

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

Приладобудівний факультет

Кафедра приладів і систем неруйнівного контролю

«На правах рукопису»
УДК _____

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

_____ Протасов А.Г.

«__» _____ 20__ р.

Магістерська дисертація

на здобуття ступеня магістра

зі спеціальності 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

на тему: «Використання машинного навчання для виявлення дефектів

композиційних матеріалів імпедансним методом»

Виконав:

студент VI курсу, групи ПК-61м

Верютін Михайло Володимирович _____

Керівник:

Доцент кафедри ПСНК, кандидат технічних наук,

доцент, Суслов Є.Ф. _____

Консультант з розроблення стартап-проекту:

Доцент кафедри менеджменту, к.е.н., доцент,

Бояринова К.О. _____

Рецензент:

Доцент кафедри ООЕП, к.т.н., доцент

Сокурєнко В.М. _____

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

Студент (-ка) _____

Київ – 2018 року

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

Кафедра приладів і систем неруйнівного контролю

Рівень вищої освіти – другий (магістерський) за освітньо-науковою програмою
Спеціальність (спеціалізація) – 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології (комп'ютерно-інтегровані технології та системи неруйнівного контролю).

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Протасов А.Г.

«___» _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ
на магістерську дисертацію студенту
Верютін Михайло Володимирович

1. Тема дисертації «Використання машинного навчання для виявлення дефектів композиційних матеріалів імпедансним методом», науковий керівник дисертації Суслов Євген Федорович, доцент кафедри ПСНК, кандидат технічних наук, доцент, затверджена наказом по університету від «___» _____ 20__ р. № _____
2. Термін подання студентом дисертації _____
3. Об'єкт дослідження: методи машинного навчання для виявлення дефектів при імпульсному імпедансному контролі композиційних матеріалів
4. Предмет дослідження: процес прийняття рішень на основі аналізу інформативних параметрів первинного перетворювача імпульсного імпедансного дефектоскопу
5. Перелік завдань, які потрібно розробити: дослідити існуючі підходи до прийняття рішень про наявність дефекту при імпульсному імпедансному контролі композитів; сформувати бібліотеку сигналів, отриманих з реальних зразків композиційних матеріалів; провести експериментальне дослідження для перевірки гіпотези про можливість прийняття рішень за допомогою методів машинного навчання.

6. Орієнтовний перелік графічного (ілюстративного) матеріалу:

7. Орієнтовний перелік публікацій 2 наукових праць, з яких: 1 стаття у збірнику наукових праць, 1 теза доповідей у збірниках матеріалів конференцій

8. Консультанти розділів дисертації*

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Розробка стартап-проектів	Бояринова Катерина Олександрівна		

9. Дата видачі завдання _____

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Формулювання завдання магістерської дисертації	19.10.2016	Виконано
2	Проведення аналітичного огляду методів імпедансного контролю	23.12.2016	Виконано
3	Аналітичний огляд методів машинного навчання	10.03.2017	Виконано
4	Отримання даних з імпульсного імпедансного дефектоскопу	19.05.2017	Виконано
5	Формування даних для навчання штучної нейронної мережі	06.10.2017	Виконано
6	Створення та тестування штучної нейронної мережі	29.12.2017	Виконано
7	Дослідження машинного навчання для виявлення дефектів при імпульсному імпедансному контролі	30.03.2018	Виконано
8	Формулювання висновків	27.04.2018	Виконано

Студент

Верютін М.В.

Науковий керівник дисертації

Сулов Є.Ф.

* Якщо визначені консультанти. Консультантом не може бути зазначено наукового керівника магістерської дисертації.

Реферат

Дисертація має обсяг 80 сторінок, основна частина складається зі вступу, п'яти розділів, містить 29 рисунків, 25 таблиць, 4 додатки та 13 джерел літератури.

Мета дослідження - дослідити можливість використання нейронних мереж для прийняття рішень при імпульсному імпедансному контролі.

Об'єкт дослідження – методи машинного навчання для виявлення дефектів при імпульсному імпедансному контролі композиційних матеріалів.

Предмет дослідження - процес прийняття рішень на основі аналізу інформативних параметрів первинного перетворювача акустичного імпульсного імпедансного дефектоскопу.

В перших двох розділах дисертації проведено аналітичний огляд існуючих методів контролю композитів, основних дефектів в них та описані існуючі прилади та системи, що реалізують даний метод. В пояснювальній записці розглянуті фізичні основи імпедансного методу контролю.

В подальших розділах розкривається процес формування масиву вхідних даних для дослідження, розробки та тестування нейронної мережі, наведені графіки залежностей похибок від параметрів нейронної мережі. Для дослідження здатності нейронної мережі до навчання на підготовлених даних та подальшої класифікації ділянки виробу за ознакою наявності або відсутності дефекту було проведено створення та тестування нейронної мережі за допомогою бібліотеки Keras на базі мови програмування Python, яке підтвердило доцільність використання даного методу обробки інформації в імпедансному контролі композиційних матеріалів.

Ключові слова

Імпедансний контроль, композиційні матеріали, штучні нейронні мережі, методи машинного навчання.

Abstract

The dissertation has a volume of 80 pages, the main part consists of an introduction, five sections, contains 29 figures, 25 tables, 4 annexes and 13 sources of literature.

The purpose of the research is to investigate the possibility of using the neural networks for decision-making process of mechanical impedance analysis.

The object of the research is the methods of machine learning for detecting flaws by mechanical impedance analysis of composite materials.

The subject of the research is the decision-making process based on the analysis of the informational parameters of the mechanical impedance defectoscope transducer.

In the first two sections of the dissertation, an analytical review of existing testing of composites, major flaws in them, and description of existing devices and systems that implement this method are carried out. Also the physical foundations of the mechanical impedance testing method is described.

The following sections reveal the process of forming an array of input data for research, the development and testing of the neural network, and graphs that show the dependencies of errors on the parameters of the neural network. To investigate the ability of the neural network to learn on the data and to further classification of the testing object's area on the basis of the presence or absence of a defect, the creation and testing of the neural network was carried out using the Keras library based on the Python programming language, which confirmed the expediency of using this method of information processing in the mechanical impedance testing of compositional materials.

Keywords:

Mechanical impedance testing, composite materials, artificial neural networks, methods of machine learning.

Зміст

Перелік умовних позначень	8
Вступ.....	9
1. Аналітичний огляд	11
1.1. Опис об'єкту контролю	11
1.2. Опис основних дефектів.....	13
1.3. Існуючі акустичні методи контролю	14
1.4. Вибір та обґрунтування імпедансного методу контролю.....	17
1.5. Штучні нейронні мережі	19
1.6. Навчання штучної нейронної мережі.....	23
1.7. Архітектури нейронних мереж.....	24
1.8. Алгоритм використання нейронних мереж в неруйнівному контролі.....	24
1.9. Огляд існуючих мобільних систем, що реалізують імпедансний метод неруйнівного контролю	25
2. Акустичний імпедансний метод контролю	38
2.1. Імпульсний варіант імпедансного методу	38
2.2. Фізичні основи імпедансного методу	44
2.3 Аналіз можливостей методу для виявлення дефектів.....	45
2.4 Огляд дефектів в композиційних матеріалах.....	46
2.5 Механічний імпеданс багатошарової конструкції.....	50
2.6 Акустичний контакт перетворювача з об'єктом контролю	51
3. Отримання та обробка експериментальних даних	55
3.1. Опис стандартного зразка.....	55
3.2. Опис процесу отримання та обробки сигналів	55
4. Розробка стартап-проекту «Використання машинного навчання при імпульсному імпедансному контролі композитів»	58
4.1. Опис ідеї проекту	58
4.2. Технологічний аудит ідеї проекту.....	59
4.3. Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту.....	60

4.4. Розроблення ринкової стратегії проекту	66
4.5. Розроблення маркетингової програми стартап-проекту	67
4.6 Висновки до розділу	70
5. Результати дослідження	71
Висновки	77
Список використаної літератури	78
Додатки.....	80

Перелік умовних позначень

НК	Неруйнівний контроль
ОК	Об'єкт контролю
ПЕП	П'єзоелектричний перетворювач
НМ	Нейронна мережа
ШНМ	Штучна нейронна мережа
ПКМ	Полімерний композитний матеріал
СП	Сотова панель
АЧХ	Амплітудно-частотна характеристика
ФЧХ	Фазово-частотна характеристика

Вступ

Композитний матеріал, або композит — гетерофазний матеріал, окремі частини якого виконують специфічні функції, що забезпечує йому властивості, яких окремі компоненти не мають. Як правило, отримують поєднанням двох або більше складових, які нерозчинні або малорозчинні один в одному і мають різні властивості.

Основними дефектами в багатошарових конструкціях є дефекти типу непроклеїв та розшарувань – найбільш небезпечні дефекти. Крім того можлива поява таких дефектів, як зони пониженої міцності зклеювання, котрі при експлуатації виробів, навіть при порівняно невеликих навантаженнях, можуть призвести до появи розшарувань в з'єднаннях.

У даній роботі прийнято рішення про застосування акустичного імпедансного методу контролю, котрий дає змогу виявляти дефекти типу розшарувань, непроклеїв, внутрішніх ушкоджень та ін.

Актуальність роботи полягає у тому, що в будь яких акустичних методах неруйнівного контролю надзвичайно важливим аспектом є інтерпретація показань оператором. Часто, навіть добре підготовлений спеціаліст може зробити помилку при віднесенні певного виробу або його ділянки до класу дефектного або бездефектного. Усі існуючі прилади, на основі акустичного імпедансного методу передбачають, що показання буде інтерпретувати підготовлений спеціаліст. Тому, в даній роботі пропонується використання методів машинного навчання, котрі дають змогу «навчити» штучну нейронну мережу самостійно робити висновок про наявність або відсутність дефекту. Це дає змогу використовувати прилад людині, котра не має спеціальної підготовки в проведенні аналізу показань акустичного імпедансного контролю.

Мета роботи - дослідити можливість використання нейронних мереж для прийняття рішень при імпульсному імпедансному контролі.

Завдання дослідження – розробити нейронну мережу для оцінки наявності дефектів в композитних матеріалах; «навчити» нейронну мережу

розрізняти дефектні та бездефектні зразки на основі одного інформативного параметру контролю за допомогою спеціальних еталонних зразків з заздалегідь відомими дефектами; «навчити» нейронну мережу робити висновки про наявність дефектів в зразках з невідомим положенням та типом дефекту на основі декількох інформативних параметрів.

Об'єкт дослідження - методи машинного навчання для виявлення дефектів при імпульсному імпедансному контролі композиційних матеріалів.

Предмет дослідження - процес прийняття рішень на основі аналізу інформативних параметрів первинного перетворювача акустичного імпульсного імпедансного дефектоскопу.

Задача дослідження - розробити нейронну мережу для оцінки наявності дефектів в композитних матеріалах.

1. Аналітичний огляд

1.1. Опис об'єкту контролю

В якості об'єкту контролю виступають сотові панелі, як один з видів композиційних матеріалів.

Сотова панель (рис.1.1) - тришарова панель, що складається з верхньої та нижньої обшивок і сотового заповнювача між ними. Між двома листами знаходиться внутрішній прошарок - наповнювач чотирьох- або шестикутної форми, який представлений у вигляді «медової соти». Ця конструкція є багат шаровою. Верхня обшивка сприяє стисненню, нижня – розтягуванню, а сотовий заповнювач з'єднаний із зовнішніми і внутрішніми обшивками. (рис.1.2.)

Сотові панелі застосовуються в літакобудуванні для зовнішньої обшивки, стінок силових елементів та підлог. Часто повністю заповнюються сотами елементи малої товщини: рулі, елерони надзвукових літаків. Сотові панелі також дуже часто використовуються у будівництві житлових будинків для козирків, навісів, балконів і т.д.

Будова сотового заповнювача:

Сотовий заповнювач має «коміркову» структуру. Ця структура складається з тонколистового матеріалу і являє собою канали, які ізольовані один від одного. Ці осередки можуть складатися з 5-ти і 6-ти граней.

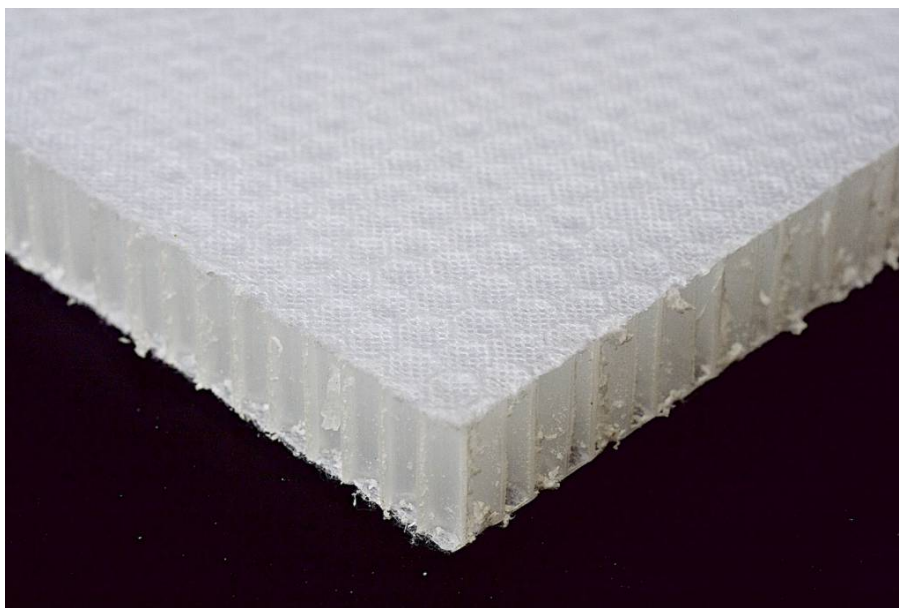


Рис.1.1. Сотова панель

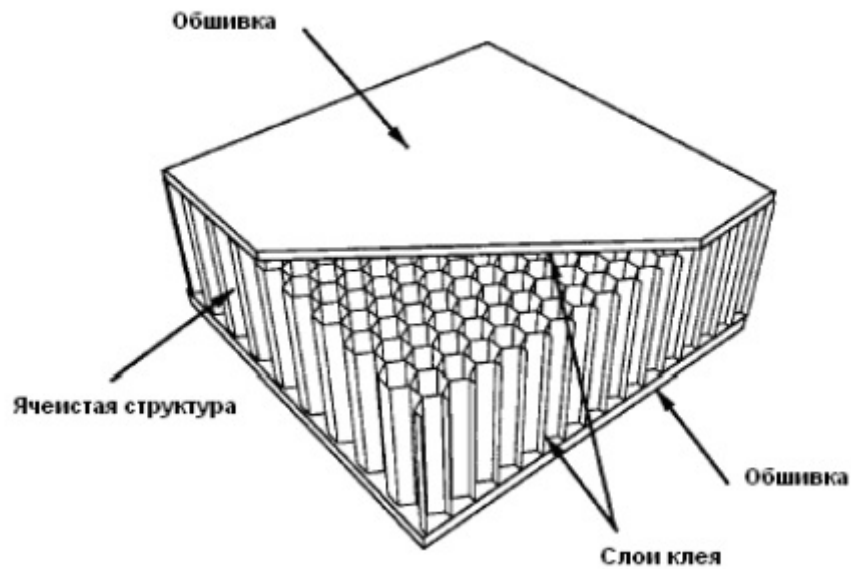


Рис.1.2. Будова сотової панелі

Переваги:

- мала маса конструкції
- висока жорсткість
- питома статична міцність більше на 20-40%
- стійкість при повздовжньому стисканні вище в 2-4 рази
- кількість деталей, що входять в вузол або агрегат, менше в 3-4 рази
- більш гладкі поверхні вузлів і агрегатів
- теплоізоляційні властивості вище в 3-5 разів
- акустичні характеристики краще в 3-5 разів

Недоліки:

- складність контролю якості клейового з'єднання обшивки і сотового заповнювача
- скупчення конденсату усередині панелі, що може призводити до прискорення процесу корозії
- відносно висока вартість виготовлення
- трудомісткість виготовлення і проектування більше на 15-20%

1.2. Опис основних дефектів

Основними дефектами в багатошарових сотових конструкціях є дефекти типу непоклеїв та розшарувань – найбільш небезпечні дефекти. Крім того можлива поява таких дефектів, як зони пониженої міцності зклеювання, котрі при експлуатації виробів, навіть при порівняно невеликих навантаженнях, можуть призвести до появи розшарувань в з'єднаннях (рис.1.3). [1]

Основними дефектами сотових конструкцій в літаках є:

1) відшарування сот від обшивки внаслідок непоклея і зім'яття сот (даний вид дефекту виникає як в силу технологічних причин, так і в ході експлуатації);

2) вода, що заповнює повністю або частково одну чи більше комірок (виникає в ході експлуатації літака внаслідок потрапляння води ззовні через технологічні нещільності панелей крил, фюзеляжу, кіля та інших частин літаків).

Фактично перший вид дефекту в більшості випадків також виникає внаслідок наявності в сотах води.



Рис.1.3. Приклад розшарування сотової панелі

На рис. 1.4. показано основні типи пошкоджень сотових панелей.

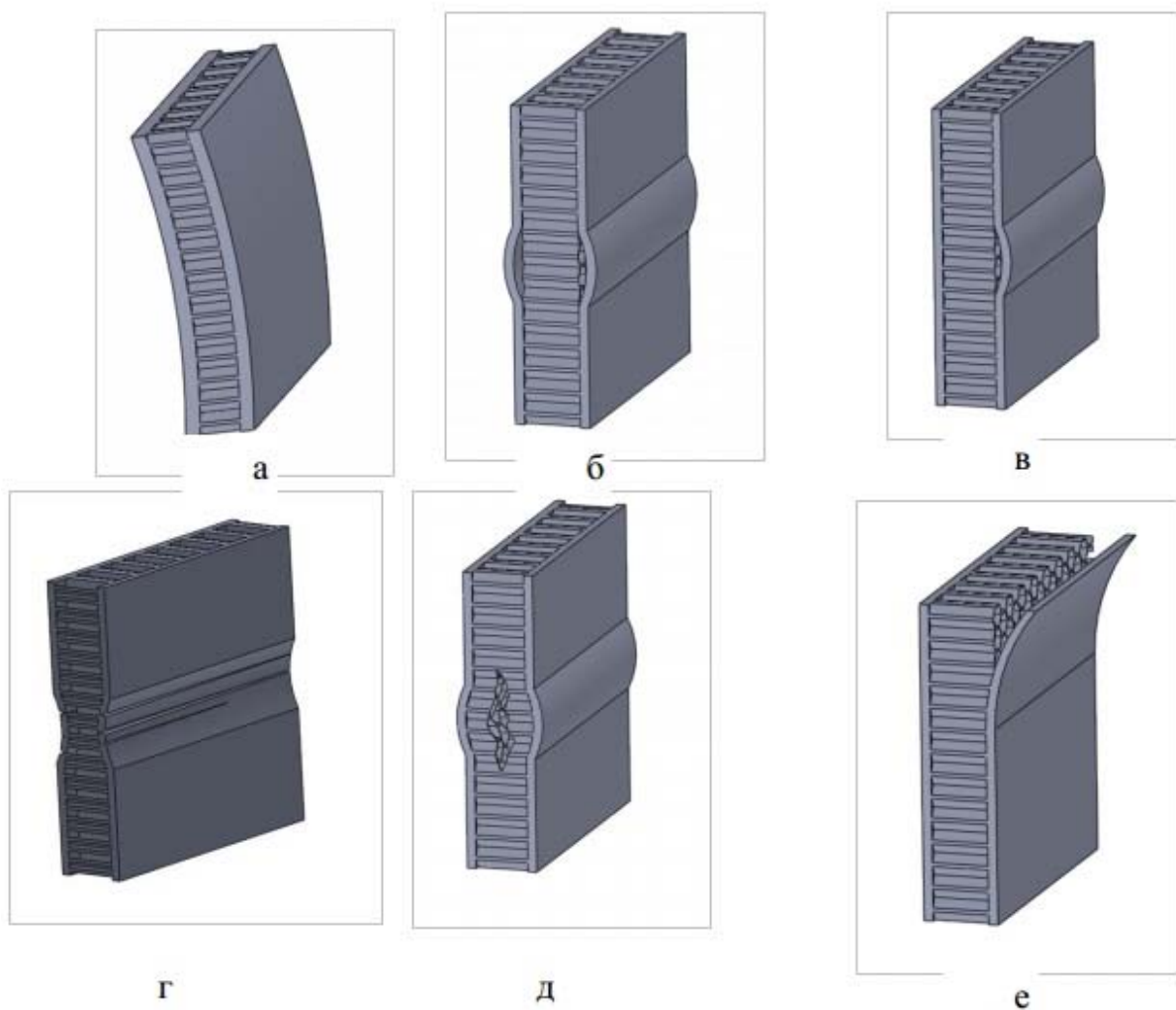


Рис.1.4. Основні типи ушкоджень тришарової панелі: а - загальна втрата стійкості; б - г - місцева втрата стійкості; д - руйнування сотового заповнювача; е – відшаровування

1.3. Існуючі акустичні методи контролю.

Акустичними методами називаються такі методи, котрі базуються на використанні пружних коливань і хвиль будь-яких частот. Методи, що використовують частоти від 20 кГц до 100 МГц називаються ультразвуковими. Акустичні методи поділяють на дві групи: активні та пасивні методи. Активні засновані на випромінюванні і прийомі пружних хвиль, пасивні - тільки на прийомі хвиль, джерелом яких служить сам об'єкт контролю.

Активні методи поділяються на методи проходження, відбивання, комбіновані (використовують як проходження, так і відбивання), імпедансні та методи власних коливань. Найбільше поширення одержали наступні методи дефектоскопії: тіньовий, ехо-імпульсний, резонансний, імпедансний і вільних коливань. [2]

Імпедансний метод контролю заснований на вимірі сили реакції, що прикладається до датчика об'єктом контролю. Даний метод доцільно застосовувати для контролю якості покриття робочих поверхонь деталей. Схема роботи імпедансного методу показана на рис. 1.5.

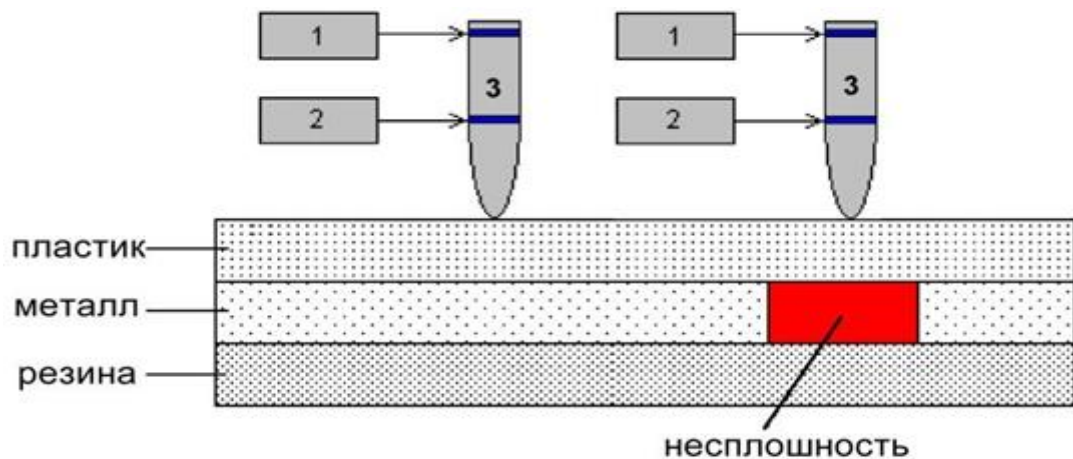


Рис. 1.5. Імпедансний метод (1 - генератор, 2 - аналізатор, 3 - стрижень, що коливається)

Метод вільних коливань заснований на зміні частоти вільних коливань контрольованого об'єкту. Якщо на виріб впливати різким ударом, то в ньому виникнуть вільні коливання. Частота цих коливань визначається інерційно-пружними параметрами деталі, які залежать від фізичної однорідності матеріалу. Наявність неоднорідностей призводить до зміни пружних властивостей, що змінює частоту вільних коливань. Структурна схема методу вільних коливань представлена на рис. 1.6.

Пасивні акустичні методи засновані на аналізі пружних коливань, що виникають безпосередньо у контрольованому об'єкті. При вивченні емісії хвиль

напруження ряду металів і висушеної деревини було відзначено, що, якщо метал навантажувати до певного рівня, то спостерігається «вибух» шуму, але при повторному навантаженні подібного ефекту не спостерігається доти, поки величина навантаження не перевищить первісне значення.

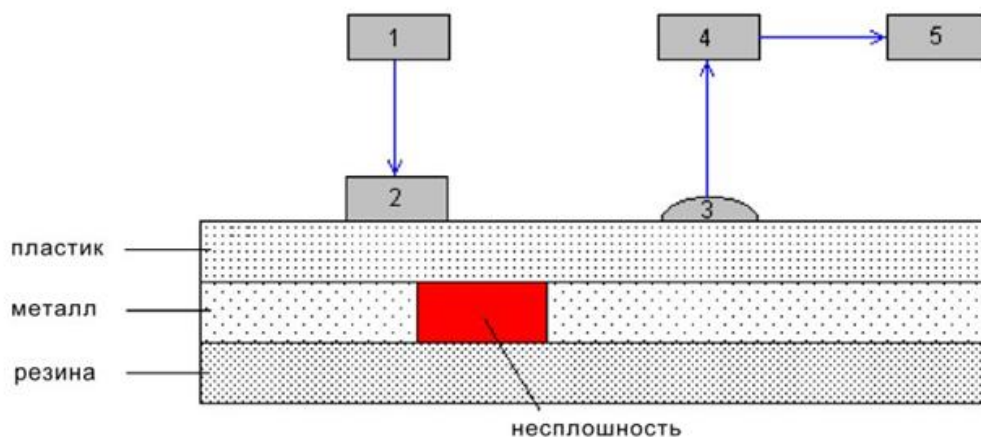


Рис. 1.6. Схема методу вільних коливань(1 - генератор, 2 - вібратор, 3 - приймач, 4 - спектроаналізатор, 5 –індикатор)

Основні недоліки акустичного неруйнівного контролю: майже неможливо дати відповідь на питання про реальні розміри дефекту, так як розмір дефекту визначається його відбивчою здатністю і тому за результатами контролю дається еквівалентний розмір дефекту (наприклад: наявні у виробі два реальні дефекту одного розміру і форми, розташовані на одній глибині, але один з яких заповнений повітрям, а другий шлаком даватимуть відображені імпульси різної амплітуди і, відповідно оцінені як дефекти, що мають різні розміри).

Слід зазначити, що, деякі дефекти в силу їх характеру, форми або розташування в об'єкті контролю практично неможливо виявити акустичними методами. Крім того, складно провести контроль деталей невеликої розміру і товщини, а також деталей, що мають складну форму з криволінійними і сферичними поверхнями малого радіусу.

Крім того, при проведенні акустичного контролю, на відміну від радіографічного, як правило, неможливо однозначно охарактеризувати дефект (шлакове включення, пора, Вольфрамове включення та ін). Також виникають

труднощі при акустичному контролі металів з крупнозернистою структурою через велике розсіювання та сильне загасання хвиль. Необхідна підготовка поверхні контролю для введення хвиль в метал, а саме: очищення поверхні контролю від забруднень, що відшаровується, окалини, іржі, бризок розплавленого металу та ін та створення необхідної шорсткості поверхні не гірше Rz 40 і хвилястості не більше 0015, так як навіть невеликий повітряний зазор між п'єзоелектроперетворювачем (ПЕП) і виробом може стати нездоланною перешкодою для поширення хвиль в ОК. [3]

Акустичне дослідження не руйнує і не пошкоджує зразок, що є його головною перевагою. Так само можна виділити високу швидкість і достовірність контролю при низькій вартості і безпеці для людини.

1.4. Вибір та обґрунтування імпедансного методу контролю

У сучасному авіабудуванні широко застосовуються композитні матеріали, яким характерні малі модулі пружності, істотні відмінності фізико-механічних властивостей, що входять до їх складу. Одним з найбільш перспективних методів контролю композитів є акустичний імпедансний метод, що дозволяє виявляти дефекти типу розшарувань, непроклеїв, внутрішніх ушкоджень та ін. За даними авіаремонтних підприємств, до 1/3 від загального обсягу робіт по неруйнівному контролю авіаційної техніки доводиться саме на імпедансний метод. Ознакою дефекту в даному методі є зміна комплексного механічного імпедансу контрольованого виробу в зоні його контакту з перетворювачем, що збуджує у виробі згібні коливання звукових частот. Ця зміна фіксується по зміні параметрів інформаційного сигналу, одержаного з первинного перетворювача.

Існуючі прилади й системи неруйнівного контролю, що реалізують імпедансний метод не використовують весь обсяг інформації, що несе інформаційний сигнал, як правило про наявність дефекту в контрольованій зоні судять по зміні лише амплітуди при імпульсному збудженні та амплітуди й фази при неперервному збудженні перетворювача. Це накладає істотне обмеження на

одержання діагностичних параметрів, чутливих до деяких видів небезпечних дефектів і знижує вірогідність контролю.

Обґрунтування вибору даного методу акустичного неруйнівного контролю полягає в тому, що імпедансний метод дозволяє досить точно виявити місце знаходження дефекту в обраному об'єкті контролю порівняно незначних ресурсах. [4]

При використанні поперечних хвиль перетворювач стрижневого типу (рис. 1.7) містить з'єднаний з генератором випромінючий та приймальний п'єзоелементи. Через сухий точковий контакт перетворювач збуджує в виробі гармонійні коливання. У зоні дефекту з'єднання модуль механічного імпедансу зменшується і змінюється його аргумент φ . Ці зміни реєструються електронною апаратурою. В імпульсному варіанті цього методу в системі перетворювач - виріб збуджують імпульси вільно-згасаючих коливань. Ознакою дефекту служить зменшення амплітуди і частоти цих коливань. [5]

Крім суміщеного перетворювача застосовують роздільно-суміщені перетворювачі, що мають в загальному корпусі роздільні випромінючий та приймальний вібратори. Ці перетворювачі працюють в імпульсному режимі. При роботі суміщеними перетворювачами використовують частоти до 8 кГц, роздільно-суміщеними - імпульси з частотами 15 ... 35 кГц. [6]

В іншому варіанті в контрольованій багатошаровій конструкції за допомогою плоского п'єзоперетворювача збуджують поздовжні пружні хвилі фіксованої частоти. Дефекти реєструють по зміні вхідного електричного імпедансу Z п'єзоперетворювача. Імпеданс визначається вхідним акустичним імпедансом контрольованої конструкції, залежать від наявності та глибини залягання дефектів з'єднання між її елементами. Зміни імпедансу представляють у вигляді точки на комплексній площині, положення якої залежить від характеру дефекту. На відміну від методів, які використовують поперечні хвилі, перетворювач контактує з виробом через шар контактної рідини. [7]

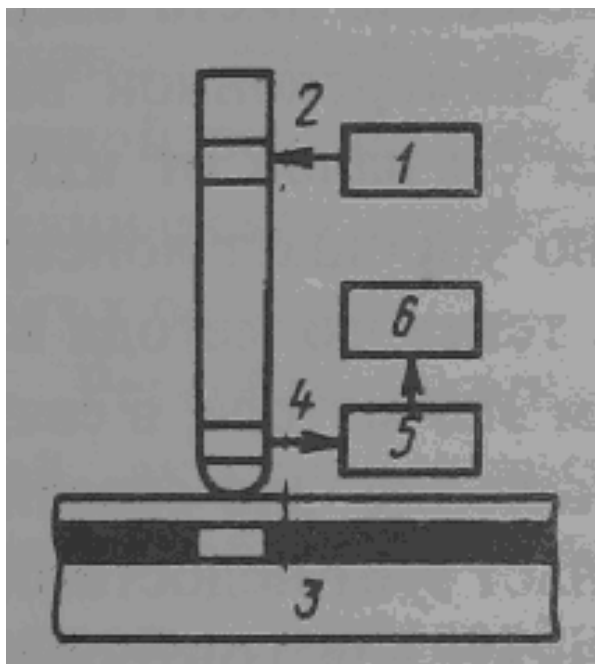


Рис.1.7. Схема роботи імпедансного методу контролю (1 - генератор; 2 - випромінювач; 3 - об'єкт контролю; 4 - приймач; 5 - підсилювач; 6 - блок обробки інформації з індикатором)

1.5. Штучні нейронні мережі

Системи, що базуються на використанні штучних нейронних мереж дозволяють досить успішно вирішувати задачі розпізнавання образів, класифікації даних, оптимізації тощо. [8]

Штучний нейрон є концептуальною моделлю біологічного нейрону, а ШНМ можна вважати електронною моделлю структури мозку, який навчається з досвіду. За допомогою блоків нейромереж можуть бути вирішені проблеми, котрі не підвладні розв'язанню наявними комп'ютерами.

Сучасні комп'ютери з архітектурою фон Неймана не мають властивостей, котрі має людський мозок, а саме:

- розподілене представлення інформації і паралельні обчислення;
- здатність навчатися й узагальнювати;
- адаптивність;
- толерантність до помилок;
- ефективне енергоспоживання. [9]

Така модель нейронних мереж, як штучний нейрон моделює функції природного аналога (рис. 1.8).

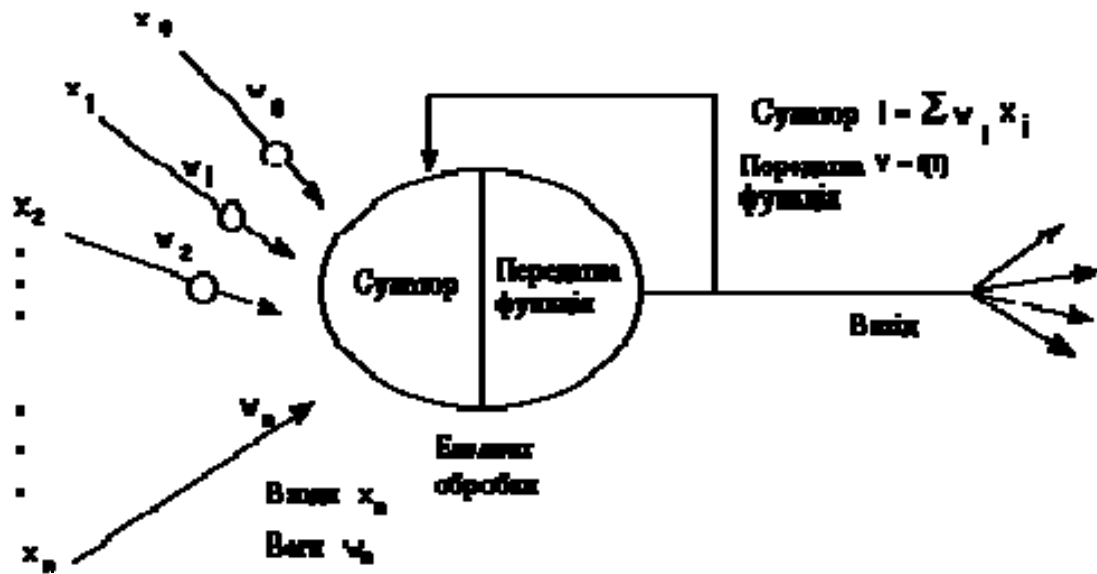


Рис. 1.8. Базовий штучний нейрон

Вхідні сигнали x_n зважені ваговими коефіцієнтами з'єднання w_n додаються, проходять через передатну функцію, генерують результат і виводяться. У пакетах програм, що наявні на даний момент, штучні нейрони називаються «елементами обробки» і мають ширші можливості, ніж базовий штучний нейрон, описаний вище. На рис. 1.9 зображена детальна схема штучного нейрону. [9]

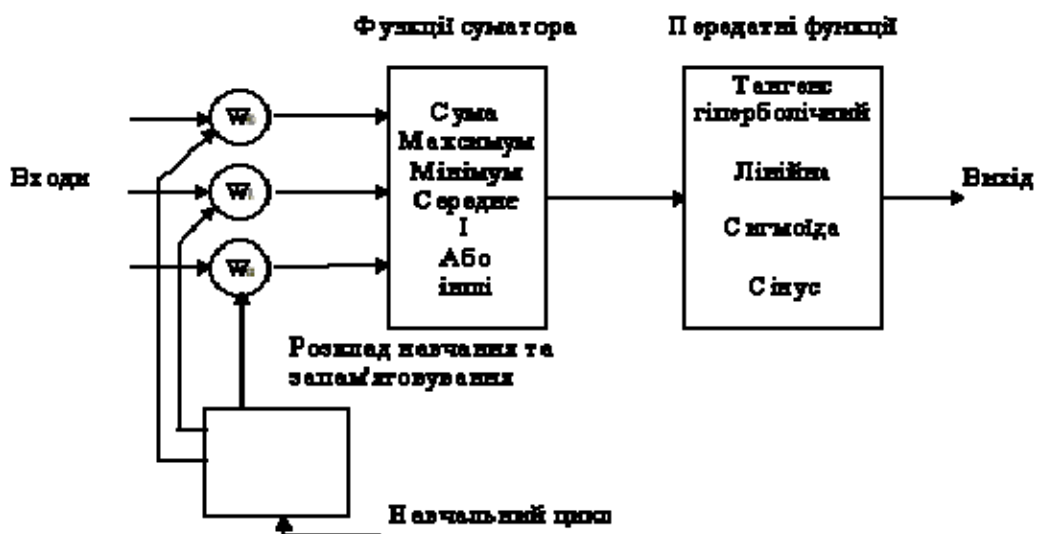


Рис. 1.9. Модель "елементу обробки"

Сигнали зі входу передаються на функцію сумування, яка сумує добутки. Можна обрати декілька різних операцій, такі як усереднення, найбільше або найменше значення, функції Або, І тощо. Окрім того, більшість програм дають змогу інженерам створювати власні функції за допомогою підпрограм, закодованих в мові високого рівня. Інколи до функції сумування додається функція активації для оперування в часі.

В будь-якому випадку функції сумування надсилаються у передатну функцію, що спрямовує весь ряд на дійсний вихід (0 або 1, або які-небудь інші значення). В наявних нейронних мережах в якості передатної функції може виступати сигмоїда, синус, гіперболічний тангенс та інші.

Після процесу обробки сигналу нейрон на виході має результат передатної функції, який поступає на входи наступних нейронів або до зовнішнього з'єднання, як це передбачено структурою нейронної мережі.

Усі штучні нейронні мережі конструюються з базового блоку формування – штучного нейрону. Наявні різноманітності та фундаментальні відмінності є полем для творчості розробників для реалізації нейромереж для вирішення різних типів завдань.

На рисунку 1.10 зображена типова структура штучних нейронних мереж. Існують мережі, в яких міститься лише один шар або навіть один елемент. Більшість задач вимагають як мінімум три типи шарів: вхідний, внутрішній та вихідний. На шар вхідних нейронів поступають заздалегідь підготовлені дані з вихідних файлів або безпосередньо з давачів. Вихідний шар передає інформацію до зовнішнього середовища або до вторинних комп'ютерних процесів та інших пристроїв. Між цими двома шарами може бути необмежена кількість прихованих внутрішніх шарів, що містять певне число нейронів в залежності від поставленої задачі. Входи та виходи кожного з внутрішніх шарів передають значення на наступні нейрони. [10]

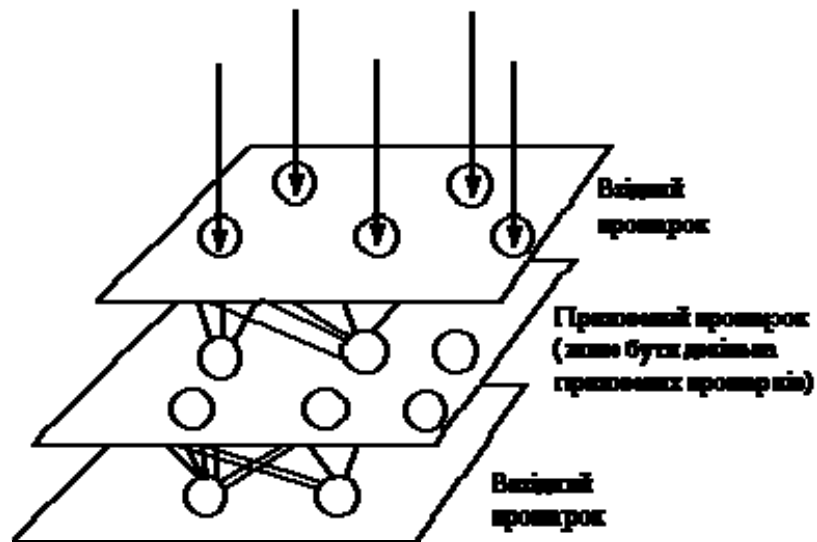


Рис. 1.10. Діаграма простої нейронної мережі

Напрямок зв'язку від одного нейрону до іншого є одним з основних аспектів нейронних мереж. У більшості з них нейрони внутрішнього шару отримують сигнали від нейронів попереднього шару та, звичайно, від вхідного шару. Після проведення операцій з сигналами, нейрони передають значення виходу до наступного шару, що забезпечує шлях передачі вперед (feedforward) в напрямку виходу.

При використанні зворотнього зв'язку, вихід нейронів зкерується до попереднього шару (рис 1.11).

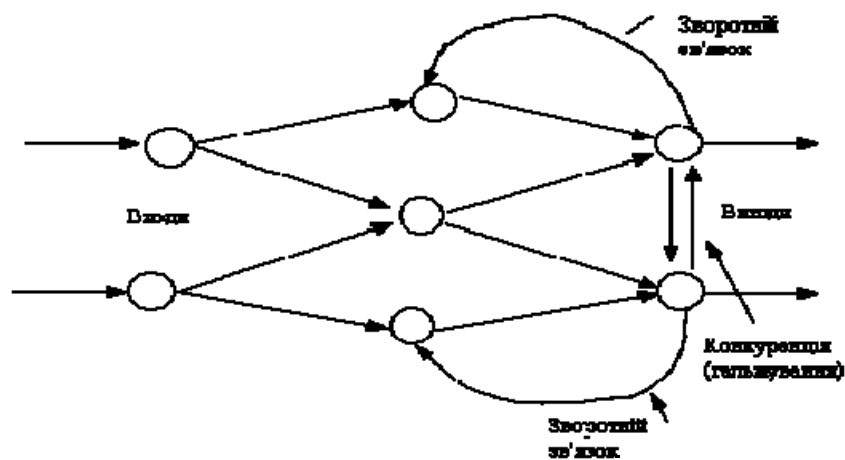


Рис. 1.11. Нейронна мережа зі зворотнім зв'язком

Напрямок шляху, якими з'єднуються нейрони між собою має значний вплив на роботу мережі. Більшість професіональних інструментів розробки програмного забезпечення дозволяють додавати, вилучати та керувати зв'язками як завгодно. При керуванні параметрами, зв'язки можна робити збуджуючими або гальмуючими. [11]

1.6. Навчання штучної нейронної мережі

Фундаментальна функція мозку – це здатність до навчання. Цей процес може розглядатися як визначення архітектури нейронної мережі і налаштування вагів синапсів для ефективного виконання спеціальних задач.

Нейронна мережа налаштовує значення вагів по навчальній множині. Здатність мережі до навчання на прикладах робить її більш ефективною в порівнянні з системами, що працюють згідно системи встановлених правил, що сформульовані експертами.

Для так званого навчання необхідно мати модель зовнішнього середовища, у якій працює нейронна мережа та потрібна для вирішення задачі. Також необхідно визначити, як модифікувати вагові коефіцієнти мережі. Алгоритмом навчання називається процедура, в якій використовують правила навчання для налаштування вагів.

Є три загальні парадигми навчання: з вчителем, без вчителя та змішана. Перша парадигма має у своєму розпорядженні встановлені значення виходів на кожен вхідний масив даних. Ваги встановлюються таким чином, щоб мережа видавала відповіді як можна ближчі до відомих заздалегідь. Навчання без вчителя не потребує встановлення правильних відповідей на кожную навчальну вибірку. В даному випадку розкривається внутрішня структура даних та кореляція між зразками навчальної множини. Це дозволяє розподілити дані по категоріях. При змішаному навчанні частина вагів встановлюється за допомогою навчання із вчителем, а інша визначається за допомогою самонавчання. [9]

1.7. Архітектури нейронних мереж

Властивості ШНМ сильно залежать від її архітектури. Найбільш використовувані архітектури (рис.1.12):

- а) одношарова мережа – по простим ознакам
- б) багатошарова мережа – класифікація по складним ознакам
- с) мережа з рекурентними зв'язками на вхідному шарі – проста динаміка
- д) мережа з рекурентними зв'язками на прихованому шарі – складна динаміка

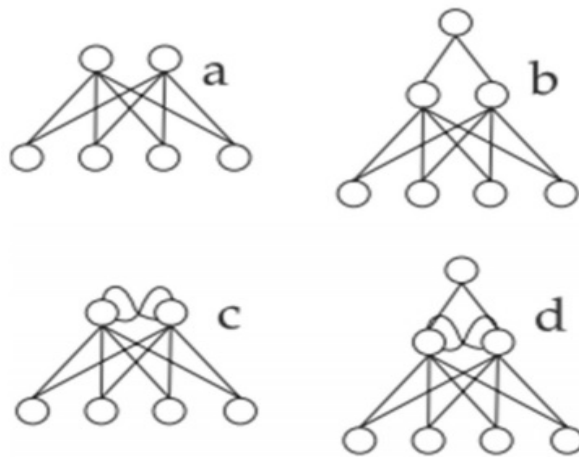


Рис. 1.12. Архітектури нейронних мереж

1.8. Алгоритм використання нейронних мереж в неруйнівному контролі

Алгоритм:

- 1) Провести контроль ділянок стандартних зразків з відомим дефектом та без дефекту
- 2) Створити вектор інформативних параметрів сигналів, отриманих з бездефектної та дефектної ділянок
- 3) Створити нейронну мережу, та в якості навчальних векторів використати вектори, розглянуті в п.2
- 4) Дослідження висновків нейронної мережі про наявність або відсутність дефекту

1.9. Огляд існуючих мобільних систем, що реалізують імпедансний метод неруйнівного контролю

Паралельно з розвитком теоретичних підходів та проведенням експериментальних досліджень розширювалася номенклатура приладів, які базуються на імпульсному імпедансному методі контролю. Одним із перших серійних пристроїв, що широко використовувався на практиці, став ІАД-3, який комплектувався суміщеним перетворювачем та використовував неперервний режим збудження коливань. Реалізовував амплітудний та фазовий режими обробки інформаційного сигналу, забезпечуючи виведення кожного з параметрів на окремий індикатор. Можливість регулювання частоти збудження перетворювача дозволяла використовувати резонансний режим роботи для підвищення чутливості контролю. Дефектоскоп АД-40І є аналогічним ІАД-3 за способом збудження, однак додатково до амплітудної має можливість виконувати амплітудно-фазову обробку сигналу.

Режим імпульсного збудження був використаний в універсальному дефектоскопі багат шарових конструкцій АД-60С, який дозволяє проводити контроль за допомогою імпульсного варіанта імпедансного методу та методу вільних коливань. Пристрій реалізовував аналогову спектральну обробку сигналу на основі набору режекторних фільтрів. Відображення амплітуди окремих гармонік відбувалося за допомогою газорозрядних трубок.

Найбільш поширеними сьогодні є дефектоскопи, що реалізують імпульсний варіант методу.

У табл. 1.1 наведено порівняльний аналіз найбільш розповсюджених типів сучасних імпедансних дефектоскопів разом із розробленою в дисертаційному дослідженні системою неруйнівного контролю.

Таблиця 1.1

Порівняння характеристик існуючих імпульсних імпедансних дефектоскопів

Дефектоскоп	Інформативний параметр	Вибір бракувального порога	Відбір найбільш чутливих інформативних параметрів	Прийняття рішень на основі статистичної оцінки спектрів
АД-42ІМ	Амплітуда сигналу	Вручну	-	Немає
АД-64М	Спектральний розклад	Вручну	Вручну оператором	Немає
АД-701	Оцінки спектрального розкладу	Вручну	Вручну оператором	Немає
ІД-91М	Амплітуда сигналу	Вручну	-	Немає
ІД-910	Амплітуда сигналу	Автоматично, по бездефектній області	-	Немає
АД-60К	Спектральний розклад	Вручну	Вручну оператором	Немає
ДАМИ-С09	Амплітуда, фаза, спектральний розклад	Автоматично, по бездефектній області	Вручну оператором	Немає
Bondmaster 1000e+	Амплітуда, фаза	Вручну	Вручну оператором	Немає

Як видно з наведеної таблиці, розповсюдженими діагностичними ознаками, що застосовуються в сучасних імпедансних дефектоскопах, є пікова амплітуда, фаза та оцінки, отримані на основі спектральних розкладів інформаційних сигналів. Для порівняно простих пристроїв АД-42ІМ, ІД-91М та ІД-910, що реалізують контроль на основі аналізу амплітуди інформаційного сигналу, рішення про наявність дефекту приймається у разі виходу виміряного значення за межі, встановлені при первинному налаштуванні пристрою. Прилади ДАМІ-С09 та Bondmaster 1000e+ дозволяють виділяти амплітуду і фазу інформаційного сигналу перетворювача, представляючи результати оцінки у вигляді годографа. У такому випадку діагностичне рішення приймається при виході маркера за межі, що відповідають бездефектній області контролю. В означених випадках, внаслідок простоти представлення оцінок та обмеженої кількості інформативних параметрів, немає потреби вибору найбільш інформативних діагностичних ознак.

Для приладів, які реалізують спектральну обробку, важливим етапом є процедура вибору окремих гармонік, або діапазонів частот, на основі аналізу яких буде прийматися діагностичне рішення. Фактично амплітуда кожної обраної складової або енергія в обраному діапазоні може вважатися окремою діагностичною ознакою, що, в свою чергу, ставить завдання вибору найбільш чутливих до проявів дефектів, властивих контролюваному класу матеріалів.

Прилади, що використовують оцінки спектральних розкладів для прийняття діагностичних рішень, мають програмні засоби, що дозволяють вибирати діапазони частот або окремі складові як інформативні ознаки контролю. Сигналом про наявність дефекту в цьому випадку вважатиметься вихід значення розрахованої оцінки за межі, встановлені оператором у процесі первинного налаштування.

В якості оцінки спектральних розкладів в сучасних дефектоскопах можуть використовуватися: енергія, локальний максимум або локальний мінімум в обраній полосі частот (АД-60К), сума модулів різниці амплітуд поточного та еталонного спектрів (АД-701), окремі суми складових різниці амплітуд поточного та еталонного спектрів, що мають величину більше або менше нуля (АД-64М).

Вибір гармонік, на основі яких проводиться контроль, покладається на оператора, який шляхом візуального порівняння спектрів, отриманих з доброякісної та дефектної зон контрольованого виробу або стандартного зразка, самостійно робить висновок щодо інформативності ознак. При цьому жоден з наведених приладів не має у своєму складі модулів програмного забезпечення або інших засобів, які б давали можливість обґрунтованого автоматичного вибору гармонік на основі аналізу їх статистичних характеристик та розрахунку показників, що відображають величину впливу дефекту на обрану інформативну ознаку.

Вибір бракувального порога виконується оператором згідно методики контролю шляхом налаштування дефектоскопа на моделях дефектів, відтворених на стандартних зразках, дефектних або бездефектних ділянках контрольованого виробу. Більшість дефектоскопів реалізують процедуру ручного налаштування, у процесі якої оператор встановлює бракувальний рівень, орієнтуючись на впевнене виявлення дефекту та зменшення спрацювань у бездефектній області.

Автоматичне налаштування застосовується в дефектоскопах ДАМІ-С09 та ІД-910. У першому пристрої шляхом переміщення перетворювача по бездефектній області на годографі формується зона, вихід маркера за межі якої призводить до формування сигналу про наявність дефекту. ІД-910 реалізує автоматичне налаштування шляхом аналізу рівня сигналу, отриманого при скануванні бездефектної зони протягом 3 – 5 секунд.

В обох з наведених випадків бракувальний рівень визначається на основі усереднених даних без урахування похибок першого та другого роду, а також без характеристик закону розподілу інформативного параметра. Крім того, в процесі налаштування не проводиться розрахунок достовірності виявлення дефекту, що може відрізнитися, залежно від обраних параметрів налаштування дефектоскопа, типу перетворювача та інформативного параметра, за яким відбувається прийняття діагностичного рішення.

Дефектоскоп акустичний АД-42ИП(рис. 1.13). Прилад виробляється НВО «Спектр», Москва. Даний дефектоскоп відноситься до засобів виявлення дефектів та призначений:

- для виявлення дефектів з'єднань (в основному клейових) між елементами багат шарових конструкцій з ПКМ та металів, що застосовуються у різних поєднаннях
- для виявлення розшарувань, порожнин, та сторонніх включень в шаруватих пластиках

Матеріалами зовнішніх елементів (обшивок) контрольованих конструкцій можуть бути метали, скло-, органо- та вуглепластики, полімерні армовані та неармовані покриття. Матеріалами внутрішніх елементів можуть бути метали, полімерні матеріали, стільникові заповнювачі з металів та неметалів, жорсткі пінопласти. Контроль відбувається при односторонньому доступі по сухим поверхням виробів без застосування контактних сумішей. Дефектоскоп має мікропроцесорну систему збору, збереження та обробки даних. Характерною особливістю дефектоскопу є можливість відображення сигналу на РК екрані. В комплект системи входять наступні перетворювачі:

- ПА-4С – суміщений, з одним складеними вібратором, що включає в себе випромінюючий та приймаючий п'єзоелемент та має одну зону контакту з ОК.
- ПА-5Р, ПА-7Р – розподілено-суміщені перетворювачі, що містять по два акустично та електрично ізольовані вібратори один з яких призначений для випромінювання, а другий для прийому коливань. Перетворювачі відрізняються довжиною вібраторів та власними робочими частотами.



Рис 1.13 Зовнішній вигляд дефектоскопу АД-42 ИП

У якості інформативного параметру контролю використовується спектральна щільність потужності сигналу в зоні навколо резонансної частоти перетворювача. В процесі контролю відбувається порівняння спектральних щільностей сигналів в дефектній та бездефектній зонах.

Дефектоскоп акустичний АД-64М. Прилад виробляється НВП «Спектр» Дефектоскоп відноситься до засобів виявлення дефектів та призначений:

- для виявлення дефектів з'єднань (в основному клейових) між елементами багат шарових конструкцій з ПКМ та металів, що застосовуються у різних поєднаннях
- для виявлення розшарувань, порожнин, та сторонніх включень в шаруватих пластиках

Прилад дозволяє контролювати широкий діапазон матеріалів: від сталі до пінопласту і в тому числі конструкції із м'якими внутрішніми та зовнішніми елементами.

В дефектоскопі реалізовано два методи акустичного низькочастотного контролю: локальний метод вільних коливань та імпульсний імпедансний метод. Контроль проводиться при односторонньому доступі без застосування контактної рідини. Особливістю системи є її реалізація на базі мобільного ПК. В комплекті присутні два перетворювачі:

- ПС-1 — мікрофонний перетворювач що використовується при контролі за допомогою методу вільних коливань
- ПИ-1 — розподілено-суміщений імпедансний перетворювач

Прийняття рішення про наявність дефекту виконується на основі порівняння спектральних щільностей та спектральних щільностей потужності сигналів із бездефектної та дефектної зон. В якості інформативного параметру використовується амплітуда складових різницевого спектру сигналів.

Акустичний дефектоскоп ИД-401(рис 1.14). Прилад виробляється НВП «Контроль, измерение диагностика», Москва. Даний дефектоскоп призначений для виявлення локальних розшарувань та порушень суцільності структури в

багатошарових клеєних конструкціях та інших виробках виконаних із композиційних матеріалів, що використовуються в авіабудуванні, корабле- та машинобудуванні. Мінімальна площа дефекту, що може бути виявлений становить $1,2 \text{ см}^2$ в сприятливих умовах (наприклад, під обшивкою із склопластика товщиною 0,5 мм приклеєного до жорстокої основи).

Присрій комплектується двома перетворювачами: ПИ-101 – розподілено суміщений та ПИ-102 суміщений. ПИ-101 призначений для виявлення дефектів типу «непроклей» та «розшарування»: в металічних конструкціях — 0,5 2,0 мм, в конструкціях із ПКМ — 0,15 – 8,0 мм. ПИ-102 призначений для виявлення дефектів зазначених типів на відносно малих глибинах залягання: в металічних конструкціях 0,5 – 1,5 мм, в конструкціях з ПКМ 0,15 – 3,0 мм, а також контролі криволінійних поверхонь з малими радіусами кривизни: випуклих $> 6 \text{ мм}$ та увігнутих $< 20 \text{ мм}$



Рис 1.14 Зовнішній вигляд дефектоскопу ИД-401

Інформативним параметром контролю є рівень амплітуди сигналу, пороги спрацювання якого встановлюються виходячи із значень отриманих на дефектній та бездефектній ділянках виробу.

Акустичний дефектоскоп АД-701(рис 1.15). Прилад виробляється НВП «Контроль, измерение, диагностика» Москва. Даний низькочастотний акустичний дефектосп призначений для неруйнівного контролю багатошарових конструкцій

та виробів із шаруватих пластиків. Він забезпечує виявлення дефектів переважно клейових з'єднань між елементами багат шарових конструкцій із ПКМ, та металів у різних поєднаннях та також розшарувань шаруватих пластиках. Дефектоскоп реалізує два методи НК: локальний метод вільних коливань та імпульсний імпедансний метод із використанням розподілено суміщеного перетворювача. В комплект входять два типи первинних перетворювачів:

- Розподілено-суміщений імпедансний перетворювач ПИ-101;
- Перетворювач ПС-101 з ударним вібратором та електретним мікрофоном для методу вільних коливань;

Мінімальна площа дефекту, що може бути виявлений у сприятливих умовах становить 1,2 см².

В режимі «Спектр» в якості інформативного параметру використовується амплітуда гармонік виділеної ділянки різницевого спектру між еталонним та поточним спектрами. Сигналізація про наявність дефекту може бути викликана перевищенням порогу будь якою або лише вибраними гармоніками. Найбільш інформативні гармоніка виділяються оператором самостійно на основі порівняльного аналізу спектрів.

В режимі «Слід» за інформативний параметр приймається сума по модулю різницевого спектру.



Рис 1.15 Зовнішній вигляд дефектоскопу АД-701

Акустичний імпедансний дефектоскоп ИД-91М (рис.1.16). Даний прилад виробляється НВП АКА-Контрол, Москва. Дефектоскоп призначений для

виявлення локальних розшарувань та порушень внутрішньої структури багат шарових клейних конструкцій у т.ч зі стільниковим заповнювачем, що застосовуються в сучасному авіабудуванні. В приладі реалізовано імпульсний імпедансний метод контролю. Глибина залягання дефектів, що виявляються за допомогою пристрою:

В конструкціях із алюмінієвих сплавів 0,5 – 7 мм

В конструкціях із ПКМ – 0,15 – 3,0 мм

Мінімальний розмір дефектів, що можуть бути виявлені в ПКМ суміщеним перетворювачем – 5 мм, розподілено-суміщеним перетворювачем 8 мм. Дефектоскоп має реєстраційний сертифікат Федеральної авіаційної служби Росії № 89-09-99. На сьогоднішній день використовується у як робочий засіб контролю композиційних матеріалів на АНТК «Антонов». Стандартна комплектація включає суміщений та розподілено-суміщений перетворювачі.

У якості інформативного параметру використовується амплітуда вхідного сигналу пропорційну модулю механічного імпедансу контрольованої зони. Значення амплітуди виводиться на індикатор на передній панелі приладу проградуирований в мкА. Поріг спрацювання сигналізації постійний, та становить 60 мкА. Налаштування дефектоскопу проводиться шляхом встановлення попереднього підсилення таким чином, щоб покази індикатору при скануванні бездефектної зони становили 70-75 мкА (РСП) або 75 – 80 мкА (СП) після чого перевіряється якість виявлення імітацій дефектів на стандартних зразках.



Рис 1.16 Зовнішній вигляд дефектоскопу ИД-91М

Акустичний імпедансний дефектоскоп ИД-910 (рис.1.17). Прилад виробляється НВП АКА-Контрол, Москва. Дефектоскоп призначений для неруйнівного контролю багат шарових клеєних конструкцій з ПКМ, виявлення локальних розшарувань та порушень суцільності. Прилад реалізує імпульсний імпедансний метод контролю. Характерною особливістю є інтеграція в одному корпусі електронного блоку дефектоскопу та суміщеного імпедансного перетворювача. Розподілено-суміщений перетворювач підключається окремо. Глибина залягання дефектів, що можуть бути виявлені у сприятливих умовах:

- В конструкціях з алюмінієвих сплавів 0,5 – 2,0 мм
- В конструкціях з ПКМ 0,15 – 8,0 мм

Інформативним параметром при контролі є рівень амплітуди сигналу, що проходить через цифровий фільтр режим, роботи якого вибирається в залежності від модуля пружності матеріалу: «Hard» - для жорстких, «Soft» - для м'яких. Налаштування приладу виконується в ручному та автоматичному режимах по бездефектній та дефектній зонах. При автоматичному налаштуванні встановлюється фіксований поріг, після чого виконується сканування бездефектної зони виробу або стандартного зразка. В ручному – встановлюється мінімальний поріг спрацювання при скануванні дефектної області стандартного зразка або відповідної зони ОК.



Рис 1.17 Зовнішній вигляд дефектоскопу ИД-910

Акустичний дефектоскоп універсального призначення АД-60К (рис 1.18).

Прилад виробляється науково-виробничим центром неруйнівного контролю «Кропус» та призначений для контролю композиційних та інших матеріалів для яких характерним є високе затухання зондуючого сигналу. Він дозволяє виявляти непоклеї, розшарування, внутрішні дефекти структури і т.п і т.д. Дефектоскоп реалізує імпульсний варіант імпедансного методу та контроль методом вільних коливань і позиціонується як сумісний з будь яким топом ударного (як мікрофонним так і п'єзоелектричним) та імпедансного (суміщений, розподілено-суміщений) перетворювача.



Рис 1.18 Зовнішній вигляд дефектоскопу АД-60К

Прийняття діагностичних рішень базується на спектральній обробці інформаційного сигналу із використання попередньої цифрової обробки у вигляді вікна Хаммінга. У якості інформативних параметрів використовується рівень складових вибраних ділянок спектру. Функціонал приладу дозволяє встановити незалежні один від одного порогові значення в чотирьох частотних областях за якими відбувається спрацювання сигналізації про наявність дефекту. В залежності від методики контролю сигналізатор може бути налаштований на фіксацію моменту перевищення або недосяжності порогу.

Універсальний дефектоскоп композиційних матеріалів ДАМИ-С09. Прилад виробляється групою компаній ВОТУМ, Москва. Дефектоскоп реалізує наступні методи контролю:

- імпульсний варіант імпедансного методу

- вихрострумний;
- ударний метод (локальний метод вільних коливань).

Дефектоскоп дозволяє проводити контроль:

- Шаруваті конструкції з неметалічних матеріалів (вуглепластиків, склопластиків, текстолітів)
- Стільникові конструкції з неметалічними обшивками та сотами з поліамідного паперу та інших матеріалів
- Стільникові конструкції з металічними обшивками (в т.ч. з перфорацією)
- Конструкції з різноманітними заповнювачами
- Шаруваті клеєні конструкції (2-х, 3-х 4-х шарів)
- Грубі стільникові та інші структури з поверхнями з регулярною зміною або змінною товщиною

Умовна чутливість дефектоскопу, тобто можливість виявлення дефектів у відповідному стандартному зразку для імпедансного методу становить 12 мм на 12 мм.

Характерною особливістю приладу є реалізація його функцій у вигляді пакетів програмного забезпечення, які можуть бути встановлені на дефектоскоп, видалені або оновлені користувачем самостійно. По замовчуванню в стандартній комплектації присутні три пакети: «Імпедансний дефектоскоп», «Ударний дефектоскоп» та «Вихрострумний дефектоскоп», але обмежені за кількістю запусків.

В режимі імпульсного імпедансного дефектоскопу пристрій дозволяє:

- виконувати контроль композиційних структур на наявність не проклею, розшарувань, зон аномальної щільності та ін..
- використовувати для проведення контролю перетворювачі суміщений ПАДИ-8-02 та розподілено суміщений РС-1-02 перетворювачі
- отримувати двовимірні зображення виявлених дефектів (С-скан)

У якості інформативних параметрів контролю використовуються амплітуда та фаза інформаційного сигналу перетворювача. Контроль та прийняття діагностичних рішень проводиться в двох режимах. Перший – представлення результуючого маркера у вигляді точки на комплексній площині, що включає в себе амплітуду та фазу сигналу, другий – аналіз фази представлений у вигляді нахилу вектору на круговій діаграмі. Первинне налаштування відбувається наступним чином: на першому етапі перетворювач встановлюється на бездефектній ділянці ОК або стандартного зразка після чого запам'ятовується поточне значення параметру, далі виконується сканування бездефектної області, для того, щоб окреслити область можливої зміни параметру.

Діагностичне рішення приймається у випадку виходу контрольованого параметру за встановлені в процесі налаштування межі годографу або кругової діаграми.

Висновки

У даному розділі було проведено аналіз об'єкту контролю – композиційних матеріалів. Визначені найбільш типові дефекти. Проведено аналіз акустичного неруйнівного контролю та його методів. Також було проведено огляд існуючих приладів та систем, в яких реалізовано даний метод для дефектоскопії композиційних матеріалів. Із усіх вищерозглянутих методів, імпедансний є найбільш оптимальним. Він дозволяє досить точно виявити місце знаходження дефекту в обраному об'єкті контролю при порівняно незначних ресурсах.

За рахунок використання методів машинного навчання, даний метод контролю дає змогу точно та ефективно виділяти діагностичні ознаки в об'єктах контролю, не залежно від рівня підготовки спеціаліста.

2. Акустичний імпедансний метод контролю

2.1. Імпульсний варіант імпедансного методу

Імпедансні методи засновані на оцінці змін механічного імпедансу ОК, обумовлених наявністю дефектів або впливом інших факторів (наприклад, твердості). Розрізняють методи, що використовують огинаючі, поздовжні хвилі й контактний імпеданс. Перші два методи служать в основному для НК з'єднань у багатошарових конструкціях, третій - для виміру твердості. Методи, засновані на застосуванні огинаючих хвиль і контактного імпедансу, використовують сухий точковий контакт (СТК) перетворювача з ОК. Такий же контакт має місце й у деяких інших приладах, наприклад в еходефектоскопах і товщиномірах для контролю бетону, а також Мск-дефектоскопах. У всіх цих випадках властивості СТК у значній мірі визначають експлуатаційні можливості апаратур.

В імпульсному варіанті імпедансного методу, випромінюючий п'єзоелемент сполученого перетворювача збуджується від ударного генератора імпульсів. Ємність C_n випромінюючого п'єзоелемента 1 (рис. 2.1) заряджається через резистор R до напруги E джерела живлення. У моменти відмикання тиристора VD ця ємність розряджається й у перетворювачі збуджуються акустичні імпульси. Їхні несучі частоти відповідають власним частотам перетворювача, навантаженого контрольованим виробом. Вихідний сигнал знімається із прийомного п'єзоелемента 2 й обробляється в електронному блоці 3.

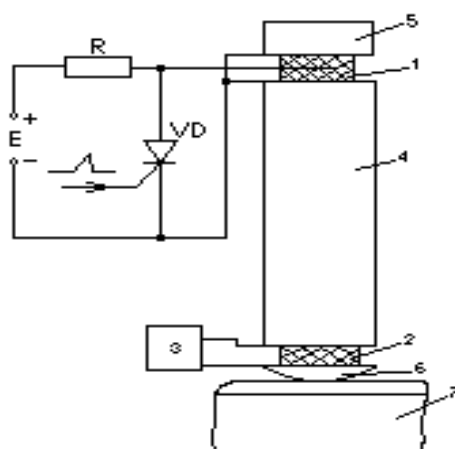


Рис.2.1. Схема контролю імпульсним імпедансним методом:
1,2- п'єзоелементи ; 3- електронний блок ; 4- звукопровід ; 5- тильна маса ;
6- контактний наконечник ; 7- об'єкт контролю.

Розглянутий варіант імпедансного методу відрізняється від традиційного не тільки імпульсним характером сигналів, але й тим, що в системі перетворювач - виріб збуджуються не змушені, а вільні коливання. Імпульси вільно загасаючих коливань характеризуються спектром, що займає деяку частотну область, тоді як поняття механічного імпедансу має сенс тільки для фіксованої частоти. У нашому випадку, коли добротність системи перетворювач — контрольований об'єкт відносно велика, спектр експоненційно загасаючих імпульсів досить вузький тому в першому наближенні будемо вважати, що механічний імпеданс контрольованого об'єкта визначений для несучої частоти імпульсу. Режим вільних коливань системи перетворювач — об'єкт, що контролюється (зокрема, що несе частота імпульсів) залежить від механічного імпедансу загального навантаження перетворювача

$$Z = R + jX = \frac{Z_I \cdot Z_K}{Z_I + Z_K}, \quad (2.1)$$

де $Z_K = \frac{1}{j\omega K_K}$ - пружний імпеданс зони контакту; $j = \sqrt{-1}$, $\omega = 2\pi f$ - кутова частота; f - частота; K_K - контактна гнучкість; $Z_I = R_I + jX_I$ - механічний імпеданс контрольованого виробу в зоні дотику з перетворювачем. Імпеданс Z_I звичайно має пружний характер ($X_I < 0$), причому в зонах дефектів $R_I \ll X_I$

Сполучений перетворювач імпедансного дефектоскопа являє собою неоднорідну стрижневу коливальну систему, що володіє безліччю власних частот. При зміні навантаження перетворювача значення цих частот змінюється. Чіткий розрахунок власних частот навантаженого перетворювача принципово простий, але трудомісткий. Тому для якісного аналізу питання замінимо реальний перетворювач однорідним стрижнем - довжиною l , з хвильовим опором $W = \rho \cdot c \cdot S$, де ρ - щільність матеріалу; c - швидкість звуку; S - площа поперечного перерізу стрижня. Втратами в стрижні зневажаємо. Рівняння власних частот навантаженого стрижня:

$$W \cdot \operatorname{tg} k \cdot l + X = 0, \quad (2.2)$$

де $k = \omega/c$ - хвильове число; X - реактивна складова загального механічного імпедансу навантаження. Член $W \cdot \operatorname{tg}k \cdot l$ (2.2) являє собою реактивний вхідний імпеданс стрижня.

На Рис.2.2 зображено графік залежності $X_c = W \operatorname{tg}kl$ від kl для двох значень $W (W_2 > W_1)$.

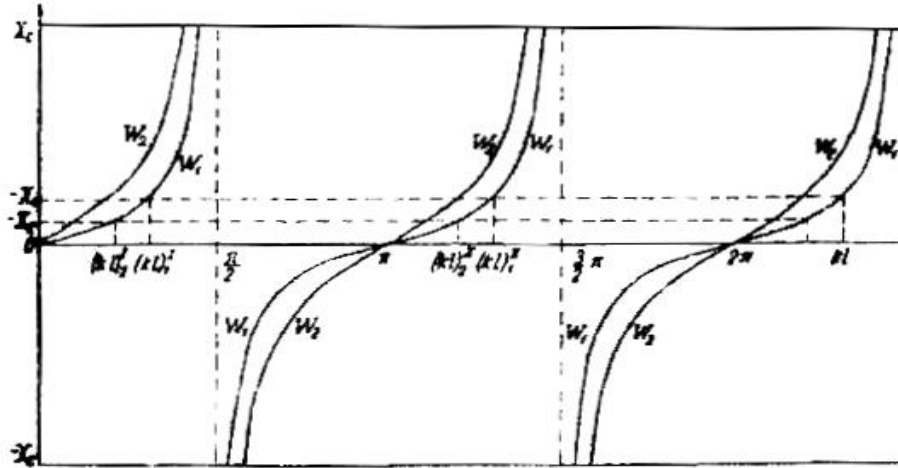


Рис.2.2. Залежність реактивної складової X_c вхідного механічного імпедансу стрижня перетворювача від параметру kl .

Значення kl , що відповідає власним частотам, виходять як абсциси точок перетинання кривих $W \cdot \operatorname{tg}k \cdot l$ з прямими $X_c = -X$. Вільні коливання можливі тільки при протилежних знаках X_c і X , тобто в зонах $n\pi \leq kl \leq \frac{2\pi+1}{2}\pi$ (де $n = 0; 1; 2; 3; \dots$). При зміні реактанса навантаження від X_1 до X_2 і $W = W_1$ власна частота в зоні $0 \leq kl \leq \frac{2}{\pi}$ зменшується від значення ω_1 , знаходжуваного $(kl)_1^1$, до ω_2 , знаходжуваного $(kl)_2^1$. В зонах $\pi \leq kl \leq \frac{3\pi}{2}$ власної частоти ω_1 і ω_2 відповідають значенням $(kl)_1^1$ і $(kl)_2^1$. Для стрижня з $W_2 > W_1$ значення власних частот при навантаженні на X_1 і X_2 й їхнє відношення будуть менше. Проаналізуємо вплив параметрів стрижня на зміну його власної частоти, обумовлене навантаженням. Нехай значення X_1 імпедансу навантаження відповідає доброякісній зоні об'єкту контролю, X_2 - дефектної, причому $X_1 < 0$ і

$X_2 < 0$. З (2.2) знайдемо відношення власних частот навантаженого стрижня при зміні X від X_1 до X_2

$$\frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{\operatorname{arctg}\left(-\frac{X_1}{W}\right) + n\pi}{\operatorname{arctg}\left(-\frac{X_2}{W}\right) + n\pi}. \quad (2.3)$$

Якщо зміни пружного навантаження перетворювача виразити через відносини не залежних від частоти гнучкості K_1 та $K_2 = aK_1$, то формула (2.3) приймає вигляд

$$\frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{\operatorname{arctg}\left(\frac{1}{\omega_1 K_1 W}\right) + n\pi}{\operatorname{arctg}\left(\frac{1}{\omega_1 a K_1 W}\right) + n\pi}. \quad (2.4)$$

На відміну від режиму вимушених коливань в режимі вільних коливань зміна механічного імпедансу навантаження в зоні дефекту міняє не тільки амплітуду і фазу вихідного сигналу перетворювача, але і його робочу частоту. Це дозволяє реалізувати всі три варіанти методу - амплітудний, фазовий і частотний.

Проаналізуємо особливості імпульсного імпедансного методу. Вихідна електрична напруга перетворювача є періодичними затухаючими імпульсами, що містять декілька несучих частот по числу ударно збуджуваних власних частот. Для виділення коливань з потрібною власною частотою в підсилювачі дефектоскопа є смуговий фільтр, що пригнічує інші сигнали. Тоді посилений сигнал є затухаючим радіоімпульсом, амплітуда якого завдяки кінцевій ширині смуги пропускання фільтру наростає поступово.

Оскільки в дефектних зонах контрольованих виробів механічний імпеданс має переважно пружний характер, імпеданс загального навантаження перетворювача в зоні дефекту представимо у вигляді $Z \cong jX = 1/j\omega K$, де $K = K_k + K_n$ - не залежна від ω зосереджена еквівалентна гнучкість; K_n - гнучкість контрольованого виробу в дефектній зоні. Нехай власна частота

перетворювача, навантаженого на бездефектну зону виробу, відповідає частоті вимушених коливань для традиційного варіанту методу і рівна ω_1 , механічний імпеданс цієї зони на даній частоті $Z_{н.х.}$. У зоні дефекту власна частота вільних коливань знизиться до ω_2 , причому відносна зміна механічного імпедансу буде: у режимі вимушених коливань $\gamma_e = Z_{н.х.} j\omega_1 K$; у режимі вільних коливань $\gamma_c = Z_{н.х.} j\omega_2 K$. Звідси $\frac{\gamma_c}{\gamma_e} = \frac{\omega_2}{\omega_1} < 1$.

Таким чином, в режимі вільних коливань відношення механічного імпедансу в доброякісній і дефектній зонах виробу, визначальне знаходжуваність дефектів по зміні амплітуди і фази сигналу зменшується. Обумовлене цим погіршення чутливості тим сильніше, чим більше ω_1/ω_2 .

Вказане зменшення чутливості може компенсуватися відповідною обробкою сигналів в електронному блоці.

В імпульсних імпедансних дефектоскопах можлива одно-, двух- та трьохпараметрова обробка сигналів (по амплітуді, фазі і частоті) як по кожному з вимірюваних параметрів окремо, так і по їх сукупності в будь-

яких поєднаннях. Якщо дефекти виявляються по зміні амплітуди і фази сигналу, то через сказане вище для підвищення чутливості величину ω_1/ω_2 доцільно зменшувати, якщо по зміні частоти, - збільшувати.

Величина ω_1/ω_2 залежить від параметрів перетворювача і характеристик контрольованого виробу. Як показано вище, для збільшення ω_1/ω_2 доцільно використовувати перетворювачі з малою хвильовою довжиною ($kl \ll \pi/2$), для зменшення ω_1/ω_2 - перетворювачі з високими хвильовими опорами і $kl > \pi$.

Імпедансний метод використовується для контролю виробів із зовнішніми шарами з матеріалів з різко різними модулями Юнга (сталь, полімери і т. п.).

Тому значення контактних гнучкостей K_k , визначаючи пружний імпеданс зон зіткнення перетворювачів з виробами, коливаються в широких межах, приблизно від $5 \cdot 10^{-8}$ до $100 \cdot 10^{-8}$ м/Н.

Максимально можлива власна частота вільних коливань навантаженого короткого ($l \ll \lambda$) перетворювача, відповідна $Z_{in} = \infty$, рівна $\omega_{\max} = \frac{1}{\sqrt{mK_k}}$, а його маса $m = \frac{1}{\omega_{\max}^2} K_k$.

Обумовлені дефектами контрольованих виробів зміни амплітуди, фази і несучої частоти посиленних вихідних сигналів перетворювача реєструються відомими методами, які можуть бути покладені в основу багатопараметрової обробки цих сигналів.

Оцінімо потужність, споживану генератором збуджуючих перетворювач імпульсів. Нехтуючи падінням напруги на відкритому тиристорі та струмом витоку замкнутого тиристора, знайдемо

$$P = fE \int_0^T i dt \quad (2.5)$$

де E - ЕРС джерела постійної напруги; f - частота проходження імпульсів; $T = \frac{1}{f}$; i - миттєве значення струму джерела. У нашому випадку $i = (E/R)\exp(-t/RC)$, де R - опір зарядного ланцюга; C - сумарна ємність випромінюючого п'єзоелемента перетворювача та з'єднувального кабелю.

Для повного використання напруги джерела ємність C доцільно заряджати до напруги E . Тоді $RC \ll T$ і

$$P = fE^2C. \quad (2.6)$$

Для збільшення відношення сигнал/шум (в даному випадку шум має фрикційний характер) напругу збудження перетворювача слід обирати порядку 200-400 В. Прийняв $E = 300$ В, $C = 1$ нФ і $f = 25$ Гц, з (2.6) знайдемо $P = 9$ мВт. Реальна споживана потужність буде дещо більше знайденої завдяки струму витоку замкнутого тиристора, яким ми нехтували. Загальна потужність

споживання генератора складе 10 - 15 мВт, що в сотні раз менше відповідної величини для генератора синусоїдальних коливань імпедансного дефектоскопа.

Споживання енергії іншими вузлами імпульсного імпедансного дефектоскопа також невелике. Це дозволить жити прилад від малопотужного джерела. Переведення імпедансного дефектоскопа з суміщеним перетворювачем на імпульсний режим роботи дасть також можливість використовувати в одному приладі і роздільно-суміщені перетворювачі, що дозволяють знаходити більш глибоко залягаючі дефекти. Це розширить номенклатуру контрольованих виробів і поліпшить експлуатаційні характеристики дефектоскопа без істотного ускладнення його схеми і конструкції.

2.2. Фізичні основи імпедансного методу

У різних областях промисловості для неруйнівного контролю та діагностики використовують методи, засновані на оцінці (або вимірюванні) імпедансів випробовуваних об'єктів при їх пружних коливаннях. Застосування цих методів, які називають імпедансними, обумовлене тим, що імпеданс містить інформацію про ряд параметрів контрольованих об'єктів, наприклад, наявності в них дефектів, фізико-механічних властивостей матеріалів і пов'язаних з ними експлуатаційних характеристиках деталей та вузлів і т.п.

У даній роботі розглянуті імпедансні методи, їх можливості, області застосування, переваги і недоліки. Зважаючи на відмінність фізичних принципів і інформативних параметрів імпедансні прилади неруйнівного контролю сильно відрізняються від інших вживаних в народному господарстві акустичних приладів.

Механічний імпеданс багат шарової конструкції визначається пружними властивостями, густиною матеріалів і товщиною шарів, коефіцієнтами затухання коливань в шарах, розмірами як самої конструкції, так і дефектних областей, станом з'єднань між шарами.

Для механічних систем із зосередженими і розподіленими постійними, здійснюючих пружні коливання, відомо декілька видів імпедансу. З них в описаних нижче методах використовуються:

- механічний імпеданс для сили $Z = \dot{F} / \dot{v}$;

- механічний імпеданс для моменту, що крутить $Z_{кр} = \dot{M} / \dot{\theta}$;

- питомий акустичний імпеданс $z_a = \dot{p} / \dot{v}$;

- характеристичний імпеданс (хвильовий опір) середовища $z_0 = \rho \cdot c$.

Тут \dot{F} , \dot{v} , \dot{p} , \dot{M} і $\dot{\theta}$ комплексні амплітуди сили, коливальної швидкості, звукового тиску, моменту, що крутить, і швидкості зміни кута повороту перетину відповідно, ρ - густина середовища, c - швидкість звуку в ній. У загальному випадку імпеданс – комплексна величина

$$Z = R + jX = |Z| \cdot e^{j\varphi}, \quad (2.7)$$

де R і X - дійсна та мнима складові імпедансу відповідно; $|Z| = \sqrt{R^2 + X^2}$ - його модуль; $\varphi = \arctg(X/R)$ - аргумент.

Значення Z визначається парою дійсних чисел - R і X або $|Z|$ і φ . Істотно, що вплив параметрів об'єктів контролю на R і X різний. Значення R більше пов'язане з втратами, значення X - з пружними або інерційними властивостями об'єкту. Ця особливість розширює можливості імпедансу як інформативного параметра. У імпедансних методах застосовуються різні види коливань і хвиль (ізгибні, подовжні, крутильні) широкого діапазону частот.

2.3 Аналіз можливостей методу для виявлення дефектів

Пристроєм, чутливим до зміни механічного імпедансу контрольованого об'єкту, служить перетворювач дефектоскопа. Чутливість дефектоскопа визначається чутливістю перетворювача і способом обробки його вихідного сигналу в електронному блоці.

Велику роль в підвищенні достовірності виявлення дефекту виконує правильний вибір інформативних параметрів і методів обробки одержаного сигналу.

Амплітудна обробка. Найпростіший вид обробки сигналу - амплітудна обробка, де реєструється зміна амплітуди прийнятого сигналу.

Фазова обробка. Зміна сигналу (імпедансу або швидкості розповсюдження пружних хвиль) реєструється по зміні фази прийнятого сигналу.

Частотна обробка. У частотній обробці реєструється зміна частоти системи, в якій перетворювач є частотозадаючою ланкою.

Амплітудно-частотна обробка. Двупараметрова обробка сигналу (в даному випадку по зміні частоти і амплітуди) дозволяє істотно підвищити чутливість до дефекту. Особливо ефективно застосування амплітудно-частотної обробки в імпедансному методі, оскільки наявність дефекту викликає зміну і амплітуди і частоти сигналу.

Амплітудно-фазова обробка. Двупараметрова обробка сигналу (в даному випадку по зміні фази і амплітуди) дозволяє істотно підвищити чутливість до дефекту.

Спектральний аналіз (АЧХ і ФЧХ). Спектр сигналу є найбільш загальною характеристикою сигналу. Спектральний аналіз дозволяє реєструвати частотні і фазові зміни сигналу. Спектральний аналіз може використовуватися в імпедансному методі. Інформативним параметром є зміна спектру на дефектній ділянці по відношенню до бездефектної.

2.4 Огляд дефектів в композиційних матеріалах

Основна увага в роботі надана дефектам композиційних матеріалів, які застосовуються в авіабудуванні, таким як вуглепластики, стільникові конструкції і багатошарові конструкції.

Дефекти в таких матеріалах можна класифікувати по групах таким чином:
дефекти волоконних структур;

дефекти пористих структур;

дефекти терпкої речовини і клейового з'єднання;

Слід зазначити, що найчастіше зустрічаються і найкритичнішими для композиційних матеріалів є наступні дефекти (рис.2.3): розшарування (а), пористість(б), непроклеї (с).

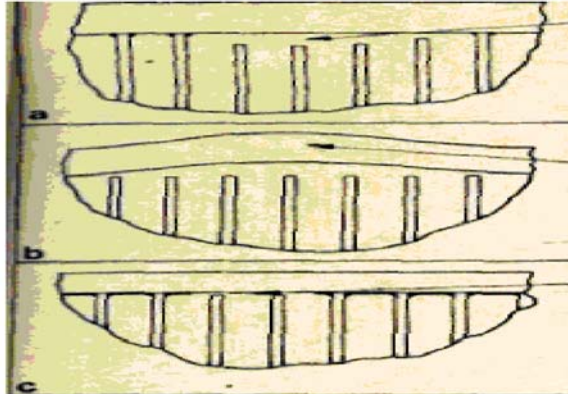


Рис. 2.3 Дефекти в композиційних матеріалах.

Основні типи дефектів, що зустрічаються в композиційних матеріалах, застосованих в авіабудуванні, і методи їх дослідження та виявлення приведені в таблиці 2.1. У даній таблиці знак «+» позначає можливість виявлення дефекту певного типу даним методом контролю.

Як видно з таблиці, акустичні методи контролю дозволяють визначити найбільшу кількість дефектів, проте, на відміну від контролю металів, де всі види дефектів можна визначити одним ультразвуковим дефектоскопом, кожний з представлених в таблиці акустичних методів вимагає використання певного приладу і методики, непридатних для контролю іншим акустичним методом. Тому, кожний з представлених методів, необхідно розглядати як самостійний метод контролю.

Акустичні методи і методи низькочастотних вібрацій дозволяють визначити як локальні дефекти, так і інтегральні механічні характеристики композиційних матеріалів:

- акустичні – коефіцієнт підсумовування, межа міцності, модуль пружності, модуль зсуву, жорсткість;

- методи низькочастотних вібрацій – модуль пружності, коефіцієнт Пуассона, мікропошкоджений стан матеріалу.

Таблиця 2.1

Типи дефектів композиційних матеріалів і можливі методи їх виявлення

Тип дефекту	Акустичні методи				Радіографічний	Методи низькочастотних вібрацій
	Амплітудний метод	Велосиметричний метод	Метод зворотного розсіювання	Імпедансний		
Невірний тип волокон		+				+
Пористість, пустки	+		+			+
Низькі властивості терпкої речовини			+			+
Дезорієнтація волокон				+		+
Неправильне об'ємне співвідношення	+		+			
Неправильне укладання				+		+
Уривчастість шару	+			+		
Чужорідні включення	+			+		+
Крізні тріщини	+			+		+
Розшарування	+					+
Пошкодження стільникового заповнювача	+					+
Проникнення вологи	+		+			

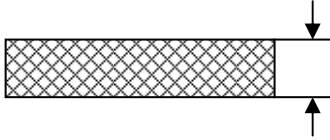
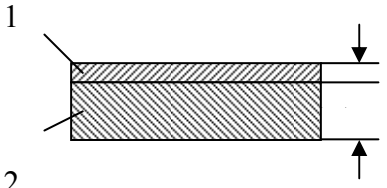
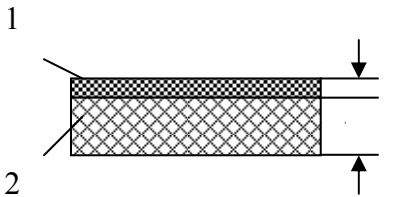
Як видно з приведенного аналізу методів неруйнівного контролю для діагностики композиційних матеріалів в таблиці 2.1, імпедансний метод дозволяє визначити найбільш критичні дефекти в композиційних матеріалах типу розшарувань, непоклеїв та пористості.

Широкому впровадженню методу сприяли його універсальність, зручність в експлуатації, відсутність необхідності змочування контрольованих виробів, легкість контролю по криволінійних поверхнях, простота і доступність апаратури.

Див.таблицю 2.2.

Таблиця 2.2

Типи контрольованих конструкцій

Схематичне зображення контрольованої конструкції	Вид з'єднання, матеріал елементів конструкцій	Розміри, співвідношення товщин елементів конструкції, мм
1	2	3
	Монолітна конструкція з ПКМ (вугле-, боро-, органо-, склопластик, текстоліт і т.п.)	$h = 0,1 - 100$
	Клеєве або паяне 1, 2 - метал (алюмінієвий сплав, титан, сталь і т.п.)	$h_1 \leq 5$ $h_2 \geq h_1$
	Клеєве 1 - неметалічний шар (ПКМ, теплозахисний матеріал й ін.); 2 - ПКМ	$h_1 \leq 25$ $h_2 \geq h_1$

	<p>Клейове</p> <p>1 - ПКМ; 2 - метал</p>	$h_1 \leq 10$ $h_2 \geq h_1$ $h_2 \leq h_1$
	<p>Клезварне</p> <p>1, 2 - метал; 3 - припій (зварна крапка)</p>	$h_1 \leq 3,5$ $h_2 \leq 5,0$ $h_2 \leq h_1$
	<p>Клейове</p> <p>1, 2, 3 - армований або неармований пластик</p>	$h_1+h_2+h_3 \leq 100$
	<p>Клейове, паяне або зварне</p> <p>1, 3 - металеве обшивання; 2 - стільники з металеві фольги</p>	$h_1 = 0,3 - 2,5$ $h_2 = 4 - 50$ $h_3 = 0,3 - 2,5$
	<p>Клейове</p> <p>1, 3 - обшивання із ПКМ; 2 - стільники з поліамідного паперу, склопластику</p>	$h_1 = 0,2 - 10$ $h_2 = 4 - 100$ $h_3 = 0,2 - 10$
	<p>Клейове</p> <p>1 - ПКМ; 2 - пінопласт; 3 - метал</p>	$h_1 = 0,3 - 2$ $h_2 = 5 - 100$ $h_3 = 0,2 - 3$

2.5 Механічний імпеданс багат шарової конструкції

У доброякісній зоні цей імпеданс визначається розмірами, кількістю, товщинами й матеріалами шарів конструкції. У зоні дефекту імпеданс залежить

від його розмірів, форми, глибини залягання, а також параметрів інших елементів конструкції. Через величезну розмаїтість типів багатошарових конструкцій і при змінюваних у них матеріалів, а також відсутності адекватних теоретичних моделей розрахунок механічних імпедансів скрутний. Однак деякі теоретичні моделі корисні для розуміння предмета, а іноді і як перше наближення. До них ставляться моделі нескінченно протяжного однорідного аркуша й закріпленої по контурі пластини. Механічний імпеданс однорідного нескінченного аркуша товщини h для нормальної до його площини зосередженої сили чисто активний

$$Z = 2,31h^2 \sqrt{\frac{E\rho}{1-\nu^2}} \quad (2.8)$$

Ця формула використовується для оцінки імпедансів деяких ОК в бездефектній зоні.

2.6 Акустичний контакт перетворювача з об'єктом контролю

У акустичних імпедансних приладах неруйнівного контролю використовують два основні види акустичного контакту перетворювача з контрольованим об'єктом: 1) по площині через тонкий шар рідини (рис. 2.4.а); 2) сухий, через випуклу сферичну (рис. 2.4.б) або загострену (рис. 2.4.в) поверхню контактного наконечника.

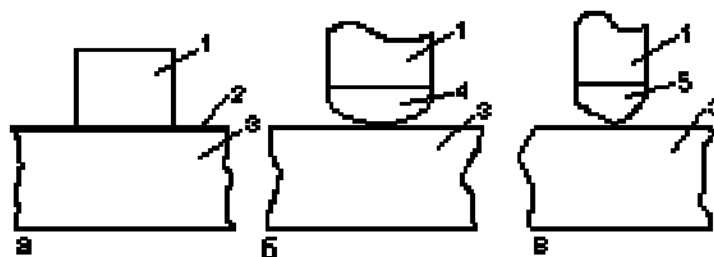


Рис.2.4 Види контакту перетворювачів імпедансних приладів з контрольованими об'єктами: 1 – перетворювач; 2 – шар рідини; 3 – контрольований об'єкт; 4 – контактний наконечник з сферичною робочою поверхнею; 5 – контактний наконечник (індентор) з гострим кінцем

У першому випадку хвильова товщина шару рідини на вживаних в імпедансних методах частотах (зазвичай 1 МГц) невелика і цей шар можна розглядати як зосереджений пружний опір, вплив якого на вхідний механічний імпеданс контрольованого об'єкту невеликий.

У другому випадку площа зіткнення перетворювача з об'єктом контролю дуже мала (частки квадратного міліметра). Такий тип контакту, званий сухим точковим контактом, має істотні особливості, що визначають можливості і характеристики використовуваних його методів. До числа цих особливостей відносять: 1) відсутність спрямованості при випромінюванні та прийомі пружних хвиль; 2) легкість контролю виробів з криволінійними поверхнями; 3) можливість контролю виробів з гігроскопічних матеріалів; 4) значна гнучкість контактної зони; 5) особливий вид перешкод, що виникають при переміщенні перетворювача (рис. 2.4.б) по шорстких поверхнях контрольованих об'єктів (фрикційних шумів). Перші три особливості очевидні і не вимагають пояснень.

Гнучкість сухого точкового контакту має фундаментальне значення і визначає характеристики імпедансних методів, що використовують цей вид контакту. Зважаючи на малість площі контакту в прилеглих до нього зонах контрольованого об'єкту і наконечника перетворювача виникають значні напруги і деформації, що швидко убувають у міру видалення від області зіткнення. У зоні контакту діє постійна сила F_0 притиснення перетворювача до контрольованого об'єкту і змінна сила з амплітудою F_m , використовувана для збудження коливань в об'єкті і отримання інформації про механічний імпеданс. Зазвичай $F_m \ll F_0$ можна вважати гармонійною. У області звукових і низьких ультразвукових частот зону контакту можна розглядати як зосереджену гнучкість. У разі чисто пружних деформацій контактуючих тіл з ідеально гладкими сферичними поверхнями

$$K = 0,55 \left(\frac{1 - \mu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \mu_2^2}{E_2} \right)^{2/3} \left(\frac{R_1 + R_2}{R_1 R_2} \right)^{1/3} F_0^{-1/3}, \quad (2.9)$$

де E_1, E_2 - модулі Юнга; μ_1, μ_2 - коефіцієнти Пуасона; R_1, R_2 - первинні радіуси кривизни поверхонь першого і другого тіла відповідно. Контактна гнучкість K нелінійна, оскільки залежить від F_0 . Значення K визначається тонким поверхневим шаром контрольованого об'єкту, становлячим 3 – 5 радіусів зони контакту. З (2.8) витікає, що внесок наконечника і виробу в K неоднаковий. Для вживаних в імпедансних дефектоскопах корундових наконечників значення $E_1 = 261$ ГПа набагато перевищує E_2 для алюмінієвих сплавів і особливо пластиків, тому гнучкість K визначається в основному пружними властивостями зовнішніх шарів контрольованих об'єктів.

При використанні сухого точкового контакту загальне механічне навантаження Z_0 перетворювача складається з двох складових – пружного опору $Z_k \cong 1/(j\omega K)$ контактної зони і вхідного імпедансу $Z_n = R + jX_n$ контрольованого об'єкту. Ці імпеданси сполучені ланцюгом, що на схемі заміщення відповідає паралельному з'єднанню. Отже

$$Z = \frac{Z_k Z_n}{Z_k + Z_n}. \quad (2.10)$$

При контролі багат шарових конструкцій представляє інтерес тільки імпеданс Z_n , а Z_k є чинником, що заважає. Тому бажано, щоб $|Z_n| \ll |Z_k|$ або $Z_n \cong Z_0$. Для задоволення цієї умови знижують робочу частоту і вживають заходи по зменшенню значення контактної гнучкості.

При рішенні задач, пов'язаних із зміною імпедансу контактної зони (наприклад, в ультразвуковому твердомірі) чинником, що заважає, служить вже Z_n . В цьому випадку необхідне дотримання протилежної умови $|Z_k| \ll |Z_n|$.

У загальному випадку імпеданс Z_k зони контакту комплексний і окрім пружної містить активну і інерційну складові. Проте переважаючим є реактивний пружний опір контакту. Іноді, наприклад для оцінки фізико-механічних властивостей матеріалів, більш інформативною виявляється активна складова R_k імпедансу Z_k .

Для методу дефектоскопії з'єднань, використовуючого перетворювачі з сухим точковим контактом і сканування виробів, характерні фрикційні шуми, обумовлені прискореннями контактного наконечника при його переміщенні по шорстких поверхнях контрольованих об'єктів. Із збільшенням швидкості сканування і висоти нерівностей поверхні рівень цих шумів зростає. Тому із збільшенням ступені шорсткості гранично допустима швидкість сканування зменшується.

Перетворювачі низькочастотних акустичних дефектоскопів звичайно контактують з контрольованими виробами через наконечники з сферичними контактними поверхнями, притискуванні до сухих виробів з постійною силою. У зоні контакту діє також змінна сила, обумовлена пружними коливаннями перетворювача. Передаванні через цю зону коливання можуть бути безперервними або імпульсними. Площа контактної зони дуже мала (частки квадратного міліметра). Такий тип зв'язку перетворювача з виробом називатимемо сухим точковим контактом.

Сухий точковий контакт сильно відрізняється від традиційних для ультразвукової дефектоскопії типів акустичного контакту не тільки виключенням застосування рідини, але і вельми малою площею зіткнення перетворювача з виробом. Останнє приводить до відсутності спрямованості випромінювання і прийому пружних коливань та обумовлює властиву сухому точковому контакту зосереджену гнучкість, що робить визначальний вплив на експлуатаційні характеристики даних низькочастотних методів. Для сухого точкового контакту характерний також особливий вид перешкод – фрикційні шуми, пов'язані з переміщенням перетворювача по шорсткій поверхні виробу.

Висновки

В даному розділі був проведений аналіз імпульсного варіанту імпедансного методу контролю, на якому базується дослідження. Висвітлені найважливіші аспекти методу, а саме: Огляд фізичних основ методу, основних дефектів та можливостей їх виявлення, опис властивостей контакту перетворювач-ОК.

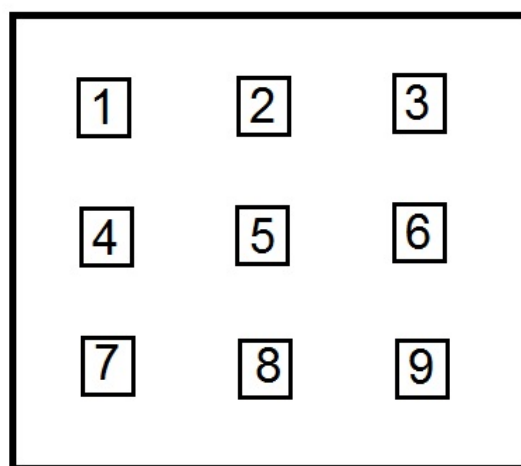
3. Отримання та обробка експериментальних даних

3.1. Опис стандартного зразка

На рисунку 3.1 зображено зразок, з якого були зняті показання для дослідження за допомогою імпедансного перетворювача. Цей зразок являє собою частину сотової панелі з дев'ятьма відомими дефектами різної глибини. На рис. 3.1а) видно лінії, на яких по черзі був розміщений датчик і показання знімалися таким чином, що вихідні сигнали, які знімалися безпосередньо на дефектах, відповідають дефектній області сотової панелі, а інші є бездефектними. На рис. 3.1б) схематично зображено дефекти з відповідними номерами.



а)



б)

Рисунок 3.1. Стандартний зразок з нанесеними дефектами:

а) зовнішній вигляд; б) схематичне зображення з вказаними номерами дефектів

3.2. Опис процесу отримання та обробки сигналів

З кожної точки зразка були зняті і записані в файли сигнали таким чином, що кожен файл відповідав показаннями з однієї точки і складався з сорока практично ідентичних сигналів, що складаються з 16000 точок. Отримані сигнали записані в текстовому форматі, були усереднені між собою в рамках одного файлу і обрізані в корисної області. На рисунку 3.2 зображений сигнал, знятий зі стандартного зразку та червоні лінії вказують початок та кінець корисної області сигналу. Початком було вирішено обрати точку, з якої безпосередньо починається сигнал,

прийнятий від дефекту, а кінець обрано таким чином, щоб не брати до уваги непотрібні неінформативні шуми. Потім були пораховані розмахи амплітуд сигналів (тобто різниця максимального і мінімального значення амплітуди). Результати цих операцій показані на рисунку 3.3.

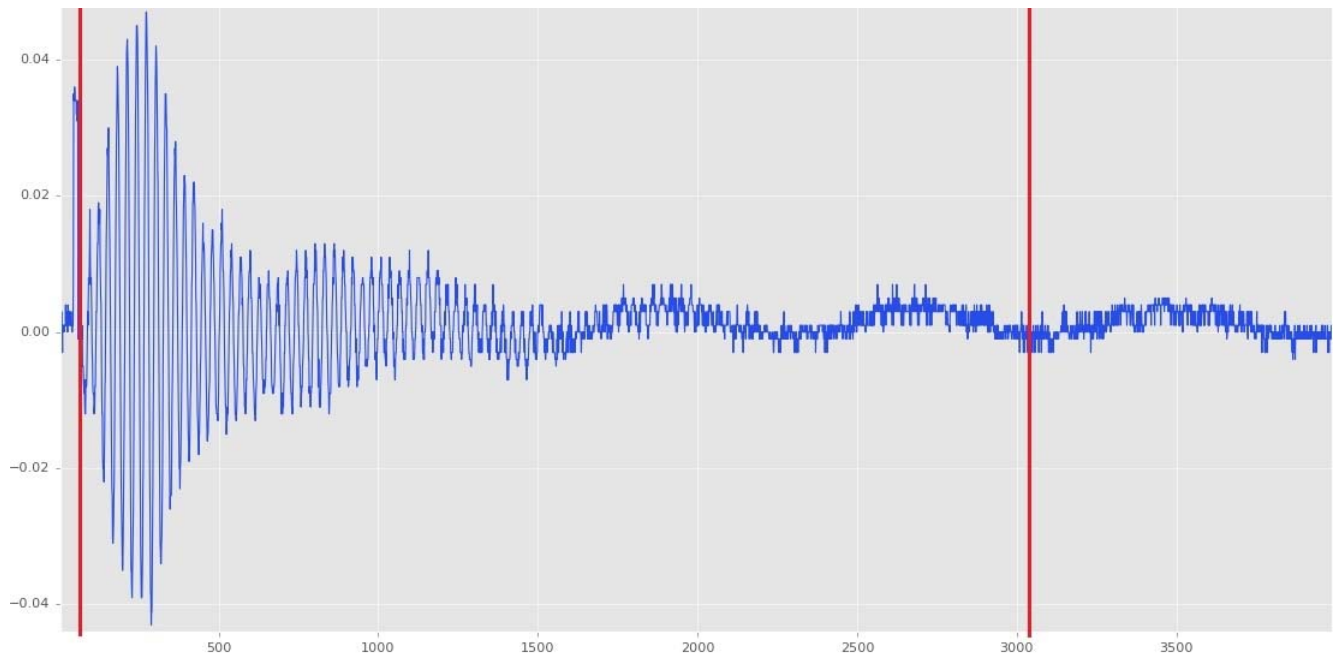
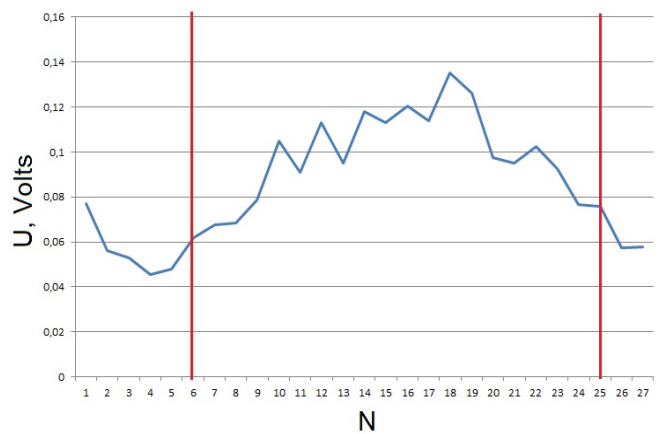
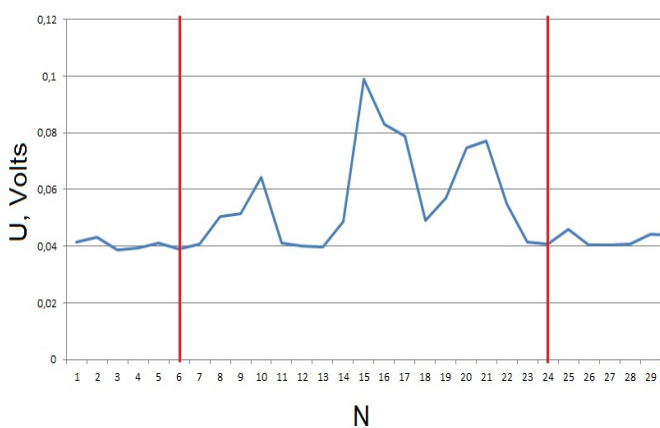


Рисунок 3.2. Зображення сигналу, знятого зі стандартного зразку

Точки по осі X відповідають номерам ліній, нанесених на зразку (рис. 3.1а). Отже, дефект знаходиться в центральній області між першою і останньою лініями. Вісь Y відповідає рівню сигналу, а червоні прямі розміщені на крайніх точках дефекту: зліва - початок дефектної області, справа - закінчення.



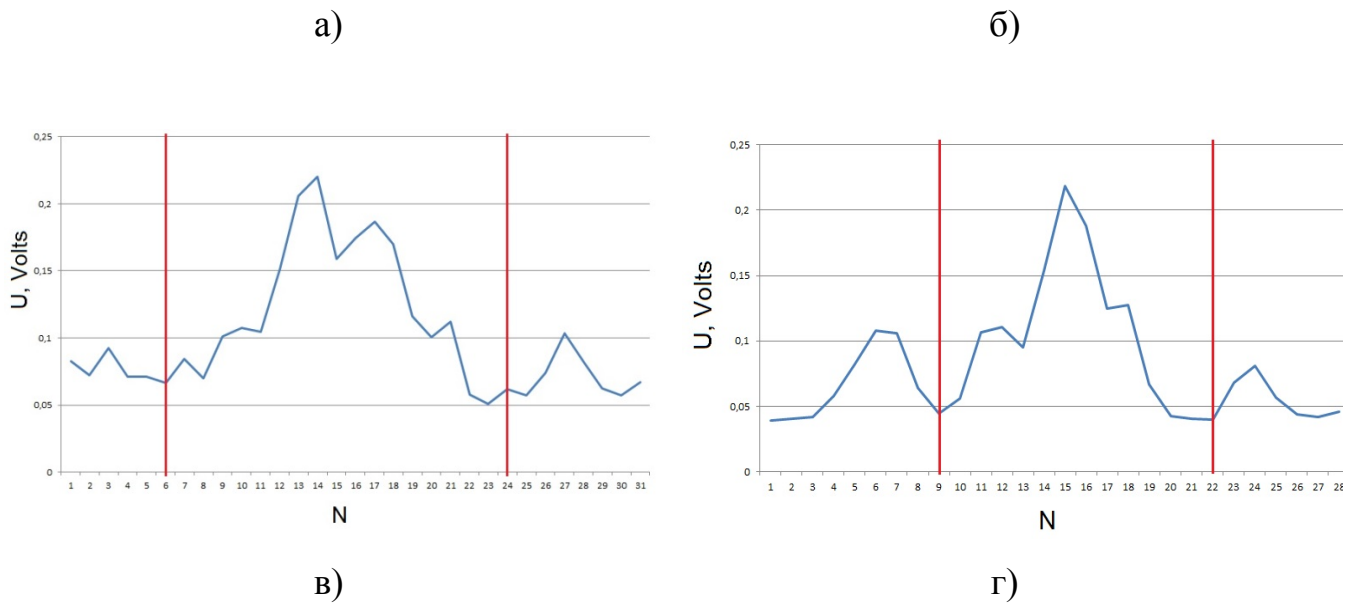


Рисунок 3.3. Графіки амплітуд сигналів

Висновки

Як видно з графіків, амплітуда в дефектній області перевищує амплітуду в бездефектній області, з чого можна засвідчити, що отримані сигнали залежать від стану об'єкта контролю. Висновком даного розділу є те, що база сигналів для дослідження отримана та оброблена вірно.

4. Розроблення стартап-проекту «Використання методів машинного навчання при імпульсному імпедансному контролі композитів»

4.1. Опис ідеї проекту

В основу ідеї стартап-проекту покладено використання методів машинного навчання для формування висновків про наявність дефекту в композитних матеріалах при імпульсному імпедансному методі контролю, яка відрізняється від наявних на ринку методом обробки інформації, отриманої в ході контролю, що виключає вплив людського фактору на інтерпретацію показань. Дана система може бути застосована для контролю виробів авіаційної промисловості та може запропонувати користувачеві максимальну простоту використання. Результат аналізу суті ідеї стартап-проекту наведено в табл. 4.1.

Таблиця 4.1. Опис ідеї стартап-проекту

<i>Зміст ідеї</i>	<i>Напрямки застосування</i>	<i>Вигоди для користувача</i>
Методи машинного навчання для формування висновків про наявність дефекту в композиційних матеріалах при імпульсному імпедансному методі контролю	Контроль виробів з композитного матеріалу	Легкість інтерпретації показань
		Універсальність застосування

Для більш наочної демонстрації переваг та недоліків даної системи контролю порівняємо параметри системи з деякими її аналогами, наявними на ринку.

Конкуренти:

Конкурент 1 - Універсальний дефектоскоп ДАМИ-С09 компанії Votum.

Конкурент 2 – Ультразвуковий дефектоскоп Bondmaster 1000e+ компанії Olympus.

Таблиця 4.2. Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проекту

n/n	Техніко-економічні характеристики ідеї	(потенційні) товари/концепції конкурентів			W (слабка сторона)	N (нейтральна сторона)	S (сильна сторона)
		Мій проект	Конкурент1	Конкурент2			
.1	Вартість, грн	51000	140000	105000			+
.2	Відбір найбільш чутливих інформативних параметрів	Автоматично	Вручну оператором	Вручну оператором			+
.3	Інформативні параметри	Амплітуда, фаза, спектральний розклад	Амплітуда, фаза	Амплітуда, фаза, спектральний розклад		+	
4.	Інструменти машинного навчання	+	-	-			+

З табл. 4.2. видно, що запропонований проект не поступається аналогам за основними характеристиками. З перелічених характеристик більшість є сильними сторонами. Слабкі сторони відсутні взагалі, це говорить про високу конкурентоспроможність даного проекту.

4.2. Технологічний аудит ідеї проекту

Таблиця 4.3. Технологічна здійсненність ідеї проекту

№ n/n	Ідея проекту	Технології її реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій
1	Методи машинного навчання для формування висновків про наявність дефекту в композиційних матеріалах при імпульсному імпедансному методі контролю	Виготовлення на замовлення	Наявна	Доступна
2	Впровадження в існуючі системи імпедансного контролю	Впровадження в існуючі системи імпедансного контролю	Наявна	Доступна
Обрана технологія реалізації ідеї проекту: впровадження даних методів для використання в існуючих системах імпедансного контролю для покращення результатів інтерпретації показань оператором.				

Результати технологічного аудиту вказують на те, що дану ідею можна реалізувати шляхом використання наявних на ринку технологій, які є доступні автору проекту.

4.3. Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту

Проведемо аналіз ринку з метою оцінки потенційних загроз та умов введення товару на ринок з урахуванням потреб потенційних клієнтів та пропозицій проектів-конкурентів

Таблиця 4.4. Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проекту

<i>n/n</i>	<i>Показники стану ринку (найменування)</i>	<i>Характеристика</i>
	Кількість головних гравців, од	2
	Загальний обсяг продаж, грн/ум.од	~10200000 грн.
	Динаміка ринку (якісна оцінка)	Стабільний
	Наявність обмежень для входу (вказати характер обмежень)	Відсутні
	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	Перевірка систем на стандартних зразках з метою підтвердження імовірності контролю/похибок вимірювання
	Середня норма рентабельності в галузі (або по ринку), %	80%+

Потенційний ринок на даний момент є стабільним, що дає можливість для даного проекту в зв'язку з новизною ідеї. Обмежень для входу на ринок немає, а вимоги до стандартизації та сертифікації не вище, ніж у існуючих аналогів.

Визначимо цільову аудиторію, якій можна запропонувати даний товар (табл. 4.5).

Таблиця 4.5. Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту

<i>n/n</i>	<i>Потреба, що формує ринок</i>	<i>Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)</i>	<i>Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів</i>	<i>Вимоги споживачів до товару</i>
	Даний товар задовольняє	Середні та великі	Орієнтація на відносно недорогі	- до продукції: Універсальність,

потребу ринку в універсальній системі інтерпретації показань при імпедансному контролі композитів	підприємства, які мають необхідність у великій кількості операцій контролю стану об'єктів	універсальні напівавтоматичні засоби неруйнівного контролю	надійність, легкість інтерпретації показань - до постачальника: Своєчасне надання продукції
---	---	--	---

Важливою потребою сучасного ринку засобів неруйнівного контролю є легкість інтерпретації показань. Даний товар повністю задовольняє цю потребу. Також можна зробити висновок, що для реалізації продукту є досить широка цільова аудиторія.

Проаналізуємо фактори загроз та можливостей при виведенні товару на ринок (табл. 4.6, 4.7).

Таблиця 4.6. Фактори загроз

<i>№ n/n</i>	<i>Фактор</i>	<i>Зміст загрози</i>	<i>Можлива реакція компанії</i>
1	Клієнтська база	На ринку засобів неруйнівного контролю існує складність швидкого набору клієнтської бази	Проведення рекламної компанії шляхом публікації оглядових статей в фахових журналах
2	Необхідність сертифікації обладнання	Засоби неруйнівного контролю повинні проходити обов'язкову сертифікацію для введення на ринок	Завчасне подання зразку системи на перевірку
3	Недостатня розвиненість методик застосування машинного навчання в галузі НК	Оскільки методи машинного навчання майже не використовуються в НК, це може викликати недовіру в потенціальних клієнтів	Обґрунтування переваг використання даних методів для підвищення точності інтерпретації показань контролю
4	Новизна	Даний продукт є абсолютно новим та може викликати недовіру в потенційних клієнтів	Наукове обґрунтування нових можливостей, що дає даний продукт
5	Обов'язкова наявність комп'ютера	Для використання продукту є необхідність у наявності комп'ютера	Адаптація програмного забезпечення для будь-якої операційної системи

Оскільки ринок засобів неруйнівного контролю не є одним з найширших в Україні, він має певні особливості, які можуть створити проблеми при спробах

ввести в нього новий товар, але попри це, ринок і проект який пропонується можуть надавати певні можливості, які сприятимуть швидкому введенню продукту. З даної таблиці можна судити, що ринок має певні фактори загроз, проте їх вплив можна нівелювати шляхом адекватної реакції з боку компанії.

Таблиця 4.7. Фактори можливостей

<i>№ n/n</i>	<i>Фактор</i>	<i>Зміст можливості</i>	<i>Можлива реакція компанії</i>
1	Відсутність даного типу технології	На даний момент на ринку відсутні системи імпульсного контролю з використанням машинного навчання	Акцентування уваги клієнтів на наявності відмінності системи від існуючих та пов'язані з цим переваги
2	Технічні конференції, виставки, семінари	Можливість представляти систему контролю шляхом написання оглядових праць в календарні видання, виступів на конференціях	Написання оглядових статей в журнали та тез на конференції, тематика яких зав'язана на неруйнівному контролі
3	Легкість інтерпретації контролю	Споживачі висувають високі вимоги до такого параметру систем неруйнівного контролю як легкість інтерпретації показань	Акцентування уваги потенційних клієнтів на тому, що дана система забезпечує легкість інтерпретації показань
4	Новизна	На даний момент запропоноване рішення не є широко використовуваним	Можливість розвитку нової системи на ринку та висока конкурентоспроможність
5	Інформацій про сигнал	Можливість роботи з сигналами невідомої заздалегідь форми	Акцентування уваги на ширших можливостях системи

Наведена вище таблиця доводить, що ситуація на ринку надає можливості для введення нового товару при правильній поведінці компанії. Найкращим рішенням для використання даних факторів є потужна рекламна компанія та активна наукова діяльність з метою привернення уваги до даного продукту.

Зважаючи на те, що ринок засобів неруйнівного контролю характеризується певним родом конкуренції, є доцільним провести аналіз ситуації на ринку з ціллю подальшого формулювання стратегії компанії.

Таблиця 4.8. Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

<i>Особливості конкурентного середовища</i>	<i>В чому проявляється дана характеристика</i>	<i>Вплив на діяльність підприємства</i>
---	--	---

		<i>(можливі дії компанії, щоб бути конкурентоспроможною)</i>
1. Вказати тип конкуренції - вільна	На ринку засобів неруйнівного контролю відсутня монополія компаній-лідерів галузі	Проведення масштабної рекламної компанії
2. За рівнем конкурентної боротьби -локальна	Конкуренція частіше спостерігається в межах країни.	Представлення нового типу продукції
3. За галузевою ознакою -внутрішньогалузева	Конкуренція є тільки між представниками галузі неруйнівного контролю	Акцентування уваги клієнтів на універсальності системи
4. Конкуренція за видами товарів: - товарно-видова	Конкуренція існує в межах кожного окремого методу контролю (ультразвуковий, вихрострумний тощо.)	Поєднання декількох методів контролю в одній комплексній системі.
5. За характером конкурентних переваг -нецінова	Основним критерієм, який визначає системи контролю, які відносяться до однієї галузі є достовірність контролю	Застосування нових методів обробки сигналів для полегшення інтерпретації показань
6. За інтенсивністю -не марочна	Важливими є характеристики продукту, а не конкретний виробник	Покращення характеристик системи.

З наведеної вище таблиці можна судити, що ситуація на ринку характеризується вільною конкуренцією в локальних масштабах, тому немає факторів, які однозначно обмежують входження на ринок.

Аналіз умов конкуренції в галузі (за М. портером) наведено в табл. 4.9.

Таблиця 4.9. Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером

Складові аналізу	<i>Прямі конкуренти в галузі</i>	<i>Потенційні конкуренти</i>	<i>Постачальники</i>	<i>Клієнти</i>	<i>Товари-замінники</i>
	<i>Навести перелік прямих конкурентів</i>	<i>Визначити бар'єри входження в ринок</i>	<i>Визначити фактори сили постачальників</i>	<i>Визначити фактори сили споживачів</i>	<i>Фактори загроз з боку замінників в</i>
Висновки: Низький рівень конкуренції дає можливість	ТОВ "ВОТУМ", Olympus	Незважаючи на те, що на ринку є компанії з досвідом, проект має	Зважаючи на те, що ринок неруйнівного контролю – це досить вузька галузь,	Так, клієнти висувають вимоги щодо легкості інтерпретації показань	Фактори загроз відсутні

виходу на ринок		можливості успішного виходу на ринок	постачальники не мають великого впливу	контролю	
-----------------	--	--------------------------------------	--	----------	--

Низький рівень конкуренції з боку декількох компаній не створює суттєвих складнощів для розвитку нової компанії. Головним обмеженням для роботи можна назвати вплив клієнтів та їх потреб.

Проведемо перелік факторів конкурентноспроможності (табл. 4.10)

Таблиця 4.10. Обґрунтування факторів конкурентноспроможності

№ n/n	Фактор конкурентноспроможності	Обґрунтування (наведення чинників, що роблять фактор для порівняння конкурентних проектів значущим)
11	Легкість інтерпретації показань контролю	Дана система дає можливість легкої інтерпретації показань контролю
22	Інформація про сигнал	Програмне забезпечення системи дозволяє забезпечити роботу з сигналами невідомої форми
33	Новизна продукції	Товар не має прямих аналогів на ринку
44	Вимоги до продукції	На етапі входу на ринок є необхідним проходження простої перевірки обладнання
55	Універсальність продукту	Запропонована система придатна для контролю виробів широкого спектру

Компанія має фактори, які характеризують її як конкурентноспроможну, що надає можливості ведення конкурентної боротьби. Усі вищеперераховані фактори задовольняють попит на ринку.

Таблиця 4.11. Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін «Використання методів машинного навчання при імпульсному імпедансному контролі композитів»

n/n	Фактор конкурентноспроможності	Бали 1-20	Рейтинг товарів-конкурентів у порівнянні з «Використання методів машинного навчання при імпульсному імпедансному контролі композитів»							
			3	2	1		1	2	3	
1	Легкість інтерпретації показань контролю	20	+							
2	Інформація про сигнал	20		+						
3	Новизна продукції	20		+						
4	Універсальність продукту	17					+			
5	Вимоги до продукції	16			+					

Дана таблиця вказує на те, що продукт компанії має ряд переваг над основними конкурентами, що робить його більш привабливим в очах потенційних клієнтів. Найбільшими перевагами є легкість інтерпретації показань контролю, можливість роботи з сигналами невідомої форми та новизна продукції. Єдиним недоліком є показник універсальності продукту.

Проведемо SWOT-аналіз стартап-проекту (матриці аналізу сильних (Strength) та слабких (Weak) сторін, загроз (Troubles) та можливостей (Opportunities)) (табл. 4.12)

Таблиця 4.12. SWOT-аналіз стартап-проекту

Сильні сторони: Легкість інтерпретації контролю, Інформація про сигнал, Новизна продукції	Слабкі сторони: Універсальність продукту
Можливості: Можливість участі в конференціях та виставках з метою реклами продукції, Відсутність технологій даного типу на ринку	Загрози: відсутність клієнтської бази

SWOT-аналіз показує, що сильні сторони компанії та її продукту переважають над слабкими і ринок в свою чергу надає більше можливостей для введення нового товару, ніж створює загроз.

Таблиця 4.13. Альтернативи ринкового впровадження стартап-проекту

<i>n/n</i>	<i>№</i>	<i>Альтернатива (орієнтовний комплекс заходів) ринкової поведінки</i>	<i>Ймовірність отримання ресурсів</i>	<i>Строки реалізації</i>
1		Розроблення програмного забезпечення для систем неруйнівного контролю	висока	1-2 місяці

В якості альтернативної стратегії ринкового впровадження було обрано розробку програмного забезпечення для наявних систем НК, що дозволить в короткі терміни отримати прибуток з високою вірогідністю.

4.4. Розроблення ринкової стратегії проекту

Проведемо вибір цільових груп потенційних споживачів (таб. 4.14)

Таблиця 4.14. Вибір цільових груп потенційних споживачів

<i>№ n/n</i>	<i>Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів</i>	<i>Готовність споживачів сприйняти продукт</i>	<i>Орієнтовний попит в межах цільової групи (сегменту)</i>	<i>Інтенсивність конкуренції в сегменті</i>	<i>Простота входу у сегмент</i>
1	Невеликі підприємства	Висока	Високий	Середня	Висока
2	Великі компанії та підприємства	Середня	Високий	Середня	Середня
3	Лабораторії	Висока	Середній	Середня	Висока
4	Приватні особи	Середня	Середній	Відсутня	Висока
Які цільові групи обрано: Невеликі підприємства, лабораторії					

Як видно з таблиці 4.14, основними цільовими групами потенційних клієнтів є невеликі підприємства та лабораторії. Великі підприємства та компанії також дають потенціал для збуду продукту. Найменш підходять для цього приватні особи.

Визначимось з базовою стратегією розвитку проекту (таб. 4.15)

Таблиця 4.15. Визначення базової стратегії розвитку

<i>n/n</i>	<i>Обрана альтернатива розвитку проекту</i>	<i>Стратегія охоплення ринку</i>	<i>Ключові конкурентоспроможні позиції відповідно до обраної альтернативи</i>	<i>Базова стратегія розвитку*</i>
1	Розроблення програмного забезпечення для систем НК	Стратегія спеціалізації	Спроможність запропонувати нові методи обробки даних	Стратегія диференціації

Базовою стратегією було обрано розроблення програмного забезпечення для систем НК, так як проблема створення нової системи не є основною та має більше загроз, ніж перспектив.

Визначимось з базовою стратегією конкурентної поведінки проекту (таб. 4.16)

Таблиця 4.16. Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

	Чи є проект	Чи буде компанія	Чи буде компанія	Стратегія
--	-------------	------------------	------------------	-----------

п/п	«першопрохідцем» на ринку?	шукати нових споживачів, або забирати існуючих у конкурентів?	копіювати основні характеристики товару конкурента, і які?	конкурентної поведінки*
1	Так	Забирати у існуючих конкурентів	Ні, в цьому немає потреби	Стратегія виклику лідеру

Базовою стратегією конкурентної поведінки було обрано роботу з клієнтами конкурентів, адже даний продукт є новинкою на ринку та може достойно замінити існуючі підходи до інтерпретації показань контролю.

Таблиця 4.17. Визначення стратегії позиціонування

<i>n/n</i>	<i>Вимоги до товару цільової аудиторії</i>	<i>Базова стратегія розвитку</i>	<i>Ключові конкурентоспроможні позиції власного стартап-проекту</i>	<i>Вибір асоціацій, які мають сформувавши комплексну позицію власного проекту (три ключових)</i>
1	Універсальність	Стратегія диференціації	Універсальність	Імпедансний неруйнівний контроль, методи машинного навчання, універсальність
2	Легкість інтерпретації показань контролю		Нові методи обробки інформації, які забезпечують легкість інтерпретації показань	

Важливо створити правильні асоціації цільової аудиторії з продуктом. Необхідно правильно показати переваги даного проекту, що відповідають основним вимогам потенціальних клієнтів.

4.5. Розроблення маркетингової програми стартап-проекту

Після проведених досліджень ринку, аналізу слабких і сильних сторін товару є доцільним створити концепцію товару, згідно з якою товар буде виводитись на ринок, для цього сформуємо маркетингову концепцію товару (таб. 4.18)

Таблиця 4.18. Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

<i>№</i>	<i>Потреба</i>	<i>Вигода, яку пропонує</i>	<i>Ключові переваги перед</i>
----------	----------------	-----------------------------	-------------------------------

<i>n/n</i>		<i>товар</i>	<i>конкурентами (існуючі або такі, що потрібно створити)</i>
1	Легкість інтерпретації контролю	Полегшення інтерпретації показань шляхом застосування нових методів обробки інформації	Використання методів машинного навчання для обробки даних
2	Форма сигналу	Методи обробки сигналів дозволяють виявляти сигнали невідомої заздалегідь амплітуди, фази та частоти	Особливість виявлення сигналів з невідомими параметрами дозволяє реалізувати нові шляхи інтерпретації показань

Ключовими перевагами потенційного товару є легкість інтерпретації показань контролю та можливість обробки сигналів з невідомими заздалегідь параметрами.

Створимо тривірневу маркетингову модель товару (та. 4.19)

Таблиця 4.19. Опис трьох рівнів моделі товару

<i>Рівні товару</i>	<i>Сутність та складові</i>		
I. Товар за задумом	Легкість інтерпретації показань контролю		
II. Товар у реальному виконанні	Властивості/характеристики	М/Нм	Вр/Тх /Гл/Е/Ор
	1. Використання машинного навчання	+	
	2. Інтеграція з існуючими системами	+	
	3. Можливість обробки сигналів невідомої форми	+	
	Якість: ГОСТ 14782-86 контроль неруйнівний.		
III. Товар із підкріпленням	Пакування		
	Марка: «Машинне навчання при імпульсному імпедансному контролі композитів» МЗ		
III. Товар із підкріпленням	До продажу включається		
	Після продажу включається		
За рахунок чого потенційний товар буде захищено від копіювання: За рахунок наявності інформаційної технології обробки сигналів імпедансного неруйнівного контролю, яка базується на методах обробки сигналів, яка раніше не набула широкого вжитку.			

Таблиця 4.20. Визначення меж встановлення ціни

<i>№ n/n</i>	<i>Рівень цін на товари-замінники</i>	<i>Рівень цін на товари-аналоги</i>	<i>Рівень доходів цільової групи споживачів</i>	<i>Верхня та нижня межі встановлення ціни на товар/послугу</i>
1	~41000 грн.	~51000 грн.	~200000 грн/рік	60000/41000

З таблиці видно, що даний потенційний товар не є дешевим, але його ціна значно нижча за аналоги. Також важливо врахувати те, що такого продукту раніше не було на ринку неруйнівного контролю.

Таблиця 4.21. Формування системи збуту

<i>№ n/n</i>	<i>Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів</i>	<i>Функції збуту, які має виконувати постачальник товару</i>	<i>Глибина каналу збуту</i>	<i>Оптимальна система збуту</i>
1	Замовлення по телефону через кваліфіковану особу	Отримання замовлення, обробка замовлення, доставка.	Висока	Поштучний продаж продукції

Системою збуту було обрано замовлення через кваліфіковану особу, адже новизна продукції може призвести до додаткових запитань з боку клієнтів. На даному етапі при введенні нового товару на ринок, збут іншими способами може викликати недовіру.

Таблиця 4.22. Концепція маркетингових комунікацій

<i>№ n/n</i>	<i>Специфіка поведінки цільових клієнтів</i>	<i>Канали комунікацій, якими користуються цільові клієнти</i>	<i>Ключові позиції, обрані для позиціонування</i>	<i>Завдання рекламного повідомлення</i>	<i>Концепція рекламного звернення</i>
1	Формування замовлення у експерта	Інтернет, телефон	Ціна; Легкість інтерпретації показань; Універсальність; Новизна	Донести до цільової аудиторії переваги продукту	Розміщення оглядових статей на електронних ресурсах, в календарних виданнях, участь у конференціях та семінарах

В наш час кожен має змогу скористатися телефоном чи інтернетом і саме ці канали зв'язку є найбільш зручними для комунікації. Розміщення оглядових статей

на електронних ресурсах, участь у конференціях та семінарах може дати змогу донести до цільової аудиторії переваги продукту.

4.6 Висновки до розділу

Дослідження показали можливість ринкової комерціалізації проекту, що обумовлено наявністю попиту на системи неруйнівного контролю. Також в ході аналізу було підтверджено рентабельність проекту. Незважаючи на наявну конкуренцію певного рівня, ринок надає можливості впровадження продукту в обіг з огляду наявності цільової аудиторії, яка зацікавиться даним продуктом. Продукт здатен подолати бар'єри входження в ринок, такі як необхідність сертифікації обладнання перед випуском її в вільний продаж та набір клієнтської бази.

В ході досліджень в якості альтернативи було обрано розробку методів обробки даних для наявних систем неруйнівного контролю, яка в наш час є доволі перспективною галуззю.

В подальшому є можливості виведення проекту на міжнародний ринок. Це обумовлено тим, що системи даного типу є абсолютно новими та дозволяють значно спростити процес інтерпретації показань контролю.

5. Результати дослідження

Для дослідження машинного навчання було обрано бібліотеку Keras для створення нейронних мереж на базі мови програмування Python.

Keras – це високорівневий інструмент для нейронних мереж, написаний на Python і здатний працювати з TensorFlow, CNTK або Theano. Він був розроблений з урахуванням можливості перейти від ідеї до результату з мінімальною затримкою.

Основною моделлю завантаження даних для бібліотеки було обрано послідовну (sequential) модель, яка підходить для поставленої задачі.

Послідовна модель - це лінійний стек шарів. Модель повинна знати, яку форму входу вона повинна очікувати. З цієї причини перший шар у послідовній моделі (і лише перший, оскільки наступні шари можуть робити автоматичне виведення форми) потребує отримання інформації про свою форму введення. Це було здійснено наступним чином: використовується шар Dense, який підтримує специфікацію своєї форми введення за допомогою аргументу `input_dim` (вхідний розмір даних) та шаровий параметр `batch_size`.

Перш ніж тренувати модель, потрібно налаштувати процес навчання, який виконується методом компіляції. Вона отримує три аргументи:

1. Оптимізатор. Це може бути рядковий ідентифікатор існуючого оптимізатора (наприклад, `rmsprop` або `adagrad`) або екземпляр класу оптимізатора.
2. Функція втрат. Це об'єкт, який модель намагатиметься мінімізувати.
3. Список метрик. Для будь-якої задачі класифікації цей параметр встановлюється в `metrics = ['accuracy']`.

Моделі компіляції бібліотеки Keras:

- Для багатокласної класифікації
- Для двох класів
- Для задачі зменшення середньоквадратичної похибки
- Для спеціальних показників

В даній роботі досліджується використання машинного навчання для виявлення наявності дефекту в композиційних матеріалах, тому було прийняте рішення про доцільність використовувати модель для двох класів.

Важливим параметром в навчанні нейронної мережі є кількість епох (epochs). Одна епоха відповідає одному циклу навчання нейронної мережі в режимі тренування. На рисунку 5.1 показана залежність результатів тестування НМ від кількості епох. На осі X вказані номери дефектів стандартного зразку, на осі Y – точність (accuracy), з якою нейронна мережа визначає наявність або відсутність дефекту при тестуванні.

Результат навчання нейронної мережі також залежить від кількості шарів. Зазвичай використовують вхідний, внутрішній та вихідний шар нейронів. На рисунку 5.2 показано відмінність результатів тестування двошарової та тришарової НМ.

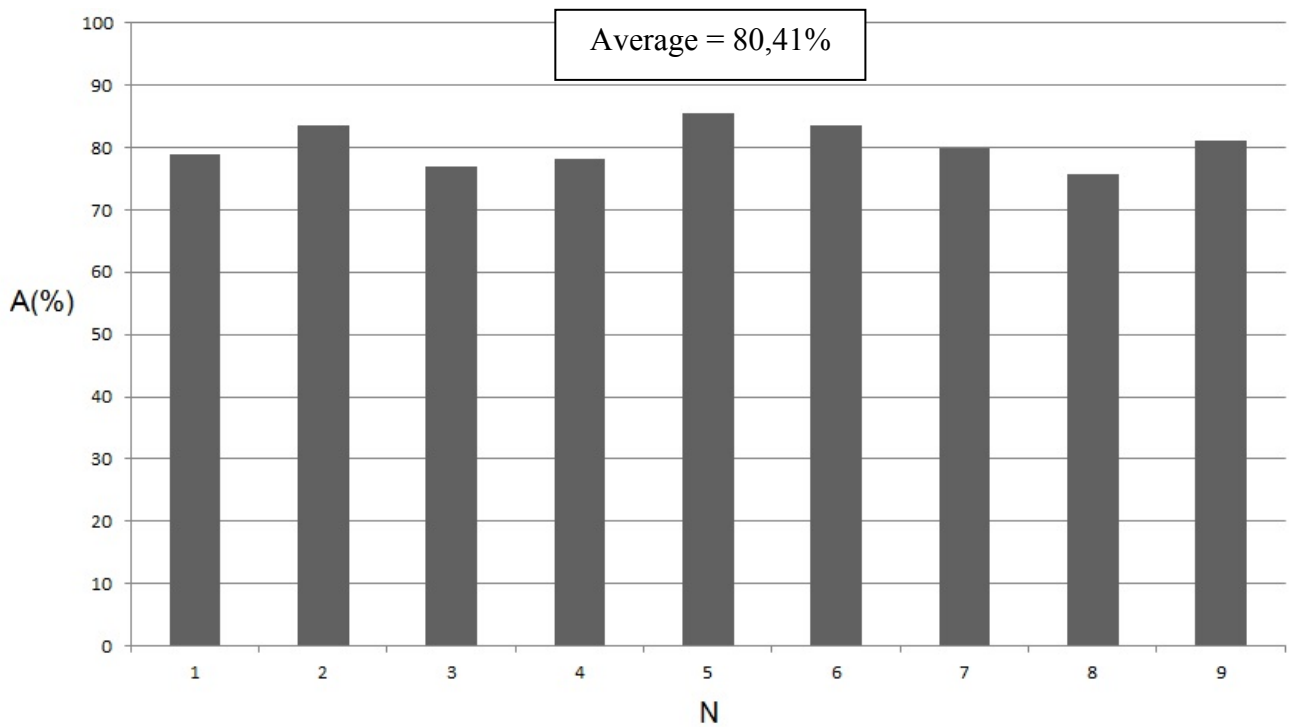
Кількість нейронів на вході та внутрішньому шарі нейронної мережі підбиралася експериментальним шляхом. У зв'язку з тим, що метою даного дослідження є виявлення дефектів, виходів завжди буде 2, один з яких відповідає наявності дефекту, другий – відсутності. Порівняння результатів тестування нейронної мережі з різною кількістю нейронів показано на рисунку 5.3.

Параметр batch size – це кількість даних, після обробки яких НМ оновлює значення вагів на синапсах між нейронами вхідного та вихідного шару. Цей параметр також був обраний експериментальним шляхом. Результати тестування нейронної мережі з різними значеннями даного параметру відображені на рисунку 5.4.

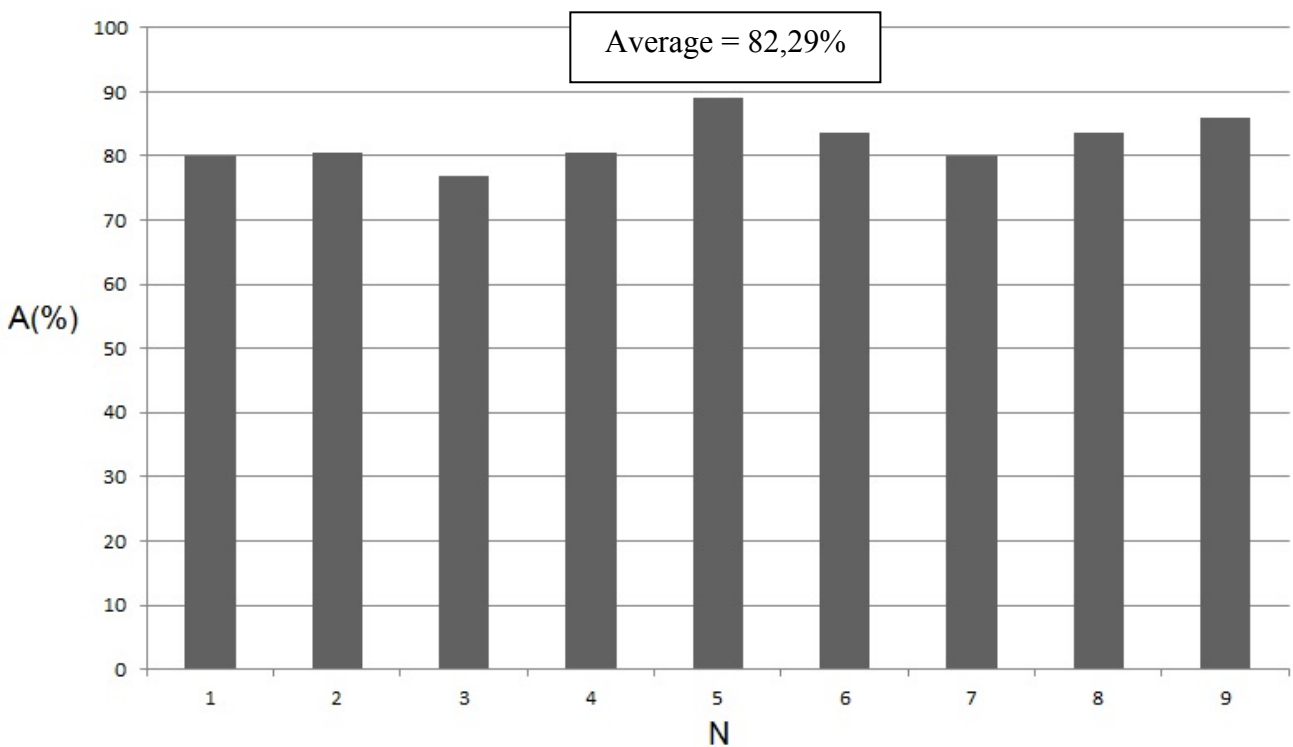
Отже, в результаті експерименту були обрані значення параметрів, що перераховані вище:

- модель компіляції – для двох класів
- кількість епох – 10
- кількість шарів – 3
- число нейронів на вхідному та внутрішньому шарах – 3500/1750
- batch size – 100

Значення всіх інших параметрів були встановлені згідно рекомендацій розробників бібліотеки Keras.



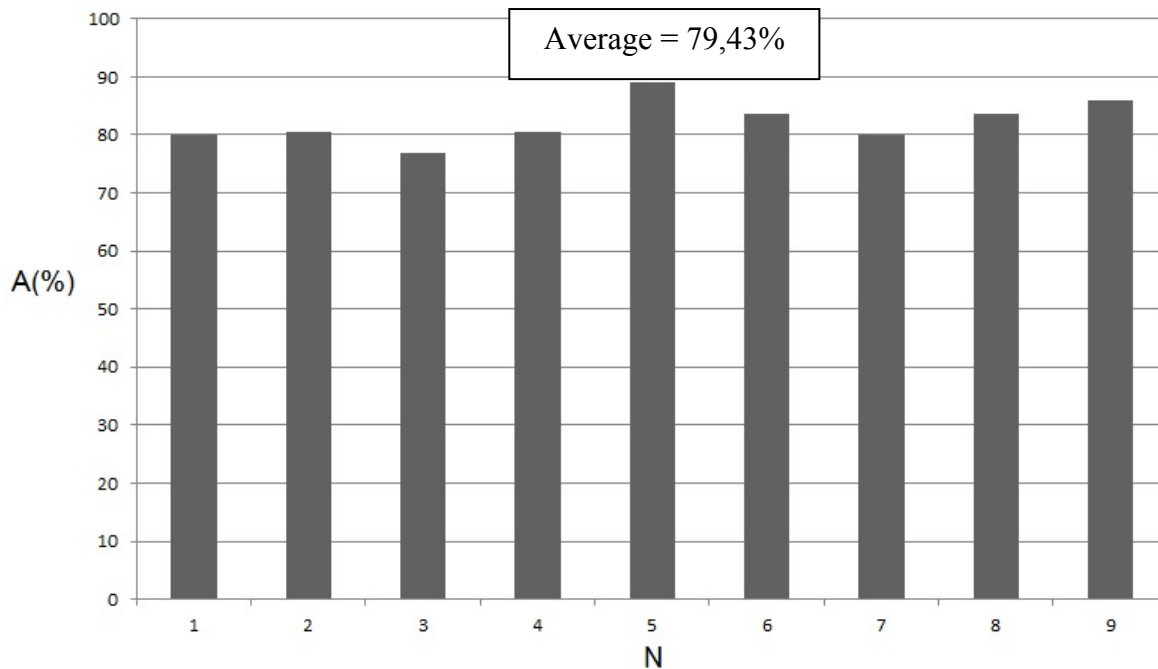
а)



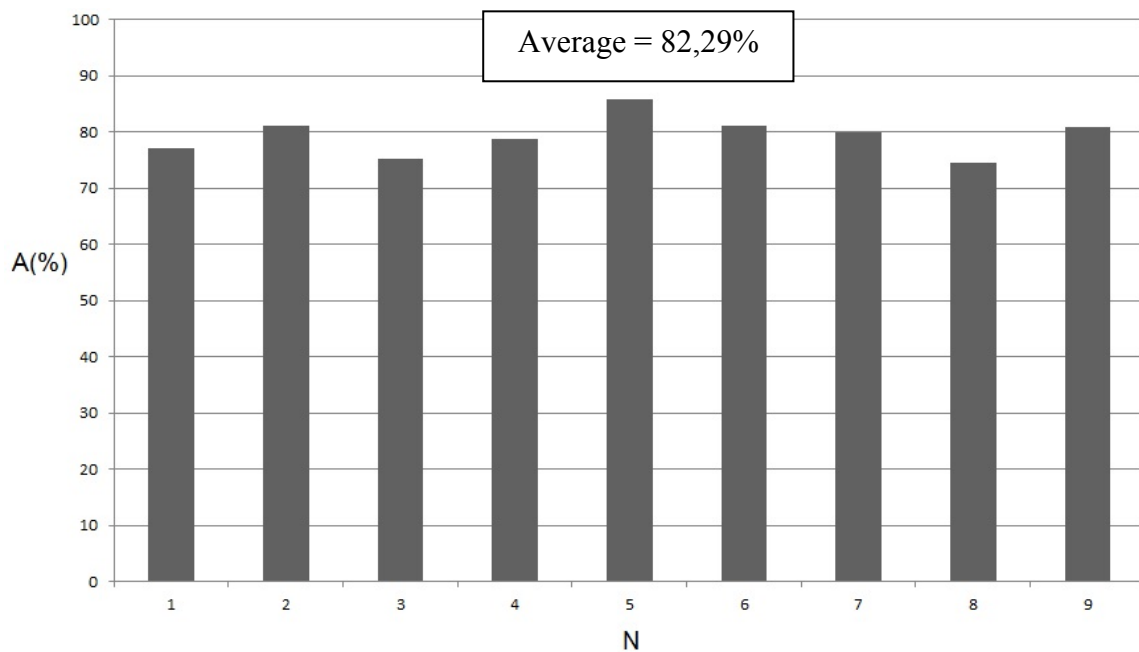
б)

Рисунок 5.1. Залежність результатів тестування НМ від кількості епох: а) к-ть епох - 5; б) к-ть епох - 10

Для 5-ти циклів навчання середня точність становить 80,41%, а для 10-ти – 82,29%. Через те, що обладнання, на якому проводилось дослідження має обмеження, використовувати більшу кількість епох недоцільно, тому для подальшого тестування число циклів навчання буде рівним 10-ти.



а)



б)

Рисунок 5.2. Порівняння результатів тестування НМ з: а) двома шарами; б) трьома шарами

Як видно з графіків, тришарова нейронна мережа дає кращий результат, тому доцільно використовувати саме таку кількість шарів.

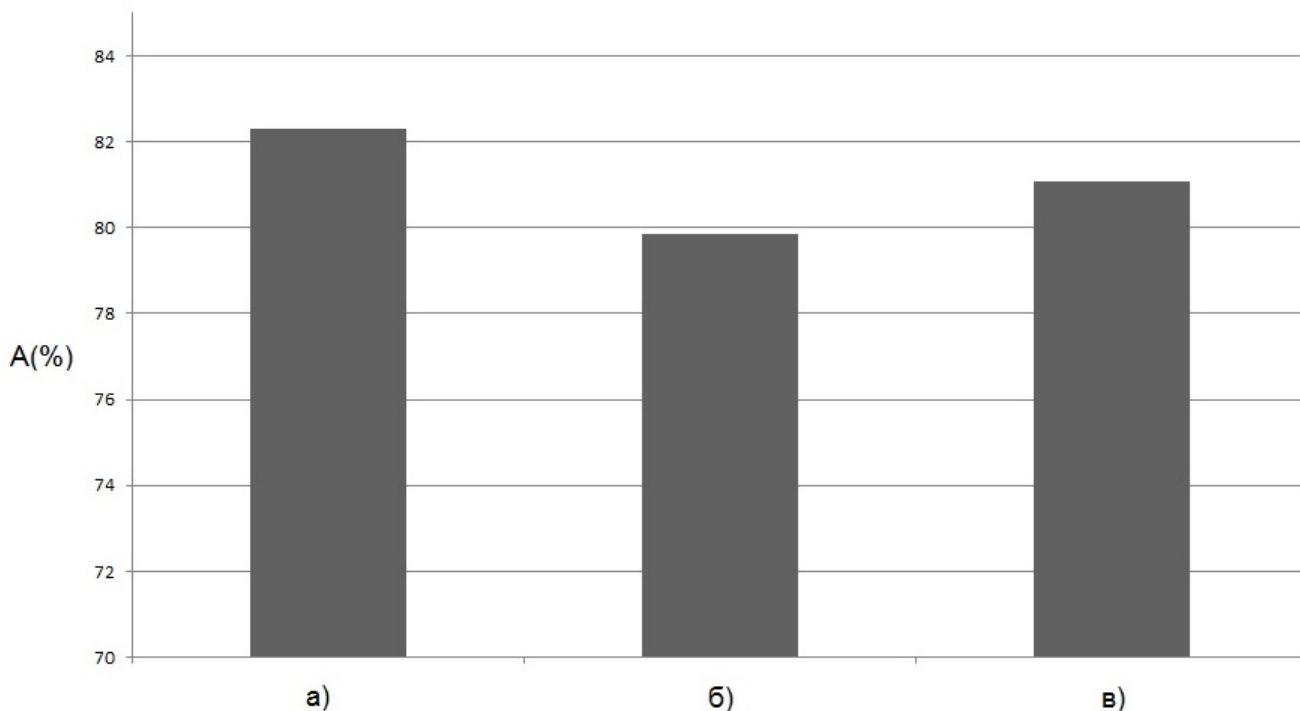


Рисунок 5.3. Порівняння результатів тестування нейронної мережі з різною кількістю нейронів на входному та внутрішньому шарі: а) 3500/1750; б) 3000/1500; в) 5000/2500

Найращі результати отримані після тестування НМ з кількістю нейронів 3500 та 1750 на входному та внутрішньому шарі відповідно.

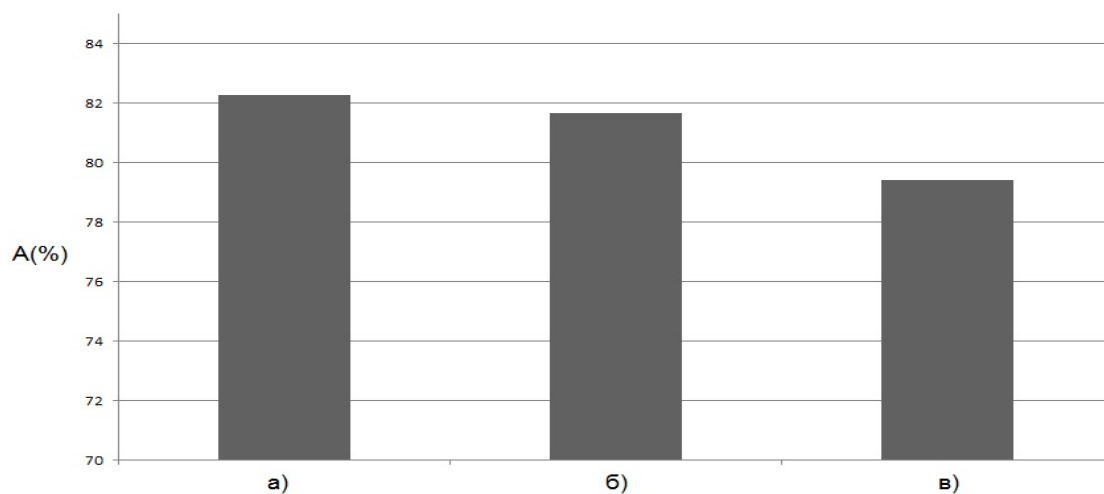


Рисунок 5.4. Результати тестування нейронної мережі з різними значеннями параметру batch size: а) 100; б) 300; в) 50

Проаналізувавши результати порівняння всіх важливих параметрів НМ робимо висновок, що найбільша точність рівна 82,29%, що відповідає наступному поєднанню параметрів: модель компіляції – для двох класів, кількість епох – 10, кількість шарів – 3, число нейронів на вхідному та внутрішньому шарах – 3500/1750, batch size – 100.

Висновки

1. В даному розділі описано створення нейронної мережі за допомогою бібліотеки Keras на базі мови програмування Python.
2. В ході експерименту було проведено порівняння результатів в залежності від різного значення основних параметрів НМ.
3. Опираючись на проміжні результати тестування мережі були підібрані параметри, які дають змогу отримати найвищу точність.
4. На основі отриманих даних можна зробити висновок про доцільність використання та розвитку методів машинного навчання для виявлення дефектів при імпульсному імпедансному контролі композиційних матеріалів.

Висновки

В даній роботі наведено теоретичне обґрунтування доцільності використання методів машинного навчання для виявлення дефектів у композитних матеріалах.

Наукові та практичні результати полягають в наступному:

- Розроблено нейронну мережу, яка здатна навчатися на заздалегідь підготовлених даних та класифікувати сигнали по наявності або відсутності дефекта на ділянці, з якої він був отриманий.
- Проведено експерименти з різними параметрами НМ та обрано їх оптимальні значення для отримання найвищої точності класифікації сигналів.
- Розроблено стартап-проект по реалізації даного методу обробки, що дозволить прискорити впровадження розробленого методу.

Запропоноване рішення проблеми інтерпритації показань контролю відповідає сучасному рівню наукових та технічних знань.

Розвиток даного дослідження може дати змогу впровадити даний метод обробки сигналів у такі галузі, як авіабудування, цивільне та промислове будівництво та інші.

Доцільно продовжувати дослідження методів машинного навчання в дефектоскопії, адже в перспективі це дозволить повністю виключити похибку від неточної інтерпритації показань контролю оператором.

Список використаної літератури

1. Ланге, Ю. В. Низкочастотные акустические методы неразрушающего контроля. Дефектоскопия / Ю. В. Ланге, М. Б. Московенко. – Москва: Машиностроение, 1991. – 272 с.
2. Приборы для неразрушающего контроля материалов и изделий. Справочник. В 2-х книгах . Кн.2 / За ред. В. В. Клюева. – М.: Машиностроение, 1986. – 352 с.
3. О характеристиках импедансного метода контроля и преобразователей импедансных дефектоскопов / Ю. В. Ланге // Дефектоскопия. – 1978. - №11. - с.11 – 20.
4. Импульсный вариант акустического импедансного метода неразрушающего контроля / Ю.В. Ланге // Дефектоскопия. – 1987. - №6. - с.13 – 18.
5. Акустические импедансные методы неразрушающего контроля / Ю.В. Ланге // Дефектоскопия. – 1978. - №8. - с.22-36 .
6. Акустический импедансный метод неразрушающего контроля многослойных конструкций / Ю. В. Ланге // Газета «Приборы и системы управления». – 1998. - №5. - с.16-17.
7. Біргер, І.А. Техническая диагностика / І.А. Біргер. – М.:Машиностроение, 1978. - 212 с.
8. Хайкін, С. Нейронные сети: полный курс, 2-е издание / С. Хайкін. - .М: Издательский дом «Вильямс», 2006. – 1104 с.
9. Штучний нейрон / Студопедия – режим доступа: https://studopedia.su/17_30353_shtuchniy-neyron.html/ - 26.05.2015 р.
10. Перспективні дослідження і розробки по інтелектуальних системах / Інфопедия для углубления знаний – режим доступа: <https://infopedia.su/17x643f.html/> - 05.02.2017 р.
11. Штучні нейронні мережі / Інфопедия для углубления знаний – режим доступа: <https://infopedia.su/17x6447.html/> - 05.02.2017 р.

12. Методичні рекомендації до виконання розділу магістерських дисертацій для студентів інженерних спеціальностей / За заг. ред. О.А. Гавриша. – Київ : НТУУ «КПІ», 2016. – 28 с.
13. Інформація та документація. Звіти у сфері науки і техніки. Структура та правила оформлювання : ДСТУ 3008-15. – [Чинний від 22-06-2015]]. — К. : Держстандарт України, 2015. — 26 с. — (Національний стандарт України)

ДОДАТКИ

Додаток А. Програма для обмеження сигналів в корисній області

```
import os
import errno

inputSignalFilesDir = '../signals'
resultSignalsDir = '../prepared_signals_new'
readFromSignalValue = 89
readToSignalValue = 3089

# try create output dir and ignore 'Already exist error'
try:
    os.makedirs(resultSignalsDir)
except OSError as e:
    if e.errno != errno.EEXIST:
        raise

# iterate directories
for signalDir in os.listdir(inputSignalFilesDir):

    # print(signalDir)
    inputDir = os.path.join(inputSignalFilesDir, signalDir)
    # check if folders item is directory (one signal - one
directory)
    if not os.path.isdir(inputDir):
        continue

    print("here")

# iterate files
```

```

for fileName in os.listdir(inputDir):

    # create result directory for current signal
    resultDirectoryPath = os.path.join(resultSignalsDir,
signalDir)

    try:
        os.makedirs(resultDirectoryPath)
    except OSError as e:
        if e.errno != errno.EEXIST:
            raise

    # get path to input and output files
    filePath = os.path.join(inputSignalFilesDir, signalDir,
fileName)

    resultFilePath = os.path.join(resultSignalsDir,
signalDir, fileName)

    # check if folders item is file
    if not os.path.isfile(filePath):
        continue

    # open file for reading
    fileDescriptor = open(filePath, 'r')

    # if file exist truncate existing data; if file not
exist create new empty file
    resultFileDescriptor = open(resultFilePath, 'w')

    # read file lines
    for i, line in enumerate(fileDescriptor):
        # convert line to array
        lineArray = line.split(' ')
        # filter array values
        resultArray =
lineArray[readFromSignalValue:readToSignalValue]

```

```
# build new line (include only filtered values)
resultLine = ' '.join(resultArray)
# write line to file
resultFileDescriptor.write(resultLine + '\n')

# close opening files
fileDescriptor.close()
resultFileDescriptor.close()
```

Додаток Б. Програма для обчислення амплітуд сигналів

```
import os
import errno

inputSignalFilesDir = '../prepared_signals'
resultSignalsDir = '../amplitude'

# try create output dir and ignore 'Already exist error'
try:
    os.makedirs(resultSignalsDir)
except OSError as e:
    if e.errno != errno.EEXIST:
        raise

# iterate directories
for signalDir in os.listdir(inputSignalFilesDir):

    # check if folders item is directory (one signal - one
    directory)
    if not os.path.isdir(signalDir):
        continue

    # iterate files
    for fileName in os.listdir(signalDir):

        # create result directory for current signal
        resultDirectoryPath = os.path.join(resultSignalsDir,
        signalDir)
        try:
            os.makedirs(resultDirectoryPath)
        except OSError as e:
            if e.errno != errno.EEXIST:
                raise

        # get path to input and output files
        filePath = os.path.join(inputSignalFilesDir, signalDir,
        fileName)
        resultFilePath = os.path.join(resultSignalsDir,
        signalDir, fileName)

        # check if folders item is file
        if not os.path.isfile(filePath):
            continue

        # open file for reading
        fileDescriptor = open(filePath, 'r')

        # if file exist truncate existing data; if file not
        exist create new empty file
        resultFileDescriptor = open(resultFilePath, 'w')
```

```
# read file lines
for i, line in enumerate(fileDescriptor):
    # convert line to array
    lineArray = line.split(' ')
    # calculate amplitude
    amplitude = float(max(lineArray)) -
float(min(lineArray))
    # store value to file
    resultFileDescriptor.write(str(amplitude) + '\n')

# close opening files
fileDescriptor.close()
resultFileDescriptor.close()
```

Додаток В. Програма для формування масиву, на якому навчається нейронна мережа

```
import numpy as np
import os

def isdefectedsignal(signalDirNumber, signalNumber):

    if 1 == signalDirNumber:
        if 11 <= signalNumber <= 25:
            return True
        else:
            return False
    elif 2 == signalDirNumber:
        if 12 <= signalNumber <= 30:
            return True
        else:
            return False
    elif 3 == signalDirNumber:
        if 13 <= signalNumber <= 31:
            return True
        else:
            return False
    elif 4 == signalDirNumber:
        if 12 <= signalNumber <= 30:
            return True
        else:
            return False
    elif 5 == signalDirNumber:
        if 8 <= signalNumber <= 26:
            return True
        else:
            return False
    elif 6 == signalDirNumber:
        if 9 <= signalNumber <= 28:
            return True
        else:
            return False
    elif 7 == signalDirNumber:
        if 8 <= signalNumber <= 15:
            return True
        else:
            return False
    elif 8 == signalDirNumber:
        if 5 <= signalNumber <= 23:
            return True
        else:
            return False
    elif 9 == signalDirNumber:
        if 9 <= signalNumber <= 27:
```

```

        return True
    else:
        return False

def gettraindata():
    pathToSignalsDir = 'D:\\dip\\cutt'
    x_train = np.empty((0, 3000))
    y_train = np.empty((0, 2))

    for Sigdir in os.listdir(pathToSignalsDir):

        # print(Sigdir)
        inputDir = os.path.join(pathToSignalsDir, Sigdir)

        if not os.path.isdir(inputDir):
            continue

        for fileName in os.listdir(inputDir):
            filePath = os.path.join(pathToSignalsDir, Sigdir,
fileName)

            # open file for reading
            fileDescriptor = open(filePath, 'r')

            for i, line in enumerate(fileDescriptor):
                if i == 1 or i == 15:
                    continue
                lineArray = line.rstrip('\n').split(' ')
                x_train = np.append(x_train, [lineArray],
axis=0)

                y_train_array = [0, 1]
                if isdefectedsignal(int(Sigdir), int(i)):
                    y_train_array = [1, 0]
                y_train = np.append(y_train, [y_train_array],
axis=0)

            return x_train, y_train

def gettestdata():
    pathToSignalsDir = 'D:\\dip\\cutt'
    x_train = np.empty((0, 3000))
    y_train = np.empty((0, 2))

    for Sigdir in os.listdir(pathToSignalsDir):

        # print(Sigdir)
        inputDir = os.path.join(pathToSignalsDir, Sigdir)

        if not os.path.isdir(inputDir):
            continue

        for fileName in os.listdir(inputDir):

```

```

filePath = os.path.join(pathToSignalsDir, Sigdir,
fileName)
# open file for reading
fileDescriptor = open(filePath, 'r')

for i, line in enumerate(fileDescriptor):
    if not (i == 1 or i == 15):
        continue

    lineArray = line.rstrip('\n').split(' ')
    x_train = np.append(x_train, [lineArray],
axis=0)
    y_train_array = [0, 1]
    if isdefectedsignal(int(Sigdir), int(i)):
        y_train_array = [1, 0]
    y_train = np.append(y_train, [y_train_array],
axis=0)

return x_train, y_train

```


Додаток Г. Програма для створення, навчання та тестування нейронної мережі

```
import numpy as np
from keras.datasets import mnist
from keras.models import Sequential
from keras.layers import Dense, Dropout, Flatten
from keras.layers import Conv2D, MaxPooling2D
from keras.utils import np_utils
from keras.optimizers import SGD
from lib import gettraindata, gettestdata

np.random.seed(42)
X_train, y_train = gettraindata()
X_test, y_test = gettestdata()

X_train = X_train.astype('float32')
X_test = X_test.astype('float32')

Y_train = y_train

# print(Y_train)
model = Sequential()
# add Layers 3500 - count of neurons
model.add(Dense(3500, activation='relu', input_dim=3000,
kernel_initializer="normal"))
model.add(Dropout(0.2))
model.add(Dense(1750, activation='relu'))
model.add(Dropout(0.5))
model.add(Dense(2, activation='sigmoid'))

#рекомендовано керасом
model.compile(loss="binary_crossentropy",
optimizer="rmsprop", metrics=["accuracy"])
```

```
print(model.summary())

#модель обучения, батч - после каждых 100 значений
присваивает весовые коэф,
#эпоха - цикл обучения
model.fit(X_train, Y_train, batch_size=50, epochs=10,
validation_split=0.2, verbose=2)

Y_test = y_test
scores = model.evaluate(X_test, Y_test, verbose=0)
print("test: %.2f%%" % (scores[1]*100))

# save model to file
model_json = model.to_json()
json_file = open("network.json", "w")
json_file.write(model_json)
json_file.close()
model.save_weights("network_model.h5")
print("network saved")
```