**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ**

**«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

**ФАКУЛЬТЕТ АВІАЦІЙНИХ І КОСМІЧНИХ СИСТеМ**

**КАФЕДРА ІНФОРМАЦІЙНО – ВИМІРЮВАЛЬНОЇ ТЕХНІКИ**

|  |  |
| --- | --- |
| «На правах рукопису»  УДК \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ | «До захисту допущено»  Завідувач кафедри  \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ В.С. Єременко  «\_\_\_»\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_2018 р. |

**Магістерська дисертація**

**на здобуття ступеня магістра**

**зі спеціальності 152 «Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка»**

**на тему: «Ультразвукова система вимірювання товщини виробів з багатошарових матеріалів»**

Виконала:

студентка VI курсу, групи ВВ-61м

Соколюк Аліса Олексіївна \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

Керівник:

професор, д.т.н., професор

Єременко В.С. \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

Рецензент:

доцент кафедри АЕД, к.т.н., доцент

Стаценко О. В. \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

Засвідчую, що у цій магістерській дисертації немає запозичень з праць інших авторів без відповідних посилань.

Студентка \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

Київ – 2018 року

**РЕФЕРАТ**

Магістерська дисертація: 90 с., 38 рис., 23 табл., 2 додатки, 30 джерел.

Об’єкт дослідження – визначення товщини багатошарового матеріалу з використанням фазових характеристик сигналу.

Предмет дослідження -методи і система вимірювання товщини багатошарового виробу.

Мета роботи – розробка системи вимірювання товщини багатошарового виробу.

Методи дослідження – методи УЗ товщинометрії, методи опрацювання сигналів, методи визначення ФХС.

Визначення товщини багатошарового матеріалу здійснюється на основі алгоритму визначення товщини з використанням перетворення Гільберта та фазового методу. Удосконалено метод УЗ визначення товщини, за рахунок чого можна уникнути впливу амплітудної похибки та отримати результати, не залежні від температури за рахунок використання повздовжних та поверхневих хвиль.

Прогнози щодо розвитку об’єкта дослідження – присутнiй середній попит та рентабельнiсть роботи на ринку.

За даною темою магістерської дисертації наявні дві публікації:

1. Тези «БЕЗЕТАЛОННИЙ УЛЬТРАЗВУКОВИЙ ВИМІРЮВАЧ ТОВЩИНИ МЕТАЛУ З ВИКОРИСТАННЯМ ПЕРЕТВОРЕННЯ ГІЛЬБЕРТА», що опубліковані у матеріалах ХХ науково-технічної конференції студентів та молодих учених «Гіротехнології, навігація, керування рухом та конструювання авіаційно-космічної техніки».

2. Стаття «ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДУ УЛЬТРАЗВУКОВОЇ ТОВЩИНОМЕТРІЇ ДЛЯ КОНТРОЛЮ ТОВЩИНИ ОБ'ЄКТІВ», яка прийнята до публікації в збірнику матеріалів ХI Науково-практичної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених «Погляд у майбутнє приладобудування».

Ключові слова: НЕРУЙНІВНИЙ КОНТРОЛЬ, ПЕРЕТВОРЕННЯ ГІЛЬБЕРТА, ФАЗОВИЙ МЕТОД, УЛЬТРАЗВУКОВА ТОВЩИНОМЕТРІЯ.

**ABSTRACT**

The total volume of – 90 pages, 38 illustrations, 23 tables, 2 applications, the number of bibliographic items - 30.

The object of the study is determining the thickness of the multilayer material using the phase characteristics of the signal.

Subject of research - methods and system for measuring the thickness of a multilayer product.

The purpose of the work is to develop a system for measuring the thickness of a multilayer product.

Methods of research - ultrasound methods of thickness measurement, methods of processing signals, methods for determining FHS.

Determination of the thickness of the multilayer material is carried out on the basis of the thickness determination algorithm using the Hilbert transform and the phase method. The method of ultrasonic thickness determination is improved, thereby avoiding the effects of amplitude error and obtaining results that are not temperature dependent due to the use of longitudinal and superficial waves.

Projections for the development of the research object - there is an average demand and profitability of work in the market.

There are two publications on this topic of the master's thesis:

1. Abstracts on the topic "BEST METAL ULTRASONIC METERS OF METAL SUPPLY USING GILBERT TRANSFER", which are published in the copy of the 20th scientific and technical conference of students and young scientists "Gyrotechnology, navigation, traffic control and aircraft engineering".

2. An article on the topic "STUDY OF THE ULTRASONIC METHOD FOR OBJECTS", which will be published in the collection of the XI Scientific and Practical Conference of students, postgraduates and young scientists "A View to the Future of Instrumentation."

Keywords: NON-DESTRUCTIVE CONTROL, HILBERT TRANSFORMATION, PHASE METHOD, ULTRASONIC THICKNESS MEASUREMENT.

**РЕФЕРАТ**

Магистерская диссертация: 90с., 38 рис., 23 табл., 2 приложения, 30 источников.

Объект исследования - определение толщины многослойного материала с использованием фазовых характеристик сигнала.

Предмет исследования – методы и система измерения толщины многослойного изделия.

Цель работы - разработка системы измерения толщины многослойного изделия. Методы исследования - методы УЗ толщинометрии, методы обработки сигналов, методы определения ФХС.

Определение толщины многослойного материала осуществляется на основе алгоритма определения толщины с использованием преобразования Гильберта и фазового метода. Усовершенствован метод УЗ определения толщины, за счет чего можно избежать влияния амплитудной погрешности и получить результаты, не зависящие от температуры за счет использования продольных и поверхностных волн.

Прогнозы по развитию объекта исследования - присутствует средний спрос и рентабельность работы на рынке.

По данной теме магистерской диссертации есть две публикации:

1. Тезисы «БЕЗЭТАЛОННЫЙ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ИЗМЕРИТЕЛЬ ТОЛЩИНЫ МЕТАЛЛА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ГИЛЬБЕРТА», которые опубликованы в материалах ХХ научно-технической конференции студентов и молодых ученых «Гиротехнологии, навигация, управление движением и конструирование авиационно-космической техники».

2. Статья «ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДА УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ТОЛЩИНОМЕТРИИ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ТОЛЩИНЫ ОБЪЕКТОВ», которая принята к публикации в сборнике материалов ХI Научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Взгляд в будущее приборостроения».

Ключевые слова: НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ, ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ГИЛЬБЕРТА, ФАЗОВЫЙ МЕТОД, УЛЬТРАЗВУКОВАЯ ТОЛЩИНОМЕТРИЯ.

**ЗМІСТ**

[**ПЕРЕЛІК ОСНОВНИХ УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ І СКОРОЕЧЕНЬ** 3](#_Toc514373404)

[**ВСТУП** 4](#_Toc514373405)

[**1. ОГЛЯД ТА АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ ТЕХНІЧНИХ РІШЕНЬ** 5](#_Toc514373406)

[1.1 Види товщиномірів 5](#_Toc514373407)

[1.1.1 Механічні товщиноміри (або товщиномір вологого шару) 5](#_Toc514373408)

[1.1.2. Електромагнітні товщиноміри 6](#_Toc514373409)

[1.1.3 Вихрострумові товщиноміри 7](#_Toc514373410)

[1.1.4 Магнітні товщиноміри 7](#_Toc514373411)

[1.1.5 Ультразвукові товщиноміри 8](#_Toc514373412)

[1.2. УЗ товщиноміри 9](#_Toc514373413)

[1.2.1 Різновиди УЗ товщиномірів 11](#_Toc514373414)

[1.2.2 Принцип роботи УЗ товщиномірів 11](#_Toc514373415)

[1.2.3 Порівняння характеристик існуючих приладів 14](#_Toc514373416)

[1.3. Завдання дослідження 20](#_Toc514373417)

[1.4. Висновки 21](#_Toc514373418)

[**2. РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ФАЗОВОГО МЕТОДУ УЛЬТРАЗВУКОВОЇ ТОВЩИНОМЕТРІЇ ДЛЯ КОНТРОЛЮ товщини багатошарових об'єктів** 22](#_Toc514373419)

[2.1. Аналіз фазової характеристики адитивної суміші радіосигналів з синусоїдними несучими 22](#_Toc514373420)

[2.2. Розробка методу фазової ультразвукової товщинометрії на основі фазової характеристики сигналу 26](#_Toc514373421)

[2.2.1. Формування вимірювальних сигналів в системах фазової УЗТ 26](#_Toc514373422)

[2.2.2. Перетворення Гільберта як метод аналізу фазових характеристик сигналів УЗТ 36](#_Toc514373423)

[2.3. Особливості використання фазових характеристик сигналів в ультразвуковій товщинометрії 37](#_Toc514373424)

[2.4. Висновки 44](#_Toc514373425)

[**3. РОЗРОБКА УЛЬТРАЗВУКОВОЇ СИСТЕМИ ВИМІРЮВАННЯ ТОВЩИНИ ВИРОБІВ З ОДНО- та БАГАТОШАРОВИХ МАТЕРІАЛІВ** 45](#_Toc514373426)

[3.1. Структурна схема УЗ системи вимірювання товщини виробів з багатошарових матеріалів 45](#_Toc514373427)

[3.2. Функціональна схема системи вимірювання товщини виробів з багатошарових матеріалів 46](#_Toc514373428)

[3.3 Модуль первинних перетворювачів 47](#_Toc514373429)

[3.4 Програмне забезпечення 50](#_Toc514373431)

[3.5. Аналіз точності вимірювання товщини 54](#_Toc514373432)

[3.5.1. Аналіз похибки визначення часової затримки 55](#_Toc514373433)

[3.5.2. Оцінювання невизначеності для одношарових ОК 57](#_Toc514373434)

[3.5.3. Оцінювання невизначеності для двошарових ОК 62](#_Toc514373435)

[3.6. Технічні характеристики розробленої УЗ системи вимірювання товщини виробів з багатошарових матеріалів 66](#_Toc514373436)

[3.7. Висновки 66](#_Toc514373437)

[**4. РОЗРОБЛЕННЯ СТАРТАП-ПРОЕКТУ** 67](#_Toc514373438)

[4.1 Опис ідеї проекту 67](#_Toc514373439)

[4.2.Технологічний аудит ідеї проекту 70](#_Toc514373440)

[4.3.Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту 71](#_Toc514373441)

[4.4 Розроблення ринкової стратегiї проекту 76](#_Toc514373442)

[4.5 Розроблення маркетингової програми стартап-проекту 78](#_Toc514373443)

[4.6 Висновок 79](#_Toc514373444)

[**ВИСНОВКИ ПО РОБОТІ** 80](#_Toc514373445)

[**СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ** 81](#_Toc514373446)

[**ДОДАТОК А** 84](#_Toc514373449)

[**ДОДАТОК Б** 86](#_Toc514373450)

ПЕРЕЛІК ОСНОВНИХ УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

УЗ – ультразвуковий

УЗТ – ультразвукова товщинометрія

УЗД – ультразвуковий датчик

ПЕП – п’єзоелектричний перетворювач

ОК – об’єкт контролю

МК – мікроконтролер

РС – роздільно-суміщений

НК – неруйнівний контроль

ФХС – фазова характеристика сигналу

АХС – амплітудна характеристика сигналу

ДСТУ – державні стандарти України

ГОСТ - Міждержавний стандарт країн СНД

ПК – Персональний комп’ютер

АЦП – аналогово-цифровий перетворювач

ПЗ – програмне забезпечення

*cs* – швидкість поверхневих хвиль

*cl* – швидкість повздовжних хвиль

*L* – відстань між призмами роздільно-суміщеного перетворювача

*h* – товщина виробу

 - критичний кут призми

*uτ* – сумарна середньоквадратична похибка вимірювання часового інтервалу

*τ* – часова затримка сигналу

К - оператор, що усуває стрибки фази в точках переходу через границі інтервалів в межах періоду

L - оператор, що усуває стрибки фази в точках переходу через границі інтервалів за межами періоду.

**ВСТУП**

На сьогоднішній день професіонали якості вже добре знайомі з різними аспектами ультразвукового контролю, в якому для проведення контролю та виконання вимірювань застосовується звукова енергія високої частоти. Ультразвуковий контроль може виявляти і оцінювати тріщини в металі, вимірювати розміри, встановлювати характеристики матеріалу і т.д.

Вимірювання товщини стінки ймовірно є найбільш відомим і простим видом ультразвукового контролю. Прецизійні ультразвукові товщиноміри дають можливість швидкого вимірювання товщини об'єктів при односторонньому доступі.

Прогрес ніколи не стоїть на місці. Але за останні 20 років людство почало робити дуже великі кроки в розвитку автоматизації вимірювань та комп’ютеризації багатьох процесів.

Багато сучасних ультразвукових товщиномірів оснащені складними системами реєстрації та передачі даних, що забезпечують сполучення товщиномірів з комп'ютерними базами даних. Тисячі показів можуть бути отримані і збережені під ідентифікаційними номерами в польових умовах або при проведенні контролю працюючого обладнання на промисловому підприємстві та завантажені в комп'ютер для реєстрації та аналізу. Деякі портативні товщиноміри також передбачають відображення луна-сигнала на дисплеї. Ці луна-сигнали можуть бути використані досвідченим оператором для перевірки точності показань в складних випадках контролю, а також для установки оптимальних значень параметрів роботи товщиноміра.

Зараз практично у кожної людини є портативний комп'ютер, планшет або ноутбук. На цих пристроях набагато простіше можна проаналізувати сигнал і отримати більше даних. Саме тому такий напрямок розвитку cумісно з підвищенням якості та точності отримання даних є актуальним.

# 

# ВИСНОВКИ ПО РОБОТІ

В дисертації вирішена актуальна науково-прикладна задача з розробки комп’ютеризованої системи визначення товщини одно- та багатошарових виробів.

Для вирішення поставленої задачі було виконано:

1. На основі проведеного аналізу виділений тип УЗ товщиноміри, оскільки вони мають найбільшу точність, найменшу похибку та мають великий діапазон вимірювання товщин. Розроблений спеціальний модуль первинних перетворювачів, який дозволяє проводити безеталонну товщинометрію і усуває похибку від неоднорідності середовища та температурну похибку.
2. Запропонований метод УЗТ зменшення похибки від амплітуди за рахунок використання та аналізу ФХС. Дпідвищити точність визначення товщини шарів багатошарових ОК і середовищ. Суть запропонованого способу полягає у визначенні моменту спотворення ФХ прийнятого сигналу, який інформує про накладання у часі зондуючого і відбитого сигналів (у випадку одношарового ОК), або відбитих від різних шарів сигналів (у випадку багатошарових ОК). ­
3. Розроблений алгоритм роботи УЗ системи вимірювання товщини для обробки інформаційного сигналу, заснований на використанні перетворенні Гільберта.
4. Побудоване програмне забезпечення, яке працює із системою.
5. Проведений аналіз точності вимірювання даної системи. Аналіз показав, що точність вимірювання товщини виробів з багатошарових матеріалів розробленою системою не поступається аналогічним УЗ системам.
6. Розроблена УЗ система визначення товщини виробів з багатошарових матеріалів вцілому.

# СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Бергман Л. Ультразвук и его применение в науке и технике, Москва, 1956г.

# Королев М. Безэталонные ультразвуковые толщиномеры / М.В. Королев. – М.: Машиностроение, 1985. – 80 с.

1. Неразрушающий контроль. В 5 кн. Кн 2. Акустические методы контроля: практ. пособие / И.Н. Ермолов, Н.П. Алешин, А.И. Пота- пов / под ред. И.Н. Сухорукова. – М.: Высш. шк., 1991. – 283 с.

# Справочник. Неразрушающий контроль. Под общей ред. В. Клюева; Том 3. Ультразвуковой контроль / И.Н. Ермолов, Ю.В. Ланге. – М.: Машиностроение, 2004. – 864 с.

1. Лившиц Б.Г. Физический свойства металлов и сплавов / Б.Г. Лившиц, В.С. Крапошкин, Я.Л. Липецкий. – М.: Металлургия, 1980. – 320 с.
2. Бендат Дж. Прикладной анализ случайных данных / Дж. Бендат, А. Пирсол – М.: Мир, 1989. –540 с.
3. Каневский И.Н. Неразрушающие методы контроля / И.Н. Каневский, Е.Н. Сальникова. – Владивосток, 2007. – 243с.
4. Чернышов А.В. Неразрушающий контроль теплозащитных свойств многослойных строительных изделий / А.В. Чернышов, Э.В. Сысоев, В.Н. Чернышов, Г.Н. Иванов, А.В. Челоноков. – М.: «Издательство Машиностроение-1», 2007. – 112с.
5. Ермолов И.Н. Расчеты в ультразвуковой дефектоскопии / И.Н.Ермолов, А.Х.Вопилкин, В.Г.Бадалян. – Эхо, 2004. – 236с.
6. Ультразвуковые преобразователи для неразрушающего контроля. Под ред. И.Н. Ермолова / И.Н. Ермолов. – М.: Машиностроение, 1986. – 421с.
7. Суранов А. Я. LabVIEW 8.20: Справочник по функциям / А. Я. Суранов. – М.: ДМК Пресс, 2007. – 536 с.
8. Фазовий спосіб ультразвукової товщинометрії / Ю. В. Куц [та ін.] // Техн. диагностика и неразрушающий контроль. - 2013. - № 1. - С. 23 - 27.
9. Алешин Н. П. и др. Методы акустическо-го контроля металлов. – М.: Машиностроение, 1989. – 456 с
10. ASME Code, секция V, раздел V, статья 23, спецификация SE-797. Типовая методика изме- рения толщины ручным ультразвуковым эхо-им- пульсным методом.
11. Приборы для неразрушающего контроля материалов и изделий: справочник. В 2 кн. / под ред. В.В. Клюева. – М.: Машиностроение, 1986. Кн. 2. – 352 с.
12. Бреховский Л.М., Годин О.А. Акустика слоистых сред. – М.: Наука,1989. – 416 с.
13. Викторов И.А. Ультразвуковые поверхностные волны в твердых телах. – М.: Наука, 1981. – 288 с.
14. Ермолов И.Н. Теория и практика ультразвукового контроля. – М.: Машиностроение, 1981. – 240 с.
15. Кретов Е.Ф. Ультразвуковая дефектоскопия в машиностроении. – С.-Петербург: Изд-во. «Радиоавионика», 1995.
16. Крауткремер Й., Крауткремер Г. Ультразвуковой контроль матери- алов: справочник. – М.: Металлургия, 1991. – 752 с.
17. Ланге Ю.В. Акустические низкочастотные методы неразрушающе- го контроля многослойных конструкций из композитных материа- лов. – М.: Машиностроение, 1991.
18. Потапов А.И. Контроль качества и прогнозирование надежности конструкций из композитных материалов. – Л.: Машиностроение, 1980. – 261 с.
19. Скучик Е. Основы акустики. В 2 т. – М.: Мир, 1976. Т. 1, 2. – 546 с.
20. Ультразвук. Маленькая энциклопедия / под ред И.П. Голяминой. – М.: Советская энциклопедия, 1979. – 400 с.
21. Ультразвуковые преобразователи для неразрушающего контроля / под ред. И.Н. Ермолова. – М.: Машиностроение, 1986. – 280 с.
22. Физическая акустика. В 4 т. / под ред. У. Мэзона. Т. 1. Методы и приборы ультразвуковых исследований. Ч. А. – М.: Мир, 1966. – 592 с.
23. Шрайбер Д.С. Ультразвуковая дефектоскопия. – М.: Металлургия, 1965. – 392 с.
24. Выборнов Б.И. Ультразвуковая дефектоскопия. – М.: Металлургия, 1985. -256 с.
25. Лукьянов В.А., Петрусенко Е.В. Ультразвуковая толщинометрия и дефектоскопия / В.А Лукьянов, Е.В. Петрусенко. – М.: РГУ нефти и газа, 2002.
26. https://www.olympus-ims.com/vi/applications-and-solutions/introductory-ultrasonics/introduction-thickness-gaging/