П – випромінюючий та приймаючий безконтактний ультразвуковий перетворювач відповідно, Г – генератор ультразвукових коливань, ВП – високовольтний перетворювач, ПП – попередній підсилювач, С – синхронізатор, АЦП – аналого-цифровий перетворювач (цифровий осцилограф), ПК- персональний комп’ютер.

У другому розділі було доведено необхідність використання узгоджувачих шарів для зменшення втрат енергії акустичних коливань на границі розділу п'єзоелемент/повітря, шляхом теоретичних досліджень вибрано тип матеріалу узгоджувачого шару перетворювача та розраховано його геометричні характеристики, розроблено загальну будову безконтактного перетворювача. Тому, на основі проведених розрахунків було виготовлено два однакових за конструкцією безконтактних ультразвукових перетворювача.

Конструктивно безконтактні ультразвукові перетворювачі складаються з корпусу з високочастотним роз'ємом, п'єзоелектричної пластини дископодібної форми діаметром 20 мм, виготовленої з титанату барію ТБК-3, резонансна частота якої складає 1 МГц, демпфера та узгоджувачого шару. П'єзоелектрична пластина за допомогою тонких провідників, електрично з'єднана з відповідними контактами закріпленого на корпусі роз'єму.

Узгоджувачий шар прикріплений до п'єзопластини за допомогою тонкого шару клею для склеювання гуми. Експериментальним шляхом, під час виготовлення перетворювачів, було встановлено, що товщина шару клею, після його висушування, складає близько 0,06 мм. Враховуючи те, що товщина шару клею є значно меншою чверті довжини хвилі акустичних коливань в даному матеріалі (чверть довжини хвилі акустичних коливань частотою 1 МГц в клею для склеювання гуми складає від 0,45 мм до 0,64 мм), то шар клею для склеювання гуми практично не впливатиме на величину коефіцієнта проходження акустичних коливань та не спричинятиме додаткових втрат енергії акустичних коливань.

В якості матеріалу для виготовлення узгоджувачого шару було взято попередньо вибрану целюлозу вторинної переробки, оскільки фізичні характеристики такого матеріалу, зокрема величина акустичного опору, є найбільш близьким до розрахованих.

В якості корпусів для виготовлення безконтактних перетворювачів було використано корпуси непрацюючих контактних ультразвукових перетворювачів типу П111-1.0-ПН17МС, які входять в комплект до ультразвукового дефектоскопа УД-10УА.

Розглянемо принцип роботи експериментальної установки. Синхронізатор формує імпульси прямокутної форми, частотою 1кГц, задній фронт яких запускає високовольтний перетворювач. Високовольтний перетворювач працює до появи переднього фронту прямокутного імпульсу синхронізатора, накопичуючи електричну енергію в генераторі ультразвукових коливань.

При появі переднього фронту прямокутних імпульсів, високовольтний перетворювач вимикається, запускається генератор ультразвукових коливань, який віддає накопичену енергію ультразвуковому перетворювачу у вигляді синусоподібних імпульсів напруги та вмикається аналого-цифровий перетворювач (АЦП). Така почергова робота генератора ультразвукових коливань та високовольтного перетворювача зумовлена необхідністю виключення взаємного впливу кожного блоку на роботу один одного.

Імпульси напруги, які потрапляють на п'єзоелемент перетворювача, збуджують в ньому ультразвукові коливання, які від перетворювача через повітряний зазор потрапляють на об'єкт контролю.

На границі розділу повітря/об'єкт контролю ультразвукові коливання зазнають часткового відбивання та заломлення. Частина енергії ультразвукових коливань проходить крізь об'єкт контролю та повітряний зазор і потрапляє на приймаючий перетворювач, в якому відбувається перетворення механічних коливань в коливання струму. Ці електричні коливання підсилюються за допомогою попереднього підсилювача і подаються на аналого-цифровий перетворювач (цифровий осцилограф Tektronix TDS101). Оцифровані дані з АЦП потрапляють в персональний комп'ютер, який здійснює обробку отриманих даних за допомогою

розробленого програмного забезпечення та визначає товщину за наперед визначеним алгоритмом.

Визначення товщини об'єкта контролю прохідним методом здійснюється наступним чином.

Безконтактні ультразвукові перетворювачі, випромінюючий та приймаючий, розміщуються один навпроти іншого на фіксованій відстані  $L = 20 \text{ мм}$ , так щоб їхні акустичні осі співпадали. Вмикається експериментальна установка та відбувається вимірювання часу проходження ультразвукових коливань  $T_1$  від випромінюючого до приймаючого перетворювача (рис. 4.3, а).

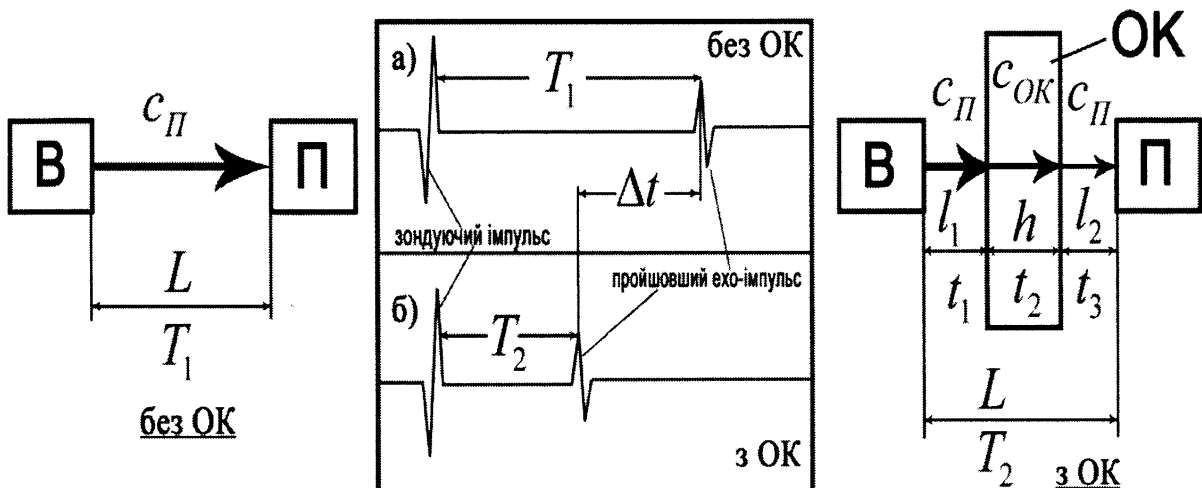


Рис. 4.3. Схема вимірювання товщини

Після цього між перетворювачами розміщується плоский зразок, так щоб його поверхні були перпендикулярні до акустичних осей перетворювачів та проводиться вимірювання часу проходження ультразвукових коливань  $T_2$ , який буде рівний сумі часу проходження УЗК від випромінюючого перетворювача до ОК –  $t_1$ , часу проходження УЗК в ОК –  $t_2$  та часу поширення ультразвукових коливань від об'єкта контролю до приймаючого перетворювача –  $t_3$  (рис. 4.3, б):

$$T_2 = t_1 + t_2 + t_3. \quad (4.1)$$

Враховуючи те, що час поширення УЗК рівній частці від ділення пройденого шляху на швидкість поширення, тоді рівняння (4.1) можна записати наступним чином:

$$T_2 = \frac{l_1}{c_{\text{п}}} + \frac{h}{c_{\text{ок}}} + \frac{l_3}{c_{\text{п}}}, \quad (4.2)$$

$$\text{або } T_2 = \frac{1}{c_{\text{п}}}(l_1 + l_2) + \frac{h}{c_{\text{ок}}}, \quad (4.3)$$

де  $l_1, l_2$  – відстань від випромінюючого перетворювача до ОК та від ОК до приймаючого перетворювача відповідно,  $h$  – товщина ОК,  $c_{\text{ок}}, c_{\text{п}}$  – швидкість поширення УЗК в матеріалі ОК та повітрі відповідно.

Оскільки  $l_1 + l_2 = L - h$  тоді:

$$T_2 = \frac{1}{c_{\text{п}}}(L - h) + \frac{h}{c_{\text{ок}}}. \quad (4.4)$$

Після розкриття дужок в рівнянні (4.4), різницю  $\Delta t = T_1 - T_2$  часів проходження УЗК в першому та другому випадках можна записати наступним чином:

$$\Delta t = \frac{L}{c_{\text{п}}} - \frac{L}{c_{\text{п}}} + \frac{h}{c_{\text{п}}} - \frac{h}{c_{\text{ок}}}, \quad (4.5)$$

$$\text{або } \Delta t = h \left( \frac{c_{\text{ок}} - c_{\text{п}}}{c_{\text{ок}} \cdot c_{\text{п}}} \right), \quad (4.6)$$

$$\text{де } T_1 = \frac{L}{c_{\text{п}}}.$$

Таким чином з рівняння (4.6) можемо записати вираз для визначення товщини об'єкта контролю:

$$h = \Delta t \left( \frac{c_{\text{ок}} \cdot c_{\text{п}}}{c_{\text{ок}} - c_{\text{п}}} \right). \quad (4.7)$$

Отже, для розрахунку товщини об'єкта контролю при вимірюванні ультразвуковим прохідним методом, необхідно виміряти час проходження УЗК від випромінюючого до приймаючого перетворювача без та при розміщенні між ними ОК, при цьому очевидно, що ця товщина не повинна залежати від відстані між перетворювачами.

Для вибору оптимальної відстані від перетворювача до ОК, про що було описано в підрозділі 4.2, необхідно володіти інформацією про дійсні технічні характеристики ультразвукового перетворювача, зокрема розподіл інтенсивності акустичного поля на осі перетворювача, простіше кажучи побудувати діаграму направленості п'єзоперетворювача. З цією метою було проведено експериментальне вимірювання діаграми направленості розробленого ультразвукового безконтактного п'єзоперетворювача (рис. 4.4).

В ході проведених експериментальних досліджень було отримано наступну діаграму направленості, яка зображена на рис. 4.5.

З отриманих результатів експериментальних досліджень щодо вимірювання діаграми направленості розробленого безконтактного п'єзоперетворювача, було встановлено оптимальне значення відстані від перетворювача до об'єкта контролю, в нашому ця відстань складає 2 см.

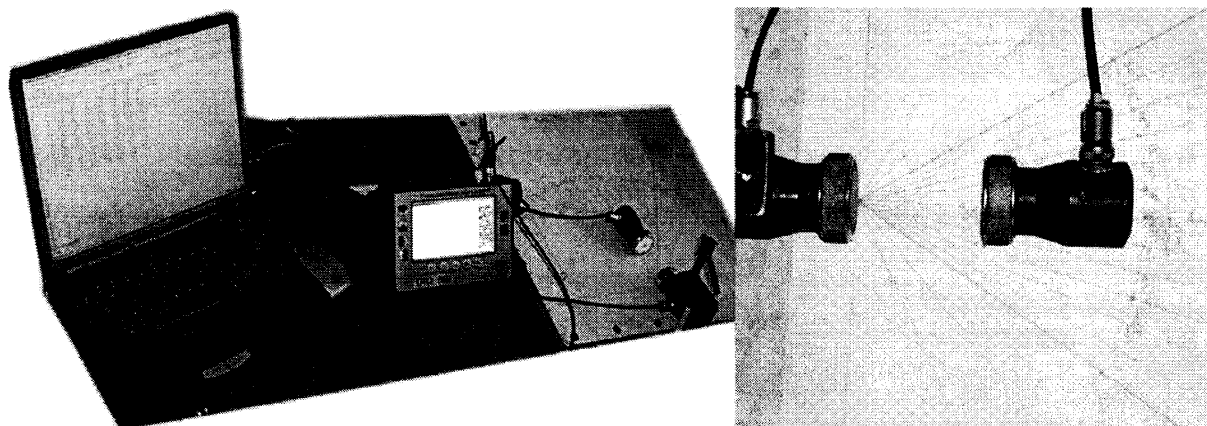


Рис. 4.4. Вимірювання діаграми направленості розробленого перетворювача

Діаграму направленості розробленого безконтактного п'єзоперетворювача побудовано з отриманих експериментальних даних за допомогою програмного пакету *MATLAB R14*.

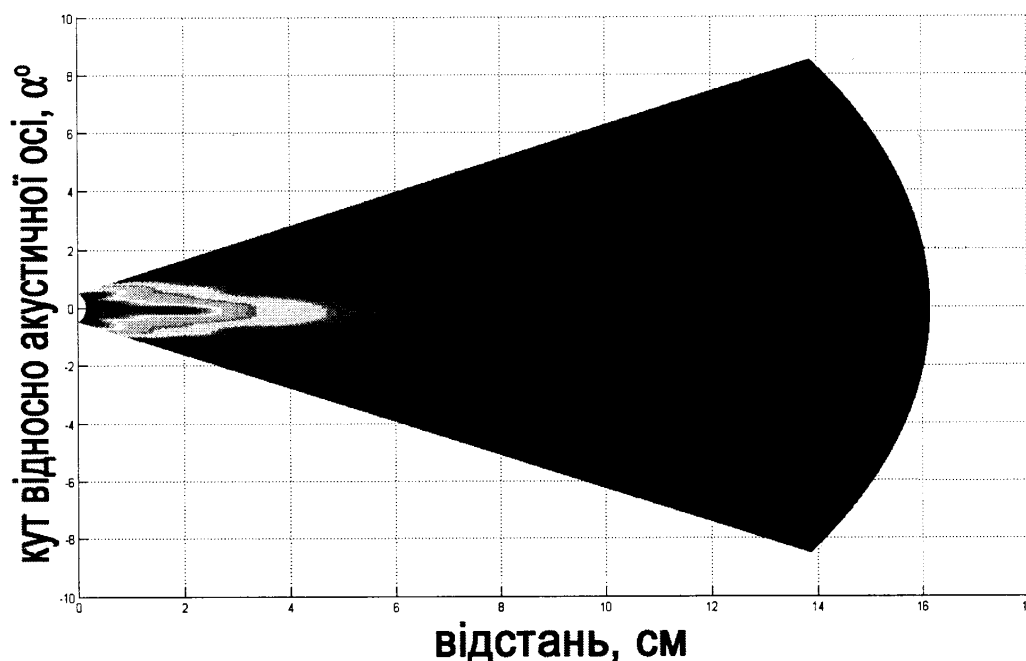


Рис. 4.5. Діаграма направленості розробленого перетворювача

#### 4.2 Методика експериментальних досліджень

Експериментальні дослідження проводились в два етапи. Метою першого етапу стало експериментальне підтвердження адекватності математичної моделі узгоджуючого шару ультразвукового перетворювача та визначення дійсних технічних характеристик безконтактного перетворювача.

Методика проведення експериментальних досліджень була наступною.

Для перевірки адекватності математичної моделі узгоджуючого шару перетворювачі розміщувались один навпроти іншого, так щоб їх акустичні осі збігалися і закріплювались до штангенциркуля, для того, щоб можна було проводити вимірювання відстані між перетворювачами. Перед початком експериментальних випробувань, було проведено вимірювання амплітуди прийнятого акустичного сигналу при використанні перетворювачів без узгоджуючих шарів. Ці вимірювання проводились за різних значень відстаней між перетворювачами. Після цього до випромінюючого перетворювача по чергово приклеювались узгоджуючі шари різної товщини, які були

виготовлені з целюлози вторинної переробки. В ході даних досліджень перетворювачі були розміщені один навпроти одного на сталій відстані, яка складала 100мм.

В ході даних досліджень отримано експериментальну залежність амплітуди прийнятого сигналу від товщини узгоджуючого шару (рис. 4.6). Оскільки в ході експериментальних досліджень всі параметри системи ультразвукових перетворювачів, крім товщини узгоджуючого шару, були незмінними, то така залежність амплітуди прийнятого сигналу від товщини узгоджуючого шару повинна характеризувати залежність коефіцієнта проходження енергії акустичних коливань від товщини узгоджуючого шару для даного матеріалу. Дослідження проводились при десяти значеннях товщини узгоджуючого шару з діапазону 0,06мм до 0,11мм при цьому амплітуда прийнято сигналу змінювалась в діапазоні від 2,35мВ до 21,2мВ.

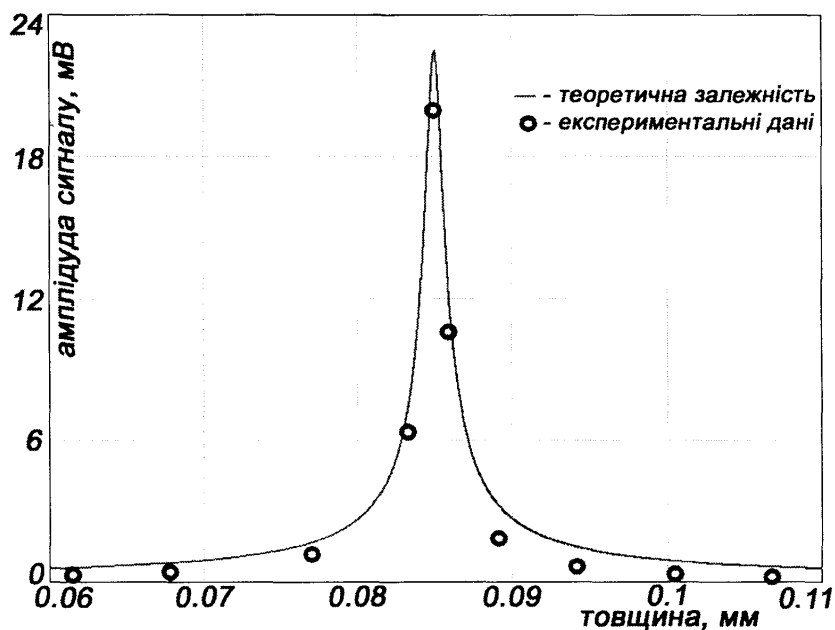


Рис. 4.6. Залежність амплітуди прийнятого сигналу від товщини узгоджуючого шару виготовленого з целюлози

Як бачимо з рис. 4.6 отримані в ході експериментальних досліджень результати повністю повторюють результати, які отримано в ході попередньо проведених теоретичних досліджень. Розходження в теоретичних та



експериментальних даних можна пояснити втратами енергії акустичних коливань, які виникають в наслідок використання клею для приклеювання узгоджуючого шару та затуханням акустичних коливань в самому матеріалі узгоджуючого шару.

Після приклеювання узгоджуючих шарів до перетворювачів, було проведено експериментальне визначення залежності амплітуди прийнятого акустичного сигналу приймаючого п'єзоперетворювача на виході попереднього підсилювача від відстані між перетворювачами з метою пошуку її оптимального значення та отримання дійсних характеристик перетворювачів.

В результаті випробувань отримано наступну залежність (рис. 4.7). Теоретична крива на рисунку 4.7 показує як змінюється інтенсивність акустичного поля на осі перетворювача в залежності від відстані до точки спостереження.

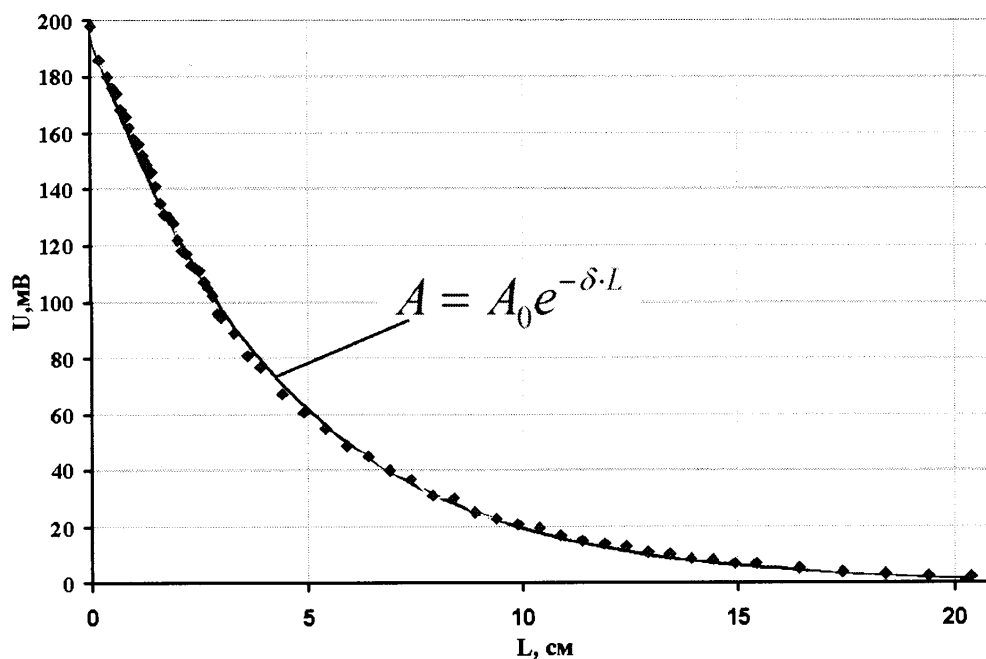


Рис. 4.7. Залежності амплітуди прийнятого акустичного сигналу від віддалі між перетворювачами:

— - теоретична крива;

—●— - експериментальна крива.

За цією кривою можна судити про величину затухання ультразвукових коливань у повітрі. Як бачимо з рисунку 4.7, характер експериментальної кривої залежності амплітуди прийнятого сигналу від віддалі повторює теоретичну криву. Розбіжність в середній частину графіка можна пояснити тим, що акустичні промені від перетворювача не розповсюджуються паралельно до акустичної осі, а поширюються під певним кутом до неї.

Попередньо визначені амплітуди ехо-імпульсів перетворювачів без узгоджувачів за певних значень відстаней між ними та значення амплітуд ехо-імпульсів перетворювачів з узгоджувачами за відповідних значень відстаней, дали можливість визначити величину, на яку зменшуються втрати енергії акустичних коливань на границі розділу п'єзоелемент/повітря при використанні узгоджувачів.

Таким чином, в ході першого етапу експериментальних випробувань було встановлено, що використання паперу вторинної переробки для виготовлення узгоджувача дає можливість підвищити рівень сигналу на +26 дБ, при цьому коефіцієнт підсилення попереднього підсилювача становив 10,5.

При виборі оптимальної віддалі між перетворювачами, потрібно було вирішувати дві проблеми. З однієї сторони необхідно відстань між перетворювачами робити як можна меншою, оскільки значне затухання ультразвукових коливань у повітрі різко зменшує їх енергію із збільшенням відстані. З іншої сторони, розміщуючи приймаючий перетворювач безпосередньо біля випромінюючого ми попадаємо в ближню зону акустичного поля, в якій воно є нерівномірним [71]. Також в цьому випадку утруднюється розпізнавання зондуємого та ехо-імпульсу, оскільки вони накладаються. Спостерігаючи за рівнем ехо-імпульсу та тривалістю збуджуючого сигналу на екрані осцилографа вдалось встановити, що мінімальна відстань між перетворювачами, при якій рівень сигналу є ще

високим, а зонduючий імпульс відсутній, становить 20мм. Це значення було прийнято за оптимальне для проведення другого етапу випробувань.

Метою другого етапу експериментальних досліджень було здійснити експериментальну перевірку можливості використання взаємкореляційного та нейромережевого підходів для локалізації маскованих шумом ехо-імпульсів та експериментального підтвердження правильності вибору нейромережевого методу оброблення вимірювальної інформації.

Таким чином на другому етапі експериментальних випробувань було досліджено можливість отримання ехо-імпульсів через різного роду матеріал різної товщини та проведено експериментальну порівняльну перевірку використання нейромереж [78] та взаємкореляційного підходу [79] для підвищення чутливості безконтактного методу контролю. Оскільки, як було сказано попередньо, із-за значної тривалості зонduючого і відповідно отриманого від донної поверхні ОК ехо-імпульсу, проводити вимірювання товщини ОК при односторонньому доступі до його поверхні не можливо, тому було вирішено використати прохідний ехо-метод вимірювання товщини.

Експериментальні випробування проводились наступним чином. Генератор збуджуючих імпульсів, вищеописаної експериментальної установки, формує синусоподібний сигнал певної тривалості, амплітудою 600В, який подається на випромінюючий п'єзоперетворювач. Акустичні коливання від випромінюючого перетворювача через повітряний зазор потрапляють на приймаючий перетворювач. Приймаючий перетворювач перетворює механічні коливання в електричні, які підсилюються за допомогою попереднього підсилювача і подаються на вхід цифрового осцилографа. За допомогою цифрового осцилографа проводиться оцифрування та запис сигналу (рис. 4.8).

З рисунка 4.8 бачимо що амплітуда ехо-імпульсу складає приблизно 130 мВ. Враховуючи коефіцієнт підсилення попереднього підсилювача, дійсне значення амплітуда ехо-імпульсу складає приблизно 12 мВ.

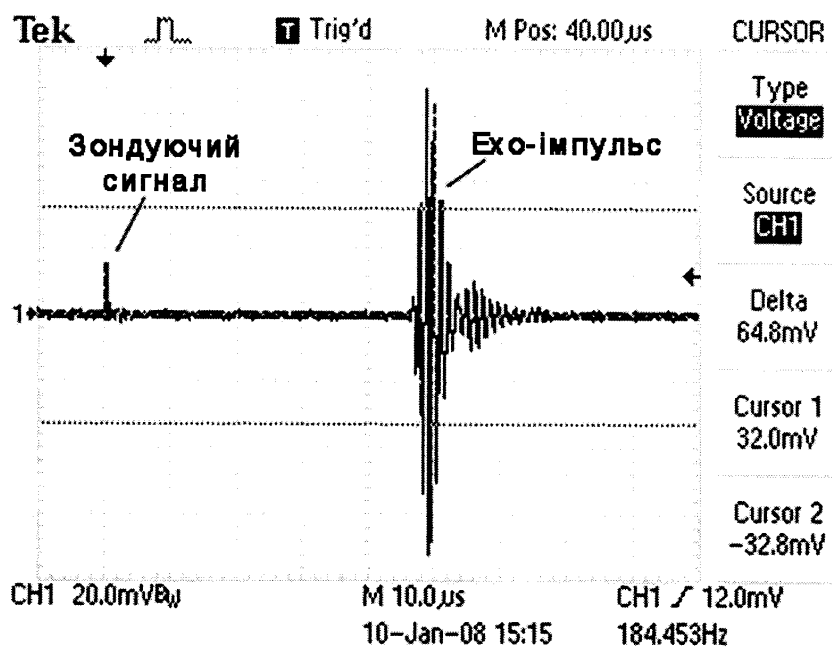


Рис. 4.8. Осцилограма акустичних імпульсів. Без ОК

Після цього між приймаючим та випромінюючим перетворювачами перпендикулярно до акустичної осі розміщувався досліджуваний матеріал у вигляді тонких пластин виготовлених з алюмінію та целюлози (паперу) різної товщини (рис. 4.9).

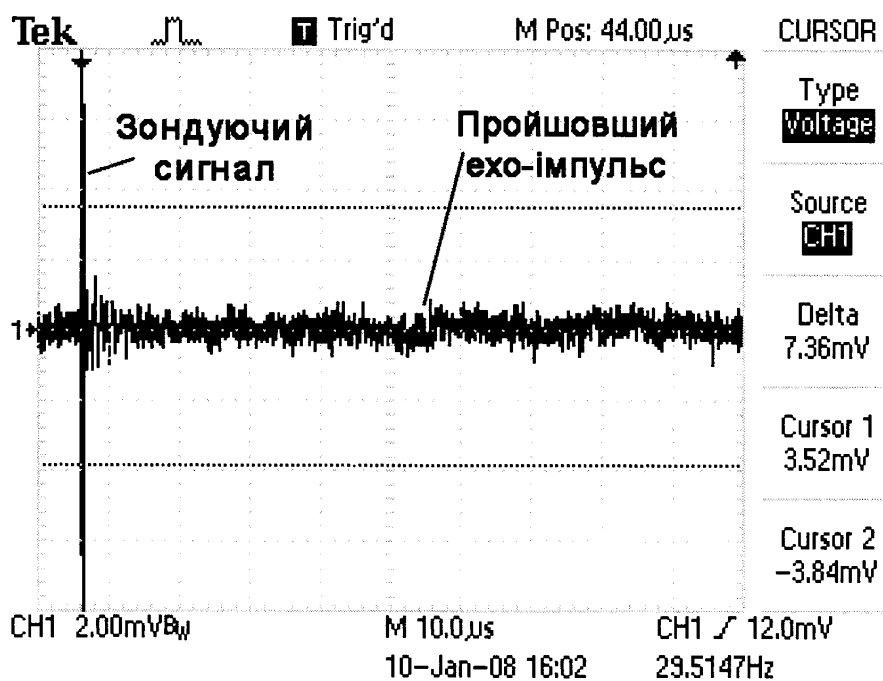


Рис. 4.9. Осцилограма акустичних імпульсів. З ОК

Акустичні коливання, розповсюджуючись від випромінюючого перетворювача на межі розділу повітря/об'єкт контролю зазнають часткового відбивання та заломлення. У нашому випадку, як було сказано попередньо, тільки незначна частина енергії акустичних коливань подвійно заломлюється і проходить через об'єкт контролю.

Величина цієї енергії визначається коефіцієнтами відбивання та проходження, які в свою чергу залежать від акустичних опорів повітря та досліджуваного матеріалу, а також від товщини досліджуваного матеріалу, якщо ця товщина рівна чи кратна чверті довжини хвилі в матеріалі. За товщин матеріалу, які значно перевищують довжину хвилі, втрати енергії акустичних коливань виникають внаслідок затухання ультразвукових коливань, величина яких залежить від коефіцієнту затухання та товщини матеріалу.

З огляду на вищесказане, акустичні імпульси, що пройшли через досліджуваний матеріал і потрапили на приймаючий перетворювач збуджують в ньому імпульси напруги, амплітуда яких є дуже малою і співрозмірною з власним шумами перетворювача та підсилювача (рис. 4.9). Ехо-імпульс знаходиться в часовому діапазоні між 15 - 20 мкс. Для зручності роботи, та збільшення роздільної здатності, оцифрування проводились тільки пройшовшого ехо-імпульсу.

На рисунку 4.10, а) подано осцилограму ехо-імпульсу, отриманого без розміщення об'єкта контролю між перетворювачами (ідеальний випадок). Даний сигнал використовується для розрахунку взаємо кореляційної функції та обробки за допомогою розробленого нейромережевого методу ехо-імпульсів, які пройшли через об'єкт контролю.

На рисунку 4.10, б) подано осцилограму пройшовшого ехо-імпульсу, яка побудована за допомогою програмного пакету MATLAB R14 зі значень отриманих за допомогою осцилографа. Товщина паперу в даному випадку складала 0,23 мм. Як бачимо з рисунку ехо-імпульс повністю маскується шумом (відношення сигнал/шум є меншим одиниці) і виділити та чітко локалізувати його традиційним способом є не можливим.

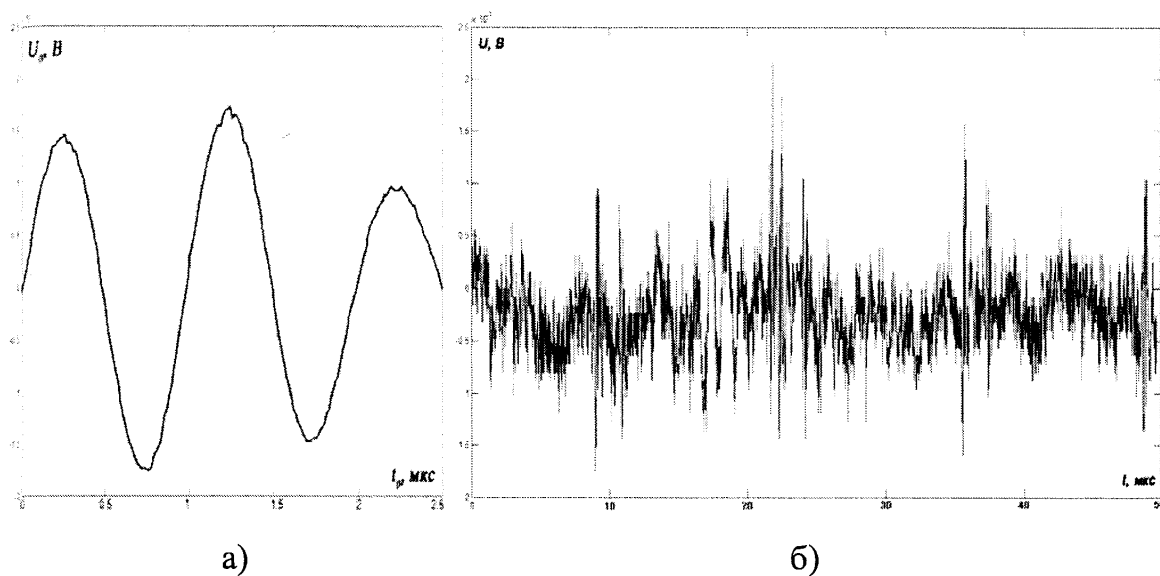


Рис. 4.10. Осцилограми ехо-імпульсів, отриманих без об'єкта контролю а) та через об'єкт контролю б)

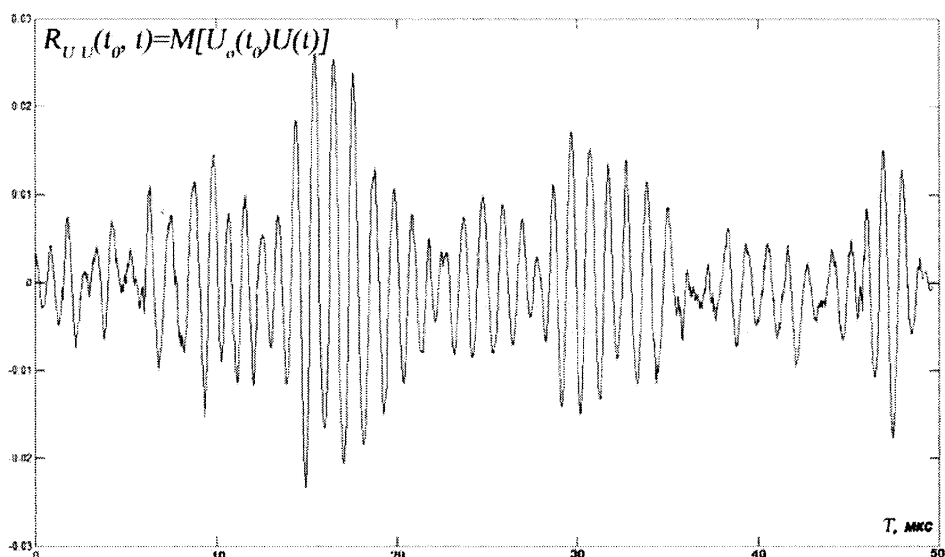


Рис. 4. 11. Взаємо кореляційна функція ехо-імпульсу

Тому для підвищення чутливості способу та локалізації зашумленого ехо-імпульсу було використано новий розроблений нейромережевий метод та, для порівняння, взаємо кореляційний підхід з використанням кодів Баркера. Оброблення експериментальних даних проводилась в середовищі програмного пакету MATLAB R14. За допомогою даного програмного

паketу було розраховано та побудовано взаємкореляційні функції для всіх досліджуваних випадків.

На рисунку 4.11 подано взаємкореляційну функцію (ВКФ) ехо-імпульсів, зображених на рисунках 4.10, а) та 4.10, б). Як бачимо з рисунку 4.11 ВКФ дає можливість чітко локалізувати зашумлений ехо-імпульс, який знаходиться в часовому діапазоні між 15 - 20 мкс, а також додатково підсилити рівень сигналу.

Зашумлений ехо-імпульс (рис. 4.9) також подавався на вхід наперед натренованої нейронної мережі (методологію роботи якої подано в третьому розділі). За результатами роботи нейронної мережі отримано наступний графік (рис. 4.12).

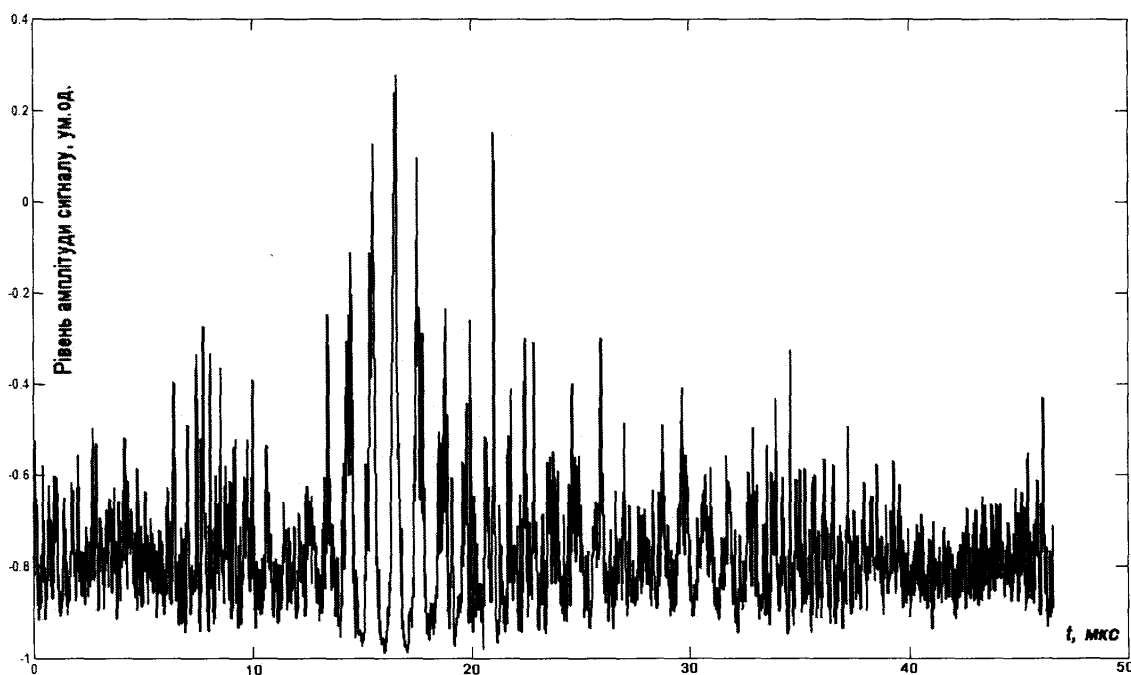


Рис. 4.12. Вихід нейромережі

Як бачимо з рис. 4.12 нейромережевий підхід також дає можливість чітко локалізувати зашумлений ехо-імпульс (часовий діапазон 15...20 мкс).

Для проведення порівняльного аналізу, з метою експериментального визначення методу оброблення, який би забезпечував найвищу чутливість, було проведено аналогічні дослідження на целюлозі товщиною від 0,085 мм

до 0,48 мм. Загалом було проведено більше 25 вимірювань за різних товщин паперу. За результатами досліджень для кожної товщини паперу було обчислено ВКФ ехо-імпульсу та отримано вихід нейромережі.

Після цього було розраховано відношення сигнал/шум результатів взаємкореляційного та нейромережевого методів для різних товщин паперу. На рис. 4.13 подано залежність амплітуди прийнятого ехо-імпульсу від товщини целюлози, яка отримана за допомогою взаємкореляційного підходу.

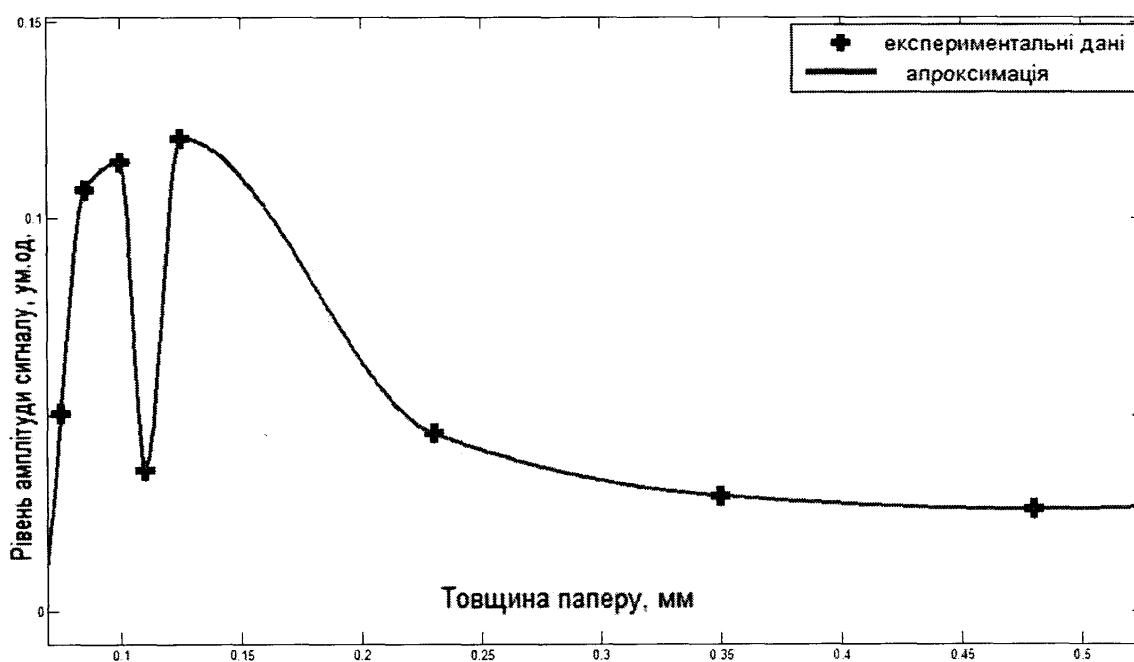


Рис. 4.13. Залежність амплітуди ехо-імпульсу від товщини паперу (взаємкореляційний підхід)

Як бачимо з рис. 4.13 за товщин целюлози близьких чи кратних чверті довжини хвилі (довжина хвилі акустичних коливань частотою 1 МГц в папері приблизно рівна 0,45мм) амплітуда пройшовших ехо-імпульсів є максимальною і зменшується зі збільшенням товщини, що повністю підтверджує теоретичні дослідження, які наведені у другому розділі.



На рисунках 4.14 та 4.15 подано порівняльні графіки залежності рівня амплітуди обробленого сигналу та відношення сигнал/шум від товщини целюлози відповідно для зазначених способів обробки.

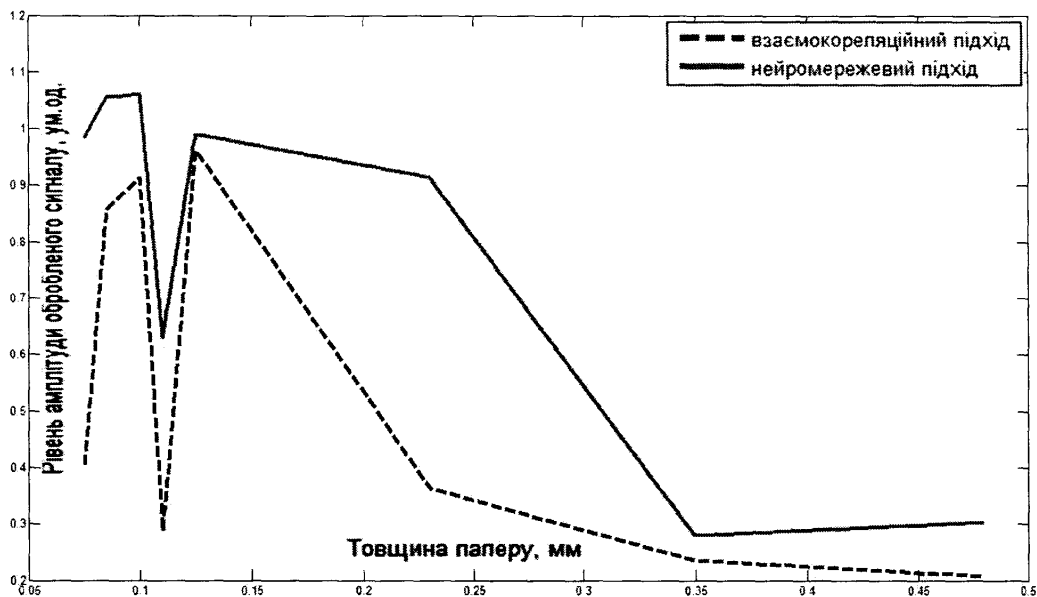


Рис. 4.14. Залежність амплітуди обробленого ехо-імпульсу від товщини паперу

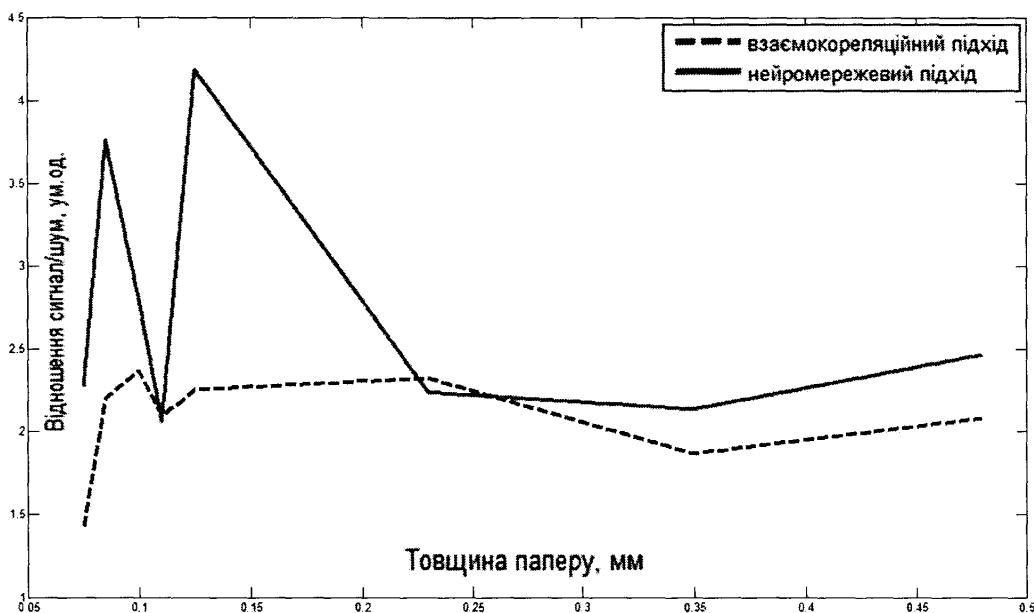


Рис. 4.15. Залежність відношення сигнал/шум обробленого ехо-імпульсу від товщини паперу

З рисунків 4.14 та 4.15 бачимо, що проведені експериментальні дослідження повністю підтверджують отримані в третьому розділі результати, отримані в ході теоретичних досліджень, а саме, що для обробки та локалізації зашумлених ехо-імпульсів доцільно використовувати нейромережевий підхід, який забезпечує вищу чутливість, як на малих так і на великих товщинах.

Таким чином, проведені експериментальні дослідження цілком підтвердили попередньо проведені теоретичні дослідження, наведені в другому та третьому розділах.

Вимірювання товщини целюлози не складало великих труднощів в основному із-за незначного неспівпадання акустичних опорів повітря та целюлози, що спричиняє малі втрати енергії акустичних коливань. Труднощі, як було сказано в попередніх розділах, виникатимуть при вимірювання товщини матеріалів (металічних виробів), акустичні опора яких є досить великими у порівнянні з акустичним опором повітря.

Виходячи з вищесказаного, для експериментальної перевірки розробленого методу було проведено аналогічні експериментальні дослідження на пластині товщиною 0,11 мм виготовленій з алюмінію, результати яких були оброблені згідно з вищеописаною методикою.

Оскільки швидкість поширення ультразвукових коливань в алюмінію є приблизно в 19 раз вищою за швидкість поширення ультразвукових коливань в повітрі і складає 6260 м/с [33], тоді загальний час поширення ультразвукових коливань від випромінюючого до приймаючого перетворювача, між якими розміщена пластина з алюмінію, має бути меншим ніж час поширення ультразвукових коливань від випромінюючого до приймаючого перетворювача без розміщення між ними пластини.

Проведене оброблення отриманих через алюмінієву пластину ехо-імпульсів, показала, що вищезгаданий час поширення зменшився на 0,02 мкс.

Таким чином, помноживши швидкість поширення ультразвукових коливань на час, отримаємо шукану товщину. За результатами

експериментальних досліджень, обчислена товщина алюмінієвої пластини склала 0,1265 мм. Отже відносна похибка безконтактного акустичного способу вимірювання товщини алюмінієвої пластини в даному випадку склала 12%. Даний результат є задовільним, враховуючи дійсне значення товщини пластини - 0,11 мм.

Нажаль, проведені аналогічні експериментальні дослідження на зразках з більшою товщиною та на зразках виготовлених зі сталі були незадовільними, оскільки жоден з запропонованих методів дозволив впевнено локалізувати ехо-імпульс. Це пояснюється тим, що амплітуда пройшовших через пластину ехо-імпульсів є значно меншою за рівень власних шумів перетворювача та підсилювача і чітко локалізувати їх не можливо. Загалом вирішити дану проблему можливо шляхом використання іншого матеріалу для виготовлення узгоджуючого шару, який би дав можливість зменшити втрати енергії акустичних коливань на межі п'єзоелемент/повітря та шляхом збільшення амплітуди зондуючого сигналу, що загалом дасть можливість підвищити амплітуду пройшовшого ехо-імпульсу.

Дані експериментальні випробування проводились за допомогою безконтактного ультразвукового перетворювача з одношаровим узгоджуючим шаром. Експериментально було визначено, що така конструкція перетворювача забезпечувала зменшення втрат енергії акустичних коливань на 26 дБ на границі розділу п'єзоелемент/повітря. Проте, як було сказано попередньо, за допомогою такого перетворювача не було можливим отримання ехо-імпульсів через об'єкти контролю, які виготовлені зі сталі.

Тому провівши аналіз літературних джерел [103] та здійснивши математичне моделювання багатошарового узгоджуючого шару, було запропоновано нову конструкцію безконтактного ультразвукового перетворювача (рис. 4.16).

Конструктивно ультразвуковий перетворювач складається з корпусу 1, демпфера 2, корпусу резонатора 3, п'єзоелектричної пластини 4, виготовленої з титанату барію ТБК-3 діаметром  $a = 20\text{мм}$ , резонансна частота якої складає

$f = 1\text{МГц}$ , багат шарового узгоджуючого шару 5 та фіксуєючого кільця 6. Демпфер, п'єзоелектрична та узгоджуючий шар склеюються між собою за допомогою епоксидної смоли і утворюють резонатор, який розміщується в корпусі резонатора. Електричне з'єднання п'єзопластини з відповідними контактами закріпленого на корпусі роз'єму, виконане за допомогою тонких провідників. Резонатор кріпиться в корпусі перетворювача за допомогою фіксуєючого кільця.

Багат шаровий узгоджуючий шар складається з трьох пластин дископодібної форми, діаметром, який рівний діаметру п'єзоелектричної пластини. Перша пластина узгоджуючого шару, яка кріпиться безпосередньо до п'єзопластини, виготовлена з алюмінію і має товщину 0,78 мм. Друга пластина узгоджуючого шару виготовлена з поліетилену, товщиною 0,65 мм. Остання пластина узгоджуючого шару виготовлена з целюлози вторинної переробки і має товщину 0,085 мм.

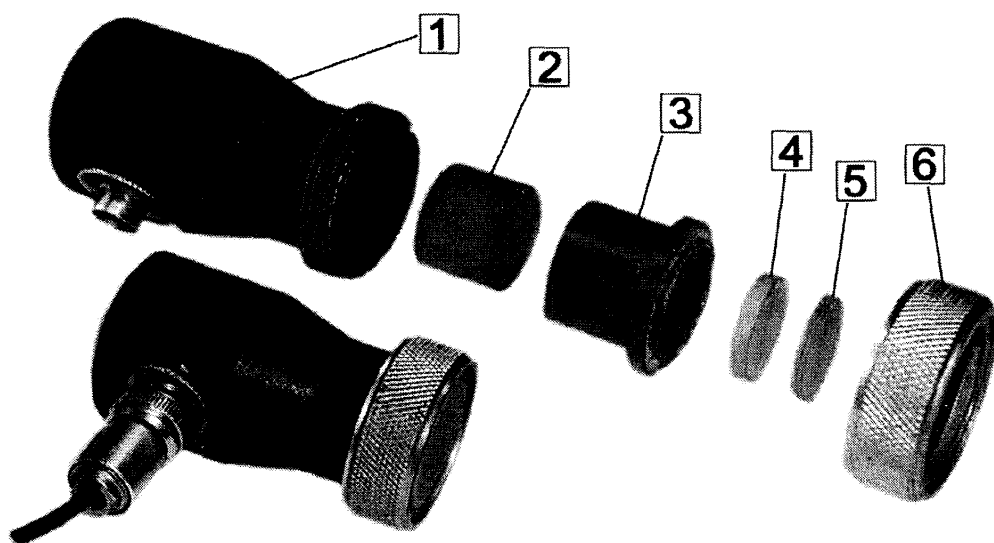


Рис. 4.16. Конструкція багат шарового безконтактного ультразвукового перетворювача:

1 – корпус перетворювача, 2 – демпфер, 3 – корпус резонатора, 4 – п'єзоелемент, 5 – узгоджуючий шар, 6 – фіксуєюче кільце.

Пластини узгоджуючого шару кріпляться між собою і до п'єзоелемента за допомогою тонкого шару епоксидної смоли. Експериментально, згідно з методикою описаною в попередньому підрозділі, було визначено, що така конструкція перетворювача забезпечує зменшення втрат енергії акустичних коливань на 32дБ. На дану конструкцію перетворювача оформлено та подано заявку на отримання патенту.

За результатами проведених експериментальних досліджень згідно з запропонованою методикою можна зробити наступні висновки:

- розроблено та виготовлено експериментальну установку та безконтактні ультразвукові перетворювачі для контролю товщини матеріалів;
- проведено комплекс порівняльних експериментальних досліджень, щодо перевірки можливості використання взаємкореляційного та нейромережевого підходів для локалізації маскованих шумом ехо-імпульсів, які підтвердили результати попередніх теоретичних досліджень;
- результати експериментальних випробувань показали, що для обробки зашумлених ехо-імпульсів доцільно використовувати нейромережевий підхід, який забезпечує достатню чутливість.

#### 4.3 Порівняльні лабораторні вимірювання товщини елементів металоконструкцій різними методами

Для проведення експериментальних випробувань було відібрано 12 сталених взірців товщиною від 0,55мм до 9,53мм (рис. 4.17) . Перед початком випробувань товщину кожного зразка було визначено за допомогою мікрометра. Взірці товщиною від 0,55мм до 3,8 мм були виготовлені з сталі марки Сталь 3, інші зі сталі марки Сталь 65 Г.

Випробування проводились згідно з наступною методикою. Безконтактні ультразвукові перетворювачі розміщуються один навпроти одного на відстані 20 мм. Відстань вимірюється за допомогою штангенциркуля.

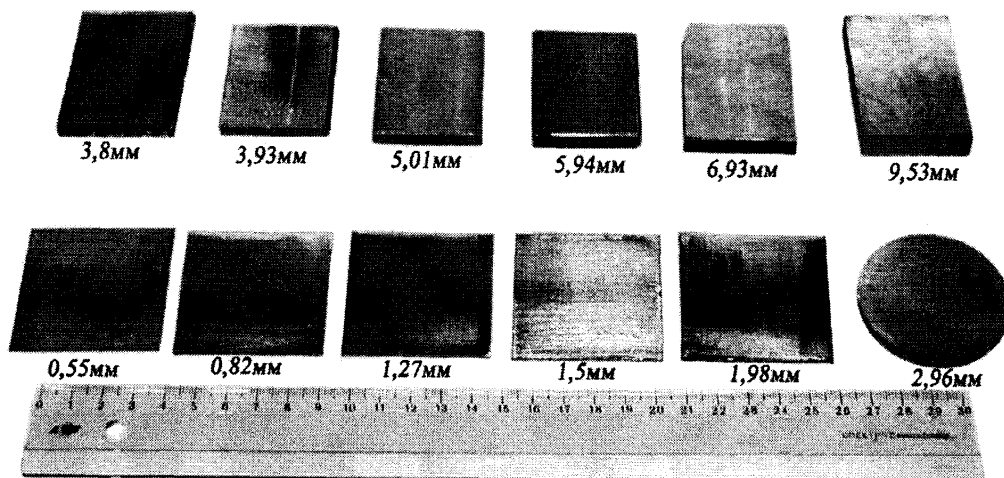


Рис. 4.17. Взірці для проведення експериментальних досліджень

Вмикається експериментальна установка та проводиться оцифрування, запис осцилограми та реєстрація часу проходження ехо-імпульсу. З оцифрованої вибірки виділяється пройшовший ехо-імпульс, який в подальшому використовується для розрахунку взаємо-кореляційної та для тренування неймережі (рис. 4.10, а).

Після цього між перетворювачами розміщується досліджуванний зразок, як було описано попередньо та проводиться оцифрування та запис пройшовшого ехо-імпульсу. Загалом таких досліджень було проведено 120, по 10 на кожному зразку.

З метою виявлення пройшовших ехо-імпульсів, як показали попередні теоретичні та експериментальні дослідження доцільно використовувати кореляційний та неймережевий підходи, алгоритм роботи яких було описано у попередніх розділах. Таким чином, для кожної оцифрованої осцилограми пройшовшого через досліджувані зразки ехо-імпульсу, було розраховано взаємо-кореляційну функцію (рис. 4.18, а) та отримано виходи неймережі (рис. 4.18, б).

Розраховані взаємокореляційні функції та отримані виходи неймережі дали можливість локалізувати пройшовші ехо-імпульси та обчислити згідно з формулою (4.7) товщини досліджуваних зразків.

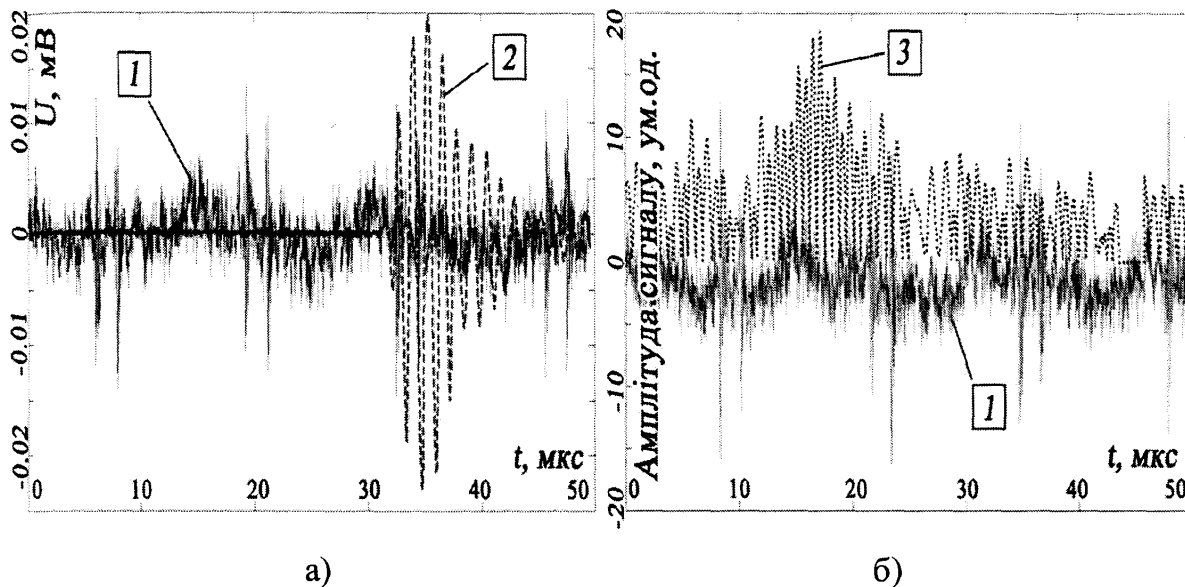


Рис. 4.18. Взаємо-кореляційна функція (а, позиція 2) та вихід нейромережі (б, позиція 3) типового ехо-сигналу (позиція 1), отриманого через досліджуваний зразок

Для порівняльних випробувань було вирішено проводити паралельні вимірювання з використанням таких технічних засобів:

- ультразвуковий дефектоскоп-товщиномір типу УДЗ-71 (зав. №120, 2004р.), п'єзоелектричний перетворювач типу П111-5.0.К6-003 (зав. №337, 2004р.), НВФ «Ультракон-Сервіс», м. Київ – рис. 4.19, а);
- товщиномір ультразвуковий типу DIO-570 (зав. №236, 2003р.), п'єзоелектричний перетворювач типу SM1 (зав. №288), STARMANS, Чехія – рис. 4.19, б);
- товщиномір ультразвуковий типу УТ-93П (зав. №708, 1990р.), п'єзоелектричний перетворювач типу П112-10-6/2-А-001 (зав. №307, 1990р.), НПО «ВОЛНА», г. Кишинев) – рис. 4.19, в);
- розроблена експериментальна установка – рис. 4.19, г).

Оскільки всі перелічені технічні засоби (крім розробленої установки) проводять вимірювання контактним методом, то для створення акустичного

контакту п'єзоперетворювачів з досліджуваними зразками було використана вода.

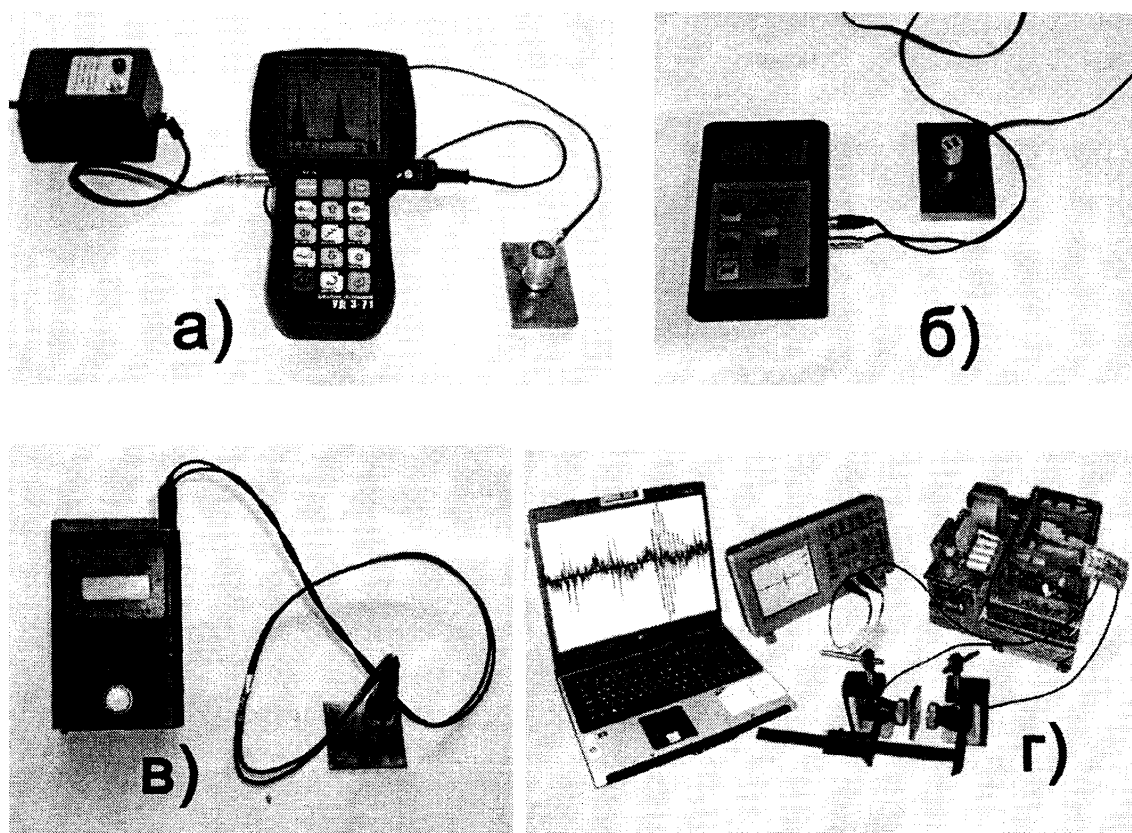


Рис. 4.19. Використані під час вимірювань технічні засоби:

- а) ультразвуковий дефектоскоп-товщиномір УДЗ-71;
- б) товщиномір ультразвуковий DIO-570;
- в) товщиномір ультразвуковий УТ-93П;
- г) експериментальна установка.

На кожному зрізці було проведене не менше п'яти вимірів кожним з згаданих технічних засобів. Після цього було визначене середнє значення товщин для всіх дванадцяти зразків. Осереднені результати порівняльних вимірювань, отриманих за допомогою використаних приладів та розробленої експериментальної при використанні неоремережевого (НМ) та взаємкореляційного (ВКФ) методу оброблення вимірювальної інформації подано в таблиці 4.1.



Таблиця 4.1.

## Результати експериментальних вимірювань.

№ взірця	Дійсне значення товщини, мм	Покази приладу УДЗ-71, мм	Покази приладу DIO-570, мм	Покази приладу УТ-93П, мм	Покази експериментальної установки, мм	
					НМ	ВКФ
1	0,55	0,61	---	---	0,47	1,05
2	0,82	0,78	---	---	0,71	1,21
3	1,27	1,15	1,12	1,25	1,33	1,25
4	1,5	1,46	1,6	1,55	1,66	1,74
5	1,98	2,01	2,13	1,88	1,75	2,09
6	2,96	3	2,85	3,01	2,58	2,14
7	3,8	3,98	3,87	3,75	3,61	3,74
8	3,93	4,01	4,02	3,91	3,89	3,78
9	5,01	5,1	5,14	4,89	4,89	4,76
10	5,94	6,01	5,91	6	5,58	5,4
11	6,93	7,02	6,98	6,95	6,56	5,57
12	9,53	9,48	9,54	9,6	9,17	-

Також було визначено середню абсолютну похибку вимірювань, яка склала 0,2 мм та 0,44 мм для нейромережевого та взаємкореляційного підходів відповідно. При цьому, приведена до діапазону похибка вимірювань склала 2,32% - для нейромережевого та 6,88% - для взаємкореляційного підходів. На рис. 4.20 подано залежність абсолютної похибки вимірювань в кожній точці для всіх зрізів від їх товщини. Така залежність була побудована за результатами вимірювань кожним технічним засобом. З рис. 4.20 бачимо, що абсолютна похибка вимірювань технічних засобів, використаних для порівняльних досліджень (УДЗ-71, DIO-570 та УТ-93П) знаходиться в межах похибки зазначеної в паспорті на прилад – 0,1 мм.

Абсолютна похибка вимірювань експериментальної установки має випадковий характер, що можна пояснити станом поверхні досліджуваних зрізів, неточністю їх розміщення, впливом зміни температури та вологості навколишнього середовища, значно меншою довжиною хвилі акустичних коливань у порівнянні з використаними серійними технічними засобами.

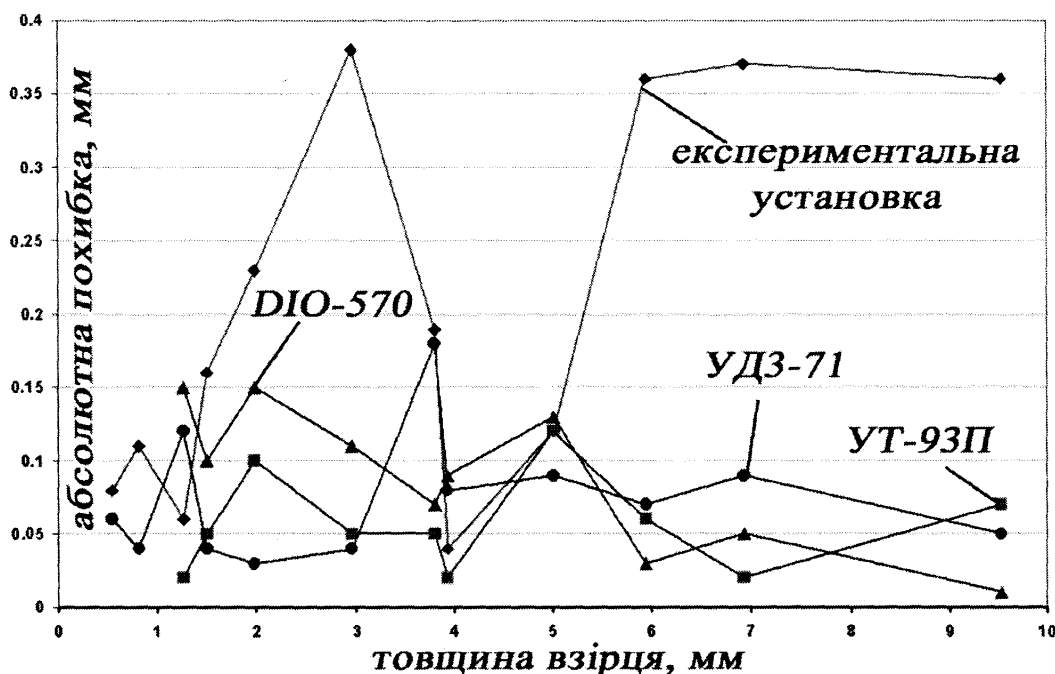


Рис. 4.20. Залежність абсолютної похибки вимірювань від товщини

Як бачимо з отриманих результатів, нейромережевий метод володіє меншою похибкою вимірювань у порівнянні з традиційним взаємкореляційним методом. Крім того, нейромережевий підхід дав можливість чітко локалізувати ехо-імпульс, пройшовший через зразок, товщиною 9,53 мм та розрахувати його товщину, чого не можливо було отримати при використанні взаємкореляційного методу. Таким чином результати експериментальних випробувань повністю підтвердили проведені в третьому розділі теоретичні дослідження.

Нажаль, проведені аналогічні експериментальні дослідження на зразках з більшою товщиною були незадовільними, оскільки жоден з запропонованих методів дозволив впевнено локалізувати ехо-імпульс. Це пояснюється тим, що амплітуда пройшовших через пластину ехо-імпульсів є значно меншою за рівень власних шумів перетворювача та підсилювача і чітко локалізувати їх не можливо.

За результатами проведених експериментальних досліджень можна зробити наступні висновки:

- проведено експериментальні випробування безконтактного ультразвукового способу, що дало змогу визначити товщину сталених зразків в діапазоні від 0,55мм до 9,53мм з похибкою приведеною до діапазону 2,32% - для нейромережевого та 6,88% - для взаємкореляційного підходів.

- проведено порівняльні випробування розробленої експериментальної установки та серійних ультразвукових товщиномірів;

- результати експериментальних випробувань при вимірюванні товщини сталених зразків показали, що для обробки зашумлених ехо-імпульсів доцільно використовувати нейромережевий підхід, який забезпечує меншу похибку вимірювань.

#### 4.4 Метрологічна оцінка удосконаленого методу контролю товщини

При вимірюванні товщини ехо-імпульсним методом, як і при будь-яких непрямих вимірюваннях, завжди виникають похибки результату вимірювання, які залежать від неточності визначення первинної величини. В нашому випадку такою первинною величиною є час поширення акустичних коливань, що в свою чергу залежить від багатьох параметрів. Не провівши аналіз причин, які впливають на точність вимірювання, не коректно говорити про достовірність результату. Для розуміння впливу цих причин, коротко їх проаналізуємо [30]:

- зміна товщини шару контактної речовини (для контактних товщиномірів) чи зміна відстані від перетворювача до ОК (в нашому випадку) призводить до зміни часу між зондуючим та ехо-сигналом;

- зміна рівня сигналу, що спричиняє втрату одного півперіоду ехо-імпульсу при однаковому рівні спрацювання вимірювального тригера;

- зміна тривалості переднього фронту ехо-імпульсу;

- похибка блоку, який здійснює вимірювання часу поширення УЗК;

- похибка, яка виникає перед вимірюванням при налаштуванні приладу;

- зміна швидкості поширення ультразвукових коливань, в наслідок неоднорідності матеріалу ОК, впливу зміни умов вимірювань;

- інші причини.

Оскільки аналітично врахувати вплив вище перелічених причин виникнення похибок на результат вимірювання практично не можливо, тому для оцінки достовірності вимірювання товщини було вирішено провести експериментальну оцінку результатів вимірювань товщини елементів металоконструкцій за допомогою розробленої експериментальної установки в ході багатократних спостережень. Оскільки, згідно з розробленої методики експериментальних досліджень, на кожному з 12 взірців було проведено по 10 вимірювань тому можемо провести метрологічний аналіз результатів цих багатократних спостережень (табл. 4.2).

Таблиця 4.2.

## Результати багатократних вимірювань

№ взірця (товщина, мм)	Отримане значення товщини $h$ , мм									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1 (0.55)	0.31	0.19	0.81	0.9	0.71	0.41	0.28	0.18	0.16	0.74
2 (0.82)	0.78	1.09	0.78	0.55	0.51	0.91	0.51	0.65	0.74	0.61
3 (1.27)	1.28	0.98	1.58	1.59	1.28	1.57	0.97	1.31	1.55	1.23
4 (1.5)	1.58	1.87	1.92	1.74	1.77	1.44	1.78	1.25	1.89	1.34
5 (1.98)	1.28	1.41	1.62	2.01	2.11	2.09	1.35	1.63	2.02	1.99
6 (2.96)	3.01	2.68	2.23	2.71	2.49	2.85	2.52	2.17	2.15	2.95
7 (3.8)	3.68	3.55	3.22	3.8	4.03	3.27	4.01	3.47	3.46	3.61
8 (3.93)	3.58	4.14	4.22	3.52	3.73	3.98	4.1	3.96	4.11	3.56
9 (5.01)	4.7	4.63	4.62	4.78	4.99	4.79	4.86	4.94	5.31	5.3
10 (5.94)	5.21	5.88	4.82	5.37	5.29	4.91	4.81	4.74	4.98	5.75
11 (6.93)	6.21	6.78	6.62	6.55	6.85	6.92	7.01	6.12	6.33	6.22
12 (9.53)	9.58	9.69	8.39	9.43	9.58	9.26	9.21	9.03	8.41	9.11

Для визначення метрологічних характеристик розробленого методу контролю товщини, оброблення результатів таких багатократних спостережень доцільно провести згідно з стандартною методикою [104], яку розглянемо на прикладі першого взірця.

1) Розрахуємо середнє значення товщини  $\bar{h}$ :

$$\bar{h} = \sum_{i=1}^n \frac{h_i}{n} = 0,47, \quad (4.8)$$

де  $n=10$  - кількість спостережень,  $h_i$  - значення товщини взірця, отримане під час  $i$ -го вимірювання.

2) Визначимо середньоквадратичне відхилення (СКВ)  $\sigma_h$  результатів спостережень:

$$\sigma_h = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (h_i - \bar{h})^2}{n-1}} = 0,29. \quad (4.9)$$

3) Згідно із правилом «трьох сігм» проведемо перевірку кожного результату спостережень на аномальність.

$$|h_i - \bar{h}| \leq 3\sigma_h. \quad (4.10)$$

При перевірці виявлено, що всі значення спостережень товщини задовольняють умову (4.10).

4) Враховуючи те, що кількість спостережень для одного взірця в нашому випадку складає 10, тоді проведемо перевірку результатів спостережень на відповідність нормальному закону розподілу за допомогою критерію  $W$ .

Для перевірки результатів спостережень товщини за критерієм  $W$  скористаємось методикою, яка подана в [105]. Спочатку всі результати спостережень упорядкуємо у вигляді варіаційного ряду  $x'_1 \leq x'_2 \leq \dots \leq x'_n$ . Після цього вказані результати спостережень занесемо в розрахункову табл. 4.3.

В нижній половині третьої колонки знизу вверх запишемо значення  $j$  від 1 до  $l$ , де  $l = n/2$  для парних  $n$  і  $l=(n-1)/2$  для непарних  $n$ . В нашому

випадку таблицю 4.3 заповнимо для результатів спостережень вимірювань товщини першого взірця.

Таблиця 4.3

Алгоритм критерію  $W$ 

$i$	$x_i$	$j$	$a_{n-j+1}$	$\Delta x = x'_{n-j+1} - x'_j$	$a_{n-j+1} \cdot \Delta x$
1	2	3	4	5	6
1	0,16				
2	0,18				
3	0,19				
4	0,31				
5	0,28				
6	0,41	5	0,0399	0.13	0.005187
7	0,71	4	0,1224	0.4	0.04896
8	0,74	3	0,2141	0.55	0.117755
9	0,81	2	0,3291	0.63	0.207333
10	0,9	1	0,5739	0.74	0.424686

На основі додатку Ж [105] для відповідних  $n$  та  $l$  знаходимо значення коефіцієнтів  $a_{n-j+1}$  для  $j$  від 1 до  $l$  і записуємо їх знизу вверху у колонку 4 табл. 4.3. Після цього розраховуємо значення різниць  $x'_{n-j+1} - x'_j$ , які заносимо в колонку 5. На основі колонок 4 і 5 заповнюємо нижню частину колонки 6 табл. 4.3.

Значення  $\varphi^2$  та  $b^2$  розраховуємо на основі даних таблиці 4.3 таким чином:

$$\varphi^2 = \sum_{i=1}^n (x'_i)^2 - \frac{1}{n} \left( \sum_{i=1}^n x'_i \right)^2 = 0,755, \quad (4.11)$$

$$b^2 = \left\{ \sum_{j=1}^l a_{n-j+1} \cdot (x'_{n-j+1} - x'_j) \right\}^2 = 0,646. \quad (4.12)$$

Значення критерію  $W$  розраховуємо на основі отриманих значень  $\varphi^2$  та  $b^2$  за формулою:

$$W = \frac{b^2}{\varphi^2} = 0,8561. \quad (4.13)$$

Для перевірки критерію  $W$  задамо певним рівнем значимості  $\alpha$ , який відображає найбільшу ймовірність помилковості гіпотези про належність результатів спостережень даної вибірки до нормального закону розподілу. Нехай в нашому випадку  $\alpha=0.05$ . Тоді згідно з додатком К [105] знаходимо значення  $W^*=0,842$ . Оскільки  $W > W^*$ , то результати спостережень вимірювання товщини відповідають нормальному закону розподілу.

5) Враховуючи те, що результати спостережень описуються нормальним законом розподілу, то визначимо СКВ результатів прямих вимірювань товщини:

$$\sigma_{\bar{h}} = \frac{\sigma_h}{\sqrt{n}} = 0.0918. \quad (4.14)$$

6) Для знаходження коефіцієнта Ст'юдента задамо значенням імовірності -  $\bar{P}_{зад} = 0.95$ . Тоді згідно з додатку В [105] коефіцієнт Ст'юдента буде рівний  $z = 2.26$ .

7) Запишемо результати вимірювань товщини згідно з формулою [106]:

$$h = \bar{h} \pm z\sigma_{\bar{h}}, \quad \bar{P} = \bar{P}_{зад}. \quad (4.15)$$

Тоді:  $h = 0.47 \pm 0.21$ ,  $\bar{P}_{зад} = 0.95$

Аналогічні розрахунки проведемо для інших 11 взірців. Результати обчислень при  $\bar{P}_{зад} = 0.95$  подано в табл. 4.4. Також визначимо відносну випадкову похибку вимірювань за результатами спостережень вимірювання товщини.

Як бачимо з табл. 4.4. відносна випадкова похибка вимірювань експериментальної установки є максимальною на початку діапазону вимірювань і зменшується при зростанні товщини. Такі великі значення випадкової відносної похибки при малих товщинах взірців можна пояснити зміною рівня сигналу, що спричиняє втрату одного півперіоду ехо-імпульсу. Тому для визначення основної допустимої похибки експериментальної установки задамося інтервалом товщин, в якому розрахована відносна похибка вимірювань складає менше 5%. В нашому випадку - для взірців 6-12. Таким чином отримаємо зведену до діапазону похибку вимірювань.

Таблиця 4.4.

Значення абсолютної та відносної випадкової похибки вимірювань

№ взірця	Виміряне середнє значення товщини, $\bar{h}$ , мм	Абсолютна випадкова похибка вимірювань, $z\sigma_{\bar{h}}$ , мм	Відносна випадкова похибка вимірювань, %
1	0.47	0.21	44.07
2	0.71	0.12	17.46
3	1.33	0.14	10.3
4	1.66	0.14	8.61
5	1.75	0.12	6.68
6	2.58	0.13	4.84
7	3.61	0.17	4.73
8	3.89	0.16	4.34
9	4.89	0.18	3.63
10	5.58	0.21	4.39
11	6.56	0.23	3.54
12	9.17	0.32	3.57

Для цього визначимо максимальне значення абсолютної похибки вимірювань [107, 108], взявши за дійсне значення виміряної величини, значення товщини зразка, яке виміряне за допомогою мікрометра (табл. 4.2). Діапазон товщин складає від 2,96 мм до 9,53 мм.

Отже зведена до діапазону (6,57мм) похибка вимірювань товщини елементів металоконструкцій удосконаленого методу не перевищує 5,5%. Абсолютна похибка вимірювань у вказаному діапазоні товщин -  $\pm 0,38$ мм.

Висновки до розділу.

- 1) розроблено експериментальну установку та методику експериментальних досліджень щодо вимірювання товщини елементів металоконструкцій;
- 2) проведено експериментальні дослідження щодо перевірки удосконаленого акустичного методу контролю. Результати досліджень



підтвердили адекватність розробленої математичної моделі узгоджуючого шару безконтактного перетворювача та правильність вибору розробленого нового нейромережевого методу оброблення вимірювальної інформації, як такого, що володіє кращою чутливістю та меншою похибкою вимірювань у порівнянні з традиційним взаємкореляційним методом;

3) шляхом експериментальних досліджень встановлено що межі використання запропонованого методу безконтактного ультразвукового контролю товщини сталевих виробів складають 0,55 - 9,53 мм;

6) проведено метрологічну оцінку удосконаленого способу вимірювання геометричних елементів металоконструкцій. Приведена до діапазону похибка вимірювань товщини не перевищує 5,5% при абсолютній похибці вимірювань  $\pm 0,38$ мм.

## РОЗДІЛ 5

### РОЗРОБЛЕННЯ ДОСЛІДНОГО ВЗІРЦЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЇ УСТАНОВКИ ДЛЯ КОНТРОЛЮ ТОВЩИНИ ЕЛЕМЕНТІВ МЕТАЛОКОНСТРУКЦІЙ ТА МЕТОДИКИ ЇЇ ВИКОРИСТАННЯ

Для проведення промислової апробації результатів теоретичних та експериментальних досліджень було розроблено дослідно-експериментальний зразок установки для контролю товщини металоконструкцій та методику проведення контролю в промислових умовах.

Як правило, будь який вид контролю елементів металоконструкцій проводиться в експлуатаційних умовах і в більшості випадків в робочих умовах в полі без зупинки об'єкту. Тому для розробки дослідно-експериментальної установки, яка б забезпечувала можливість проведення контролю у згаданих умовах необхідно усунути декілька конструктивних недоліків експериментальної установки, яка використовувалась при лабораторних дослідженнях, а зокрема:

- відсутність корпусу установки;
- великі розміри окремих складових блоків експериментальної установки, що було пов'язано з необхідністю забезпечення зручності при налаштуванні складових частин;
- необхідність використання цифрового осцилографу для оцифрування вимірювальної інформації та карт пам'яті для передачі оцифрованої вимірювальної інформації в персональний комп'ютер для оброблення.

З метою виключення даних недоліків постала необхідність розроблення на базі існуючої експериментальної установки нової для проведення промислових випробувань.

## 5.1 Розроблення дослідного взірця установки для контролю товщини елементів металоконструкцій

Для розроблення дослідного взірця установки під назвою БКТУ-2 були використані ті самі схемотехнічні рішення принципи та підходи, що застосовувались для створення експериментальної установки. Основними відмінностями дослідної установки від експериментальної була відсутність вищезгаданих недоліків.

В основу функціональної схеми дослідного взірця установки БКТУ-2 було покладено ту саму концепцію макетного взірця експериментальної установки (рис. 5.1).

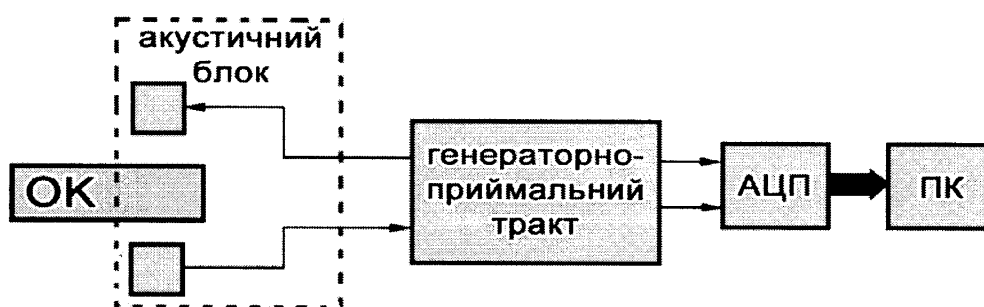


Рис. 5.1. Функціональна схема дослідної установки БКТУ-2

Акустичний блок складається з двох розроблених безконтактних ультразвукових перетворювачів (рис. 4.16), які призначені для збудження і приймання акустичних коливань і за допомогою гнучких екранованих провідників з роз'ємами на кінці приєднаний до генераторно-приймального тракту.

Для розміщення всіх блоків експериментальної установки в один корпус, було заново виготовлено її окремі блоки з меншими габаритними розмірами, що дало можливість зробити дослідний зразок установки компактним та переносним.

Генераторно-приймальний тракт разом з аналого-цифровим перетворювачем розміщені в окремому переносному корпусі. Структурна

схема генераторно-приймального тракту подана на рис. 4.15. Принцип роботи генераторно-приймального тракту дослідної установки залишився незмінним і описаний в підрозділі 4.3.

При проведенні дослідних випробувань в промислових користуватися осцилографом доволі не зручно. Крім того, необхідність передачі вимірювальної інформації до персонального комп'ютера за допомогою карт пам'яті, значно збільшує час одного вимірювання. Тому, для виключення даного недоліку та з метою забезпечення можливості автоматичної передачі вимірювальної інформації до ПК для її подальшого оброблення, в якості аналого-цифрового перетворювача був вибраний серійний АЦП підприємства „Електронні технології та метрологічні системи ЗЕТ” (Додаток В). Технічні характеристики АЦП наступні:

- частота перетворення – до 50 МГц;
- частота вибірки – до 500 Мвіб/с;
- смуга пропускання – 0...20 МГц;
- вхідний опір 1 МОм;
- вхідна ємність 20 пФ;

Даний аналого-цифровий перетворювач володіє гіршими технічними характеристиками у порівнянні з раніше використаним цифровим осцилографом. Проте основною перевагою даного АЦП є його малі габаритні розміри, що дало можливість розташувати його в корпусі БКТУ-2 та можливість оцифрування та передачі вимірювальної інформації до ПК в режимі реального часу через порт USB.

Після оцифрування, вимірювальна інформація з АЦП потрапляє на блок оброблення та візуалізації, який представляє собою персональний комп'ютер зі спеціально розробленим програмним забезпеченням, що реалізує новий розроблений метод визначення товщини елементів металоконструкцій на базі нейронних мереж. Принцип реалізації розробленого методу оброблення вимірювальної інформації за допомогою штучних нейронних мереж подано в третьому розділі.

Блок-схема алгоритму оброблення вимірювальної інформації та визначення товщини подана на рис. 5.2.

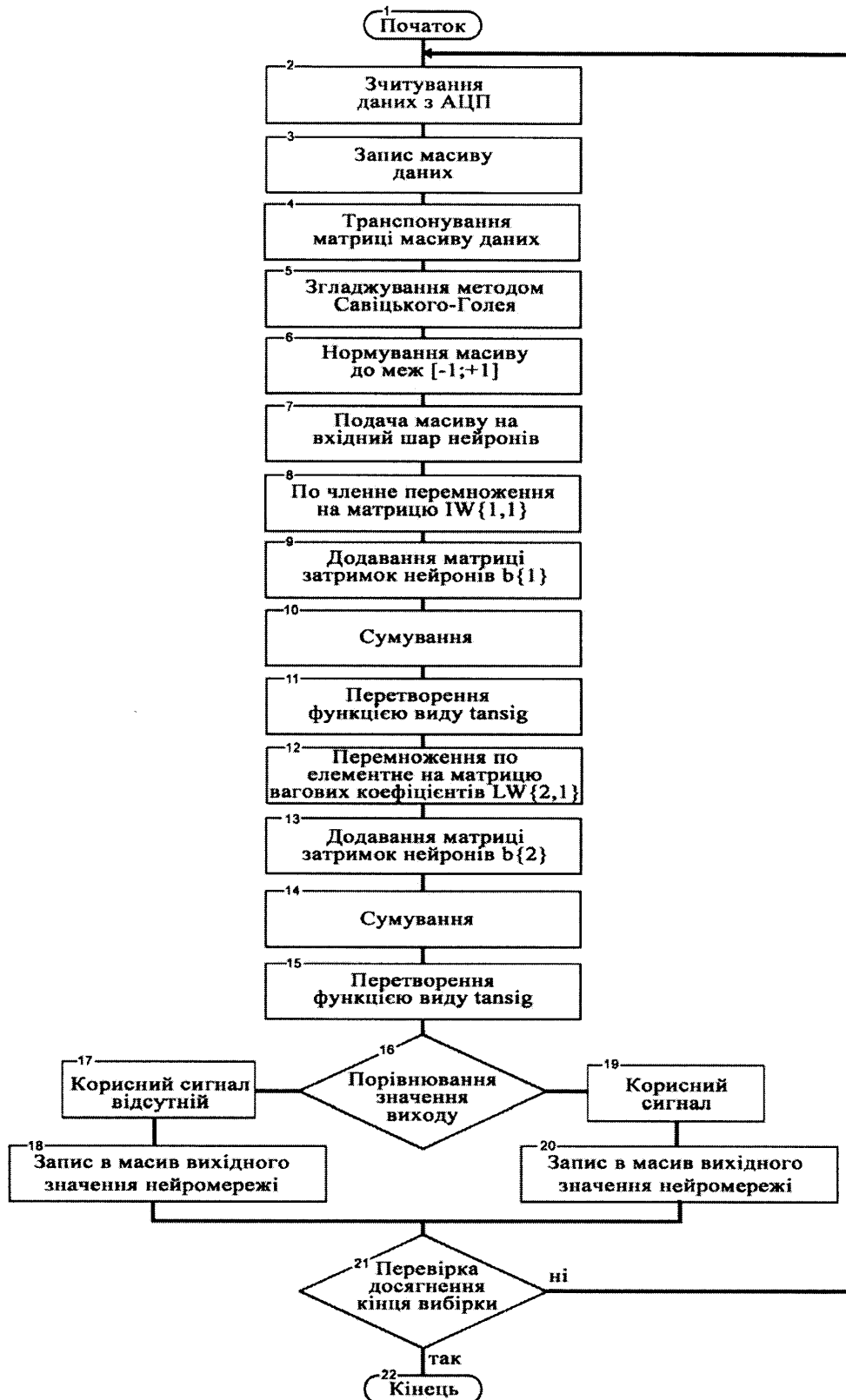


Рис. 5.2. Алгоритм оброблення вимірювальної інформації

Лістинг програми, що реалізує даний алгоритм подано в додатку Д. Результатом роботи даної програми є значення товщини елементів металоконструкції, яке висвічується на екрані персонального комп'ютера.

Для проведення безконтактного вимірювання величини зовнішнього корозійного пошкодження елементів металоконструкцій був розроблений механізований автоматичний сканер (рис. 5.3).

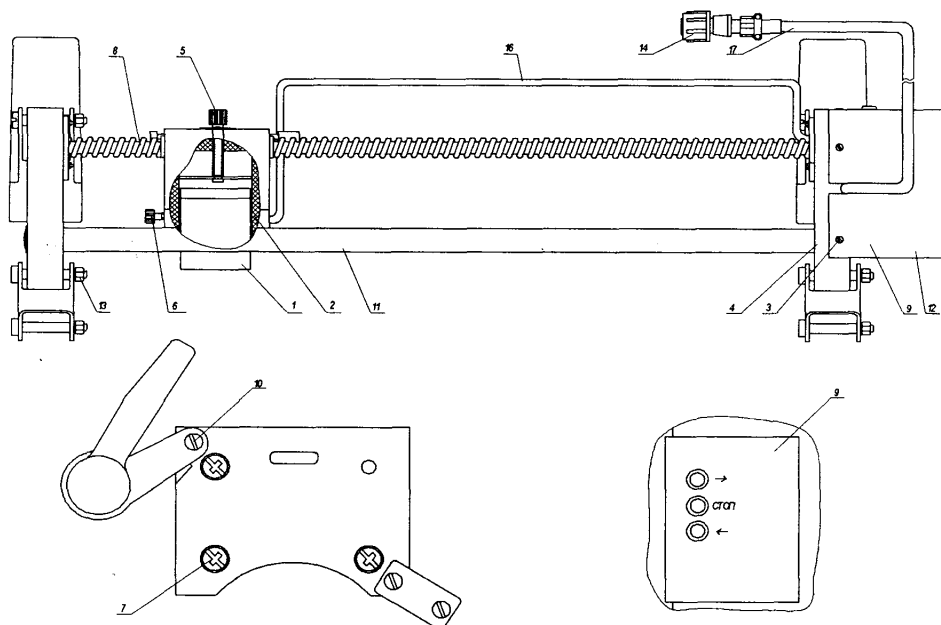


Рис. 5.3. Автоматичний сканер для контролю глибини корозійного пошкодження:

1 – акустичний перетворювач, 2 – корпус, 3, 7, 10 – гвинт, 4 – радіальна стійка, 5 – гвинт для настроювання базової віддалі, 6 – гвинт-фіксатор, 8 – привідний гвинт, 9 – блок управління, 11 – направляючі, 12 – кришка, 13 – гайка, 14 – з'єднювач, 15 – кінцевий вимикач, 16, 17 – кабель.

Автоматичний сканер складається з безконтактного акустичного перетворювача 1, встановленого у корпусі 2. Корпус 2 за допомогою привідного гвинта 8, який обертається кроковим двигуном, розміщеним у блоці управління кроковим двигуном 9, здійснює поступальний рух по направляючих 11. Направляючі закріплені за допомогою гвинтів 7 до радіальних стійок 4. Блок управління кроковим двигуном розміщений під

кришкою 12, яка за допомогою гвинтів 3 кріпиться до радіальної стійки. Гвинт 5 дозволяє плавно змінювати базову віддаль між перетворювачем та контрольованою поверхнею, а гвинт 6 фіксує потрібне положення перетворювача. За допомогою гвинтів 10 та гайок 13 до радіальних стійок кріпиться система фіксації автоматичного сканера на контрольованому об'єкті. Кінцеві вимикачі 15 призначені для автоматичної зупинки крокового двигуна. Акустичний перетворювач через кабель 16 з'єднується з блоком управління кроковим двигуном 9. Через кабель 17 та з'єднувач 14 сканер з'єднується з дослідною установкою БКТУ-2.

Дослідна установка БКТУ-2 являє собою ручний переносний прилад у металевому корпусі з класом захисту IP65, до якого приєднуються акустичні перетворювачі та автоматичний сканер. Загальний вигляд БКТУ-2, що призначена для контролю товщини елементів металоконструкцій подано на рис. 5.4.

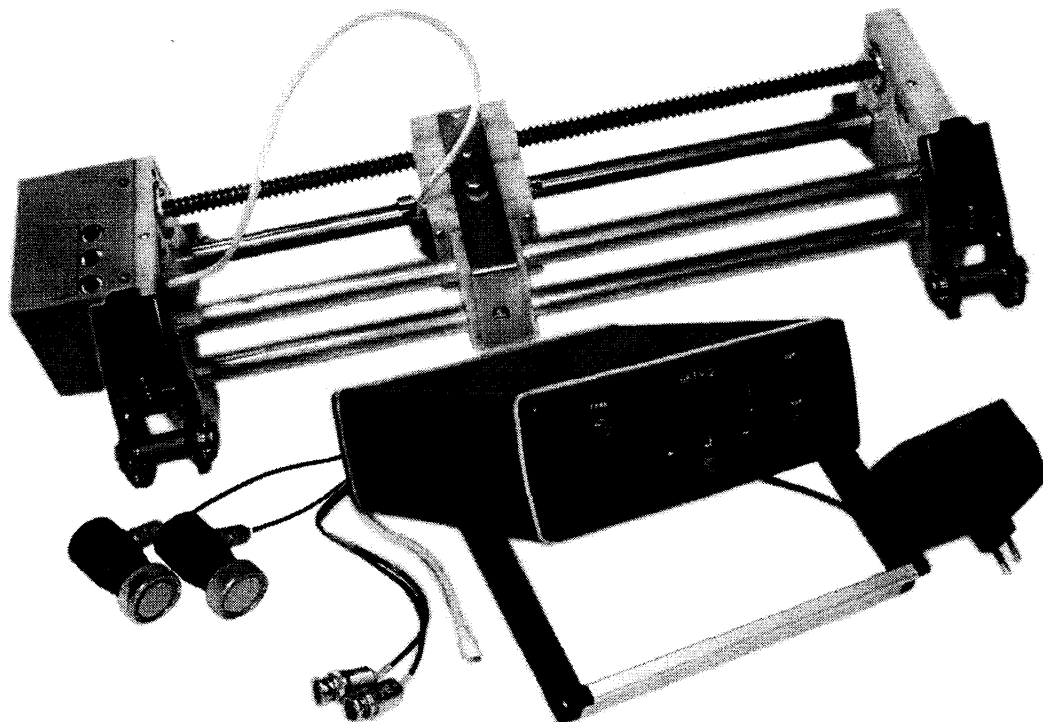


Рис. 5.4. Дослідна установка БКТУ-2

Зв'язок БКТУ-2 з персональним комп'ютером здійснюється через інтерфейс USB. Живлення розробленої дослідної установки БКТУ-2 здійснюється від внутрішньої акумуляторної батареї, а також можливе живлення від промислової мережі змінного струму 220 В  $\pm 10\%$  з частотою (50 $\pm$ 0,5) Гц за допомогою блока живлення. Автоматичний сканер для контролю корозійних пошкоджень живиться від внутрішньої акумуляторної батареї установки БКТУ-2.

## 5.2 Методика неруйнівного контролю товщини металоконструкцій в промислових умовах

Для забезпечення надійної роботи будь-якого вимірювального приладу та забезпечення достовірності результатів вимірювання потрібно розробити методику його застосування, що регламентує порядок проведення робіт при експлуатації.

З цією метою, для проведення випробувань дослідного взірця установки БКТУ-2, була розроблена програма та методика промислових випробувань, яка подана в додатку Е.

Розроблена програма та методика промислових випробувань розроблена згідно з загальних вимог та підходів до розроблення нормативних документів в галузі неруйнівного контролю [14] та включає такі розділи:

- об'єкт випробування;
- мета випробування;
- порядок, місце та умови проведення;
- необхідне обладнання та засоби вимірювальної техніки;
- технічні вимоги;
- підготовка до випробувань;
- програма випробувань;
- методика проведення випробувань;
- вимоги техніки безпеки і охорони навколишнього середовища;



- оформлення результатів.

В додатках до програми та методики промислових випробувань подано зразок типового акту, який складається за результатами випробувань і підписується особами, що брали участь у випробуваннях.

Програма випробувань включає такі розділи:

- визначення діапазону вимірювань товщини;
- визначення діапазону вимірювання глибини корозійного пошкодження;
- визначення середньої абсолютної похибки вимірювань товщини;
- визначення приведеної до діапазону похибки вимірювань.

Коротко подамо послідовність операцій, які необхідно виконати при проведенні промислових випробувань.

Визначення діапазону вимірювань, середньої абсолютної похибки та похибки приведеної до діапазону вимірювань здійснюється наступним чином. Проводиться підготовка дослідної установки та її виведення на робочі режими. Відбираються зразки з різними значеннями товщини стінок з діапазону вимірювання від 1 мм до 12 мм. Проводять вимірювання, запис, оцифрування та оброблення результатів за допомогою програмного забезпечення згідно з описаною в розділі 4 послідовністю.

При випробуваннях потрібно проводити не менше п'яти вимірювань на одному зразку в одній точці. Після кожного вимірювання перетворювачі потрібно зміщувати відносно точки вимірювання вздовж зразка та повертати в попереднє положення, при цьому відстань між перетворювачами не повинна змінюватись.

За результатами випробувань, згідно з описаної методики, визначають шукані величини похибок та діапазону вимірювань.

Всі результати вимірювань, незалежно від того чи були випробування успішними, а також виявлені в процесі випробувань недоліки та зауваження заносяться в протокол промислових випробувань. За бажанням членів комісії, що беруть участь у випробуваннях, складається перелік заходів щодо

ліквідації виявлених недоліків, пропонуються шляхи удосконалення установки. За негативних результатів випробувань складається акт, в якому вказуються пункти невідповідності та визначаються терміни усунення недоліків, умови та місце наступних випробувань.

### 5.3 Промислові випробування дослідно-експериментальної установки та методики контролю

Отримані результати теоретичних та експериментальних досліджень дали можливість розробити та виготовити дослідно-експериментальну установку БКТУ-2 та розробити проект програми та методики проведення промислових випробувань.

Промислові випробування проводились у два етапи. Перший етап був проведений в умовах лабораторій Науково-виробничої фірми «Зонд» (м. Івано-Франківськ).

В мовах НВФ «Зонд» були виконані випробування дослідного взірця установки БКТУ-2 на сімох різних плоских зразках для настроювання ультразвукових дефектоскопів. Товщини відібраних зразків були наступними: 1 мм, 3 мм, 5 мм, 7 мм, 9 мм та 10 мм. Випробування проводились з метою визначення похибки вимірювань товщини металоконструкцій дослідної установки БКТУ-2.

В ході проведення випробувань було отримано наступні результати (таблиця 5.1.).

Також було проведено промислові випробування установки БКТУ-2 при роботі з автоматичним сканером для контролю величини корозійних пошкоджень металоконструкцій. Випробування проводились на фрагменті труби магістрального трубопроводу з наявними корозійними пошкодженнями по тілу металоконструкції та в області зварного шва (рис.5.5), шляхом сканування його поверхні за допомогою акустичного перетворювача.

За результатами випробувань отримано просторовий образ зразка, який було побудовано за допомогою розробленого програмного забезпечення (рис. 5.6).

Таблиця 5.1

Результатами промислових випробувань в умовах НВФ «Зонд»

Маркування зразка та дійсне значення товщини	Прилади та обладнання, використане при випробуваннях	Покази експериментальної установки БКТУ-2, мм	Абсолютна похибка вимірювань, мм
ЗН №1/10 h =1 мм	Мікрометр МК25-2 №4718	0,63	0,37
ЗН №1/10 h =3 мм	Мікрометр МК25-2 №4718	3,47	0,47
ЗН №1/10 h =4 мм	Мікрометр МК25-2 №4718	3,58	0,42
ЗН №1/10 h =5 мм	Мікрометр МК25-2 №4718	5,41	0,41
ЗН №1/10 h =7 мм	Мікрометр МК25-2 №4718	6,72	0,38
ЗН №1/10 h =9 мм	Мікрометр МК25-2 №4718	8,64	0,36
ЗН №1/10 h =10 мм	Мікрометр МК25-2 №4718	9,58	0,42
Середня абсолютна похибка вимірювань – 0,41 мм.			
Похибка приведена до діапазону (7 мм) вимірювань – 5,75 %.			



Рис. 5.5. Зразок для проведення випробувань

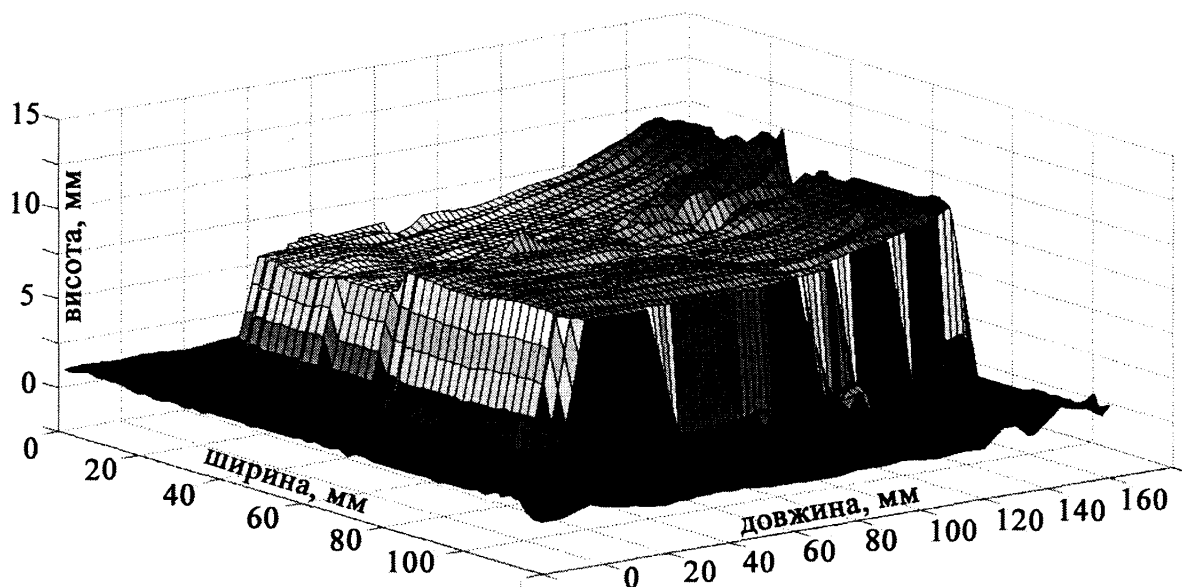


Рис. 5.6. Просторовий образ зразка

Таким чином випробування показали, що установка БКТУ-2 може бути використана для контролю товщини сталевих зразків та для вимірювання глибини корозійних пошкоджень зовнішньої поверхні труб магістральних трубопроводів.

За результатами випробувань було запропоновано:

- удосконалити конструкцію генераторно-приймального тракту та системи оброблення вимірювальної інформації;
- з метою зменшення похибки вимірювань розглянути можливість розроблення конструкції та виготовити безконтактні ультразвукові перетворювачі, частотою вищою 1 МГц.

Акт попередніх випробувань в промислових умовах НВФ «Зонд» подано в додатку.

Другий етап промислових випробувань було проведено в умовах Богородчанського ЛВУМГ.

Випробування експериментальної установки БКТУ-2 були виконані на трьох різних фрагментах труб, які були вирізані з ділянки трубопроводу при проведенні ремонтних робіт. Умовний діаметр труб 159 мм, 168 мм та 377 мм, номінальна товщина стінок складала 5 мм, 6 мм та 9 мм відповідно.

Покази експериментальної установки БКТУ-2 (середні значення за трьома вимірюваннями) та відповідні дійсні значення товщини труби, виміряні за допомогою штангенциркуля та ультразвукового дефектоскопа - товщиноміра УДЗ-71 наведені в табл. 5.2.

Таблиця 5.2.

Результатами промислових випробувань в умовах  
Богородчанського ЛВУМГ

Умовний діаметр труби, мм, (номінальна товщина стінки, мм)	Дійсні значення товщини стінки труби, мм	Покази дефектоскопа-товщиноміра УДЗ-71, мм	Покази експериментальної установки БКТУ-2, мм
<i>159, (5)</i>	<i>5,1</i>	<i>5,12</i>	<i>5,31</i>
<i>168, (6)</i>	<i>6,2</i>	<i>6,31</i>	<i>6,37</i>
<i>377, (9)</i>	<i>8,9</i>	<i>9,05</i>	<i>9,24</i>

Результати випробувань дозволяють стверджувати про повторюваність випробувань дослідної установки в діапазоні товщин від 5мм до 9мм, при відносній похибці вимірювань, яка не перевищує 6,1%.

В ході випробувань виявлені наступні недоліки:

- тривалий час виконання одного вимірювання товщини стінки труби;
- необхідність проведення попереднього зачищення поверхні труби;
- неможливість проведення вимірювання товщини труби при односторонньому доступі до поверхні.

Акт промислових випробувань в умовах Богородчанського ЛВУМГ подано в додатку.

Для визначення можливого економічного ефекту від застосування розробленого взірця установки БКТУ-2, проаналізуємо умови можливих статей економії:

- визначення нових термінів експлуатації та забезпечення відпрацювання повного технічного ресурсу металоконструкцій довготривалої експлуатації шляхом визначення дійсних значень їх товщини на основі чого і визначатиметься залишковий ресурс;

- зменшення виникнення аварійних ситуацій та простоювання обладнання;

- підвищення продуктивності контролю, зменшення затрат на підготовку до проведення контролю (не потрібно використовувати контактні речовини, не відбувається зношення протектора перетворювача, що призводить до його виходу з ладу).

Виходячи з наведених можливих статей економії, що буде досягнуто за допомогою даної дослідної установки проведених розрахунків, впровадження установки у виробництво та застосування на промисловості дасть річний економічний ефект в розмірі 97 000 грн., а термін окупності складе 2,4 роки при нормативному терміні експлуатації 5 років.

#### Висновки до розділу.

Подані в даному розділі результати можна об'єднати у такі основні висновки:

- 1) розроблено дослідний взірець установки для контролю товщини елементів металоконструкцій. Описано конструкцію установки, будова її основних вузлів та принцип роботи;

- 2) розроблено та подано алгоритм роботи програмного забезпечення для оброблення вимірювальної інформації;

- 3) розроблено проект програми та методики промислових випробувань дослідного взірця установки БКТУ-2. Проведено промислові випробування установки БКТУ-2 в умовах лабораторій НВФ «Зонд» та в умовах промислу Богородчанського ЛВУМГ;

- 4) оцінено річний економічний ефект від застосування розробленої установки та методики, який становить 97 000 грн. при терміні окупності 2,4 роки.

## ВИСНОВКИ

У результаті проведених теоретичних та експериментальних досліджень вирішена важлива науково-практична задача в галузі методів та приладів неруйнівного контролю – удосконалено акустичний метод безконтактного контролю товщини металоконструкцій, розроблено експериментальний взірець приладу та здійснено його апробацію і одержано такі основні результати:

1. Проведений аналіз відомих методів та засобів контролю товщини металоконструкцій показав, що на даний час найбільш поширеним є акустичний метод з використанням контактних рідин, недоліком якого є необхідність забезпечення якісного акустичного контакту п'єзоперетворювача з об'єктом контролю, що звужує сферу використання та зменшує продуктивність даного методу. Обґрунтовано необхідність удосконалення існуючих методів контролю та розроблення нового методу акустичного контролю товщини.

2. Удосконалено прохідний метод безконтактного акустичного контролю товщини стінки металоконструкції шляхом використання узгоджувачів шарів для зменшення втрат енергії акустичних коливань на межі розподілу п'єзоелемент/повітря та нового інтелектуального способу оброблення дефектоскопічної інформації, який порівняно з традиційним взаємкореляційним методом, дав змогу збільшити діапазон вимірювання товщини стінки металоконструкцій на 37,5% та на 4,6% зменшити приведену до діапазону (8,98мм) похибку вимірювань.

3. Удосконалено математичну модель узгоджувача шару безконтактного ультразвукового перетворювача, шляхом врахування акустичних характеристик повітря та матеріалу об'єкта контролю, а також розроблено методику розрахунку втрат енергії акустичних коливань під час безконтактного вимірювання товщини металоконструкцій, що дало змогу визначити характеристики матеріалу та товщину узгоджувачів шарів

перетворювача та теоретично обґрунтувати можливість проведення контролю.

4. Розроблено новий метод оброблення дефектоскопічної інформації на базі штучних нейронних мереж, що дало змогу покращити відношення сигнал/шум для безконтактного акустичного способу вимірювання товщини стінки металоконструкцій у порівняно з взаємокореляційним методом оброблення на 2,5дБ.

5. За результатами експериментальних досліджень було доведено адекватність розробленої математичної моделі, визначено дійсні межі використання запропонованого методу безконтактного ультразвукового контролю товщини сталевих виробів, що становлять 0,55 - 9,53 мм. Оцінено приведену до діапазону (6,57мм) похибку вимірювань товщини елементів металоконструкцій удосконаленого методу, що не перевищує 5,5%. Абсолютна похибка вимірювань у вказаному діапазоні товщин становить  $\pm 0,38$ мм.

6. Розроблено та виготовлено дослідно-експериментальний зразок установки для безконтактного акустичного контролю товщини стінки металоконструкцій. Проведено промислову апробацію установки в умовах лабораторій НВФ «Зонд» та промислу Богородчанського ЛВУМГ, яка показала можливість та доцільність розроблення систем безконтактного контролю товщини металоконструкцій. Розроблено проект методики визначення товщини стінки металоконструкцій за допомогою розробленої установки. Очікуваний економічний ефект від впровадження запропонованого приладу становить 97 000 грн.



## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Про схвалення Енергетичної стратегії України на період до 2030 року : від 15.03.2006р. № 145-р / Розпорядження Кабінету Міністрів України - Режим доступу:

<http://zakon.rada.gov.ua/cgi-bin/laws/main.cgi?nreg=145-2006-%F0>.

2. Інформація про перше засідання Міжвідомчої комісії з питань науково-технологічної безпеки при Раді національної безпеки і оборони України : від 14.02.02 р. / Рада національної безпеки і оборони України // Офіційна веб-сторінка РНБО України. – Режим доступу: <http://www.rainbow.gov.ua>.

3. Глоба В. М. Основи будівництва трубопроводів : навчальний посібник / В.М. Глоба, О. Т. Мартинюк. – Івано-Франківськ: ІФДТУНГ, 2000. – 156 с.

4. Остащ О. П. Технічна діагностика і ресурс конструкцій після довготривалої експлуатації / О. П. Остащ, В. М. Учанін, І. М. Андрейко, І. Р. Маковійчук // Фізичні методи та засоби контролю середовищ, матеріалів та виробів. – Львів: Фізико-механічний інститут НАН України. 1999. Вип. 4 - С. 3 - 8.

5. Акользин П. А. Коррозия и защита металла теплоэнергетического оборудования / Акользин П. А. – М: Энергоиздат, 1992. – 303 с.

6. Карпаш О.М. Технічна діагностика систем нафтогазопостачання: навчальний посібник / Карпаш О. М., Возняк М. П., Василюк В. М. – Івано-Франківськ: Факел, 2007. – 314 с.

7. Гумеров А. Г. Безопасность длительно эксплуатируемых магистральных нефтепроводов / Гумеров А. Г., Гумеров Р. С., Гумеров К. М. - М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2003. – 310 с.

8. Технічне діагностування та контроль технічного стану. Терміни та визначення : ДСТУ 2389-94 . – [Чинний від 1995-01-01]. – К. : Держстандарт України, 1995. – 23 с.

9. Надзвичайні ситуації техногенного характеру / МНС України // Офіційний інформаційний сервер МНС України. 2008р. – Режим доступу: <http://www.mns.gov.ua/quater/mns/2007/4/techno.ua.php>.

10. Мазур И. И. Безопасность трубопроводных систем / И. И. Мазур, О. М. Иванцов. – М.: ИЦ «ЕЛИМА», 2004. – 1104 с.

11. Болотов А. С. Коррозионное растрескивание на магистральных газопроводах / А. С. Болотов // Газовая промышленность. – 1994. - №6. С. 3 - 10.

12. Байков И. Р. Методы анализа надежности и эффективности систем добычи и транспорта углеводородного сырья / Байков И. Р., Смородов Е. А., Азмадуллин К. Р. – М.: Недра-Бизнесцент, 2003. – 275 с.

13. Карпаш О. М. Технічна діагностика бурового та нафтогазового обладнання / Карпаш О. М. – Івано-Франківськ: Факел, 2007. – 272с.

14. Неруйнівний контроль труб нафтового сортаменту: навчальний посібник / [Карпаш О. М., Криничний П. Я., Крижанівський Є. І., Мигаль І. Г., Рибчич І. Й., Зінчак Я. М.]. – Івано-Франківськ.: Факел, 2001. – 380 с.

15. Горохов Е. В. Диагностика и оценка остаточного ресурса строительных металлоконструкций в коррозионных средах / Е. В. Горохов, В. П. Корольов // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 1998. – №3. – С 57 – 59.

16. Криничний П. Я. Контроль корозійних втрат металу неруйнівними методами / П. Я. Криничний, І. В. Рибіцький // Методи та прилади контролю якості. – 2005. – № 15. – С. 80 – 84.

17. Коллакот Р. Диагностика поврежденных / Коллакот Р. ; пер. с англ. – М.: Мир, 1989. – 512 с.

18. Карпаш О. М. Огляд методів та засобів контролю корозійних пошкоджень трубопроводів / О. М. Карпаш, П. Я. Криничний, М.О. Карпаш, І. В. Рибіцький // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ: Всеукраїнський щоквартальний науково-технічний журнал. – 2005. – вип. 2(15). – С. 91 – 97.

19. Про затвердження Державної науково-технічної програми „Ресурс” : від 8 жовтня 2004 р. № 1331 / Постанова Кабінету Міністрів України. – Режим доступу:

<http://www.kmu.gov.ua/control/uk/meetings/agenda?mid=8851097>.

20. Про схвалення Концепції Державної програми забезпечення технологічної безпеки в основних галузях економіки : від 11. 06. 2003 р. № 351-р / Розпорядження Кабінету Міністрів України.

21. Карпаш О. М. Стационарна установка “Зонд-СОТ” для автоматизованого комплексного неруйнівного контролю сталевих труб / О. М. Карпаш, П. Я. Криничний, Я. Б. Даниляк, І. А. Молодецький // Фізичні методи та засоби контролю середовищ, матеріалів та виробів. – Львів: 1999. – вип. 5. – С. 37 – 38.

22. Неразрушающий контроль и диагностика : справочник / [Клюев В. В., Соснин Ф. Р., Филинов В. Н. и др.] ; под ред. В. В. Клюева. – М. : Машиностроение, 1995. – 448 с.

23. Неразрушающий контроль. : практ. пособие / [И.Н. Ермолов, Н.П. Алешин, А.П. Потапов; Под ред. В.В. Сухорукова.] – М.: Высшая школа, 1991. – 283 с. – ( "Акустические методы контроля» : в 5 кн., кн. 2).

24. Gómez T. E. Piezoelectric transducers for air-coupled operation in the frequency range 0.3-2.5 MHz / T. E. Gómez, F. Montero // IEEE International Ultrasonics Symposium, Atlanta – 2001. – P. 7 – 10.

25. Junho Song. Design, Fabrication and Characterization of a Spherically Focused Capacitive Air-Coupled Ultrasonic Transducer / Junho Song, D. E. Chimenti // International Journal of Applied Science and Engineering. – 2006. – №4. – P. 1–19.

26. Рибіцький І. В. Аналіз безконтактних методів ультразвукового контролю матеріалів і виробів / І. В. Рибіцький, О. М. Карпаш, М. О. Карпаш // Фізичні методи та засоби контролю середовищ, матеріалів та виробів, – Львів: 2007. вип. 5. – С. 111 – 116.

27. Aindow A. M. Laser-Based Non-Destructive Testing Techniques for Ultrasonic Characterization of Subsurface Flaws / A. M. Aindow, R. J. Dewhurst, S. B. Palmer, C. B. Scruby // NDT International. – 1984 – v. 17, P. 329 – 335.

28. Контроль неразрушающий. Классификация методов : ГОСТ 18353-79. – [Чинний від 1980-07-01] – М.: Госстандарт СССР, 1980. – 12 с.

29. Контроль неруйнівний. Терміни та визначення : ДСТУ 2865-94. – [Чинний від 1996-01-01] – К.: Держспоживстандарт України, 1996. – 56 с.

30. Приборы для неразрушающего контроля материалов и изделий : справочник ; [под ред. В. В. Клюева.]. – [2-е изд.]. – М.: Машиностроение, 1986, – 352 с. – (в 2-х кн., кн. 2).

31. Неразрушающий контроль. Электромагнитный контроль ; [под ред. В. В. Сухорукова.]. – М.: Высшая школа, 1992, – С. 206 – 219.

32. Міцність та довговічність нафтогазового обладнання ; [під. ред. В.І. Похмурського, Є.І. Крижанівського.] – Львів – Івано-Франківськ: Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України; Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, 2006. – 1193 с.

33. Приборы для неразрушающего контроля материалов и изделий : справочник ; [под ред. В. В. Клюева.]. – [2-е изд.]. – М.: Машиностроение, 1986, – 488 с. – (в 2-х кн., кн. 1).

34. Контроль излучением / [под. ред. С. С. Сухорукова.]. – М.: Высш. шк., 1992. – 321 с. – (кн. 4).

35. Неразрушающий контроль. : справочник ; [под ред. В. В. Клюева.]. – М.: Машиностроение, 2001. – 616с.

36. Білокур І. П. Основи дефектоскопії : [підручник] / І. П. Білокур. – К.: Азимут-Україна, 2004. – 496 с.

37. Белокур И. П. Дефектоскопия материалов и изделий / И. П. Белокур, В. А. Коваленко. – К.: Техника, 1989. – 192 с.

38. Алешин Н. П. Радиационная, ультразвуковая и магнитная дефектоскопия металлоизделий : учеб. для ПТУ / Н. П. Алешин, В. Г. Щербинский. – М.: Высш. шк., 1991. – 271 с.

39. Субботин С. С. Дефектоскопия нефтяного оборудования и инструмента при эксплуатации / С. С. Субботин, В. И. Михайленко. – М., Недра, 1982. – 213с.

40. Чедд Г. Звук / Г. Чедд ; [пер. с англ. Г. И. Кузнецова., ред. и предисл. С. Б. Гурвича.]. – М., Мир, 1975. – 206 с.

41. Алешин Н.П., Ультразвуковая дефектоскопия : справ. пособие / Н. П. Алешин, В. Г. Лупачев. – М.: Выш. школа, 1987. – 271 с.

42. Основы физики и техники ультразвука : учеб. пособие для вузов / [Б.А. Агранат, М.Н. Дубровин, Н.Н. Хавский и др.]. – М.: Высш. шк., 1987. – 352с.

43. J. David. Fundamental and Application of Ultrasonic Waves / J. David, N. Cheeke // CRC Series in Pure and Applied Physics. CRC Press LLS. – 2002. – 453 p.

44. Curie J., Curie P. Development par compression de l'electricite pollaire dans les cristaux hemledres a faces inclinees. Bulletin no. 4 de la Societee Mineralogique de France, 3 90 and C.R. Acad. Sc. Paris, 91, 294p.

45. Richardson, R.L. Apparatus for Warning a Ship at Sea of its Nearness to Large Objects wholly or partially under Water : British Patent Specification, 11,125, March 27, 1913.

46. Palmer S. B. Laser-Based Non-Destructive Testing Techniques / Palmer, S.B., Aindow, A.M., Scruby, C.B // Subsurface Flaws, NDT International, - 1984. – v. 15, P. 239 - 245.

47. Шкарлет Ю. М. Бесконтактные методы ультразвукового контроля / Ю. М. Шкарлет. – М.: Машиностроение, 1974. – 57 с.

48. Kawashima K. Experiments with two types of electromagnetic ultrasonic transducers / Kawashima K // *Acoust. Soc. Amer.* – 1976, – №2, P. 365 – 373.

49. Kawashima K. Electromagnetic ultrasonic transducer for generating and detecting longitudinal waves (with a small amount of radially polarized transverse wave) / Kawashima K., McClung R. // *Mater. Eval.*, – 1976, – №4, P.81–90.

50. Карпаш О. М. Можливість застосування електромагніто-акустичних перетворювачів для неруйнівного контролю труб нафтового сортаменту в польових умовах / О. М. Карпаш, П. Я. Криничний, О. В. Вісков // *Сучасні прилади, матеріали і технології для неруйнівного контролю і технічної діагностики промислового обладнання : наук.-техн. конф. та вист : матеріали III . - Івано-Франківськ, – 2002. – С. 67 – 69.*

51. Ультразвук. Маленькая энциклопедия / [глав. ред. И. П. Голямина.] – М.: Советская энциклопедия, 1979. – 400 с.

52. Крауткремер Й. Ультразвуковой контроль материалов : [справочное издание.] / Й. Крауткремер, Г. Крауткремер. – М.: Металлургия, 1991, – 752 с.

53. F. Montero de Espinosa. Spherically Focused Ultrasonic Transducer / F. Montero de Espinosa, D. E. Chimenti // *International Journal of Applied Science and Engineering.* – 2007. – №4. – P. 15 – 24.

54. Castaings M. Single sided inspection of composite material using air-coupled ultrasound / Castaings M., P. Cawley, R. Farlow, G. Hayward. // *Journal of Nondestructive Evaluation.* – 1998. – v.17. – P. 37 – 45.

55. Кажис Р. Й. Ультразвуковые информационно-измерительные системы / Р. Й. Кажис. – Вильнюс: Мокслас, 1986. – 216 с.

56. Gómez T. E.. Air-Coupled Ultrasonic Scanner for Brile / T. E. Gómez, F. Montero, Ana P. Pozas // *IEEE Ultrasonics Symposium.* - 2001. p. 591.

57. F. Montero de Espinosa. High Sensitive Piezoelectric Transducers for NDE Air Borne Applications / F. Montero de Espinosa, T.E. Gomez, A. Albareda, R. Perez, J.A. Casals // IEEE Ultrasonics Symposium. 2000. – 1073 p.
58. Gomez T.E. Bridging the Gap of Impedance Mismatch Between Air and Solid Materials / T.E. Gomez, F. Montero // IEEE Ultrasonics Symposium. 2000. – 1069 p.
59. Boyle R.W. The relation between the thickness of a partition in medium and its reflection of sound waves by the ultrasonic method / Boyle R.W. Lehmann J.F. // Phys. Rev., 2, Vol. 27, P. 518-523.
60. Теумин И. И. Ультразвуковые колебательные системы / И. И. Теумин – М.: МАШГИЗ, 1959. – 331 с.
61. Кажис Р.И. Исследование динамических свойств волнового канала ультразвуковых измерительных приборов / Кажис Р.-И., Таму лис А. // Научные труды вузов ЛитССР, Ультразвук, - 1984, №16, с. 3 – 19.
62. Kazys R.-J., Milius P.-B., Butkus J. Ultrasonic measuring system for the determination of thermal fluctuations in gas-discharge flow // Proceedings of the XV International Conference on Phenomena in Ionized Gases. Minsk, 1981, pt 2, p. 991-999.
63. Sutilov V.A. Physik de Ultraschalls / Sutilov, V.A. // Wien, New York, Springer Verlag. - 1984. – 241 p.
64. Lorh J., Moeglichkeiten zur Verbesserung von Luftultraschallsystemen, PhD-thesis, Fachbereich 6, Verfahrenstechnik, Technischen Universitaet Berlin, (1998).
65. Смажевская Е.Г. Пьезоэлектрическая керамика / Е.Г. Смажевская, Н.Б. Фельдман. – М.: Изд-во «Советское радио», 1971, – 200 с.
66. Gomez T.E.. Paper Characterization by Measurement of Thickness and Plane Resonances Using Air-Coupled Ultrasound / T.E. Gomez, B. Gonzalez, F. Montero // IEEE Ultrasonics Symposium, Munich (Germany). 8 -11 October, 2002. – P. 36.

67. Малов В.В. Пьезорезонансные датчики / В. В. Малов – [2-е изд., перераб. и доп.]. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 272 с.

68. A. Turo, Ultra-low noise front-end electronics for air-coupled ultrasonic non-destructive evaluation / A. Turo, J. Salazar, J. Chavez, H. Kichou, T. Gomez, F. Espinoza, M. Garcia-Hernandez // *NDT&E International*. – 2003. - #36. – P. 93 -100.

69. Рибіцький І.В. Математична модель узгоджуючого шару п'єзоперетворювача та розрахунок втрат енергії акустичних коливань при безконтактному способі вимірювання товщини / І. В. Рибіцький // *Методи та прилади контролю якості*. – 2007. - № 18. – с. 40 - 45.

70. Гурвич А. К. Справочные диаграммы направленности искателей ультразвуковых дефектоскопов / А. К. Гурвич, Л. И. Кузьмина. – К.: Техника, 1980. – 101 с.

71. Ермолов И. Н. Измерение диаграммы направленности в дополнительной плоскости / И. Н. Ермолов, А. А. Щербаков // *Дефектоскопия*. – 1996. - № 110. – с. 3 – 10

72. S.P. Kelly. An Air-Coupled Ultrasonic Matching Layer Employing Half Wavelength Cavity Resonance / S.P. Kelly, G. Hayward, T.E. Gomez // *IEEE Ultrasonics Symposium*. 2001, - P. 965-968.

73. T. Stepinski. Automatic Defect Characterization in Ultrasonic / T. Stepinski, F.Ligvall. // *NDT Conference proceedings, 15<sup>th</sup> WCNDT*. Roma 2000.

74. Карпаш О. М. Експериментальна перевірка можливості використання взаємкореляційного та нейромережевого підходів для підвищення чутливості безконтактного ультразвукового способу контролю товщини матеріалів / О.М. Карпаш, І.В. Рибіцький, М.О. Карпаш // *Фізичні методи та засоби контролю середовищ, матеріалів та виробів*, вип. 13. – Львів, 2008. с. 152-160.

75. Благітко Б. Виділення сигналу з суміші сигнал-шум за допомогою вейвлет-перетворення / Б. Благітко, В. Бригілевич, І.



Ярмолівський // Вісник Львів. УН-ТУ Серія фізична. 2006. Вип. 39. с. 300-306.

76. Качанов В. К. Использование радиолокационных сигналов и методов их обработки в ультразвуковой дефектоскопии композиционных материалов / В. К. Качанов // ТД и НК, 1995, №2. – с. 3 -17.

77. M. Thavasimuthu. Improving the evaluation sensitivity of ultrasonic pulse echo technique using a neural network classifier / M. Thavasimuthu, S. Rajagopalan, P. Kalyanasundaram, Baldev Raj // NDT&E International. – 1996. Vol. 29, No. 3, P. 87-93.

78. Барский А. Б. Нейронные сети: распознавание, управление, принятие решений / А. Б. Барский. – М.: Финансы и статистика, 2004. – 176 с.

79. Ewa Swiercz. A new method of detection of coded signals in additive chaos on the example of Barker code / Ewa Swiercz // Signal Processing 86. – 2006. P. 153 –170.

80. Варакин Л. Е. Системы связи с шумоподобными сигналами / Л. Е. Варакин – М.: Радио и связь, 1985. – 384 с.

81. Малыгин И. В. Коды, коды, коды... / И. В. Малыгин // Технология и средства связи. – 1999. - №3.- С. 53 - 57.

82. Карпаш О.М. ЕМА-товщиномір з підвищеною чутливістю / О. М. Карпаш, П. Я. Криничний, О. В. Вісков // Фізичні методи та засоби контролю середовища, матеріалів та виробів. - Київ-Львів: - 2001. – С. 38-41.

83. Карпаш О. М. Застосування електромагніто-акустичного методу неруйнівного контролю / О. М. Карпаш, П. Я. Криничний, О. В. Вісков // Методи та прилади контролю якості. – 2000. - №6. – С. 19 - 20.

84. Takuma M. Evaluation of function of spot-welded joint using ultrasonic inspection / Takuma M., Shinke N., Motono H. // Mechanics and Materials Engineering. – 1996. - Vol. 39 (4). - P. 626-632.

85. Cheng R.W. AE behaviors evaluation with BP neural network / Cheng R.W., Tozawa T., Gen M., Kato H., Takayama M. // Computers and Industrial Engineering. – 1996. – Vol. 31(3-4). - P. 867-871.

86. Осовский С. Нейронные сети для обработки информации / С. Осовский ; [пер. с польского И. Д. Рудинского.]. – М.: Финансы и статистика, 2004 . – 344 с.
87. Grossberg S. Contour enhancement, short-term memory, and consistencies in reverberating neural networks / S. Grossberg // Studies in Applied Mathematics. – 1973. – Vol. 52. – P.217-257.
88. Zgonc K. A neural network for crack sizing trained by finite element calculations / Zgonc K., Achenbach J.D. // NDT & E International. – 1996. – Vol. 29. – P.147-155.
89. Matsumoto Y. Automatic analysis of eddy current data using neural network / Matsumoto Y., Komatsu H., Badics Z., Aoki K., Nakayasu F., Hashimoto M., Miya K // Proc. Steam Generator and Heat Exchanger Conference. – Toronto (Canada), 1994. P. 2.35-2.45.
90. Райтер П. М. Про можливість використання нейронних мереж для контролю багатофазних потоків / П. М. Райтер, М. О. Карпаш // Науковий вісник ІФНТУНГ. – 2002. - № 1. – С.86 -88.
91. Neural Network Toolbox. For use with Matlab. User's guide. Howard Demuth, Mark Beale. <http://www.mathworks.com>, 2004 – 844 p.
92. Хайкин С. Нейронные сети: полный курс / С. Хайкин. – М.: Вильямс, 2006. – 1104 с.
93. Сигеру Омату. Нейроуправление и его приложения / Сигеру Омату, Марзуки Халид, Рубия Юсоф. - М: Радиотехника, 2000. - 272 с.
94. Терехов В. А. Нейросетевые системы управления / В. А. Терехов, Д. В. Ефимов, И. Ю. Тюкин. - М: Радиотехника, 2002. - 480 с
95. Нейроматематика / [под ред. А.И. Галушкин.]. - М.: Радиотехника, 2002. - 448 с.
96. Уоссермен Ф. Нейрокомпьютерная техника : Теория и практика / Ф. Уоссермен. - М.: Мир, 1992. – 185 с.

97. Rumelhart D. E. Learning internal representations by error propagation in Parallel distributed processing/ Rumelhart D. E., Hinton G. E., Williams R. J. Cambridge, MA: MIT Press. - 1986 vol. 1, P. 318-362. .

98. Chinrungrueng C. Directional Savitzky-Golay filters for real-time speckle reduction and coherence enhancement of medical ultrasound images / Chinrungrueng C, Toonkum P. // TENCON 2004. 2004 IEEE Region 10 Conference, Vol. A (2004).

99. Integrated Savitzky-Golay Filter from Inverse Taylor Series Approach Wayt, Howard J.; Khan, Taufiqar R. // Digital Signal Processing, 2007 15th International Conference on Volume , Issue , 1-4 July 2007 Page(s):375 – 378.

100. P. A. Gorry. General Least-Squares Smoothing and Differentiation by the Convolution (Savitzky-Golay) Method / P. A. Gorry. Analytical Chemistry. - 1990 vol. 62, P. 570-573.

101. The analysis of hyperspectral data using Savitzky-Golay filtering-theoretical basis. 1 Ruffin, C.; King, R.L. // Geoscience and Remote Sensing Symposium, 1999. IGARSS apos;99 Proceedings. IEEE 1999 International. Volume 2, Issue , 1999 Page(s):756 - 758 vol.2.

102. P. A. Baedeker. Comments on Least-Square Polynomial Filters for Initial Point and Slope Estimation, Analytical Chemistry, vol. 57, pp. 1477-1479, 1985.

103. T.E. Gomez. Low-Impedance and Low-Loss Customized Materials for Air-Coupled Piezoelectric Transducers / T.E. Gomez, F. Montero de Espinosa // IEEE Ultrasonics Symposium, 2001. P. 1073-1080.

104. Грановский В. А., Сирая Т. Н. Методы обработки экспериментальных данных при измерениях / В. А. Грановский, Т. Н. Сирая – Л.: Энергоатомиздат, 1990. – 288 с.

105. Кісіль І. С. Метрологія, точність і надійність засобів вимірювань: Навчальний посібник / І. С. Кісіль. – Івано-Франківськ: Факел, 2002. – 400 с.

106. Метрологічна атестація засобів вимірювальної техніки. Організація та порядок проведення : ДСТУ 3215-95 [Чинний від 1996-07-01] – К.: Держстандарт України, 1996. – 28 с.

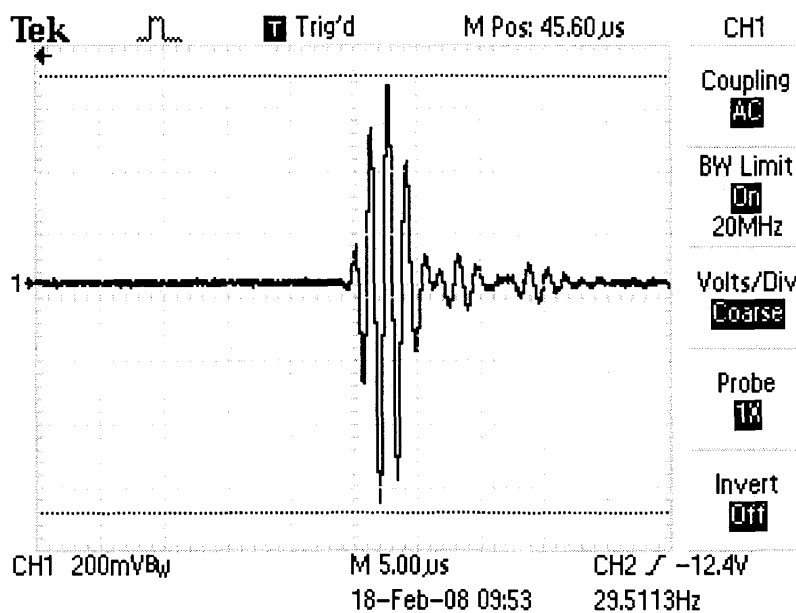
107. Основи метрології та вимірювальної техніки : підручник / [М. Дорожовець, В. Мотало, Б. Стадник, В. Василюк, А. Ковальчик] ; за ред. Б. Стадника. – Львів: Видавництво Національного університету „Львівська політехніка”, 2005. – 532 с.

108. Метрологічна оцінка безконтактного акустичного методу контролю товщини металоконструкцій : анотації доповідей міжнародної науково-технічної конференції молодих учених [“Техніка і прогресивні технології в нафтогазовій інженерії”], (м. Івано-Франківськ, 16-20 вересні 2008р.) / Міністерство освіти і науки України, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу [та ін.], Івано-Франківськ,: Факел. 2008. - 57 с.

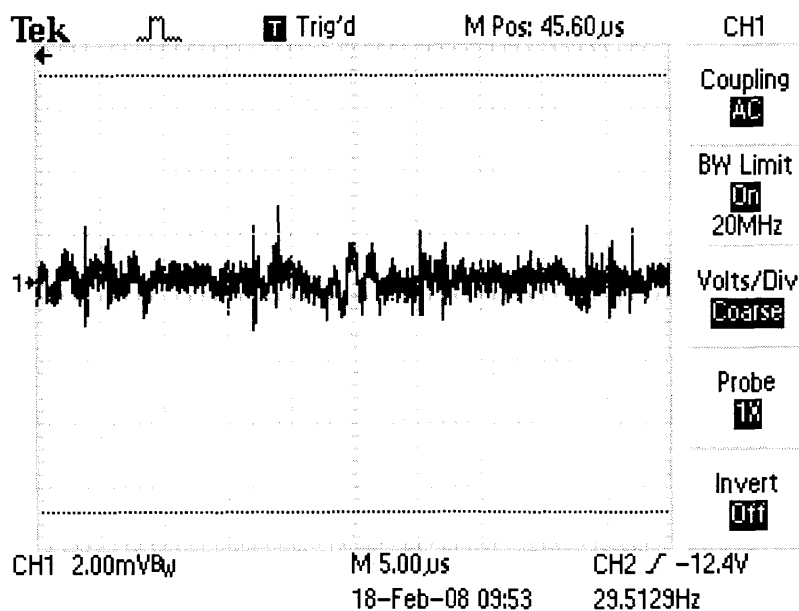
## Додаток А

Осцилограми ехо-сигналів отримані за допомогою цифрового осцилографу Tektronix TDS1012 при вимірюванні товщини матеріалів

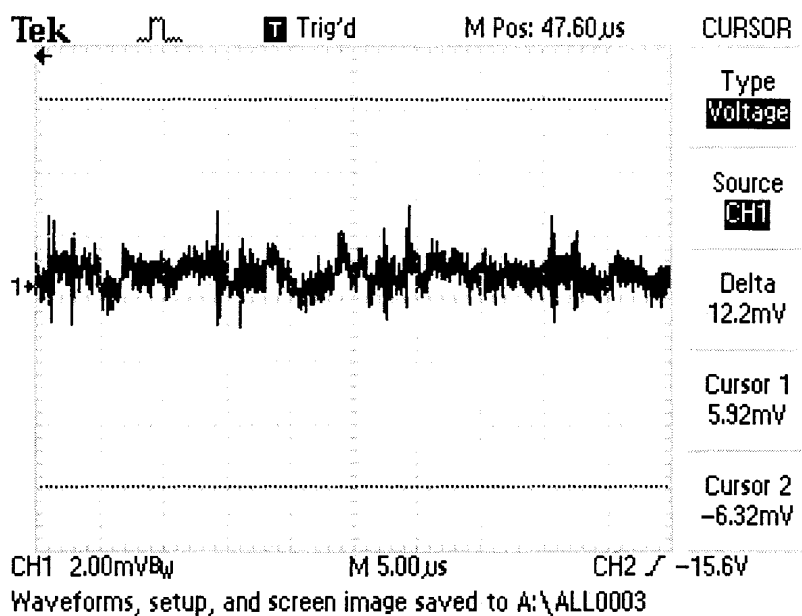
*При вимірюванні товщини целюлози*



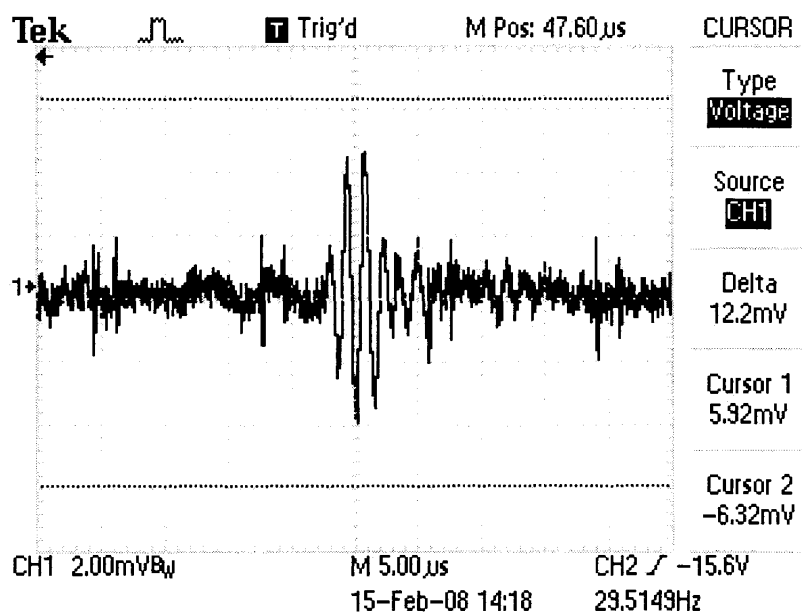
Без об'єкта контролю



З об'єктом контролю

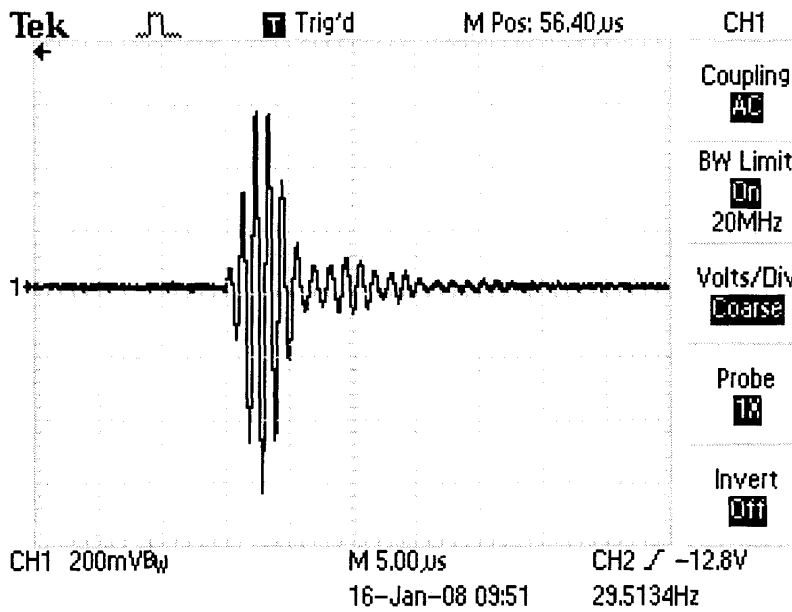


3 объектом контролю

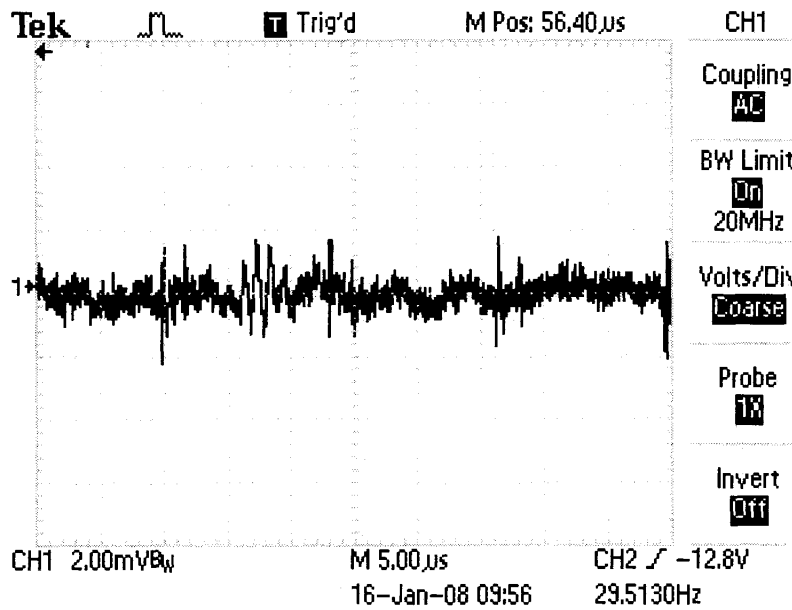


3 объектом контролю

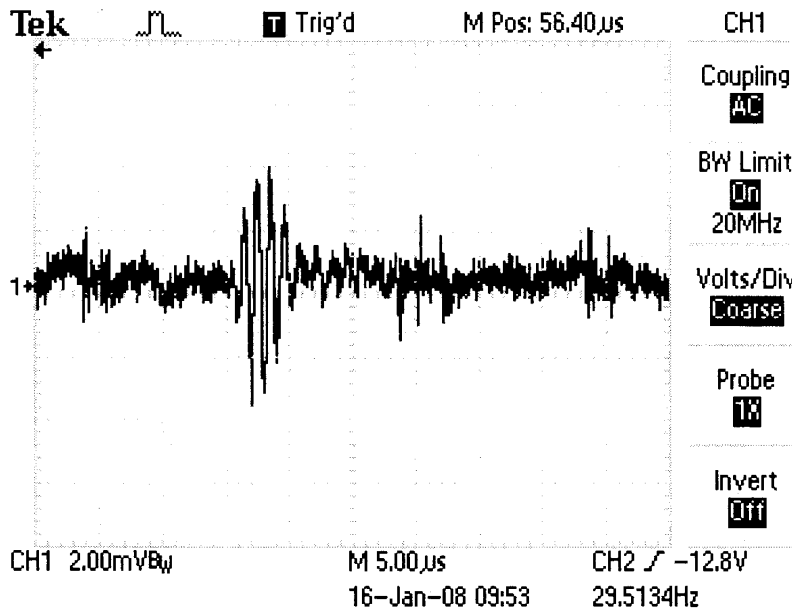
*При вимірюванні товщини алюмінієвої пластинки за допомогою удосконаленої експериментальної установки*



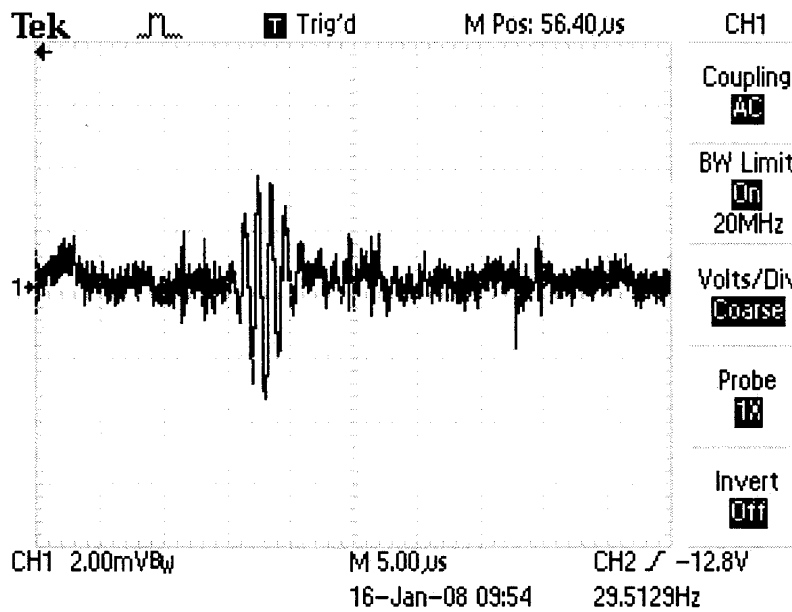
Без об'єкта контролю



З об'єктом контролю



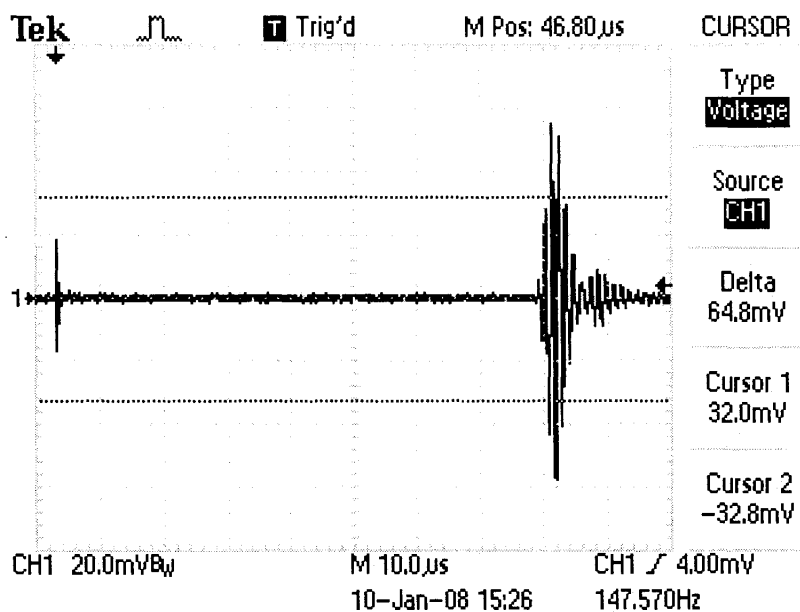
3 об'єктом контролю



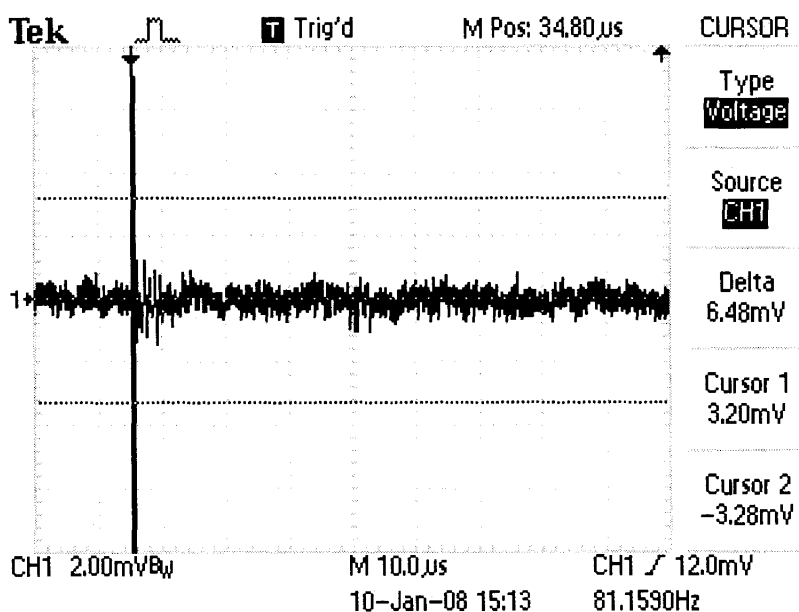
3 об'єктом контролю



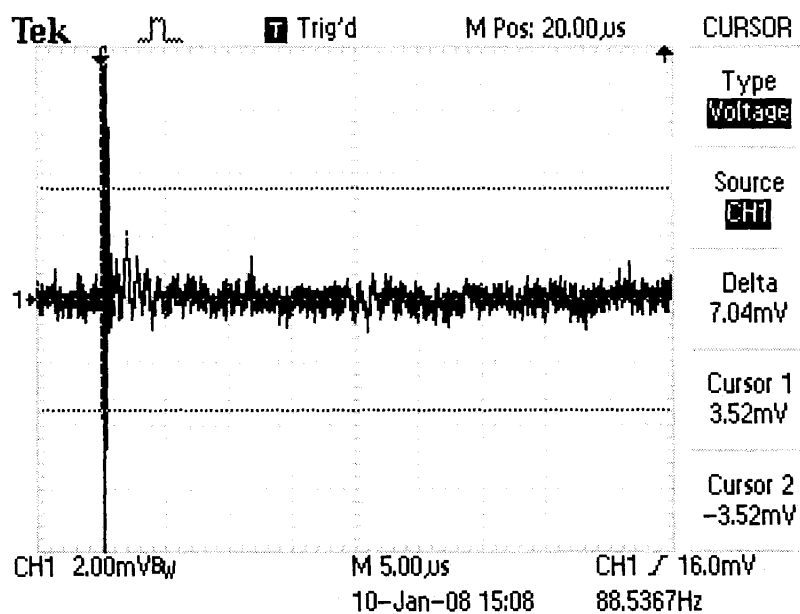
*При вимірюванні товщини сталених пластин за допомогою удосконаленої експериментальної установки*



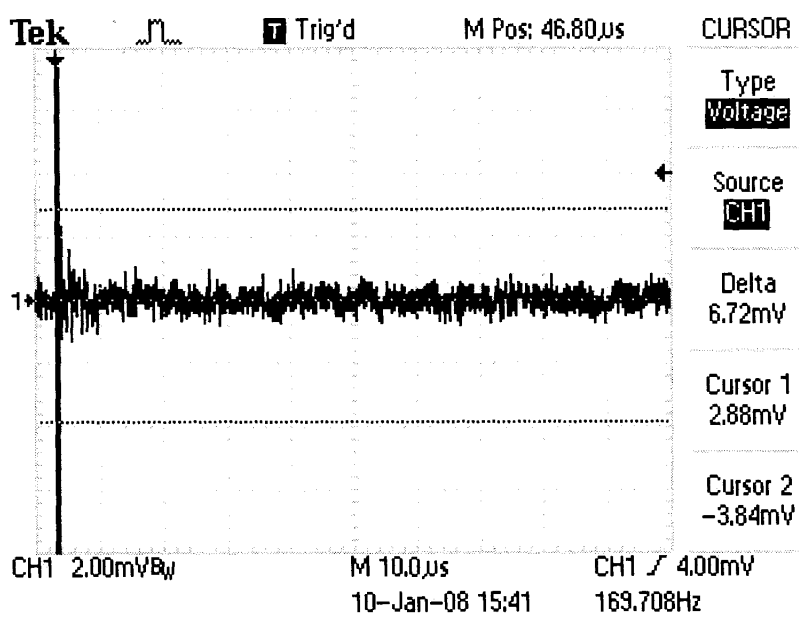
Без об'єкта контролю



З об'єктом контролю



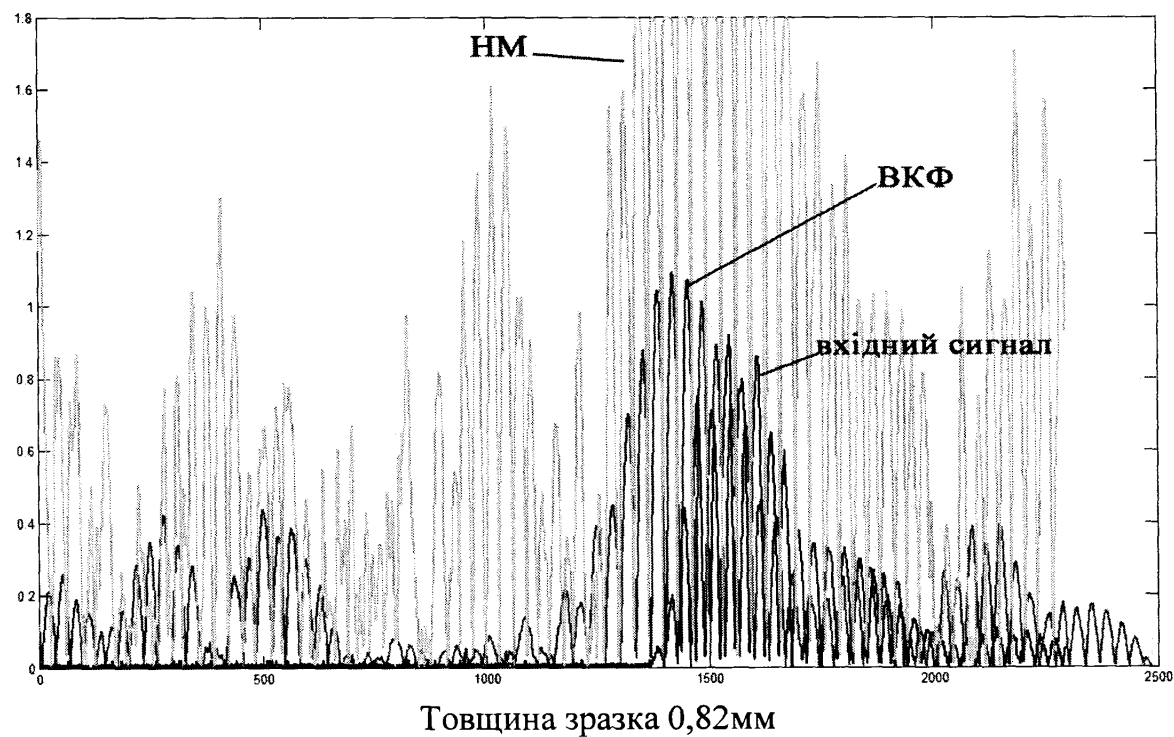
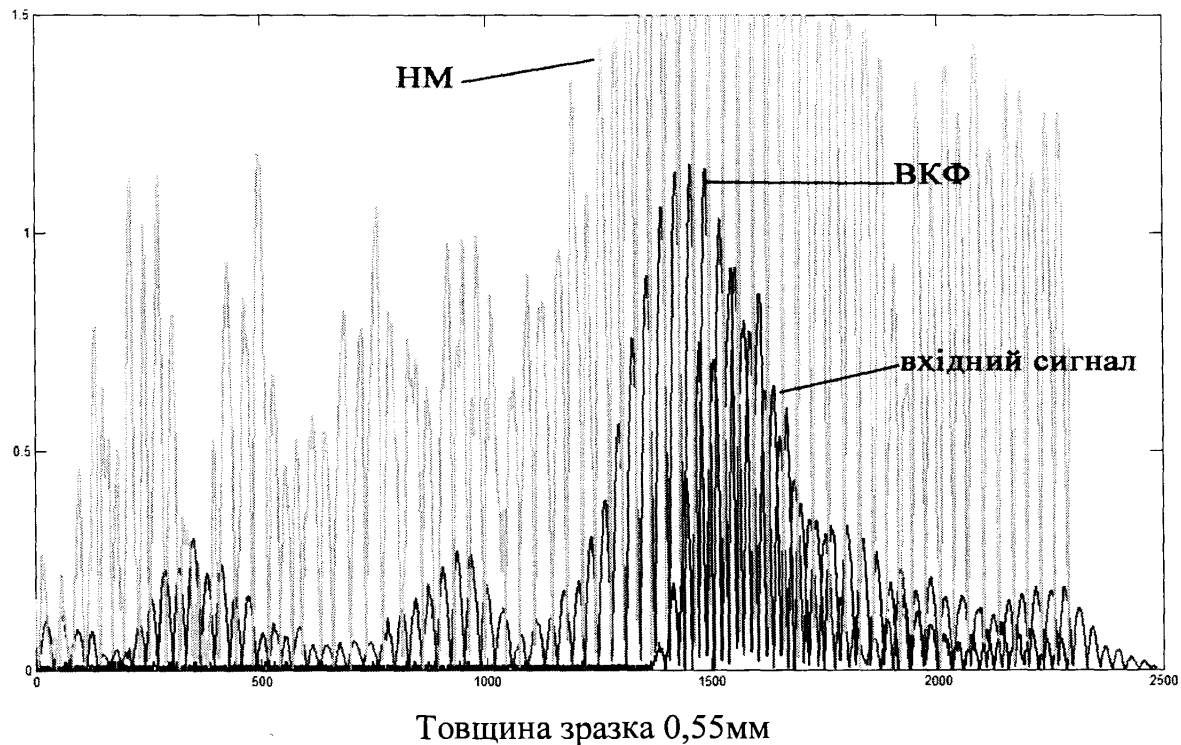
3 об'єктом контролю



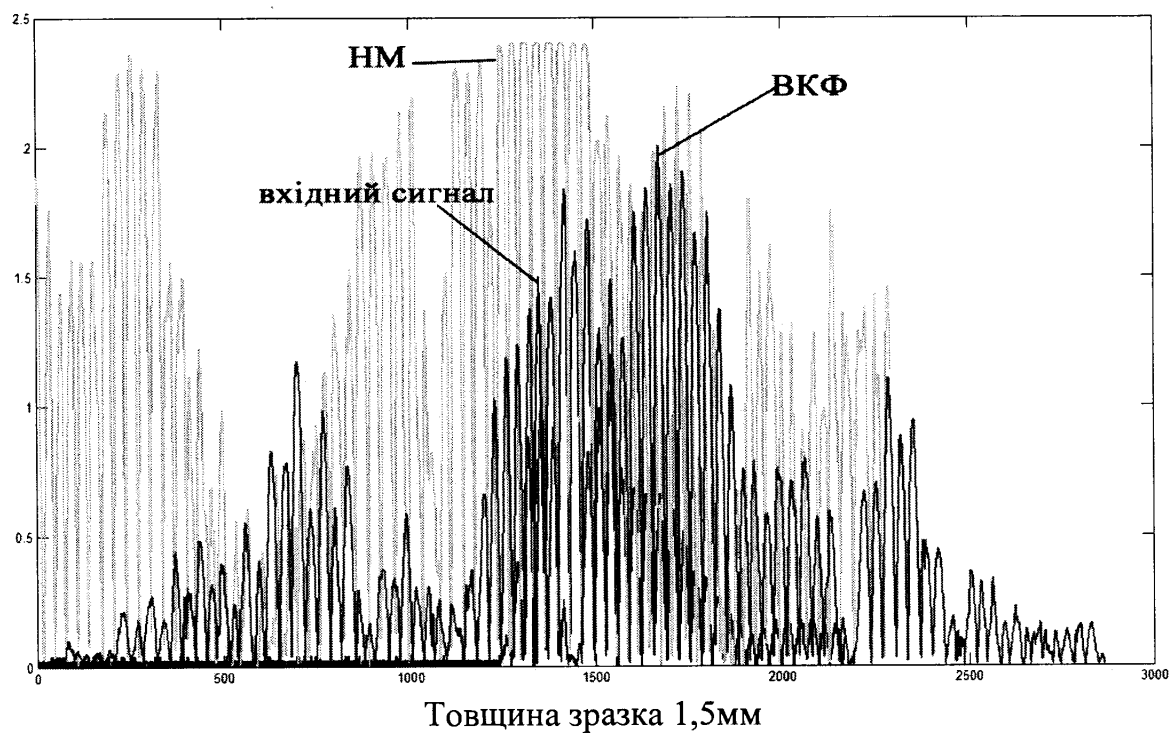
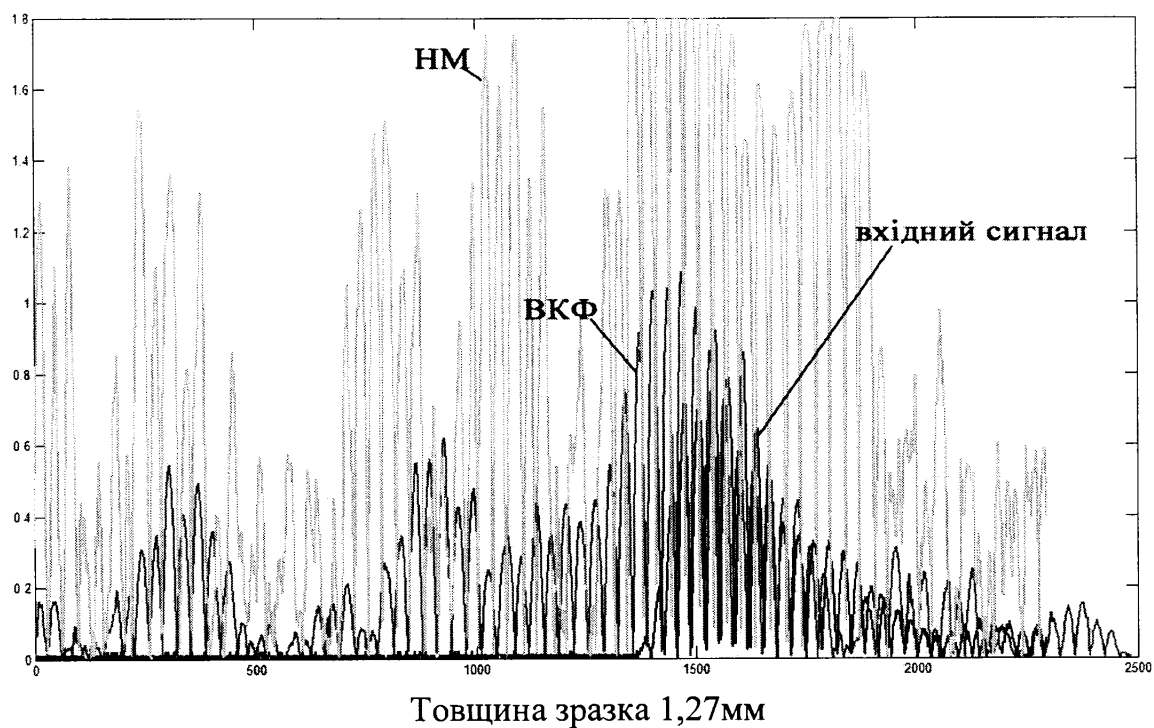
3 об'єктом контролю

## Додаток Б

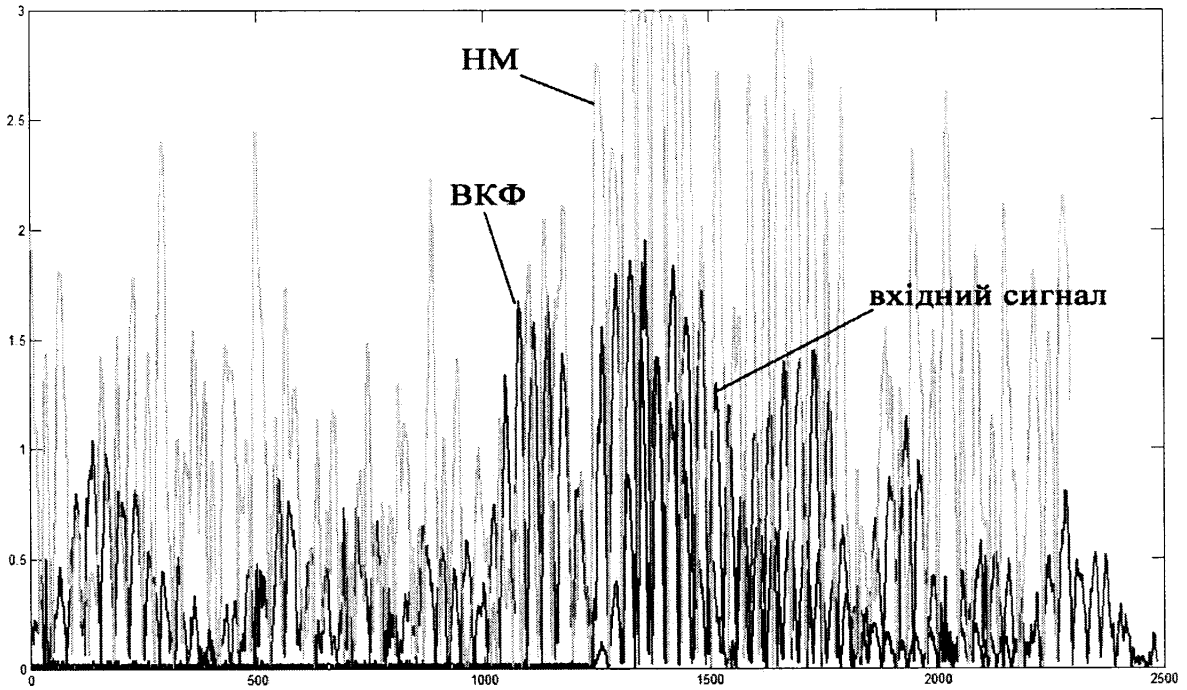
Результати обчислень взаємо кореляційної функції (ВКФ) та виходи нейромережі (НМ) пройшовших через зразок ехо-імпульсів при експериментальних дослідженнях що вимірювання товщини



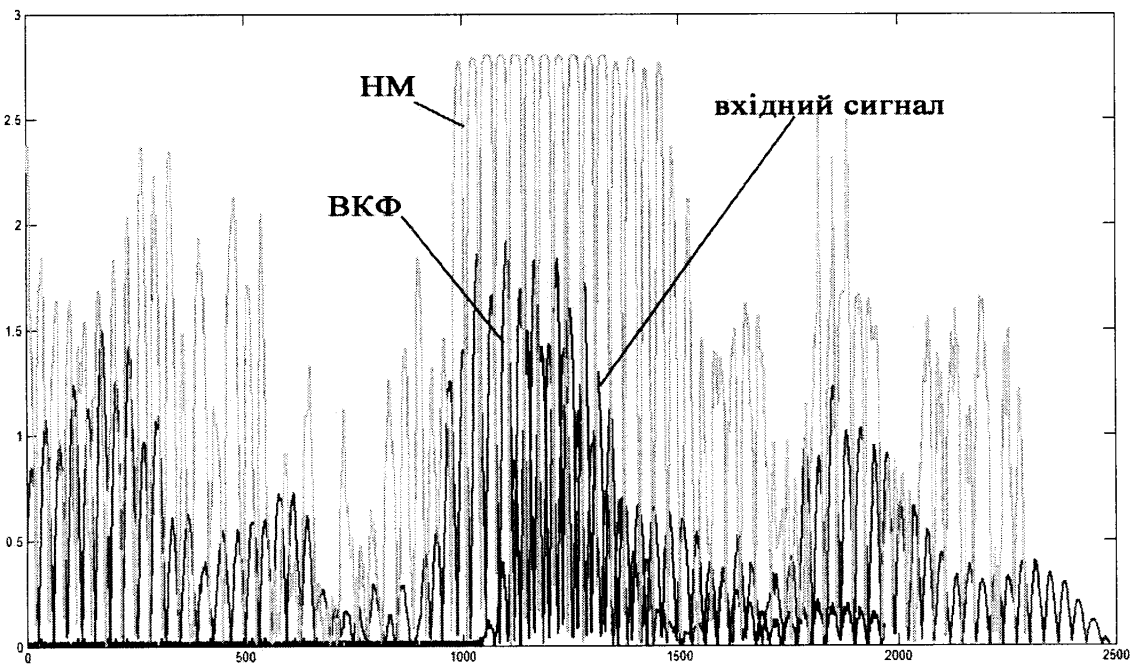
## Продовження додатку



## Продовження додатку

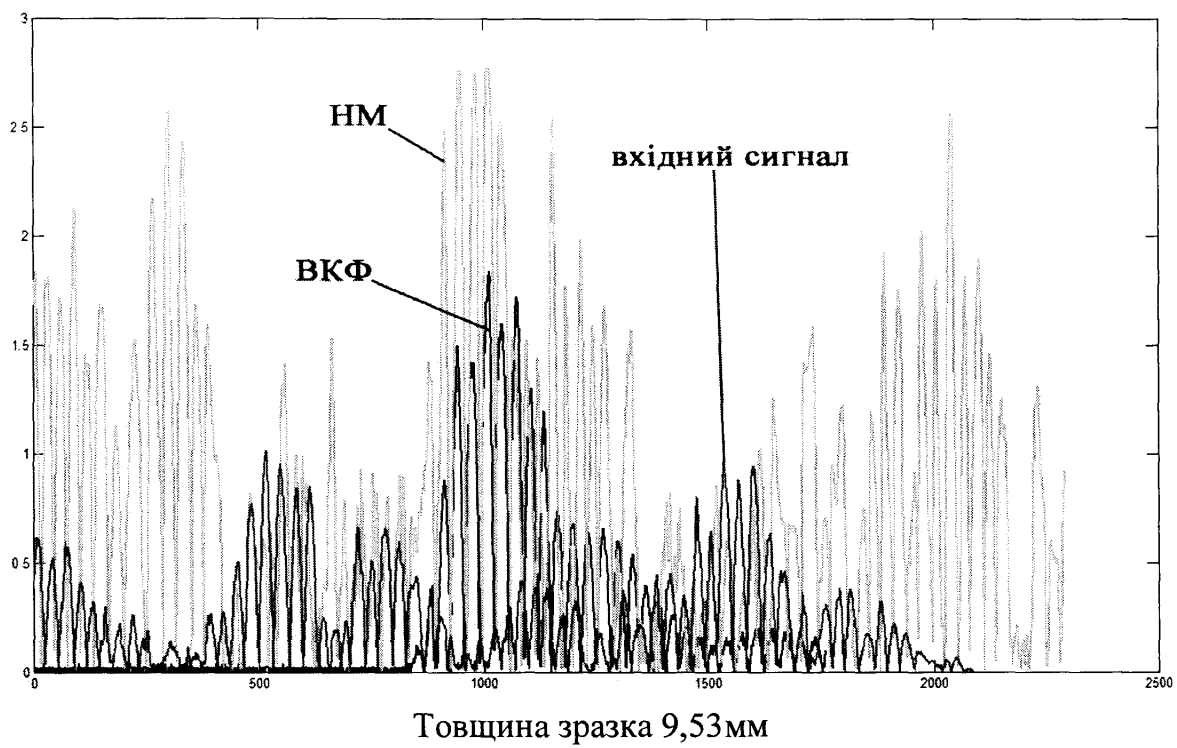


Товщина зразка 1,98мм



Товщина зразка 3,93мм

## Продовження додатку



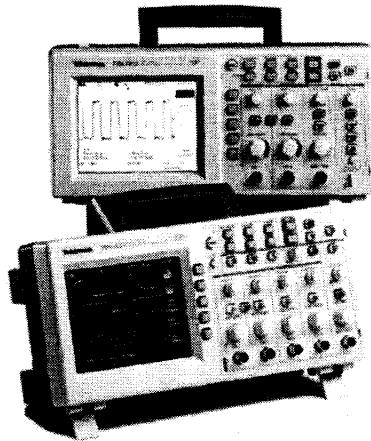
## Додаток В Цифровий осцилограф Tektronix TDS1012

### Digital Storage Oscilloscopes

► TDS1000 Series • TDS2000 Series

### Digital Storage Oscilloscopes

► TDS1000 Series • TDS2000 Series



► Quickly transfer waveforms and measurement data to an external PC or between oscilloscopes.

#### ► Characteristics

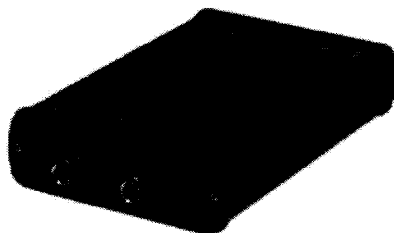
##### ► TDS1000 and TDS2000 Series Electrical Characteristics

	TDS1001	TDS1002	TDS1012	TDS2002	TDS2004	TDS2012	TDS2014	TDS2022	TDS2024
Display (1/4 VGA LCD)	Mono	Mono	Mono	Color	Color	Color	Color	Color	Color
Bandwidth <sup>1</sup>	40 MHz	60 MHz	100 MHz	60 MHz	60 MHz	100 MHz	100 MHz	200 MHz	200 MHz
Channels	2	2	2	2	4	2	4	2	4
External Trigger Input	Present on all models								
Sample Rate on Each Channel	1.0 GS/s	1.0 GS/s	1.0 GS/s	1.0 GS/s	1.0 GS/s	1.0 GS/s	1.0 GS/s	2.0 GS/s	2.0 GS/s
Record Length	2.5 K points on all models								
Vertical Resolution	8-bits								
Vertical Sensitivity	2 mV to 5 V/div on all models with calibrated fine adjustment								
DC Vertical Accuracy	±3% on all models								
Vertical Zoom	Vertically expand or compress a live or stopped waveform								
Max Input Voltage	300 V <sub>RMS</sub> CAT II; derated at 20 dB/decade above 100 kHz to 13 V <sub>pk-OK</sub> AC at 3 MHz and above								
Position Range	2 mV to 200 mV/div ±2 V; >200 mV to 5 V/div ±50 V								
BW Limit	20 MHz for all models								
Input Coupling	AC, DC, GND on all models								
Input Impedance	1 MΩ in parallel with 20 pF								
Time Base Range	5 ns to 50 s/div	5 ns to 50 s/div	5 ns to 50 s/div	5 ns to 50 s/div	5 ns to 50 s/div	5 ns to 50 s/div	5 ns to 50 s/div	2.5 ns to 50 s/div	2.5 ns to 50 s/div
Time Base Accuracy	50 ppm								
Horizontal Zoom	Horizontally expand or compress a live or stopped waveform								

<sup>1</sup> Bandwidth is 20 MHz at 2 mV/div, all models.

## Додаток Г

Підприємство „Електронні технології та метрологічні системи ЗЕТ”  
Аналого-цифровий перетворювач ZET 302



Аналого-цифровий перетворювач Zet302 призначений для спостереження за високочастотними сигналами в діапазоні до 20 МГц. Використання 50 мегагерцового аналого-цифрового перетворювача і режиму еквівалентної вибірки дозволяє збільшити ефективну частоту до 500 Мвиб/с.

Підключення до комп'ютера здійснюється по шині USB2.0. Є компактним приладом, який поміщується на долоні, що дозволяє економити місце. Живлення 5В дозволяє жити пристрій від шини USB2 та здійснювати автономну роботу, наприклад, з нот буком. Для роботи з ПК в комплект входить спеціальне програмне забезпечення.

## Технічні характеристики

- Кількість вхідних каналів	– 2
- Частота перетворення	– до 50 МГц
- Частота вибірки	– до 500 Мвиб/с
- Смуга пропускання	– 0...20 МГц
- Кількість розрядів	АЦП – 8
- Динамічний діапазон	– 84 дБ
- Вхідний опір	– 1 МОм
- Вхідна ємність	– 20 пФ
- Живлення	+5 В
- Габаритні розміри	– 115x180x35

Підприємство „Електронні технології та метрологічні системи ЗЕТ”

Росія, 124482, Москва,

Зеленоград, Савелкинський проїзд,

дім 4, 21 поверх, офіс 2101

Тел.: (495) 744-81-60, (916) (925) (909) 922-03-56, (499) 130-94-29;

Факс: (495) 228-01-11

E-mail: [info@zetms.ru](mailto:info@zetms.ru), [sale@zetms.ru](mailto:sale@zetms.ru), [support@zetms.ru](mailto:support@zetms.ru)

<http://www.zetms.ru/about/index.php>



## Додаток Д

Лістинг програми, що реалізує алгоритм оброблення вимірювальної  
інформації

```

*****
**                                     **
**      ОБРОБЛЕННЯ З ДОПОМОГОЮ      **
**      НЕЙРОННОЇ МЕРЕЖІ            **
**                                     **
*****

function [Y,Pf,Af,E,perf]=sim(net,P,Pi,Ai,T)
%SIM Simulate a neural network.
%
% Syntax
%
% [Y,Pf,Af,E,perf] = sim(net,P,Pi,Ai,T)
% [Y,Pf,Af,E,perf] = sim(net,{Q TS},Pi,Ai,T)
% [Y,Pf,Af,E,perf] = sim(net,Q,Pi,Ai,T)
%
% Description
%
% SIM simulates neural networks.
%
% [Y,Pf,Af,E,perf] = SIM(net,P,Pi,Ai,T) takes,
% NET - Network.
% P - Network inputs.
% Pi - Initial input delay conditions, default = zeros.
% Ai - Initial layer delay conditions, default = zeros.
% T - Network targets, default = zeros.
% and returns:
% Y - Network outputs.
% Pf - Final input delay conditions.
% Af - Final layer delay conditions.
% E - Network errors.
% perf - Network performance.
%
% Note that arguments Pi, Ai, Pf, and Af are optional and
% need only be used for networks that have input or layer delays.
%
% SIM's signal arguments can have two formats: cell array or matrix.
%
% The cell array format is easiest to describe. It is most
% convenient for networks with multiple inputs and outputs,
% and allows sequences of inputs to be presented:
% P - NixTS cell array, each element P{i,ts} is an RixQ matrix.
% Pi - NixID cell array, each element Pi{i,k} is an RixQ matrix.
% Ai - NlxLD cell array, each element Ai{i,k} is an SixQ matrix.
% T - NtxTS cell array, each element P{i,ts} is an VixQ matrix.
% Y - NOxTS cell array, each element Y{i,ts} is a UixQ matrix.
% Pf - NixID cell array, each element Pf{i,k} is an RixQ matrix.
% Af - NlxLD cell array, each element Af{i,k} is an SixQ matrix.
% E - NtxTS cell array, each element P{i,ts} is an VixQ matrix.
% Where:
% Ni = net.numInputs
% Nl = net.numLayers,
% No = net.numOutputs
% ID = net.numInputDelays
% LD = net.numLayerDelays
% TS = number of time steps
% Q = batch size

```

```

% Ri = net.inputs{i}.size
% Si = net.layers{i}.size
% Ui = net.outputs{i}.size
%
% The columns of Pi, Pf, Ai, and Af are ordered from oldest delay
% condition to most recent:
% Pi{i,k} = input i at time ts=k-ID.
% Pf{i,k} = input i at time ts=TS+k-ID.
% Ai{i,k} = layer output i at time ts=k-LD.
% Af{i,k} = layer output i at time ts=TS+k-LD.
%
% The matrix format can be used if only one time step is to be
% simulated (TS = 1). It is convenient for networks with only
% one input and output, but can also be used with networks that
% have more.
%
% Each matrix argument is found by storing the elements of
% the corresponding cell array argument into a single matrix:
% P - (sum of Ri)xQ matrix
% Pi - (sum of Ri)x(ID*Q) matrix.
% Ai - (sum of Si)x(LD*Q) matrix.
% T - (sum of Vi)xQ matrix
% Y - (sum of Ui)xQ matrix.
% Pf - (sum of Ri)x(ID*Q) matrix.
% Af - (sum of Si)x(LD*Q) matrix.
% E - (sum of Vi)xQ matrix
%
% [Y,Pf,Af] = SIM(net,{Q TS},Pi,Ai) is used for networks
% which do not have an input, such as Hopfield networks
% when cell array notation is used.
%
% Examples
%
% Here NEWP is used to create a perceptron layer with a
% 2-element input (with ranges of [0 1]), and a single neuron.
%
% net = newp([0 1;0 1],1);
%
% Here the perceptron is simulated for an individual vector,
% a batch of 3 vectors, and a sequence of 3 vectors.
%
% p1 = [.2; .9]; a1 = sim(net,p1)
% p2 = [.2 .5 .1; .9 .3 .7]; a2 = sim(net,p2)
% p3 = {[.2; .9] [.5; .3] [.1; .7]}; a3 = sim(net,p3)
%
% Here NEWLIND is used to create a linear layer with a 3-element
% input, 2 neurons.
%
% net = newlin([0 2;0 2;0 2],2,[0 1]);
%
% Here the linear layer is simulated with a sequence of 2 input
% vectors using the default initial input delay conditions (all zeros).
%
% p1 = {[2; 0.5; 1] [1; 1.2; 0.1]};
% [y1,pf] = sim(net,p1)
%
% Here the layer is simulated for 3 more vectors using the previous
% final input delay conditions as the new initial delay conditions.
%
% p2 = {[0.5; 0.6; 1.8] [1.3; 1.6; 1.1] [0.2; 0.1; 0]};
% [y2,pf] = sim(net,p2,pf)
%
% Here NEWELM is used to create an Elman network with a 1-element
% input, and a layer 1 with 3 TANSIG neurons followed by a layer 2

```

```

% with 2 PURELIN neurons. Because it is an Elman network it has a
% tap delay line with a delay of 1 going from layer 1 to layer 1.
%
% net = newelm([0 1],[3 2],{'tansig','purelin'});
%
% Here the Elman network is simulated for a sequence of 3 values
% using default initial delay conditions.
%
% p1 = {0.2 0.7 0.1};
% [y1,pf,af] = sim(net,p1)
%
% Here the network is simulated for 4 more values, using the previous
% final delay conditions as the new initial delay conditions.
%
% p2 = {0.1 0.9 0.8 0.4};
% [y2,pf,af] = sim(net,p2,pf,af)
%
Algorithm
%
SIM uses these properties to simulate a network NET.
%
NET.numInputs, NET.numLayers
NET.outputConnect, NET.biasConnect
NET.inputConnect, NET.layerConnect
%
These properties determine the network's weight and bias values,
% and the number of delays associated with each weight:
%
NET.inputWeights{i,j}.value
NET.layerWeights{i,j}.value
NET.layers{i}.value
NET.inputWeights{i,j}.delays
NET.layerWeights{i,j}.delays
%
These function properties indicate how SIM applies weight and
% bias values to inputs to get each layer's output:
%
NET.inputWeights{i,j}.weightFcn
NET.layerWeights{i,j}.weightFcn
NET.layers{i}.netInputFcn
NET.layers{i}.transferFcn
%
% CHECK AND FORMAT ARGUMENTS
% -----
%
if nargin < 2
    error('Not enough input arguments.');
```

```

    return
end
if ~isa(net,'network')
    error('First argument is not a network.');
```

```

end
if net.hint.zeroDelay
    error('Network contains a zero-delay loop.')
```

```

end
if length(net.hint.noWeights)
    error(sprintf('Layer %g has no weights.',net.hint.noWeights(1)))
end
switch nargin
    case 2, [err,P,Pi,Ai,T,Q,TS,matrixForm] = simargs(net,P);
    case 3, [err,P,Pi,Ai,T,Q,TS,matrixForm] = simargs(net,P,Pi);
    case 4, [err,P,Pi,Ai,T,Q,TS,matrixForm] = simargs(net,P,Pi,Ai);
    case 5, [err,P,Pi,Ai,T,Q,TS,matrixForm] = simargs(net,P,Pi,Ai,T);

```

```

end
if length(err), error(err), end

% SIMULATE NETWORK
% -----

% Combined and Delayed inputs
Pc = [Pi P];
Pd = calcpd(net,TS,Q,Pc);

% Simulate network
net = struct(net);
if (net.numLayerDelays == 0) & (TS > 1)
    Pd = seq2con(Pd);
    Ac = calca(net,Pd,Ai,Q*TS,1);
    Ac = con2seq(Ac,TS);
else
    Ac = calca(net,Pd,Ai,Q,TS);
end
net = class(net,'network');

% Network outputs, final inputs
Y = Ac(net.hint.outputInd,net.numLayerDelays+[1:TS]);
Pf = Pc(:,TS+[1:net.numInputDelays]);
Af = Ac(:,TS+[1:net.numLayerDelays]);
if nargout >= 4
    Tl = expandrows(T,net.hint.targetInd,net.numLayers);
    El = calce(net,Ac,Tl,TS);
    E = El(net.hint.targetInd,:);
end
if nargout >= 5
    % mth 5/26/05 perf = feval(net.performFcn,El,getx(net),net.performParam);
    perf = feval(net.performFcn,El,Y,getx(net),net.performParam); % mth 5/26/05
end

% FORMAT OUTPUT ARGUMENTS
% -----

if (matrixForm)
    Y = cell2mat(Y);
    if (net.numOutputs == 0)
        Y = zeros(size(Y,1),Q);
    end
    Pf = cell2mat(Pf);
    Af = cell2mat(Af);
    if nargout >= 4
        E = cell2mat(E);
    end
end

% =====
function [s2] = expandrows(s,ind,rows)

s2 = cell(rows,size(s,2));
s2(ind,:) = s;

% =====
function [err,P,Pi,Ai,T,Q,TS,matrixForm] = simargs(net,P,Pi,Ai,T);

err = '';

% Check signals: all matrices or all cell arrays
% Change empty matrices/arrays to proper form
switch class(P)

```

```

case 'cell', matrixForm = 0; name = 'cell array'; default = {};
case 'double', matrixForm = 1; name = 'matrix'; default = [];
otherwise, err = 'P must be a matrix or cell array.'; return
end
if (nargin < 3)
    Pi = default;
elseif (isa(Pi,'double') ~= matrixForm)
    if isempty(Pi)
        Pi = default;
    else
        err = ['P is a ' name ', so Pi must be a ' name ' too.'];
        return
    end
end
if (nargin < 4)
    Ai = default;
elseif (isa(Ai,'double') ~= matrixForm)
    if isempty(Ai)
        Ai = default;
    else
        err = ['P is a ' name ', so Ai must be a ' name ' too.'];
        return
    end
end
if (nargin < 5)
    T = default;
elseif (isa(T,'double') ~= matrixForm)
    if isempty(Ai)
        T = default;
    else
        err = ['P is a ' name ', so T must be a ' name ' too.'];
        return
    end
end

% Check Matrices, Matrices -> Cell Arrays
if (matrixForm)
    if (net.numInputs == 0) & all(size(P) == [1 1])
        Q = P;
        P = zeros(0,Q);
    else
        Q = size(P,2);
    end
    TS = 1;
    [err,P] = formatp(net,P,Q); if length(err), return, end
    [err,Pi] = formatpi(net,Pi,Q); if length(err), return, end
    [err,Ai] = formatai(net,Ai,Q); if length(err), return, end
    [err,T] = formatt(net,T,Q,TS); if length(err), return, end

% Check Cell Arrays
else
    if (net.numInputs == 0) & all(size(P) == [1 2])
        Q = P{1};
        TS = P{2};
        P = cell(0,TS);
    else
        TS = size(P,2);
        if prod(size(P))
            Q = size(P{1,1},2);
        elseif prod(size(Pi))
            Q = size(Pi{1,1},2);
        elseif prod(size(Ai))
            Q = size(Ai{1,1},2);
        else

```

```

    Q = 1;
end
end
[err] = checkp(net,P,Q,TS); if length(err), return, end
[err,Pi] = checkpi(net,Pi,Q); if length(err), return, end
[err,Ai] = checkai(net,Ai,Q); if length(err), return, end
[err,T] = checkt(net,T,Q,TS); if length(err), return, end
end

% =====
*****
**                                     **
**      РЕАЛІЗАЦІЯ АЛГОРИТМУ          **
**      ПЛАВАЮЧОГО ВІКНА ТА НОРМУВАННЯ **
**                                     **
*****

function [kk]=calcing(xx_1)

for i=1:2293
KK(i,:)=xx(i:i+191);
end

for i=1:2293
kk(i,:)=KK(i,:)/max(abs(KK(i,:)));
end

*****
**                                     **
**      ПРОЦЕДУРА ЗГЛАДЖУВАННЯ       **
**                                     **
*****

function [c,ww] = smooth(varargin)
%SMOOTH Smooth data.
% Z = SMOOTH(Y) smooths data Y using a 5-point moving average.
%
% Z = SMOOTH(Y,SPAN) smooths data Y using SPAN as the number of points used
% to compute each element of Z.
%
% Z = SMOOTH(Y,SPAN,METHOD) smooths data Y with specified METHOD. The
% available methods are:
%
%      'moving'   - Moving average (default)
%      'lowess'   - Lowess (linear fit)
%      'loess'    - Loess (quadratic fit)
%      'sgolay'   - Savitzky-Golay
%      'rloess'   - Robust Lowess (linear fit)
%      'rloess'   - Robust Loess (quadratic fit)
%
% Z = SMOOTH(Y,METHOD) uses the default SPAN 5.
%
% Z = SMOOTH(Y,SPAN,'sgolay',DEGREE) and Z = SMOOTH(Y,'sgolay',DEGREE)
% additionally specify the degree of the polynomial to be used in the
% Savitzky-Golay method. The default DEGREE is 2. DEGREE must be smaller
% than SPAN.
%
% Z = SMOOTH(X,Y,...) additionally specifies the X coordinates. If X is
% not provided, methods that require X coordinates assume X = 1:N, where
% N is the length of Y.
%
% Notes:

```

```

% 1. When X is given and X is not uniformly distributed, the default method
% is 'lowess'. The 'moving' method is not recommended.
%
% 2. For the 'moving' and 'sgolay' methods, SPAN must be odd.
% If an even SPAN is specified, it is reduced by 1.
%
% 3. If SPAN is greater than the length of Y, it is reduced to the
% length of Y.
%
% 4. In the case of (robust) lowess and (robust) loess, it is also
% possible to specify the SPAN as a percentage of the total number
% of data points. When SPAN is less than or equal to 1, it is
% treated as a percentage.
%
% For example:
%
% Z = SMOOTH(Y) uses the moving average method with span 5 and
% X=1:length(Y).
%
% Z = SMOOTH(Y,7) uses the moving average method with span 7 and
% X=1:length(Y).
%
% Z = SMOOTH(Y,'sgolay') uses the Savitzky-Golay method with DEGREE=2,
% SPAN = 5, X = 1:length(Y).
%
% Z = SMOOTH(X,Y,'lowess') uses the lowess method with SPAN=5.
%
% Z = SMOOTH(X,Y,SPAN,'rloess') uses the robust loess method.
%
% Z = SMOOTH(X,Y) where X is unevenly distributed uses the
% 'lowess' method with span 5.
%
% Z = SMOOTH(X,Y,8,'sgolay') uses the Savitzky-Golay method with
% span 7 (8 is reduced by 1 to make it odd).
%
% Z = SMOOTH(X,Y,0.3,'loess') uses the loess method where span is
% 30% of the data, i.e. span = ceil(0.3*length(Y)).

if nargin < 1
    error('curvefit:smooth:needMoreArgs', ...
        'SMOOTH needs at least one argument.');
```

```

end

if nargin > 1 % Called from the GUI cftool
    ws = warning('off', 'all'); % turn warning off and record the previous
warning state.
    [lw,lwid] = lastwarn;
    lastwarn('');
else
    ws = warning('query','all'); % Leave warning state alone but save it so
resets are no-ops.
end

% is x given as the first argument?
if nargin==1 || ( nargin > 1 && (length(varargin{2})==1 ||
ischar(varargin{2})) )
    % smooth(Y) | smooth(Y,span,...) | smooth(Y,method,...)
    is_x = 0; % x is not given
    y = varargin{1};
    y = y(:);
    x = (1:length(y))';
else % smooth(X,Y,...)
    is_x = 1;
    y = varargin{2};

```

```

    x = varargin{1};
    y = y(:);
    x = x(:);
end

% is span given?
span = [];
if nargin == 1+is_x || ischar(varargin{2+is_x})
    % smooth(Y), smooth(X,Y) || smooth(X,Y,method,...), smooth(Y,method)
    is_span = 0;
else
    % smooth(...,SPAN,...)
    is_span = 1;
    span = varargin{2+is_x};
end

% is method given?
method = [];
if nargin >= 2+is_x+is_span
    % smooth(...,Y,method,...) | smooth(...,Y,span,method,...)
    method = varargin{2+is_x+is_span};
end

t = length(y);
if t == 0
    c = y;
    ww = '';
    if nargin > 1
        ww = lastwarn;
        lastwarn(lw,lwid);
        warning(ws); % turn warning back to the previous state.
    end
    return
elseif length(x) ~= t
    warning(ws); % reset warn state before erroring
    error('curvefit:smooth:XYmustBeSameLength',...
        'X and Y must be the same length.');
```

```

end

if isempty(method)
    diffx = diff(x);
    if uniformx(diffx,x,y)
        method = 'moving'; % uniformly distributed X.
    else
        method = 'lowess';
    end
end

% realize span
if span <= 0
    warning(ws); % reset warn state before erroring
    error('curvefit:smooth:spanMustBePositive', ...
        'SPAN must be positive.');
```

```

end
if span < 1, span = ceil(span*t); end % percent convention
if isempty(span), span = 5; end % smooth(Y,[],method)

idx = 1:t;

sortx = any(diff(isnan(x))<0); % if NaNs not all at end
if sortx || any(diff(x)<0) % sort x
    [x,idx] = sort(x);
    y = y(idx);
end
```



```

c = repmat(NaN,size(y));
ok = ~isnan(x);
switch method
    case 'moving'
        c(ok) = moving(x(ok),y(ok),span);
    case {'lowess','loess','rloess','rloess'}
        robust = 0;
        iter = 5;
        if method(1)=='r'
            robust = 1;
            method = method(2:end);
        end
        c(ok) = lowess(x(ok),y(ok),span, method,robust,iter);
    case 'sgolay'
        if nargin >= 3+is_x+is_span
            degree = varargin{3+is_x+is_span};
        else
            degree = 2;
        end
        if degree < 0 || degree ~= floor(degree) || degree >= span
            warning(ws); % reset warn state before erroring
            error('curvefit:smooth:invalidDegree', ...
                'Degree must be an integer between 0 and span-1.');
```

end

```

        c(ok) = sgolay(x(ok),y(ok),span,degree);
    otherwise
        warning(ws); % reset warn state before erroring
        error('curvefit:smooth:unrecognizedMethod', ...
            'SMOOTH: Unrecognized method.');
```

end

```

c(idx) = c;

if nargout > 1
    ww = lastwarn;
    lastwarn(lw,lwid);
    warning(ws); % turn warning back to the previous state.
end

%-----
function c = moving(x,y, span)
% moving average of the data.

ynan = isnan(y);
span = floor(span);
n = length(y);
span = min(span,n);
width = span-1+mod(span,2); % force it to be odd
xreps = any(diff(x)==0);
if width==1 && ~xreps && ~any(ynan), c = y; return; end
if ~xreps && ~any(ynan)
    % simplest method for most common case
    c = filter(ones(width,1)/width,1,y);
    cbegin = cumsum(y(1:width-2));
    cbegin = cbegin(1:2:end)./(1:2:(width-2))';
    cend = cumsum(y(n:-1:n-width+3));
    cend = cend(end:-2:1)./(width-2:-2:1)';
    c = [cbegin;c(width:end);cend];
elseif ~xreps
    % with no x repeats, can take ratio of two smoothed sequences
    yy = y;
    yy(ynan) = 0;
    nn = double(~ynan);
```

```

    ynum = moving(x,yy,span);
    yden = moving(x,nn,span);
    c = ynum ./ yden;
else
    % with some x repeats, loop
    notnan = ~ynan;
    YY = y;
    yy(ynan) = 0;
    c = zeros(n,1);
    for i=1:n
        if i>1 && x(i)==x(i-1)
            c(i) = c(i-1);
            continue;
        end
        R = i; % find rightmost value with
same x
        while(R<n && x(R+1)==x(R))
            R = R+1;
        end
        hf = ceil(max(0,(span - (R-i+1))/2)); % need this many more on each
side
        hf = min(min(hf,(i-1)), (n-R));
        L = i-hf; % find leftmost point needed
        while(L>1 && x(L)==x(L-1))
            L = L-1;
        end
        R = R+hf; % find rightmost point needed
        while(R<n && x(R)==x(R+1))
            R = R+1;
        end
        c(i) = sum(yy(L:R)) / sum(notnan(L:R));
    end
end

%-----
function c = lowess(x,y, span, method, robust, iter)
% LOWESS Smooth data using Lowess or Loess method.
%
% The difference between LOWESS and LOESS is that LOWESS uses a
% linear model to do the local fitting whereas LOESS uses a
% quadratic model to do the local fitting. Some other software
% may not have LOWESS, instead, they use LOESS with order 1 or 2 to
% represent these two smoothing methods.
% Reference: "Trimmed resistant weighted scatterplot smooth" by
% Matthew C Hutcheson.

n = length(y);
span = floor(span);
span = min(span,n);
c = y;
if span == 1
    return;
end

useLoess = false;
if isequal(method,'loess')
    useLoess = true;
end

diffx = diff(x);

% For problems where x is uniform, there's a faster way
isuniform = uniformx(diffx,x,y);
if isuniform

```

```

% For uniform data, an even span actually covers an odd number of
% points. For example, the four closest points to 5 in the
% sequence 1:10 are {3,4,5,6}, but 7 is as close as 3.
% Therefore force an odd span.
span = 2*floor(span/2) + 1;

c = unifloess(y,span,useLoess);
if ~robust || span<=2
    return;
end
end

% Turn off warnings when called from command line (already off if called from
% cftool).
ws = warning('off', 'all'); % save warning state
[lastwarnmsg,lastwarnid]=lastwarn; % save last warning

ynan = isnan(y);
anyNans = any(ynan(:));
seps = sqrt(eps);
theDiffs = [1; diffx; 1];

if isuniform
    % We've already computed the non-robust smooth, so in preparation for
    % the robust smooth, compute the following arrays directly
    halfw = floor(span/2);
    lbound = max(1, min(n-span+1, (1:n)-halfw));
    rbound = max(span, min(n, (1:n)+halfw));
    dmaxv = repmat(halfw,1,n);
    dmaxv(1:halfw) = span-(1:halfw);
    dmaxv(end:-1:end-halfw+1) = dmaxv(1:halfw);
    x = (1:numel(x))';
else
    if robust
        % pre-allocate space for lower and upper indices for each fit,
        % to avoid re-computing this information in robust iterations
        lbound = zeros(n,1);
        rbound = zeros(n,1);
        dmaxv = zeros(n,1);
    end

    % Compute the non-robust smooth for non-uniform x
    for i=1:n
        % if x(i) and x(i-1) are equal we just use the old value.
        if theDiffs(i) == 0
            c(i) = c(i-1);
            if robust
                lbound(i) = lbound(i-1);
                rbound(i) = rbound(i-1);
                dmaxv(i) = dmaxv(i-1);
            end
            end
            continue;
        end
        % calculate how far we have to look on either side
        left = max(1,i-span+1);
        right = min(n,i+span-1);
        % now see if we have any equal values that we need to take into
account
        while left > 0 && theDiffs(left) == 0
            left = left-1;
        end
        while right <= n && theDiffs(right+1) == 0
            right = right+1;
        end
    end
end

```

```

mx = x(i);          % center around current point to improve conditioning
% look at the span interval around x(i)
d = abs(x(left:right)-mx);
[dsort,idx] = sort(d);
idx = idx +left-1; % add back left value

if anyNans
    idx = idx(dsort<=dsort(span) & ~ynan(idx));
else
    idx = idx(dsort<=dsort(span));
end

if isempty(idx)
    c(i) = NaN;
    continue
end
x1 = x(idx)-mx;
y1 = y(idx);
dsort = d(idx-left+1);
dmax = dsort(end);
if dmax==0, dmax = 1; end
if robust
    lbound(i) = min(idx);
    rbound(i) = max(idx);
    dmaxv(i) = dmax;
end

weight = (1 - (dsort/dmax).^3).^1.5; % tri-cubic weight
if all(weight<seps)
    weight(:) = 1; % if all weights are 0, just skip weighting
end

v = [ones(size(x1)) x1];
if useLoess
    v = [v x1.*x1];
end

v = weight(:,ones(1,size(v,2))).*v;
y1 = weight.*y1;
if size(v,1)==size(v,2)
    % Square v may give infs in the \ solution, so force least squares
    b = [v;zeros(1,size(v,2))]\[y1;0];
else
    b = v\y1;
end
c(i) = b(1);
end
end

% now that we have a non-robust fit, we can compute the residual and do
% the robust fit if required
maxabsyXeps = max(abs(y))*eps;
if robust
    for k = 1:iter
        r = y-c;
        for i=1:n
            if i>1 && x(i)==x(i-1)
                c(i) = c(i-1);
                continue;
            end
            if isnan(c(i)), continue; end
            idx = lbound(i):rbound(i);
            if anyNans

```

```

        idx = idx(~ynan(idx));
    end
    x1 = x(idx);
    mx = x(i);
    x1 = x1-mx;
    dsort = abs(x1);
    y1 = y(idx);
    r1 = r(idx);

    weight = (1 - (dsort/dmaxv(i)).^3).^1.5; % tri-cubic weight
    if all(weight<seps)
        weight(:) = 1; % if all weights 0, just skip weighting
    end

    v = [ones(size(x1)) x1];
    if useLoess
        v = [v x1.*x1];
    end

    % Modify the weights based on x values by mutliplying them by
    % robust weights. These are computed using the median absolute
    % deviation of all points given positive weight based on x.
    mask = (weight>0);
    rmed = median(r1(mask));
    r1 = abs(r1-rmed);
    mad = median(r1(mask));
    if mad > maxabsyXeps
        rweight = r1./(6*mad);
        id = (rweight<=1);
        rweight(~id) = 0;
        rweight(id) = (1-rweight(id).*rweight(id));
        weight = weight.*rweight;
    end

    v = weight(:,ones(1,size(v,2))).*v;
    y1 = weight.*y1;
    if size(v,1)==size(v,2)
        % Square v may give infs in the \ solution, so force least
squares
        b = [v;zeros(1,size(v,2))]\[y1;0];
    else
        b = v\y1;
    end
    c(i) = b(1);
end
end
end

lastwarn(lastwarnmsg,lastwarnid);
warning(ws);

```

```

%-----
function c=sgolay(x,y,f,k)
% savitziki-golay smooth
% (x,y) are given data. f is the frame length to be taken, should
% be an odd number. k is the degree of polynomial filter. It should
% be less than f.

% Reference: Orfanidis, S.J., Introduction to Signal Processing,
% Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1996.

n = length(x);

```

```

f = floor(f);
f = min(f,n);
f = f-mod(f-1,2); % will subtract 1 if frame is even.
diffx = diff(x);
notnan = ~isnan(y);
nomissing = all(notnan);
if f <= k && all(diffx>0) && nomissing, c = y; return; end
hf = (f-1)/2; % half frame length

idx = 1:n;
if any(diffx<0) % make sure x is monotonically increasing
    [x,idx]=sort(x);
    y = y(idx);
    notnan = notnan(idx);
    diffx = diff(x);
end
% note that x is sorted so max(abs(x)) must be abs(x(1)) or abs(x(end));
% already calculated diffx for monotonic case, so use it again. Only
% recalculate if we sort x.
if nomissing && uniformx(diffx,x,y)
    v = ones(f,k+1);
    t=(-hf:hf)';
    for i=1:k
        v(:,i+1)=t.^i;
    end
    [q,ignore]=qr(v,0);
    ymid = filter(q*q(hf+1,:)',1,y);
    ybegin = q(1:hf,:)*q'*y(1:f);
    yend = q((hf+2):end,:)*q'*y(n-f+1:n);
    c = [ybegin;ymid(f:end);yend];
    return;
end

% non-uniformly distributed data
c = y;

% Turn off warnings when called from command line (already off if called from
% cftool).
ws = warning('off', 'all');
[lastwarnmsg,lastwarnid]=lastwarn;

for i = 1:n
    if i>1 && x(i)==x(i-1)
        c(i) = c(i-1);
        continue
    end
    L = i; R = i; % find leftmost and rightmost
values
    while(R<n && x(R+1)==x(i))
        R = R+1;
    end
    while(L>1 && x(L-1)==x(i))
        L = L-1;
    end
    HF = ceil(max(0,(f - (R-L+1))/2)); % need this many more on each side

    L = min(n-f+1,max(1,L-HF)); % find leftmost point needed
    while(L>1 && x(L)==x(L-1))
        L = L-1;
    end
    R = min(n,max(R+HF,L+f-1)); % find rightmost point needed
    while(R<n && x(R)==x(R+1))
        R = R+1;
    end
end

```

```

tidx = L:R;
tidx = tidx(notnan(tidx));
if isempty(tidx)
    c(i) = NaN;
    continue;
end
q = x(tidx) - x(i); % center to improve conditioning
vrank = 1 + sum(diff(q)>0);
ncols = min(k+1, vrank);
v = ones(length(q),ncols);
for j = 1:ncols-1
    v(:,j+1) = q.^j;
end
if size(v,1)==size(v,2)
    % Square v may give infs in the \ solution, so force least squares
    d = [v;zeros(1,size(v,2))]\[y(tidx);0];
else
    d = v\y(tidx);
end
c(i) = d(1);
end
c(idc) = c;

lastwarn(lastwarnmsg,lastwarnid);
warning(ws);

% -----
function ys = unifloess(y,span,useLoess)
%UNIFLOESS Apply loess on uniformly spaced X values

y = y(:);

% Omit points at the extremes, which have zero weight
halfw = (span-1)/2; % halfwidth of entire span
d = abs((1-halfw:halfw-1)); % distances to pts with nonzero weight
dmax = halfw; % max distance for tri-cubic weight

% Set up weighted Vandermonde matrix using equally spaced X values
x1 = (2:span-1)-(halfw+1);
weight = (1 - (d/dmax).^3).^1.5; % tri-cubic weight
v = [ones(length(x1),1) x1(:)];
if useLoess
    v = [v x1(:).^2];
end
V = v .* repmat(weight',1,size(v,2));

% Do QR decomposition
[Q,ignore] = qr(V,0);

% The projection matrix is Q*Q'. We want to project onto the middle
% point, so we can take just one row of the first factor.
alpha = Q(halfw,:)*Q';

% This alpha defines the linear combination of the weighted y values that
% yields the desired smooth values. Incorporate the weights into the
% coefficients of the linear combination, then apply filter.
alpha = alpha .* weight;
ys = filter(alpha,1,y);

% We need to slide the values into the center of the array.
ys(halfw+1:end-halfw) = ys(span-1:end-1);

% Now we have taken care of everything except the end effects. Loop over

```

```

% the points where we don't have a complete span. Now the Vandermonde
% matrix has span-1 points, because only 1 has zero weight.
x1 = 1:span-1;
v = [ones(length(x1),1) x1(:)];
if useLoess
    v = [v x1(:).^2];
end
for j=1:halfw
    % Compute weights based on deviations from the jth point,
    % then compute weights and apply them as above.
    d = abs((1:span-1) - j);
    weight = (1 - (d/(span-j)).^3).^1.5;
    V = v .* repmat(weight(:),1,size(v,2));
    [Q,ignore] = qr(V,0);
    alpha = Q(j,:)*Q';
    alpha = alpha .* weight;
    ys(j) = alpha * y(1:span-1);

    % These coefficients can be applied to the other end as well
    ys(end+1-j) = alpha * y(end:-1:end-span+2);
end

% -----
function isuniform = uniformx(diffx,x,y)
%ISUNIFORM True if x is of the form a:b:c

if any(isnan(y)) || any(isnan(x))
    isuniform = false;
else
    isuniform = all(abs(diff(diffx)) <= eps*max(abs([x(1),x(end)])));
end

```



## Додаток Е

Програма та методика промислових випробувань

**ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА УСТАНОВКА ДЛЯ КОНТРОЛЮ  
ГЕОМЕТРИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК МЕТАЛОКОНСТРУКЦІЙ  
БЕЗКОНТАКТНИМ АКУСТИЧНИМ МЕТОДОМ БКТУ-2**

*Програма та методика промислових випробувань*

## 1 ОБ'ЄКТ ВИПРОБУВАНЬ

1.1 Дана програма і методика промислових випробувань (далі - програма) розроблена у відповідності з вимогами ГОСТ 2.106-96 „Единая система конструкторской документации. Текстовые документы” і поширюється на експериментальну установку для контролю геометричних характеристик металоконструкцій безконтактним акустичним методом БКТУ-2 (далі установку) та встановлює зміст і порядок проведення промислових випробувань (далі - випробування).

## 2 МЕТА ВИПРОБУВАНЬ

2.1 Метою випробувань є визначення технічних характеристик установки та можливості її застосування в умовах промислу.

## 3 ПОРЯДОК, МІСЦЕ ТА УМОВИ ПРОВЕДЕННЯ ВИПРОБУВАНЬ

3.1 Установка повинна представлятися на випробування разом із матеріалами попередніх випробувань та даною Програмою і методикою промислових випробувань.

3.2 Випробування проводяться у спеціалізованій лабораторії для проведення випробувань на території НВФ „Зонд” (м. Івано-Франківськ) та в промислових умовах Богородчанського ЛВУМГ.

3.3 Всі випробування повинні проводитися при наступних умовах:

- температура навколишнього повітря  $(20 \pm 5)^\circ\text{C}$ ;
- відносна вологість від 45% до 75%;
- атмосферний тиск від 84,0 до 106,7кПа (від 630 до 800 мм ртутного стовпчика);
- напруга змінного струму  $220 \pm 2\%$ ;
- частота змінного струму  $(50 \pm 0,5)$  Гц;
- зовнішні електромагнітні поля повинні бути відсутні або знаходитись в межах, які не впливатимуть на роботу установки;
- технічна вода не повинна містити повітряних бульбашок та механічних домішок.

## 4 НЕОБХІДНЕ ОБЛАДНАННЯ ТА ЗАСОБИ ВИМІРЮВАЛЬНОЇ ТЕХНІКИ

4.1 Перелік засобів вимірювальної техніки (далі – ЗВТ), оснащення, матеріалів, необхідних для проведення випробувань установки наведено в таблиці 1.

Таблиця 1

Найменування	Основні технічні характеристики	Примітки
Штангенциркуль ШЦ-III-400-0.1	Діапазон вимірювання 1 ... 400мм, точність $\pm 0,1$ мм	
Барометр БТК-СН-14	Діапазон вимірювання: 927кПа ... 1073кПа, ціна поділки 1 кПа	
Гігрометр психрометричний ВИТ-1	Діапазон вимірювання: -вологості від 20% до 90%; -температури від 0°C до 25°C, -ціна поділки 0.2°C	
Персональний комп'ютер	<i>P3 500MHz</i> або вище з встановленим програмним забезпеченням, <i>50Mb</i> вільної пам'яті на жорсткому диску, мишка	комп'ютерний порт типу USB 1.1
Дефектоскоп ультразвуковий УДЗ-71	Діапазон вимірювання: від 0 до 100дБ, похибка $\pm(0,2+0,03N)$ дБ	
Зразки для налаштування ультразвукових дефектоскопів та товщиномірів		
<b>Примітка.</b> Допускається використовувати інші типи ЗВТ, якщо вони відповідають заданій точності вимірювання		

## 5 ТЕХНІЧНІ ВИМОГИ

5.1 Під час випробувань повинні бути визначені наступні технічні характеристики установки:

- діапазон вимірювання товщини;
- діапазон вимірювання глибини корозійного пошкодження;
- середня абсолютна похибка вимірювань товщини;
- приведена до діапазону похибка вимірювань.

### 5.2 Комплектність

5.4.1 В комплект установки входять наступні складові:

- акустичний блок, який складається з випромінюючого та приймаючого  
ультразвукового перетворювача;
- генераторно-приймальний тракт;
- блок візуалізації, оцифрування та оброблення акустичних сигналів.

## 6 ПІДГОТОВКА ДО ВИПРОБУВАНЬ

6.1 Для підготовки установки до випробувань необхідно:

- провести зовнішній огляд експериментальної установки;
- перевірити комплектність установки згідно пунктом 5.4.1 цієї методики;

- увімкнути експериментальну установку та прогріти її на протязі 30 хв.

6.2 Перед проведенням випробувань необхідно виконати також наступні операції:

- перевірити наявність діючих тавр, свідоцтв про повірку (атестацію) ЗВТ, які будуть використовуватися;
- провести підготовку ЗВТ у відповідності з експлуатаційною документацією на них;
- перевірити працездатність ЗВТ у відповідності з паспортними даними на них.

## 7 ПРОГРАМА ВИПРОБУВАНЬ

7.1 Експериментальне визначення характеристик установки при проведенні випробувань необхідно проводити в об'ємі і послідовності, які наведені в таблиці 2.

**Таблиця 2**

Назва операції	Пункти методики	ЗВТ, що застосовуються під час атестації	Примітка
Визначення діапазону вимірювання товщини стінки	8.3.	Зразки для настроювання ультразвукових дефектоскопів та товщиномірів	
Визначення діапазону вимірювання глибини корозійного пошкодження	8.3.	Зразки для настроювання ультразвукових дефектоскопів та товщиномірів	
Визначення середньої абсолютної похибки вимірювань товщини	8.3.	Зразки для настроювання ультразвукових дефектоскопів та товщиномірів	
Визначення приведеної до діапазону похибка вимірювань	8.3.	Зразки для настроювання ультразвукових дефектоскопів та товщиномірів	

## 8 МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ВИПРОБУВАНЬ

8.1 Перевірка відповідності установки вимогам комплектності проводиться шляхом зовнішнього огляду.

8.2 При проведенні випробувань необхідно дотримуватись умов, зазначених в пункті 3.3 даної методики і програми випробувань.

### 8.3 Визначення технічних характеристик установки.

8.3.1 Визначення діапазону вимірювань, середньої абсолютної похибки та похибки приведеної до діапазону вимірювань.

Для проведення досліджень необхідно:

а) увімкнути установку та прогріти її на протязі 1хв. Відібрати зразки з різними товщинами стінок з діапазону вимірювання від 1 мм до 12 мм (включаючи верхнє та нижнє значення діапазону);

б) згідно з пункту 6.1 цієї методики здійснити підготовку установки до роботи. Приєднати випромінюючий перетворювач до генератора а приймаючий до підсилювача ультразвукових коливань;

в) розмістити безконтактні ультразвукові перетворювачі, випромінюючий та приймаючий, один навпроти одного на фіксованій відстані  $L = 20 \text{ мм}$ , так щоб їхні акустичні осі співпадали;

г) провести вимірювання часу проходження ультразвукових коливань  $T_1$  від випромінюючого до приймаючого перетворювача;

д) розмістити між перетворювачами досліджуваній зразок, так щоб його поверхні були перпендикулярні до акустичних осей перетворювачів та провести вимірювання часу проходження ультразвукових коливань  $T_2$ . Товщину стінки зразка розраховують за формулою:

$$h = (T_1 - T_2) \cdot \left( \frac{c_{OK} \cdot c_{П}}{c_{OK} - c_{П}} \right) \quad (1)$$

е) виконати п'ять вимірювань товщини стінки в одній точці на одному із зразків. Вимірювання потрібно проводити на зразках з різними товщинами з діапазону від 1 мм до 12 мм;

є) після кожного вимірювання перетворювачі потрібно зміщувати відносно точки вимірювання вздовж зразка та повертати в попереднє положення, при цьому відстань між перетворювачами не повинна змінюватись. Після п'яти вимірювань обчислити середнє арифметичне значення товщини  $h_c$  в кожній точці;

ж) середню абсолютну похибку вимірювання товщини стінки  $\Delta h$  розраховують за формулою:

$$\Delta h = \frac{\sum_{i=1}^n |h_i - h_{ci}|}{n} \quad (2)$$

де  $h_i$  – дійсне значення товщини стінки  $i$ -го зразка;

$h_{ci}$  – обчислене середнє арифметичне значення товщини  $i$ -го зразка;

$n$  – кількість зразків, на яких проводилось вимірювання.

з) діапазон вимірювання товщини визначається за мінімальним  $h_{min}$  та максимальним  $h_{max}$  значенням товщин зразка, при яких можливо, за допомогою розробленого програмного забезпечення, провести локалізацію пройшовшого через зразок ультразвукового імпульсу;

и) похибку приведену до діапазону вимірювань  $\Delta$  розраховують за формулою:

$$\Delta = \frac{\Delta h}{h_{max} - h_{min}} \cdot 100\% \quad (3)$$

### 8.3.2 Визначення діапазону вимірювання глибини корозійного пошкодження

Для проведення досліджень необхідно:

а) виконати операції згідно з пунктів 8.3.1 а) та 8.3.1 б) даної програми;  
 б) за допомогою спеціального розгалужувача приєднати випромінюючий перетворювач одночасно до генератора та підсилювача акустичних коливань. Розмістити ультразвуковий перетворювач над зразком на некоронованій ділянці, так щоб його акустична вісь була перпендикулярною до поверхні зразка;

в) провести вимірювання відстані  $d$  від перетворювача до зразка;

г) шляхом паралельного переміщення перетворювача до поверхні зразка, розмістити його над ділянкою з наявним корозійним пошкодженням, глибина якого є наперед відомою, та провести вимірювання відстані від перетворювача до дна корозійного пошкодження зразка  $d_k$ ;

д) глибину корозійного пошкодження  $k$  розраховують за формулою:

$$k = d - d_k \quad (4);$$

е) діапазон вимірювання глибини корозійного пошкодження визначається за мінімальним  $k_{min}$  та максимальним  $k_{max}$  значенням, при яких можливо, за допомогою розробленого програмного забезпечення, провести локалізацію відбитого від поверхні зразка ультразвукового імпульсу

## 9 ВИМОГИ ТЕХНІКИ БЕЗПЕКИ І ОХОРОНИ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА

9.1 До роботи з установкою допускаються особи, які достатньо ознайомились з роботою установки і з діючими документами по техніці безпеки та правилами пожежної безпеки.

9.2 До роботи з установкою допускаються особи, які пройшли інструктаж з охорони праці, в тому числі і на місці проведення робіт.

9.3 Під час випробувань установки діють загальні положення з техніки безпеки, що прийняті на підприємстві, на якому здійснюється випробування установки.

9.4 Персонал, що бере участь в ремонті та наладці установки, зобов'язаний мати посвідчення про допуск до роботи з електроустановками напругою до 1000 В.

9.5 Перед включенням установки від мережі необхідно переконатись, що параметри електроживлення відповідають нормованим.

9.6 Оператори, які проводять випробування, при проведенні вимірювань повинні виконувати всі розпорядження особи, відповідальної за охорону праці.

9.7 Перед включенням установки необхідно здійснити його зовнішній огляд та огляд акустичного блоку, з'єднувальних кабелів і переконатись у відсутності механічних пошкоджень.

9.8 При виявленні несправностей або механічних пошкоджень експлуатація установки повинна бути припинена до їх усунення.

## 10 ОФОРМЛЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ

10.1 За згодою комісії окремі результати попередніх випробувань можуть бути визнані і на промислових випробуваннях не перевірятись.

10.2 Результати промислових випробувань оформляються актом промислових випробувань згідно додатку А та протоколом промислових випробувань.

10.3 При негативних результатах випробувань установки усуваються всі виявлені недоліки і повторно проводяться випробування по пунктах невідповідності.

## Додаток Є

Акт лабораторних випробувань експериментальної  
установки БКТУ-2 в умовах НВФ «Зонд»



**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Директор НВФ «Зонд»

Цюцяк І.І.

“ 04 ”  03 2008 р.

**АКТ**  
**ЛАБОРАТОРНИХ ВИПРОБУВАНЬ**  
експериментальної установки БКТУ-2  
в умовах НВФ «Зонд»

Робоча група в складі:

голови *Молодецького І.А.* – заступника директора НВФ «Зонд»

членів робочої групи:

1. *Власійчука І.М.* – начальника випробувального центру НВФ «Зонд»
2. *Даниляка Я.Б.* – провідного інженера НВФ «Зонд»
3. *Ващишак І.Р.* – провідного інженера НВФ «Зонд»
4. *Качана М.Б.* – провідного інженера НВФ «Зонд»

склала цей акт про таке:

**1** У період з 03.03.2008 р. по 04.03.2008 р. робоча група здійснила лабораторні випробування (далі – випробування) експериментальної установки для контролю геометричних характеристик металоконструкцій безконтактним акустичним методом БКТУ-2 згідно з запропонованою методикою.

**2** Робочій групі були надані:

- програма і методика випробувань;
- результати попередніх лабораторних випробувань;
- експериментальна установка БКТУ-2.

**3** Робоча група розглянула програму і методику випробувань експериментальної установки БКТУ-2 та погодилася проводити промислові випробування згідно із запропонованою програмою і методикою.

**4** Робоча група провела випробування експериментальної установки на семи різних плоских зразках для настроювання дефектоскопів, товщиною 1 мм, 3 мм, 4 мм, 5 мм, 7 мм, 9 мм, та 10 мм. Випробування проводилось з метою визначення дійсного значення похибки вимірювань товщини металоконструкції експериментальної установки БКТУ-2.

В ході проведення випробувань було отримано наступні результати (таблиця 1).

Таблиця 1 – Результати випробувань в умовах НВФ «Зонд»

Маркування зразка та дійсне значення товщини	Прилади та обладнання, використане при випробуваннях	Покази експериментальної установки БКТУ-2, мм	Абсолютна похибка вимірювань, мм
ЗНТ 1/10 №01, h=1 мм	Мікрометр МК25-2 № 4718	0,63	0,37
ЗНТ 1/10 №01, h=3 мм	Мікрометр МК25-2 № 4718	3,47	0,47
ЗНТ 1/10 №01, h=4 мм	Мікрометр МК25-2 № 4718	3,58	0,42
ЗНТ 1/10 №01, h=5 мм	Мікрометр МК25-2 № 4718	5,41	0,41
ЗНТ 1/10 №01, h=7 мм	Мікрометр МК25-2 № 4718	6,72	0,38
ЗНТ 1/10 №01, h=9 мм	Мікрометр МК25-2 № 4718	8,64	0,36
ЗНТ 1/10 №01, h=10 мм	Мікрометр МК25-2 № 4718	9,58	0,42
Середня абсолютна похибка вимірювань – 0,41 мм.			
Похибка приведена до діапазону (7 мм) вимірювань – 5,75 %.			

Також було проведено випробування установки БКТУ-2 при роботі з автоматичним сканером для контролю корозійних пошкоджень металоконструкцій. Випробування проводились на фрагменті труби магістрального трубопроводу  $\varnothing$  720 мм з наявними корозійними пошкодженнями по тілу металоконструкції та в області зварного шва (рис. 1) шляхом сканування його поверхні за допомогою акустичного перетворювача.

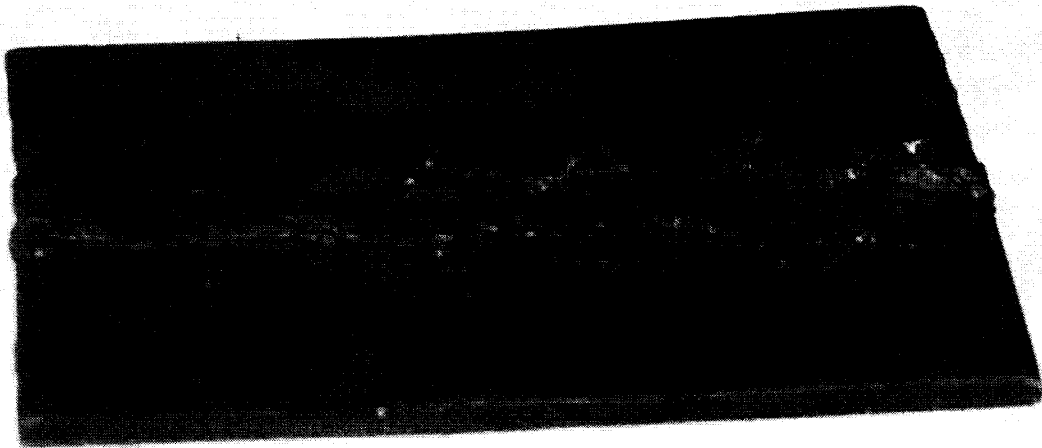


Рис. 1 - Зразок для проведення випробувань

За результатами випробувань отримано просторовий образ зразка, який було побудовано за допомогою розробленого програмного забезпечення (рис. 2).

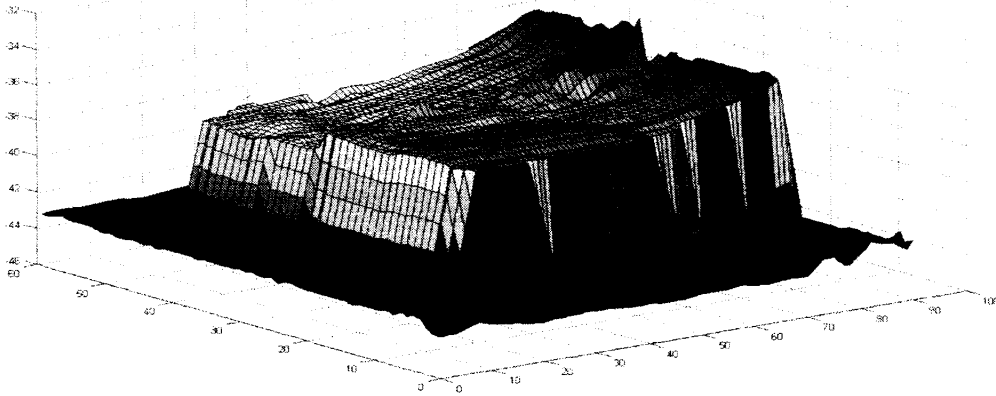


Рис. 2 - Просторовий образ зразка

**5** Робоча група постановила, що експериментальна установка для контролю геометричних характеристик металоконструкцій безконтактним акустичним методом БКТУ-2 витримала лабораторні випробування та встановила, що величина приведеної до діапазону (7 мм) похибки вимірювань товщини експериментальної установки БКТУ-2 не перевищує 5,75%.

**6** Робоча група пропонує:

- 1) удосконалити конструкцію генераторно-приймального тракту та системи оброблення вимірювальної інформації;
- 2) з метою зменшення похибки вимірювань розробити конструкцію та виготовити безконтактні ультразвукові перетворювачі, частотою вищою 1 МГц.

Голова робочої групи

Члени робочої групи

(підпис)  
 (підпис)  
 (підпис)  
 (підпис)  
 (підпис)

Молодецький І.А.

(ініціали, прізвище)

Власійчук І.М.

(ініціали, прізвище)

Даниляк Я.Б.

(ініціали, прізвище)

Ващишак І.Р.

(ініціали, прізвище)

Качан М.Б.

(ініціали, прізвище)

## Додаток Ж

Акт промислових випробувань установки БКТУ-2  
в умовах Богородчанського ЛВУМГ

**ЗАТВЕРДЖУЮ**  
 Головний інженер  
 Богородчанського ЛВУМГ  
 Опацький В.І.



2008 р.

## АКТ ПРОМИСЛОВОЇ АПРОБАЦІЇ

результатів дисертаційної роботи «Удосконалення акустичного методу контролю геометричних характеристик металоконструкцій» аспіранта ІФНТУНГ Рибіцького І.В.  
 в умовах промислу Богородчанського ЛВУМГ

Робоча група в складі:

Начальник лінійно-експлуатаційної служби  
 Богородчанського ЛВУМГ Кутинець В.О.

Начальник служби КПВіА  
 Павлик В.В.

Науковий співробітник НДІ НГЕіЕ  
 Рибіцький І.В.

Старший науковий співробітник НДІ НГЕіЕ  
 Ногач М.М.

склала цей акт про таке:

1 04 . 06 .08р. комісія здійснила промислові випробування експериментальної установки для контролю геометричних характеристик металоконструкцій безконтактним акустичним методом БКТУ-2 згідно з запропонованою методикою.

## 2 Комісії були надані:

- програма і методика промислових випробувань ;
- результати попередніх лабораторних випробувань;
- експериментальна установка БКТУ-2.

3 Комісія розглянула програму і методику промислових випробувань експериментальної установки БКТУ-2 та погодилася проводити промислові випробування згідно із запропонованою програмою і методикою.

4 Комісія провела випробування експериментальної установки на трьох різних фрагментах труб, які були вирізані з ділянки трубопроводу при проведенні ремонтних робіт. Умовний діаметр труб 159 мм, 168 мм та 377 мм, номінальна товщина стінок складала 5 мм, 6 мм та 9 мм відповідно. Випробування проводилось з метою визначення дійсного значення товщини стінки трубопроводу.

Покази експериментальної установки БКТУ-2 (середні значення за трьома вимірюваннями) та відповідні дійсні значення товщини труби, виміряні за допомогою штангельциркуля та ультразвукового дефектоскопа - товщиноміра УДЗ-71 наведені в табл. 1.

Таблиця 1.

Умовний діаметр труби, мм, (номінальна товщина стінки, мм)	Дійсні значення товщини стінки труби, мм	Покази дефектоскопа-товщиноміра УДЗ-71, мм	Покази експериментальної установки БКТУ-2, мм
159, (5)	5,1	5,12	5,31
168, (6)	6,2	6,31	6,37
377, (9)	8,9	9,05	9,24

Результати випробувань дозволяють стверджувати про повторюваність показів експериментальної установки БКТУ-2 та про те, що величина приведеної до діапазону (3,8мм) похибки вимірювань експериментальної установки БКТУ-2 не перевищує 6,32%.


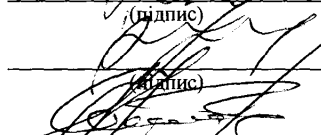
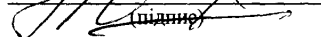
## 5 Комісією відмічені наступні недоліки:

- 1) тривалий час виконання одного вимірювання товщини стінки труби;
- 2) необхідність проведення попереднього зачищення поверхні труби;
- 3) неможливість проведення вимірювання товщини труби при односторонньому доступі до поверхні;

6 Комісія пропонує:

- а) усунути виявлені в процесі випробувань недоліки;
- б) внести певні зміни в конструкцію експериментальної установки з метою забезпечення можливості проведення вимірювань товщини стінки при односторонньому доступі до поверхні труби;
- в) розробити та укомплектувати експериментальну установку БКТУ-2 автоматизованою системою сканування з метою автоматизації процесу контролю.

Члени робочої  
групи

  
(підпис)  
  
(підпис)  
  
(підпис)

Кутинець В.О.

(ініціали, прізвище)

Павлик В.В.

(ініціали, прізвище)

Рибіцький І.В.

(ініціали, прізвище)

Ногач М.М.

(ініціали, прізвище)

Додаток 3  
Акт впровадження в навчальний процес  
результатів дисертаційної роботи

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Перший проректор ІФНТУНГ



**АКТ**

впровадження в навчальний процес  
результатів дисертаційної роботи Рибіцького І.В.

В результаті виконання аспірантом очної форми навчання Рибіцьким І.В. дисертаційної роботи на тему «Удосконалення акустичного методу контролю товщини металоконструкцій» одержані нові наукові та прикладні результати, які активно використовуються на кафедрі «Технічної діагностики та моніторингу».

Зокрема:

- при читанні лекцій курсів: «Технічна діагностика систем нафтогазопостачання», «Технічна діагностика трубопроводів», «Методи контролю стану робочих поверхонь», «Методи та засоби контролю матеріалів та виробів»;
- при проведенні лабораторних робіт з даних курсів.

Декан факультету нафтогазопроводів

доцент, к.т.н.

Лісафін В.П.

В. о. зав. кафедрою ТД та М

доцент, к.т.н

Яворський А.В.



Додаток И  
Висновок про видачу деклараційного патенту на корисну модель.

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ДЕРЖАВНИЙ ДЕПАРТАМЕНТ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ВЛАСНОСТІ  
ДЕРЖАВНЕ ПІДПРИЄМСТВО  
"УКРАЇНСЬКИЙ ІНСТИТУТ ПРОМИСЛОВОЇ ВЛАСНОСТІ"

вул. Глазунова, 1, м. Київ-42, 01601, Україна Тел.: (044) 494-05-05 Факс: (044) 494-05-06  
E-mail: office@ukrpatent.org

18 ВЕР 2008

№

13710/1

Висновок, затверджений Державним департаментом інтелектуальної власності, набув статусу рішення про видачу деклараційного патенту на корисну модель

Адреса для листування  
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу,  
вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ,  
76019, Україна

Стосується заявки № а 2007 00055  
/ при листуванні просимо посилатися на цей № /

**«ЗАТВЕРДЖУЮ»**  
Заступник Голови Державного  
департаменту інтелектуальної власності

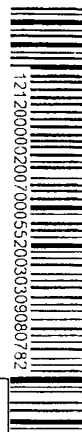


17 ВЕР 2008

В.П. Чеботарьов

Висновок про видачу деклараційного патенту на корисну модель за результатами  
формальної експертизи

- (21) Реєстраційний номер заявки а 2007 00055
- (22) Дата подання 02.01.2007
- (71) Заявник(и)  
ІВАНО-ФРАНКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
НАФТИ І ГАЗУ
- (72) Повне ім'я винахідника(ів)  
Карпаш Олег Михайлович, Криничний Петро Якович, Карпаш Максим Олегович,  
Рибіцький Ігор Володимирович
- (73) Власник(и) патенту  
ІВАНО-ФРАНКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
НАФТИ І ГАЗУ
- (51) МПК (2006)  
G01N 29/04  
G01B 17/02
- (54) Назва корисної моделі  
СПОСІБ НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ ГЛИБИНИ КОРОЗІЙНОГО  
ПОШКОДЖЕННЯ ТА ТОВЩИНИ МЕТАЛЕВИХ ВИРОБІВ



За результатами формальної експертизи, проведеної відділом Укрпатенту відповідно до ч.8 ст.16 Закону України "Про охорону прав на винаходи і корисні моделі" (далі - Закон), встановлено, що заявка **відповідає вимогам** ст.12 Закону.

Обсяг правової охорони визначається формулою корисної моделі, що додається на 1 арк.

Державна реєстрація деклараційного патенту України на корисну модель відповідно до ч.2 ст.22 Закону буде здійснена за умови сплати **державного мита** за його видачу і **збору** за публікації про видачу деклараційного патенту. Згідно з Порядком сплати зборів за дії, пов'язані з охороною прав на об'єкти інтелектуальної власності, затвердженим постановою Кабінету Міністрів України від 23.12.2004 р. № 1716 із змінами, внесеними постановою Кабінету Міністрів України від 19.09.2007 № 1148, (далі - Порядок), розмір цього збору (код 12400) становить 20 грн . оскільки заявка містить сумарно 9 аркушів опису, креслень, формули корисної моделі і реферату.

Додаток: на 1 арк.

Начальник відділу



(Підпис)

Л.О. Авдошко

Виконавець



(Підпис)

Т.Ф. Москаленко

Телефон

494-05-43