

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

**Приладобудівний факультет**

**кафедра автоматизації та систем неруйнівного контролю**

«На правах рукопису»  
УДК \_\_\_\_\_

До захисту допущено:  
Завідувач кафедри  
\_\_\_\_\_ Юрій КИРИЧУК  
«\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

**Магістерська дисертація**

**на здобуття ступеня магістра**

**за освітньо-професійною програмою «Комп'ютерно-інтегровані  
системи та технології в приладобудуванні»  
зі спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані  
технології»**

**на тему: «Автоматизована система визначення типу матеріалу  
активним тепловим методом»**

Виконав:

студент II курсу, групи ПК-11мп  
Наконечний Микола Вікторович \_\_\_\_\_

Науковий керівник:

Ст.викладач, доктор філософії  
Момот Андрій Сергійович \_\_\_\_\_

Консультант з «Розробка стартап-проекту»:

Завідувач кафедри економічної кібернетики, д.е.н., проф.  
Бояринова Катерина Олександрівна \_\_\_\_\_

Рецензент:

проф. д.т.н.  
Защепкіна Наталія Миколаївна \_\_\_\_\_

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

Студент \_\_\_\_\_

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

Рівень вищої освіти – другий (магістерський)

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

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

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ Юрій КИРИЧУК

«\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

**ЗАВДАННЯ**  
**на магістерську дисертацію студенту**  
**Наконечному Миколі Вікторовичу**

1. Тема дисертації «Автоматизована система визначення типу матеріалу активним тепловим методом», науковий керівник дисертації професор кафедри АСНК Момот Андрій Сергійович, затверджені наказом по університету від «9» 11.2022 р. № 4110-с
2. Термін подання студентом дисертації: 17.12.2022\_\_\_\_\_
3. Об'єкт дослідження: процес лазерного нагріву об'єктів різних матеріалів.
4. Вихідні дані: вибірка теплових профілів зразків, вірогідність правильної класифікації теплових профілів не менше 70%.
5. Перелік завдань, які потрібно зробити: виконати літературний огляд за темою дослідження, провести аналіз існуючих методів визначення типу матеріалу, розробка системи для класифікації типу матеріалу.
6. Орієнтовний перелік графічного (ілюстративного) матеріалу: три плакати А1.

7. Орієнтовний перелік публікацій: публікація статті в матеріалах науково-технічній конференції «Ефективність та Автоматизація інженерних рішень у приладобудуванні – 2022», публікація статті в матеріалах XIII науково-технічній конференції студентів, аспірантів та молодих вчених «Погляд у майбутнє приладобудування», публікація статті в матеріалах XVI науково-технічній конференції студентів, аспірантів та молодих вчених «Ефективність та автоматизація інженерних рішень у приладобудуванні».

#### 8. Консультанти розділів дисертації

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Розробка стартап-проектів	Бояринова К.О., д.е.н., проф.; завідувач кафедри економічної кібернетики КПІ ім. Ігоря Сікорського		

9. Дата видачі завдання: \_\_\_\_\_

#### Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Огляд літературних джерел, аналіз існуючих систем.	3 тижні	
2	Розгляд і вибір методів визначення типу матеріалу	1 тиждень	
3	Розгляд і вибір методів машинного навчання	1 тиждень	
4	Створення системи на основі обраних методів	3 тижні	
5	Моделювання системи на основі зробленої вибірки	3 тижні	
6	Розробка стартап-проекту	1 тиждень	
7	Оформлення пояснювальної записки, презентації та плакатів	1 тиждень	

Студент

Микола НАКОНЕЧНИЙ

Науковий керівник

Андрій МОМОТ

## РЕФЕРАТ

Обсяг магістерської дисертації складає 86 сторінок в 5 розділах, та містить 35 джерел літератури, 36 малюнки, 25 таблиць.

Мета роботи: створити систему, що буде розпізнавати 4 класи матеріалу використовуючи температурні профілі об'єктів, отримані шляхом лазерного нагріву зразків.

Завдання роботи:

1. Виконати літературний огляд за темою дослідження.
2. Провести аналіз існуючих методів визначення типу матеріалу.
3. Розробка системи для класифікації типу матеріалу.
4. Проаналізувати результати експериментальних досліджень.

Об'єкт дослідження: процес лазерного нагріву об'єктів різних матеріалів.

Предмет дослідження: методи автоматизованої класифікації типу матеріалу.

В даній роботі було проаналізовано проблеми визначення характеристик невідомих об'єктів в телеопераційних задачах та запропоновано безконтактний підхід на основі активного теплового неруйнівного методу та використанні технологій нейронних мереж для класифікації.

Отримані результати підтверджують, що створена система здатна оцінити матеріал зразка по зчитаному температурному профілю його поверхні. Лазерне джерело нагріває поверхню об'єкта, у той час інфрачервона камера фіксує його температурний профіль та передає дані в алгоритм на основі нейронної мережі для класифікації.

Ключові слова: інфрачервона термографія, лазерний нагрів, нейронні мережі, класифікація матеріалів.

## ABSTRACT

The volume of the master's thesis is 86 pages in 5 chapters, and contains 35 sources of scientific literature, 36 pictures, 25 tables.

The purpose of the work: to create a system that will recognize 4 classes of material using the temperature profiles of objects obtained by laser heating of samples.

Tasks of the dissertation:

1. Review a literature on the research topic.
2. Conduct an analysis of the existing methods of determining the type of material.
3. Develop a system for classifying the type of material.
4. Analyze the results of experimental studies.

The object of research: the process of laser heating of objects of various materials.

Subject of research: methods of automated classification of material type.

This work analyzed the problems of determining the properties of unknown objects in teleoperation tasks and proposed a non-contact solution based on active thermal non-destructive method and the use of neural network technologies for classification.

The obtained results confirm that the created system is able to evaluate the material of the sample based on the measured temperature signature of its surface. A laser source heats the object's surface, while an infrared camera captures its temperature signature and sends the data to a neural network-based algorithm for classification.

Keywords: infrared thermography, laser heating, neural networks, material classification.

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ.....	9
ВСТУП .....	10
РОЗДІЛ 1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД.....	11
1.1. Огляд стану проблеми.....	11
1.2. Огляд методів класифікації типів матеріалів.....	13
1.2.1. Аудіовізуальний метод визначення типу матеріалу .....	13
1.2.2. Визначення типу матеріалу на контактній основі.....	16
1.2.3. Вихрострумний метод визначення типу матеріалу .....	19
1.2.4. Термографія.....	21
1.3. Опис і обґрунтування вибору методу .....	27
1.4. Обґрунтування вибору засобу вимірювання.....	31
1.5. Огляд існуючих методів аналізу теплових профілів.....	34
1.5.1. Класичні методи машинного навчання .....	34
1.5.2. Нейромережеві класифікатори .....	36
1.6. Висновки до розділу 1 .....	37
РОЗДІЛ 2. РОЗРОБКА ПРОГРАМНО-ТЕХНІЧНИХ АЛГОРИТМІВ СИСТЕМИ .....	39
2.1 Вибір та опис об'єкту .....	39
2.2. Розробка структурної схеми приладу .....	39
2.3. Вибір та опис лазерного джерела.....	40
2.4. Вибір та опис тепловізора.....	41
2.5. Вибір типу нейронних мереж .....	43
2.5.1. Багатошарова мережа прямого розповсюдження.....	43

2.5.2. Мережі LSTM (Long short-term memory).....	45
2.5.3. BI-LSTM (Bi-directional long short term memory).....	47
2.5.4. 1-D Convolutional .....	48
2.6. Розробка алгоритму роботи системи .....	50
2.7. Висновки до розділу 2 .....	51
<b>РОЗДІЛ 3. Імітаційне моделювання.....</b>	<b>53</b>
3.1. Вибір середовища моделювання .....	53
3.2. Опис моделі тестових зразків .....	54
3.3. Опис параметрів моделювання.....	55
3.4. Створення навчального набору даних .....	57
3.5. Висновки до розділу 3 .....	61
<b>РОЗДІЛ 4. ТЕСТУВАННЯ РОЗРОБЛЕНИХ МОДЕЛЕЙ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ.....</b>	<b>62</b>
4.1. Класифікація з використанням багатошарової мережі прямого розповсюдження.....	62
4.2. Класифікація з використанням мережі LSTM .....	64
4.3. Класифікація з використанням мережі Bi-LSTM .....	65
4.4. Класифікація з використанням одновимірної згорткової мережі.....	67
4.5. Аналіз результатів.....	69
4.6. Огляд потенційних шляхів підвищення ефективності системи..	74
4.7. Висновки до розділу 4 .....	75
<b>РОЗДІЛ 5. РОЗРОБКА СТАРТАП-ПРОЕКТУ «АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА ВИЗНАЧЕННЯ ТИПУ МАТЕРІАЛУ АКТИВНИМ ТЕПЛОВИМ МЕТОДОМ» .....</b>	<b>77</b>
5.1. Опис ідеї стартапу.....	77

5.2. Технологічний аудит ідеї проекту.....	79
5.3. Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту.....	80
5.4. Розроблення ринкової стратегії.....	87
5.5. Розроблення маркетингової програми стартап-проекту.....	89
5.6. Висновки до розділу .....	92
ВИСНОВКИ.....	94
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ.....	96
ДОДАТКИ.....	101



## **ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ**

ІЧТ – інфрачервона термографія

НМ – нейронна мережа

RNN – (Recurrent neural network) рекурентна нейронна мережа

LSTM – (Long short-term memory) довга короткочасна пам'ять

CNN – (Convolutional neural network) згорткова нейронна мережа

## ВСТУП

Останнім часом дослідженням характеристик матеріалів приділяється все більше уваги. Успішне маніпулювання невідомими об'єктами потребує розуміння їхніх фізичних властивостей. У ряді прикладних сценаріїв важливо ефективно оцінювати фізичні властивості об'єктів, не вступаючи з ними в контакт безпосередньо (наприклад, дистанційна або автономна робототехніка). Сьогодні такі робототехнічні пристрої користуються переважно візуальними та / або слуховими зворотніми зв'язками для віддаленої взаємодії з навколишнім середовищем робота. Проте у таких систем існує ряд обмежень, пов'язаних саме з розпізнання фізичних властивостей оточуючих об'єктів.

Потенціал для безконтактного визначення характеристик невідомих об'єктів у реальному часі має тепловий неруйнівний метод. Інфрачервона термографія сьогодні широко використовується для неруйнівних оцінок, випробування матеріалів та інших якісних вимірювань. Одним із цікавих сценаріїв для термографії є визначення матеріального складу об'єктів на основі їх теплової реакції на збудження, що може привести до таких застосувань, як мультимодальна взаємодія людини з комп'ютером, телеоперація та безконтактне тактильне відображення. У інфрачервоної термографії є можливість стати новою технологією визначення характеристик матеріалу без необхідності контакту між чутливим елементом і об'єктом, що дозволить реалізувати ширший спектр випадків використання, як наприклад, роботи з надчутливими предметами.

У цій роботі ми спробували представити систему, яка здатна класифікувати різні матеріали в режимі реального часу, використовуючи ступінчасту термографію лазерного збудження та набір класифікаторів машинного навчання. Систему можна використовувати з телекерованими або автономними роботами, щоб оптимізувати техніку захоплення невідомих об'єктів, не торкаючись їх.

## РОЗДІЛ 1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД

### 1.1. Огляд стану проблеми

За останнє десятиріччя ми спостерігаємо величезний прогрес у таких сферах, як автономність роботів, телеоперація, тривимірне комп'ютерне бачення, взаємодія людини з комп'ютером. Системи телеоперації дозволяють користувачеві фізично взаємодіяти з віддаленим середовищем (реальним або віртуальним). Також, протягом останніх кількох років ми спостерігаємо активне зростання імерсивних технологій (таких як змішана та доповнена реальність). Поширення проривів у штучному інтелекті, робототехніці та віртуальній/доповненій реальності покращить комп'ютери з вищим рівнем обізнаності, завдяки чому вони будуть усвідомлювати своє оточення. Це також забезпечить людям природний досвід занурення, що матиме позитивний вплив на освіту, навчання, промисловий дизайн і розваги.

Не дивлячись на те, що існують різні механізми для отримання певної інформації про об'єкти, яка залежить від їхніх матеріальних властивостей, зазвичай неможливо вивести явне рівняння для зв'язку між цими властивостями. Однак деякі програми машинного навчання призначені саме для встановлення зв'язку між різними формами даних. Саме машинне навчання вже знайшло широке коло застосувань, включаючи комп'ютерну діагностику в охороні здоров'я, характеристику матеріалів і діагностику несправностей у машинних системах.

Також по мірі того, як роботи знаходять застосування в областях реального світу такі як будівництво, виробництво, взаємодія з людьми, в повітрі або в космічній області та в інших цивільних або військових програмах, також зростає попит на фізичну взаємодію з невідомим середовищем. У типовому завданні з маніпуляції робот повинен розробити техніку захоплення, засновану на фізичних властивостях об'єкта. Для

успішної маніпуляції перед здійсненням будь-якого фізичного контакту з об'єктом бажано визначити відповідні сили захоплення. Якщо прикладена сила недостатня, то об'єкт може зісковзнути, тоді як занадто велика сила може пошкодити об'єкт. Однією з постійних проблем, які виникають під час захоплення невідомих об'єктів, є відсутність інформації в реальному часі про вагу невідомих об'єктів без фізичного контакту з ними, або спроби підняти їх.

Внаслідок того, що люди використовують приблизне припущення про вагу із початкової візуальної оцінки, а потім тактильні вимірювання, який покращує точність хапання, поширеною технікою для оцінки ваги об'єкта є виконання попередніх захоплень. Оцінка ваги може включати до п'ять кроків: початкове положення роботизованої руки навколо об'єкта, (2) захоплення та підйом об'єкта, (3) утримання об'єкта без підтримки, (4) повернення об'єкта у вихідне положення та (5) повернення рука робота у вихідне положення. Вага об'єкта оцінюється як різниця між силами, що діють робототехнічною рукою на етапах (2) і (3) вздовж трьох напрямків руху. Фундаментальним обмеженням цього підходу є необхідність встановлювати контакт, перш ніж знати фізичні властивості об'єкта.

Виконання точних маніпуляційних завдань на відстані виявилось складнішим і комплекснішим, ніж очікувалося, оскільки воно включає кілька модальностей взаємодії (аудіо, візуальне та фізичне). У той час як сучасні технології аудіовізуального зондування пропонують швидкий і детальний збір аудіо та візуальних даних, можливості фізичного зондування значно відстають. Тому труднощі дистанційного керування зумовлені в основному незбалансованим співвідношенням між зором і фізичними відчуттями. Системи телеоперації, роботи з дистанційним керуванням і автономні роботи, як правило, оснащені камерами високої роздільної здатності, зображення яких обробляються добре налагодженими алгоритмами комп'ютерного зору для вивчення візуальних властивостей маніпульованого простору (таких як колір, геометрія, рух і текстура). Однак ці системи мають дуже обмежені знання про властивості матеріалу маніпульованого простору (наприклад, властивості

жорсткості або тертя). Отримання, зберігання, передача та відображення фізичних властивостей покращить якість виконання або занурення у віддалене середовище. Вже є багато існуючих, зовсім нещодавніх та майбутніх сценаріїв, у яких завдання характеристики невідомого середовища є критично важливим для виконання. Приміром, система, яка спроможна забезпечувати зворотний зв'язок з хірургами кількісними вимірюваннями властивостей, сили та жорсткості м'яких тканин у режимі реального часу, досі відсутня проте надзвичайно потрібна.

Сьогодні ми можемо точно та швидко записувати аудіо та відео за допомогою найсучасніших камер. Однак фактори, які створюють наше відчуття дотику, ще не так ефективно скануються чи моделюються. Загальна потреба у відображенні тактильної модальності полягає в тому, щоб оснастити машини цією навичкою (соціальна чи промислова робототехніка) або симулювати досвід для людей у середовищах, де це природно не відбуватиметься (телеоперація, телеприсутність, доповнена або віртуальна реальність). Це призведе до точної роботи роботів і забезпечить захоплюючий і реалістичний досвід для людей.

## **1.2. Огляд методів класифікації типів матеріалів**

### **1.2.1. Аудіовізуальний метод визначення типу матеріалу**

Оскільки можливості збору та зберігання аудіовізуальних даних продовжують вдосконалюватися, вони, в комбінації з використанням методів машинного навчання стають ефективнішими для оцінки властивостей матеріалів. Зорові датчики широко використовуються для ідентифікації поверхневих матеріалів. На сьогоднішній день є роботи з розпізнаванням типів матеріалів за допомогою зображень і оцінених 3D точок. Нещодавно була розроблена техніка глибокого навчання для розпізнавання матеріалу та сегментації зображень у дикій природі [1]. Наявна також розробки методів

візуального прогнозування поверхневого тертя в середовищах з різними поверхнями, щоб покращити продуктивність двоногих роботів при плануванні пересування [2].

Високорівнева архітектура системи Vision-Based Measurement зображена на рис.1.1. Основна апаратна частина складається з двох компонентів — візуального датчика, який фіксує зображення і операційного блока, який обробляє зображення та переглядає об'єкт інтересу, що разом і називаються комп'ютерним зором [3].

Зоровими датчиками можуть слугувати звичайні оптичні камери, камери інфрачервоного світла, рентгенівські та лазерні сканери або ж інші датчики, здатні сприйняти зображення фізичного оточення. Так як найпоширенішим застосуванням в якості зорового датчика є оптична камера з високою роздільною здатністю, зняте зображення здебільшого дуже схоже на фотографію оточення, яку сприймає людське око. У випадку використання лазерних чи рентгенівських датчиків, зображення буде різнитися з тим, що може сприймати людина, і здебільшого призначене для обробки операційним блоком. Та в незалежності від типу візуального датчика, критичний фактор, від якого залежить точність вимірювань, є калібрування датчика – точні дані про його розташування, спрямування, фокусну відстань, відношення між сторонами, головною точкою, спотворення тощо.

Операційний блок отримує зображення, отримане зоровим датчиком, і виконує операції по отриманню потрібних вимірювань. На практиці він реалізується або на комп'ютерних чи процесорних системах, або ж на базі спеціального виділеного апаратного забезпечення. Сам блок складається з чотирьох основних етапів:

*Попередня обробка:* метою цього етапу є підготовка необробленого зображення для основного етапу операцій. Зображення, отримане зоровим датчиком, може мати ряд недоліків, такі як відблиски, шуми, розмиття тощо. Крім того, воно може бути не у потрібному форматі для наступних операцій. Попередня обробка вирішує подібні до цих потреби та виконує такі операції,

як нормалізація, яка змінює інтенсивність пікселів чи контрастність частин зображення.

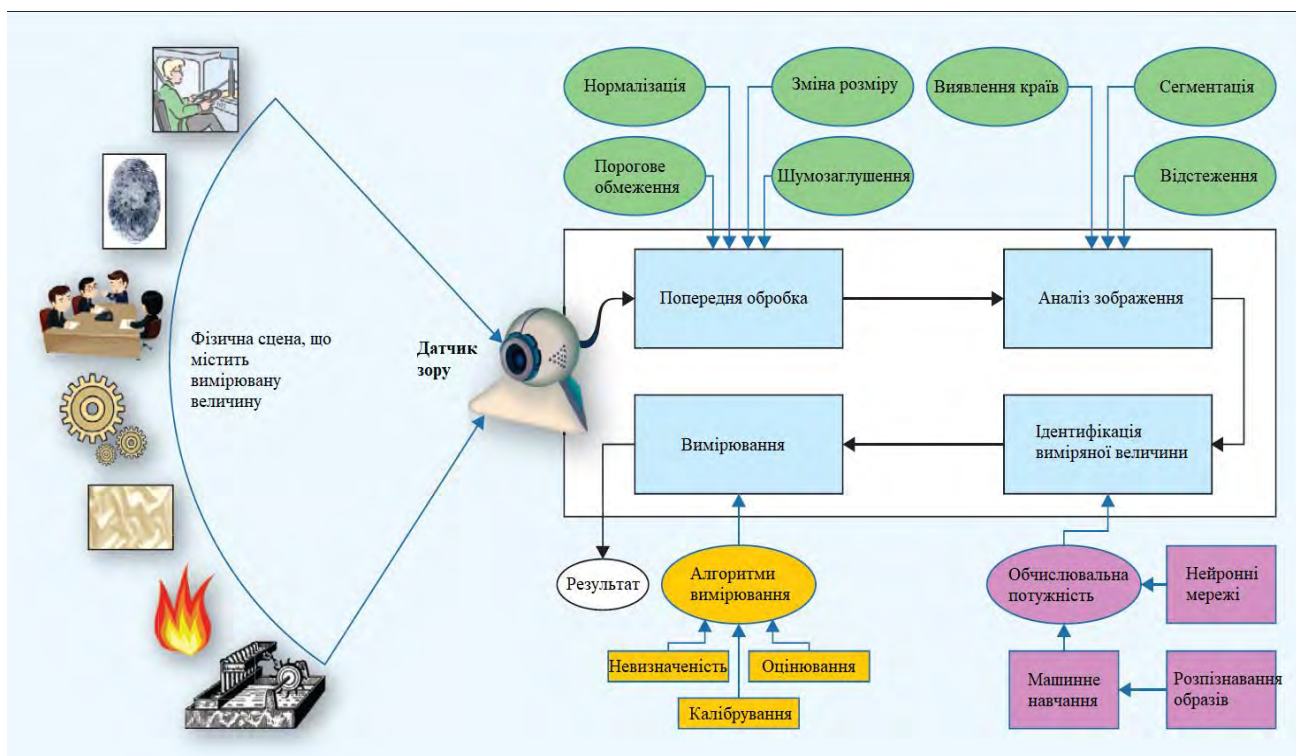


Рис. 1.1. Архітектура системи на візуальній основі високого рівня

*Аналіз зображення:* метою цього етапу є аналіз зображення та отримання необхідної інформації для пошуку вимірюваної величини та проведення подальших вимірювань. На цьому етапі також використовуються операції обробки зображення, такі як сегментація, яка ділить зображення на кілька сегментів, кожен з яких представляє щось значуще в оточенні, виявлення країв, яке знаходить краї об'єктів у сцені та допомагає ідентифікувати цікаві об'єкти, відстеження об'єктів після того, як вони були виявлені та коли вони рухаються в оточенні тощо.

Наприкінці етапу аналізу зображення виходом є або сама вимірювана величина, або інформація, яка може привести до ідентифікації вимірюваної величини. У першому випадку ми можемо пропустити наступний етап, ідентифікацію вимірюваної величини, і перейти безпосередньо до етапу вимірювання. Однак у деяких програмах для ідентифікації вимірюваної

величини потрібно більше операцій і для відповіді на це запитання необхідний додатковий етап ідентифікації.

*Ідентифікація вимірюваної величини:* метою цього етапу є ідентифікація конкретної вимірюваної величини на зображенні, якщо вона ще не була ідентифікована на попередньому етапі аналізу зображення. Техніки, які тут використовуються, здебільшого базуються на обчислювальному інтелекті, особливо на машинному навчанні, а саме на розпізнаванні і зіставленні шаблонів, де перше забезпечує обґрунтовану, найбільш вірогідну, відповідність заданих вхідних даних і вихідних даних а, отже, вносить деякі невизначеності, тоді як друге шукає та повідомляє про точні збіги заданих вхідних даних із апіорним шаблоном.

*Вимірювання:* на цьому етапі наявна вимірювана величина, тому можливо виконати необхідні операції вимірювання, такі як калібрування, яке дає нам розміри вимірюваної величини та її окружність, площу, об'єм тощо, а також вимірювання часу під час відстеження вимірюваної величини та зміни його стану з часом.

Не дивлячись на те, що сучасні відеокамери може надати велику кількість даних для класифікації поверхневих матеріалів, візуальний метод класифікації матеріалів має фундаментальні обмеження, в першу чергу через велику різноманітність зовнішнього вигляду матеріалів та поверхонь об'єктів, як і їх покриття (маються на увазі матеріали, що мають схожий зовнішній вигляд, але зовсім різні складом). Все це підштовхує науковців застосовувати мультимодальні та сенсорні дані для покращення якості класифікації типів матеріалів.

### **1.2.2. Визначення типу матеріалу на контактній основі**

Фізичний контакт між датчиком і досліджуваним об'єктом надає важливу інформацію про характеристики матеріалу, оскільки властивості матеріалу поверхні об'єкта є одним із найважливіших сигналів, які потрібні роботі для ефективної взаємодії з оточенням. Хоча методи на візуальній основі



є популярним підходом до розпізнавання матеріалу предмета, зір може розпізнати лише поверхневий матеріал і не може сам по собі оцінити його фізичні параметри. У цьому відношенні використовувати дотик для визначення властивостей матеріалу. Текстура поверхні (коефіцієнти тертя та шорсткість) і відповідність є одними з найважливіших параметрів для маніпулювання об'єктами. Люди надзвичайно вправно розпізнають властивості матеріалу об'єктів на основі цих сигналів. У робототехніці дослідники намагалися дати можливість роботам визначати властивості матеріалу на рівні, порівнянному з людьми. Ці властивості можна розділити на два різні методи: на основі текстури поверхні та на основі жорсткості об'єкта.

#### *Тактильне розпізнавання матеріалу на основі текстури поверхні*

Інформацію про текстуру поверхні можна отримати шляхом дослідження коефіцієнтів тертя, шорсткості та мікроструктури об'єктів. Перші два можна отримати за допомогою силового або тактильного датчика, що ковзає по поверхні об'єкта, тоді як останнього можна досягти за допомогою тактильних зображень. Тертя, яке виникає при контакті під час ковзання датчика по поверхні об'єкта, можна використовувати для розпізнавання матеріалів поверхні. Серед методів такого роду, використання акустичних сигналів отриманих в результаті тертя для розпізнавання матеріалів об'єкта є відносно недорогим і потребує обмеженої обчислювальних потужностей. У роботі [4] на нозі робота встановлено мікрофон, який стукає по землі під час руху мобільного робота, подібно до того, як сліпа людина стукає своєю тростиною. Потім акустична характеристика постукування використовується для класифікації різних матеріалів підлоги. У [5] штучний палець, обладнаний мікрофоном (тобто динамічним тактильним датчиком), використовується для збору даних звуку тертя, які відображаються в частотній області за допомогою швидкого перетворення Фур'є для виявлення різних текстур. У [6] використовується датчик текстури на основі мікрофона, і текстури можна класифікувати за допомогою нейронної мережі самоорганізуючих карт. В [7]

розроблено систему класифікації рельєфу в реальному часі для ходячих роботів з використанням акустичних функцій. Класифікатор Support Vector Machine був навчений на семи різних типах місцевості із загальним коефіцієнтом розпізнавання 95,1% із видаленням шуму. Використання акустичних сигналів має такі переваги, як відносна низька вартість і обмежені витрати на обчислення, однак навколишній шум і шум двигуна часто погіршують точність та швидкість розпізнавання.

*Тактильне розпізнавання матеріалу на основі жорсткості предмета.* Жорсткість об'єкта також є однією з критичних властивостей матеріалу. Використовуючи спеціальні датчики, можна оцінити податливість об'єкта (зворотну величину жорсткості). У [8] нога робота, оснащена акселерометром, використовується для активного стукання поверхнями об'єкта, і шляхом аналізу даних датчика можна виявити твердість, еластичність і жорсткість об'єкта. У [9], використовуючи моменти зображення тактильних зчитувань як ознаки, динамічне викривлення часу використовується для порівняння подібності між часовими рядами сигналів для класифікації об'єктів на жорсткі та деформівні. Датчик сили використовується для перевірки механічних імпедансів матеріалів з точки зору модуля зсуву, фіксуючого розтягування та щільності в [10]. Таким чином, матеріали об'єктів можна розпізнати за допомогою різних ознак дотику на основі поверхневих текстур, вібрації та механічного опору.

Так як декілька датчиків можуть захопити різні атрибути властивостей матеріалів, використання водночас декілька модальностей покращує точність визначення. Крім того, останні досягнення в робототехніці дозволяють робототехнічним пристроям приймати мультимодальні заміри для більш точної орієнтації в оточуючому середовищі. Зовсім нещодавно автори в [11] представили підхід до класифікації поверхонь за допомогою інструментів, який об'єднує кілька модальностей (таких як звук і сигнали прискорення, які вловлюються від удару та руху) для класифікації текстурованих поверхонь за умов змінних рухів від руки.

Сенсорні датчики дозволяють отримати різноманітні та досить точні дані про характеристики та властивості тих чи інших матеріалів. Проте громіздкість та складність конструкцій, обмеження на проведення безконтактних вимірювань не дозволяють говорити про створення мобільного та простого приладу на контактній основі.

### **1.2.3. Вихрострумний метод визначення типу матеріалу**

Електромагнітні методи є менш популярними порівняно з іншими методами вимірювань, але все ж привертають увагу міжнародної наукової спільноти. Такі методи особливо ефективні в кількох застосуваннях, наприклад, виявлення дефектів на провідних матеріалах або менш провідних матеріалах, характеристика матеріалу з точки зору електричних властивостей і товщини, моніторинг вмісту води в лініях виробництва та моніторинг стану ґрунту. З усіх магнітних методів випробування вихровими струмами є найпоширенішим методом оцінки властивостей матеріалу з точки зору електричних властивостей, таких як діелектрична проникність, провідність і проникність, використовуючи магнітну техніку на середньо-низькій частоті. Усі ці властивості матеріалу можна використовувати для оцінки стану матеріалу. Наприклад, можна діагностувати його механічний стан або ранню стадію втоми та тріщин матеріалу шляхом визначення електричних властивостей, таких як провідність, проникність тощо.

Вихрострумний метод працює наступним чином: індукційна котушка генерує змінне в часі магнітне поле (найчастіше змінного струму на заданій частоті), яке індукує вихрові струми в досліджуваному матеріалі (зазвичай провідний матеріал). Щільність і просторові структури цих вихрових струмів (і, отже, магнітного поля, яке вони створюють) залежать від властивостей матеріалу (діелектричної проникності, провідності та проникності), геометрії та частоти котушки. Отже, по цьому можна оцінити властивості матеріалу. Як правило, індукційна котушка також використовується для виявлення реакційного магнітного поля; зміна імпедансу котушки реєструється та дає

інформацію про досліджуваний матеріал. Для виявлення реакційного магнітного поля також можна використовувати окрему індуктивну чутливу/приймальну котушку.

Структурну схему одного з розроблених приладів на основі вихрострумowego методу приведено на рис. 1.2 [12]. Працює він наступним чином: згенеровані імпульси з імпульсного генератора низькочастотного сигналу (2) з поступають на передавальну антену (1), що випромінює електромагнітне поле на об'єкт. Зміни в полі реєструються приймальною антеною (4), та проходять через блок підсилення та обробки сигналу (5). Синхронізація роботи вузлів приладу відбувається через генератор тактових імпульсів (7). Після обробки сигнал поступає до мікроконтролера (3), в якому отримані сигнали від зразку нормуються за тривалістю та амплітудою і передаються на комп'ютер (6). В комп'ютері методами машинного навчання дані класифікуються для визначення матеріалу об'єкту.

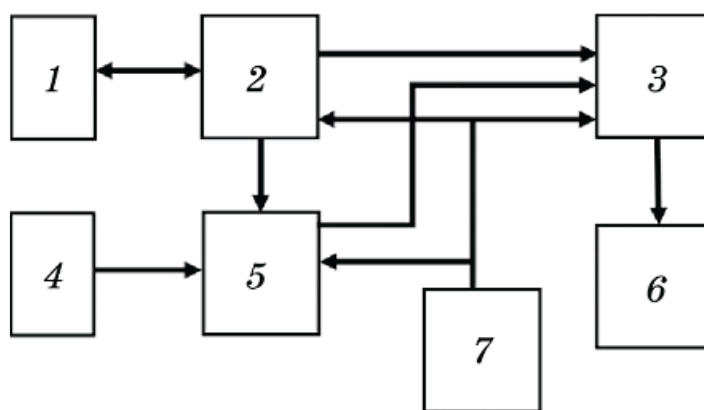


Рис. 1.2. Структурна схема вихрострумowego пристрою

Перевагами вихрострумowego випробування є миттєве отримання результатів, чутливість до ряду фізичних властивостей, не обов'язковий контакт між оглядовою котушкою та зразком, що дозволяє проводити безконтактні вимірювання на невеликій відстані, маленьке та автономне обладнання, а датчик/зонд можна мініатюризувати для виявлення дефектів навіть із роздільною здатністю мкм. Одним з основних обмежень

вихрострумове методу на основі змінного вхідного сигналу, що подається на котушку збудження, є те, що вихрові струми зосереджені близько до поверхні (так званий скін-ефект), особливо на високій частоті та провідному матеріалі. Магнітне поле вихрового струму протидіє збуджуючому магнітному полю, таким чином знижуючи щільність вихрового струму зі збільшенням глибини. З іншого боку, систему вихрового струму не можна використовувати на низькій частоті через обмежену чутливість.

Основним способом визначення типу матеріалу вихрострумовим методом є амплітудний метод. В рамках нього фіксуються найбільші отримані значення амплітуди відбитих сигналів під час вимірювання. Після закінчення збору даних зафіксовані пікові значення амплітуди приводяться відносно питомої ваги об'єкта, таким чином, параметр амплітуди є відносним. В залежності від виду металу та його властивостей ці значення будуть відрізнятися, що і дозволяє на їх основі класифікувати метал зразка.

У вихрострумове методу є ряд переваг, насамперед – миттєве отримання результатів та можливість проведення безконтактних вимірювань, але він виявляється недієздатним при класифікуванні матеріалів-діелектриків, що робить його непридатним для використання у оточеннях з різноманітними матеріалами.

#### **1.2.4. Термографія**

Інфрачервона термографія (ІЧТ) — наука, присвячена збору та обробці теплової інформації з безконтактних вимірювальних пристроїв. Він заснований на інфрачервоному випромінюванні (нижче червоного), формі електромагнітного випромінювання з більшою довжиною хвилі, ніж у видимого світла. Будь-який об'єкт з температурою вище абсолютного нуля (тобто  $T > 0\text{K}$ ) випромінює інфрачервоне випромінювання. Людське око не бачить такого типу випромінювання. Таким чином, для отримання та обробки цієї інформації потрібні інфрачервоні вимірювальні пристрої.

Інфрачервоні вимірювальні прилади сприймають інфрачервоне випромінювання, яке випромінює об'єкт, і перетворюють його в електронний сигнал. Найпростішим інфрачервоним пристроєм є пірометр, який видає один вихід за допомогою одного датчика. Більшість передових пристроїв включають ряд датчиків для створення детального інфрачервоного зображення оточення. Різниця між видимим зображенням та інфрачервоним зображенням полягає в тому, що видиме зображення є представленням відбитого світла в оточенні, тоді як в інфрачервоному зображенні оточення є джерелом і може спостерігатися за допомогою інфрачервоної камери без світла. Зображення, отримані за допомогою інфрачервоних камер, перетворюються на видимі зображення шляхом призначення кольору кожному інфрачервоному енергетичному рівню. У результаті виходить фальшиве кольорове зображення, яке називається термограмою.

ІЧТ має багато переваг перед іншими технологіями [13]. Загалом основні переваги ІЧТ наступні:

- ІЧТ – це безконтактна технологія: прилади, що використовуються, не контактують з джерелом тепла, тобто є безконтактними термометрами. Таким чином можна безпечно виміряти температуру надзвичайно гарячих предметів або небезпечних продуктів, таких як кислоти, убезпечивши користувача від небезпеки.
- ІЧТ забезпечує двовимірні теплові зображення, що робить можливим порівняння між областями цілі.
- ІЧТ працює в режимі реального часу, що дає змогу проводити не тільки високошвидкісне сканування нерухомих цілей, але й отримання даних від цілей, що швидко рухаються, і від швидкозмінних теплових профілів.
- ІЧТ не має шкідливих радіаційних ефектів технологій, таких як рентгенівське зображення. Таким чином, він придатний для тривалого та багаторазового використання.

- ІЧТ є неінвазивною технікою. Таким чином, він жодним чином не втручається в об'єкт і не впливає на нього.

ІЧТ надає особливі переваги в медицині та ветеринарії, оскільки забезпечує точні показання без інвазивних процедур. Той факт, що ІЧТ є безконтактною методикою, дуже важливий у цій галузі, оскільки це означає, що це безболісна та безпечна процедура. Крім того, оскільки прилад безконтактний, він не впливає на результат вимірювання і може проводитися дистанційно. Інші альтернативи можуть бути болючими, і коли датчик контактує з твариною, це може вплинути на вимірювання. Таким чином, ІЧТ є дуже ефективною не тільки для вимірювання температури тварини, але й інших змінних, таких як стрес.

Завдяки всім цим перевагам термографія стала ефективним інструментом у багатьох різних застосуваннях. Однак ІЧТ не позбавлений недоліків. Не дивлячись на те, що швидке та доступне обладнання вже почало з'являтися, інфрачервона камера все ще залишається дорогим пристроєм. Нещодавно на ринку з'явилися досить доступні моделі з досить високою просторовою роздільною здатністю для більшості застосувань (640\*512). Однак ці недорогі моделі з високою просторовою роздільною здатністю забезпечують меншу точність, що робить їх непридатними для деяких застосувань. Інфрачервоні зображення також можуть бути складними для інтерпретації [14]; загалом, потрібна спеціальна підготовка. ІЧТ також сильно залежить від умов роботи, таких як температура навколишнього середовища, потік повітря або вологість. Тому ІЧТ необхідно використовувати в контрольованому середовищі.

Інтенсивність інфрачервоного випромінювання, що випускається об'єктами, в основному залежить від їх температури; чим вища температура, тим більша інтенсивність випромінюваної інфрачервоної енергії. Багато різних програм можуть скористатися цією функцією, від контролю температури побутових індукційних варильних поверхонь до позиціонування мобільного робота в інтелектуальних просторах. Деякі з основних галузей, де

використовується інфрачервона термографія, включають медицину, ветеринарію, технічне обслуговування та моніторинг процесів, інспекцію будівель і неруйнівний контроль.

Температура є дуже хорошим індикатором здоров'я, оскільки зміни лише на кілька градусів на шкірі (шкірній чи поверхневій) можуть бути використані як індикатор можливої хвороби. Таким чином, медичні програми використовують ІЧТ як альтернативний діагностичний інструмент. Наприклад, ІЧТ використовується для виявлення поверхневих пухлин тіла, таких як рак молочної залози [15]. Пухлини зазвичай мають підвищене кровопостачання, що підвищує температуру шкіри над ними. Таким чином, ІЧТ можна використовувати як ефективний ранній індикатор раку молочної залози, що призводить до значно вищих шансів переживання захворювання. У цих застосуваннях ІЧТ є додатковим інструментом діагностики з високою ефективністю тільки для виявлення ранніх сигналів попередження. Це раннє виявлення є основною перевагою ІЧТ порівняно з іншими методами. ІЧТ використовується в багатьох інших медичних додатках, таких як діагностика діабетичної нейропатії або судинних розладів, скринінг гарячки, шкірні захворювання, стоматологія та дерматологія та операції на серці.

Технічне обслуговування є ще однією сферою, де ІЧТ успішно застосовується. Електричне поле, механічне поле та ізоляція є трьома найпоширенішими областями, де використовується ІЧТ. ІЧТ використовується в електричному та механічному обслуговуванні для виявлення ранніх ознак несправності, що дозволяє уникнути дорогих поломок. В електричному полі аномальні температурні профілі можуть вказувати на несправність з'єднань, тоді як у механічному полі вони можуть вказувати на надмірне тертя через неправильне змащення або втому матеріалу. У сфері ізоляції ІЧТ використовується для виявлення прихованих втрат тепла, які можуть знизити продуктивність і збільшити витрати. ІЧТ також використовується в інших сферах технічного обслуговування та моніторингу

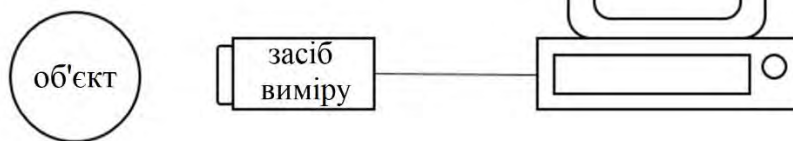


процесу, таких як моніторинг пластичних деформацій, оцінка втомних пошкоджень у матеріалах та перевірка зварних швів.

Іншою сферою, де ІЧТ успішно застосовується, є обстеження будівель. Розподіл температури на фасаді будівлі надає дуже корисну інформацію для виявлення багатьох прихованих умов, пов'язаних з експлуатаційними характеристиками та обслуговуванням будівлі. Наприклад, його можна використовувати для визначення того, де і як відбувається витік енергії з огорожувальних конструкцій будівлі. Окрім виявлення втрати тепла, ІЧТ також використовується для виявлення інших аномалій, таких як проникнення води та вологість. Мокра маса в стіні має диференційовану теплову інерцію, яку можна виявити за допомогою ІЧТ. Останні застосування ІЧТ для виявлення вологи можна знайти в [16], де ІЧТ використовують для виявлення підповерхневої вологи в кам'яних конструкціях і для картографування вологості в стародавніх будівлях відповідно. Виявлення вологи за допомогою ІЧТ не обмежується будівлями. Його також можна застосувати до паперу, ґрунту або конструкцій літака. Наявність води всередині конструкцій літака може призвести до утворення льоду зі зміною об'єму та подальших механічних навантажень.

У ІЧТ використовуються два різні підходи: пасивний і активний (рис. 1.3.). У пасивному ІЧТ випромінювання, що надходить від цільового об'єкта, вимірюється без будь-якої зовнішньої теплової стимуляції. Цю інформацію можна використовувати для вимірювання температури. У випадку активної ІЧТ зразок піддається зовнішній термічній стимуляції. Поширення тепла залежить від теплових властивостей матеріалу, а також від підповерхневих аномалій, які призводять до різниці температур на поверхні об'єкту. У цьому випадку вимірюване випромінювання походить від теплової реакції об'єкту на зовнішнє збудження.

### 1. Пасивна термографія



### 2. Активна термографія

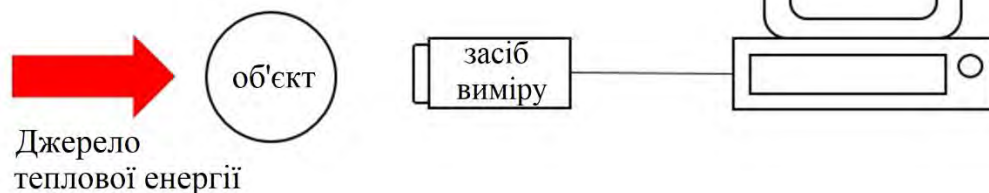


Рис. 1.3. Схеми систем пасивної та активної термографії

Пасивна ІЧТ використовується в програмах контролю якості та моніторингу процесів. Температура відіграє критичну роль у будь-якому промисловому процесі. Таким чином, вимірювання та моніторинг температури під час і після промислового процесу має критичне значення для досягнення оптимальних результатів, таких як прокатка сталі або спікання. Однак обчислення температури з інфрачервоних зображень базується не лише на вимірюваному випромінюванні; це також залежить від калібрування внутрішньої камери, а також від коефіцієнта випромінювання об'єкта, що випромінює енергію.

Активна ІЧТ здебільшого використовується в програмах неруйнівного контролю, де до зразка застосовується зовнішній стимул, щоб викликати відповідні температурні контрасти між інтересуючими областями. Вона застосовується для перевірки матеріалів для виявлення підповерхневих дефектів, а також для виявлення ділянок зразка з різними властивостями під поверхнею. Деякі підповерхневі аномалії дуже тонкі. Таким чином, пов'язані з ними рівні сигналу можуть бути втрачені в шумі термографічних даних. У цих випадках для покращення співвідношення сигнал/шум термографічних даних можна використовувати різні методи постобробки.

Враховуючи переваги і обмеження цього методу, прийнято рішення використовувати його в задачі визначення матеріалу об'єкту.

### 1.3. Опис і обґрунтування вибору методу

Інфрачервоне випромінювання – це енергія, яку випромінює поверхня об'єкта, температура якого вище абсолютного нуля. Випромінюване випромінювання є функцією температури матеріалу; чим вища температура, тим більша інтенсивність інфрачервоного випромінювання.

Є три шляхи, за допомогою яких промениста енергія, що вражає об'єкт, може розсіюватися: поглинання, передача та відбиття. Частки всієї енергії випромінювання, пов'язані з кожним із цих способів розсіювання, називаються коефіцієнтами поглинання, пропускання та відбиття тіла. Для опису цих явищ використовують три параметри: спектральне поглинання  $\alpha_\lambda$ , яке є відношенням спектральної потужності випромінювання, поглиненої об'єктом, спектральне відбивання  $\rho_\lambda$ , яке є відношенням спектральної потужності випромінювання, відбитої об'єктом, і спектральний коефіцієнт пропускання  $\tau_\lambda$ , який є відношенням спектральної потужності випромінювання, що передається об'єктом. Ці три параметри залежать від довжини хвилі. Сума цих трьох параметрів має бути одиницею на будь-якій довжині хвилі, як у рівнянні (1.1):

$$\alpha_\lambda + \rho_\lambda + \tau_\lambda = 1 \quad (1.1)$$

Матеріали, у яких пропускна здатність і відбивна здатність дорівнюють нулю, називаються чорними тілами. У цих матеріалах поглинається вся направлена енергія випромінювання ( $\alpha_\lambda = 1$ ).

Електромагнітне випромінювання, що випромінюється чорним тілом ( $W_{\lambda b}$ ), можна розрахувати за допомогою закону Планка, як у рівнянні (1.2), де  $C_1$  і  $C_2$  — константи, це довжина хвилі, а  $T$  — температура. Результатом

закону Планка є потужність, що ться на одиницю площі на одиницю довжини хвилі, яка є функцією  $\lambda$  і  $T$ .

$$W_{\lambda b} = \frac{c_1 \lambda^{-5}}{\frac{c_2}{e^{\lambda T}} - 1} \quad (1.2)$$

Довжина хвилі, на якій випромінюється електромагнітне випромінювання, залежить від температури об'єкта; чим вища температура, тим коротша її довжина хвилі. Розподіл аналогічний, але довжина хвилі зміщена. Пікова довжина хвилі для певного значення температури може бути розрахована за допомогою закону Віна, як рівняння (1.3). На рис. 1.4. показано графічне представлення співвідношення між піковою довжиною хвилі та температурою з використанням логарифмічної шкали. Закон Віна виходить диференціюванням рівняння (1.2) закону Планка за максимальною інтенсивністю випромінювання та знаходженням її.

$$\lambda_{\text{пик}} = \frac{0,0029}{T} \quad (1.3)$$

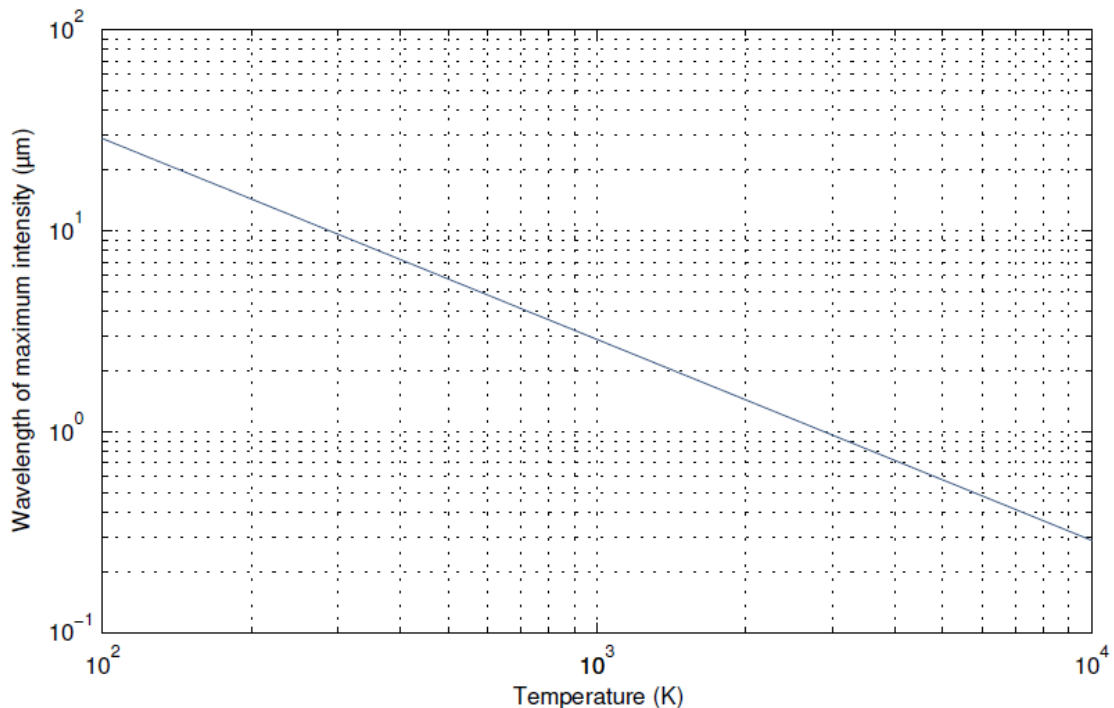


Рис. 1.4. Закон переміщення Віна: довжина хвилі максимальної інтенсивності випромінювання чорним тілом при заданій температурі

Як було згадано вище, усі об'єкти випромінюють інфрачервону енергію, відому як тепловий профіль. Інфрачервона камера (також відома як тепловізор) виявляє та вимірює інфрачервону енергію об'єктів. Камера перетворює ці інфрачервоні дані в електронне зображення, яке показує видиму температуру поверхні вимірюваного об'єкта. Вона містить оптичну систему, яка фокусує інфрачервону енергію на спеціальний чіп детектора (сенсорний масив), який містить тисячі пікселів детектора, розташованих у сітці. Кожен піксель матриці датчиків реагує на сфокусовану на ньому інфрачервону енергію та виробляє електронний сигнал. Процесор камери отримує сигнал від кожного пікселя та застосовує до нього математичні розрахунки, щоб створити колірну карту видимої температури об'єкта. Кожне значення температури позначається окремим кольором. Отримана матриця кольорів надсилається в пам'ять і на дисплей камери як зображення температури (теплове зображення) цього об'єкта.

Термографічні вимірювання також мають можливість надавати суттєву інформацію про характеристики та властивості матеріалу досліджуваного об'єкта. Це можна реалізувати шляхом вивчення того, як температурні профілі на поверхні об'єкта змінюються в часі і просторі [17]. Розповсюдження тепла в тілі описується рівнянням теплопровідності, яке містить сталу пропорційність між похідною температури за часом і розподілом Лапласа її простору. Ця константа є коефіцієнтом матеріалу (співвідношення його теплопровідності та об'ємної теплоємності) і описує здатність матеріалу проводити тепло у відношенні з його здатністю його накопичувати. Беручи до уваги анізотропію багатьох зразків реальних матеріалів, прийнято розрізняти коефіцієнти теплопровідності в площині та через площину залежно від того, в якому напрямку проводиться теплопровідності вимірювано теплого потоку.

Поширеним методом вимірювання коефіцієнта дифузії через площину є лазерний спалаховий аналіз, в якому лазерне джерело миттєво нагріває одну сторону зразка, а час напівпідвищення температури вимірюється з іншої сторони. Коефіцієнт дифузії в площині можна виміряти через модифікований

метод перехідного плоского джерела, коли короткий лазерний імпульс подається в те саме місце на поверхні об'єкта, де датчик відбиття тепла вимірює збільшення напруги. Недоліки цих методів полягають у тому, що вони обидва вимагають прямого контакту зі зразками, а вимірювальне обладнання є великим за розміром, тому їх неможливо використовувати в сценаріях, коли необхідна мобільна установка.

Інша термічна властивість, тепловиділення, також нерозривно пов'язана з поверхневими властивостями матеріалу, оскільки це можна описати навіть непрофесійною людиною як те, чи матеріал холодний на дотик. Таким чином, досліджуючи теплові реакції об'єкта, ми на їх основі можемо визначати його термічні властивості, які могли б дати розуміння його матеріального складу.

Запропонованого підходу реалізується наступним чином: Програмний контролер дає вказівку контролеру спалаху визначити схему лазерного променя (гауссівську, прямокутну тощо), а також визначає часову форму очікуваного променя. Програмний контролер також отримує фізичні властивості з компонента оцінки матеріалу на основі машинного навчання. Контролер спалаху генерує електричні імпульси, необхідні для активації лазерного джерела. У свою чергу, лазерне джерело перетворює електричний сигнал у світловий. Згенерований світловий сигнал направляється у визначену точку реєстрації допомогою виконавчого механізму. Пропонується підхід машинного навчання для використання просторово-часового профілю нагрівання та охолодження матеріалу для оцінки типу та властивостей матеріалу, оскільки ці схеми формують унікальний профіль для матеріалу. Зокрема, після нагрівання невеликої ділянки цільового об'єкта можна спостерігати паттерн охолодження як функція часу та місця (в місці, включаючи нагріту точку та ділянку навколо неї). Упорядкована за часом послідовність зображень з інфрачервоної камери протягом певного часового проміжку (наприклад, тривалістю кілька секунд) формує необроблені дані, які після виділення ознак служать вхідними даними для системи машинного

навчання. Бажаними вихідними даними системи є оцінка мітки класу (класифікація серед конкретних типів матеріалів, таких як деревина, пластик, сталь тощо).

#### 1.4. Обґрунтування вибору засобу вимірювання

Основними засобами для реєстрації теплових профілів зразка є термометр, пірометр і тепловізор (інфрачервона камера).

*Термометр.* Найбільш розповсюдженими сьогодні є рідинні, електронні та механічні термометри. Принцип роботи рідинного термометра полягає в тому, що тверді тіла та рідини мають властивість розширюються при нагріванні. Коли температура підвищується, ртуть в приладі розширюється, змушуючи її рухатися вгору по замкнутому просторі та відобразити температуру. Термометри механічного типу працюють за тим же принципом, що і рідинні, за тією різницею, що в якості датчика використовується металева спіраль або біметалева стрічка. Електронні термометри засновані на тому принципі, що електричний опір металу змінюється з температурою. Цифрові термометри відрізняються від традиційних термометрів, тим, тим, що для його роботи потрібен датчик.

Основні обмеження цього засобу реєстрації тепла полягають у неможливості проведення безконтактних вимірювань та довгому отриманні його результатів. Також більшість з них передбачає часткове або повне занурення чутливої частини у вимірювальне середовище, що ще більше ускладнює проведення вимірювань.

*Пірометр.* Ключовою ідеєю пірометрії є використання вторинного процесу – електромагнітного випромінювання, яке фізичними законами тісно пов'язане з температурою його джерела. Для «ідеального» об'єкта (абсолютно чорного тіла) це співвідношення підкоряється закону Планка, який описує спектральну щільність теплового випромінювання. На практиці важливу роль

у вимірюваннях відіграє конфігурація пірометричної системи. Він служить для опису набору ефектів, які виникають при тепловому випромінюванні до того моменту, коли воно реєструється чутливим елементом системи.

Його основними компонентами [18] є: вимірюваний об'єкт 1 (рис. 1.5.), оточення тіла 2, середовище розповсюдження (атмосфера) 3, оптична частина пірометра 4–6. Отже, в цілому характеристики випромінювання, які реєструє пірометр, спотворюються.

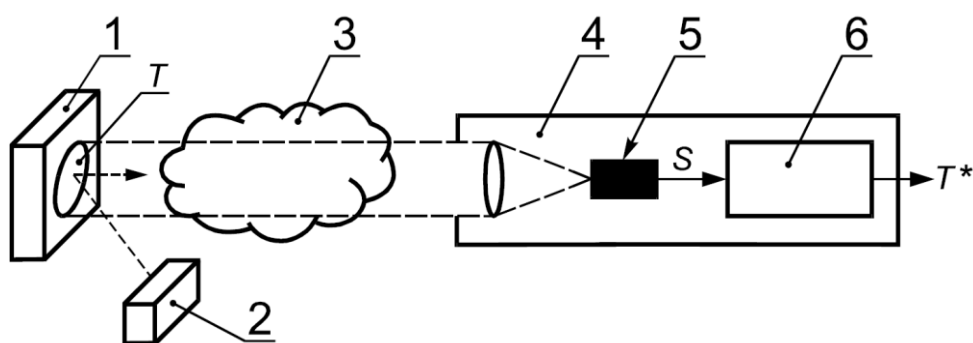


Рис. 1.5. Система пірометра ( $T$  – температура поверхні предмета): 1) предмет; 2) нагріте тіло; 3) середовище передачі; 4) пірометр; 5) приймач ( $S$  – його вихідний сигнал); 6) система обробки

Основними факторами, які впливають на точність вимірювань пірометра, є стан поверхні об'єкта (невідомий коефіцієнт випромінювання), градієнт температури в полі зору приладу, відбите випромінювання сусідніх тіл, поглинання випромінювання атмосферними газами, розсіювання аерозолями і саме випромінювання атмосфери. Дія більшості цих факторів залежить від багатьох фізичних величин (явищ) і не може бути представлена простими моделями. Часто в промисловості ситуація ускладнюється ще й мінливістю факторів у часі та неможливістю вжити практичних заходів щодо їх усунення. Наявність цих труднощів призводить до формулювання в класичній пірометрії поняття «псевдотемператури», згідно з яким передбачається, що пірометр вимірює певну умовну величину – випромінювання (яскравість) або колірну температуру, яка тотожна справжній



температурі лише за ідеальних умов. Серйозний недолік цієї концепції очевидний: умовна температура не є фізичною характеристикою об'єкта, і саме по собі вимірювання не має практичного значення, оскільки кінцевою метою пірометрії є оцінка фактичної температури.

Отже, центральною проблемою пірометрії є значна складність отримання користувачем надійної оцінки похибки вимірювання. На практиці, через відсутність необхідних нормативних документів, якість, з якою можна оцінити справжню температуру, а також адекватність прийнятих у подальшому рішень залежать, в цілому, від рівня кваліфікації оператора. Хоча пірометри й не позбавлені суттєвих обмежень, все ж їх мобільність, можливість проводити безконтактні вимірювання дозволяють використовувати їх у задачах визначення типів матеріалів, хоча й з деякими обмеженнями у точності вимірювання. Проте у рамках поставленого завдання існує більш доцільний засіб.

*Тепловізор (інфрачервона камера).* Інфрачервоне випромінювання, що займає ділянку електромагнітного спектру в діапазоні  $0,9 - 14 \mu\text{m}$ , випромінюється всіма об'єктами при температурах вище абсолютного нуля [19]. ІЧ-камера представляє захоплене випромінювання у вигляді термограми, сірого або псевдокольорового теплового зображення, яке відображає температурні варіації об'єкта чи середовища. ІЧ-камери засновані на двох законах: законі повного випромінювання та законі Стефана – Больцмана [20]. Закон повного випромінювання стверджує, що кількість падаючої енергії дорівнює сумі поглиненої, відбитої та переданої енергії. Закон Стефана – Больцмана має вигляд:

$$W = \varepsilon\sigma T^4 \quad (1.4)$$

який стверджує, що повна енергія випромінювання ( $W$ ) тіла пропорційна коефіцієнту випромінювання ( $\varepsilon$ ) і четвертому ступені температури ( $T$ ).

Враховуючи принципово кращий підхід у вимірюванні температурного профілю зразка тепловізором, що дозволяє реєструвати не лише зміну

температури в конкретні точці, а й розповсюдження тепла від точки до сусідніх ділянок зразка, мобільність приладу та можливість без проблем проводити з його допомогою безконтактні вимірювання, тепловізор є кращим засобом у задачах визначення типу матеріалу.

## **1.5. Огляд існуючих методів аналізу теплових профілів**

Оскільки кожний матеріал має свої унікальні параметри теплопровідності, система буде реєструвати процес нагріву досліджуваного об'єкту та на основі цих даних автоматизовано визначати тип матеріалу зразка, користуючись відомими даними про теплопровідність кожного з передбачених матеріалів.

Так як система передбачає класифікацію зареєстрованих даних по одній з відомих їй категорій, постає питання вибору методу автоматизованої класифікації. Для запропонованої системи пропонується використовувати метода машинного навчання. Проте, у машинному навчанні існує декілька підходів, основними та найпоширенішими з яких є класичне навчанням та нейронні мережі.

### **1.5.1. Класичні методи машинного навчання**

У випадку класичного навчання ми розглянемо найбільш підходящий під поставлену задачу проекту алгоритм – дерева рішень. Дерева рішень – це послідовні моделі, які логічно поєднують послідовність простих тестів [21] (рис. 1.6.); кожен тест порівнює числовий атрибут із пороговим значенням або номінальний атрибут із набором можливих значень. Однією з найбільш корисних характеристик дерев рішень є їх зрозумілість. Такі символічні класифікатори мають перевагу перед моделями, такими як нейронні мережі, з точки зору зрозумілості. Логічні правила, за якими слідує дерево рішень, набагато легше інтерпретувати, ніж числові ваги зв'язків між вузлами в нейронній мережі. Люди можуть легко зрозуміти, чому дерево рішень

класифікує примірник як належний до певного класу. Оскільки дерево рішень являє собою ієрархію тестів, невідоме значення ознаки під час класифікації зазвичай розглядається шляхом передачі прикладу в усі гілки вузла, де було виявлено невідоме значення ознаки, і кожна гілка виводить розподіл класу. Результатом є комбінація різних розподілів класів, сума яких дорівнює 1. Припущення, зроблене в деревах рішень, полягає в тому, що екземпляри, які належать до різних класів, мають різні значення принаймні однієї зі своїх функцій.

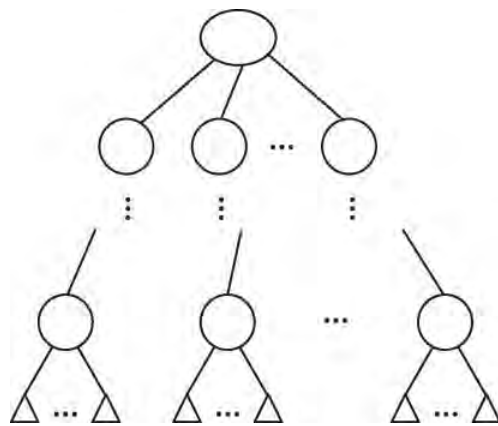


Рис. 1.6. Загальна структура дерева рішень.

Коли точка даних потрапляє в розділену область, дерево рішень класифікує її як належну до найпоширенішого класу в цій області. Частота помилок — це загальна кількість неправильно класифікованих точок, поділена на загальну кількість точок даних; а коефіцієнт точності дорівнює одиниці мінус коефіцієнт помилок.

Незважаючи на те, що в силу своєї простоти алгоритм «розділяй і володарюй» є швидким, ефективність його може стати сумнівною, коли мова заходить про шуми у отриманих даних [22]. Навіть невеликі зміни в навчальній вибірці можуть призвести до глобальних змін у моделі, що вплине на правила класифікації. Також роздільна границя має свою внутрішню обмеження, що робить алгоритм менш якісним в плані класифікації в цілому.

## 1.5.2. Нейромережеві класифікатори

Штучні нейронні мережі моделюються на основі біологічних нейронних мереж (рис. 1.7.). Подібно до біологічної нейронної мережі, НМ є взаємозв'язком вузлів, аналогічних нейронам. Кожна нейронна мережа має три важливі компоненти: характер вузла, топологію мережі та правила навчання [23]. Характер вузла визначає, як вузол обробляє сигнали, наприклад, кількість входів і виходів, пов'язаних з вузлом, вагу, пов'язану з кожним входом і виходом, і функцію активації. Топологія мережі визначає способи організації та з'єднання вузлів. Правила навчання визначають спосіб ініціалізації та налаштування вагових коефіцієнтів.

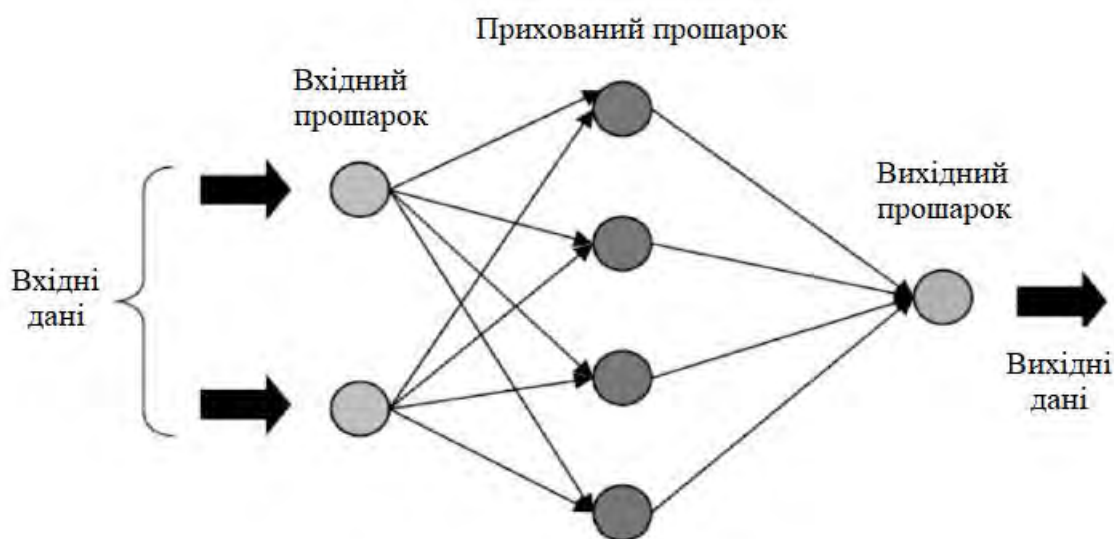


Рис. 1.7. Загальна структура нейронної мережі

Головними перевагами нейронних мереж перед традиційними алгоритмами є швидкодія на їх системи навчання, що забезпечує цим класифікаторам високу адаптивність до змін. Вони є універсальним засобом, простим в застосуванні, завадостійким, здатні ефективно працювати в умовах нелінійності, за різних умов вимірювань та навіть в умовах неповних і зашумлених вимірювань [24]. Також в умовах різноманітності матеріалів

варто виділити здатність нейронних мереж автоматично виділяти діагностичні ознаки в процесі навчання.

Температурні профілі різних матеріалів можуть бути схожими або перетинатися в певних областях, тому використання класичних алгоритмів класифікації суттєво зменшить достовірність класифікації. Основуючись на приведених перевагах, для автоматизованої класифікації теплових профілів пропонується застосовувати нейронні мережі.

## 1.6. Висновки до розділу 1

У першому розділі було розглянуто актуальні методи визначення типів матеріалів об'єктів. Існуючі аудіовізуальні методи характеристики фізичних властивостей обмежені у застосуванні та точності через те, що візуальні властивості фундаментально не пов'язані з основними фізичними властивостями об'єкта. Враховуючи велику різноманітність зовнішнього вигляду матеріалів, видів обробки поверхонь об'єктів та їх покриття, поширеними випадком на практиці є об'єкти, які схожі ззовні, але зовсім різні за складом. При таких умовах методи, засновані на візуальних даних не є благойдійним способом отримання інформації щодо типу матеріалу зразка.

У свою чергу, підхід, заснований на контакті з об'єктом, хоч і дозволяє отримати цілком достовірну інформацію про матеріал зразка, є одночасно громіздким і трудомістким, і може бути непрактичним для більшості застосувань. Неможливість проведення безконтактних вимірювань, вимірювань на відстані та часом висока вартість не дозволяють говорити про створення мобільного та простого приладу на контактній основі.

Нарешті, підхід на основі теплового методу в даний час зосереджений на якісній оцінці дефектів матеріалу. Інфрачервона термографія – це швидка, чиста та безпечна технологія, яка використовується в широкому спектрі застосувань, є зрілим методом неруйнівного контролю. Та останні досягнення

в цій галузі дозволяють цій технології виявляти багато свідчень про об'єкт та його характеристики. На її основі пропонуємо створити систему, яка зможе класифікувати чотири типу матеріалу. В ній буде використаний активний підхід термографії – лазер для нагріву зразка, і тепловізор для реєстрації теплових профілів зразка. Передбачається, що система зможе проводити безконтактні вимірювання на відстані 20-30 см, та зможе класифікувати такі типи матеріалів: дерево, пластик, сталь, алюміній.

## **РОЗДІЛ 2. РОЗРОБКА ПРОГРАМНО-ТЕХНІЧНИХ АЛГОРИТМІВ СИСТЕМИ**

### **2.1 Вибір та опис об'єкту**

На основі проведеного аналітичного огляду для створення автоматизованої системи обрано метод інфрачервоної термографії. В цій роботі поставлена задача розробити систему, яка буде розпізнавати 4 класи матеріалу використовуючи температурні профілі об'єктів, отримані шляхом лазерного нагріву зразків.

Оскільки основне потенційне призначення пристрою є поліпшення обізнаності про оточуюче середовище та об'єкти взаємодії телеопераційними системами, шляхом визначення типів матеріалів предметів, наприклад, в задачах з маніпулювання, у якості об'єктів обрано потенційно типові зразки – невеликі за розміром, з твердих жорстких матеріалів.

Для застосування системи було обрано найбільш розповсюджені технологічні матеріали – дерево, пластик, сталь та алюміній. Система має працювати з такими габаритами зразків: шириною та висотою в 50 мм, товщиною 1-30 мм.

### **2.2. Розробка структурної схеми приладу**

Структурна схема розроблювального приладу для визначення типу матеріалу тепловим методом зображено на рис. 2.1.

Позначення:

- БЦО — Блок цифрової обробки
- МК — Мікроконтролер
- Л — Лазер
- О — Об'єкт

- Т — Тепловізор

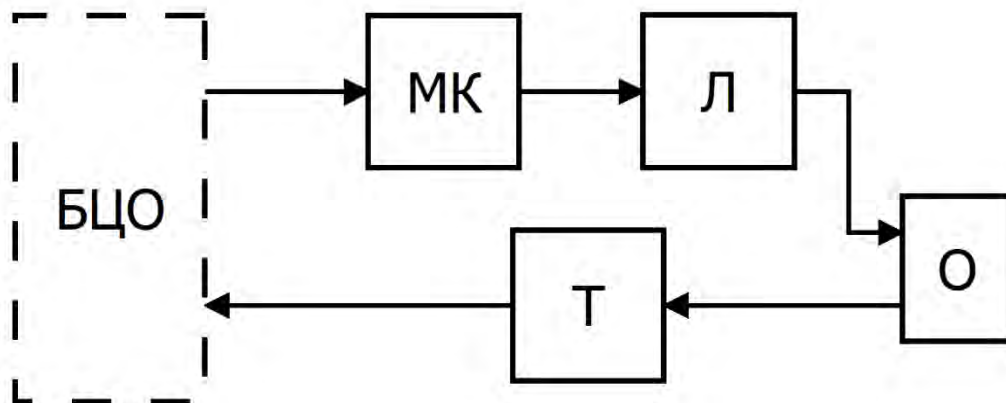


Рис. 2.1. Структурна схема приладу

Блок цифрової обробки подає сигнал на мікроконтролер, який, у свою чергу, передає команду лазеру. Далі лазерне джерело нагріву електричний сигнал у направлений світловий сигнал, спрямований у визначену точку. У цей час тепловізор безперервно реєструє зображення із заданим часовим проміжком – записується послідовність теплових профілів. Цифрові термографічні дані направляються у блок цифрової обробки для виконання класифікації. Класифікації відбувається в блоці цифрової обробки за допомогою завантаженої в нього нейронної мережі.

### 2.3. Вибір та опис лазерного джерела

Основними вимогами при виборі лазерного джерела нагрівання системи є його необхідна потужність та компактність. Лазер повинен володіти достатньою потужністю для суттєвого нагріву зразка в цілому та щоб сам процес нагріву відбувався швидко, за секунди, але й не повинен бути надмірно потужним, щоб своїм спалахом не пошкодити зразок.



Для задоволення таких вимог підійде лазерне джерело потужністю від 400 до 500 mW та довжиною хвилі  $\sim 400$  nm. Для системи було обрано Лазерний діод TVS Blue (рис. 2.2.).



Рис. 2.2. Зовнішній вигляд лазерного діоду

Його параметри:

- Довжина хвилі: 445nm
- Вихідна потужність: 400mW
- Робоча температура: 10 ~ 35 град.

#### **2.4. Вибір та опис тепловізору**

Оскільки проектувальна система загострена під, у першу чергу, компактність, ми розуміємо, що тепловізор буде обмежений у роздільній здатності та точності замірів. Тому основний вирішено ставити на його швидкодію та відносне порівняння сусідніх пікселів.

Таким чином, основними вимогами до тепловізору системи є його швидкодія та кадрова частота. Основна мета – отримання якомога більше даних за менший проміжок часу. Мінімальна задовільна частота при моделюванні зчитування теплових профілів становить 50 Гц, тому це є необхідною мінімальною частотою при виборі тепловізору системи.

В рамках проекту було обрано теплову камеру машинного бачення FLIR A615 (рис. 2.3). З її особливостей можна виділити просту в управлінні, доступну ціну та компактність. Цією камерою можна повністю керувати за допомогою комп'ютера, вона підтримує програмне забезпечення машинного бачення сторонніх виробників, наприклад National Instruments, Cognex, Matrox, MVtec і т.д.



Рис. 2.3. Зовнішній вигляд теплової камери

Роздільна здатність екрану становить 640 x 480 пікселів, що є більш ніж задовільним для проектуємої системи. Мікроболометр, який здатен виявити різницю температур до 50 мК забезпечить точність і на великих відстанях. Даний тепловізор дозволяє реєструвати повнокадрові 16-бітні зображення з частотою 50 Гц або у віконному режимі з частотою до 200 Гц для високошвидкісних процесів, що має потенціал ще підвищити надійність класифікації. А 16-бітному лінійний вивід температури дозволить проводити вимірювання в безконтактному режимі за допомогою будь-якого програмного забезпечення сторонніх виробників.

Детальний перелік технічних характеристик даного тепловізору:

- Тип роз'єму цифрового введення/виведення: 6-контактна гвинтова клема
- Цифрові входи: 2 оптоізовані, 10–30 В постійного струму
- Призначення цифрового виводу: вихід на доп. пристрій (програмно встановлений)
- Цифрові виходи: 2 оптоізовані, 10–30 В постійного струму, макс. 100 мА
- Частота зображення: 50 Гц (100/200 Гц з вікнами)
- Теплова чутливість:  $< 0.05^{\circ}\text{C} @ +30^{\circ}\text{C} (86^{\circ}\text{F}) / 50 \text{ mK}$
- Точність:  $\pm 2^{\circ}\text{C}$  або  $\pm 2\%$  від показань

## 2.5. Вибір типу нейронних мереж

Оскільки перед проектом поставлена амбіційна задача при досить бідному та однотипному наборі даних, було прийнято рішення розробити чотири архітектури нейронних мереж та проаналізувати ефективність кожної з них, це: багат шарова мережа прямого розповсюдження (multi-layer feed-forward neural network), LSTM, Bi-directional LSTM, 1D-Convolutional.

### 2.5.1. Багат шарова мережа прямого розповсюдження

Багат шарові нейронні мережі прямого розповсюдження, навчені за допомогою алгоритму навчання зворотного поширення, є найпопулярнішими нейронними мережами. Вони застосовуються в широкому спектрі проблем. Нейронна мережа MLF складається з нейронів, упорядкованих у прошарки [25] (рис. 2.4). Перший прошарок називається вхідним прошарком, останній прошарок – вихідним, а прошарки між ними є прихованими прошарками.

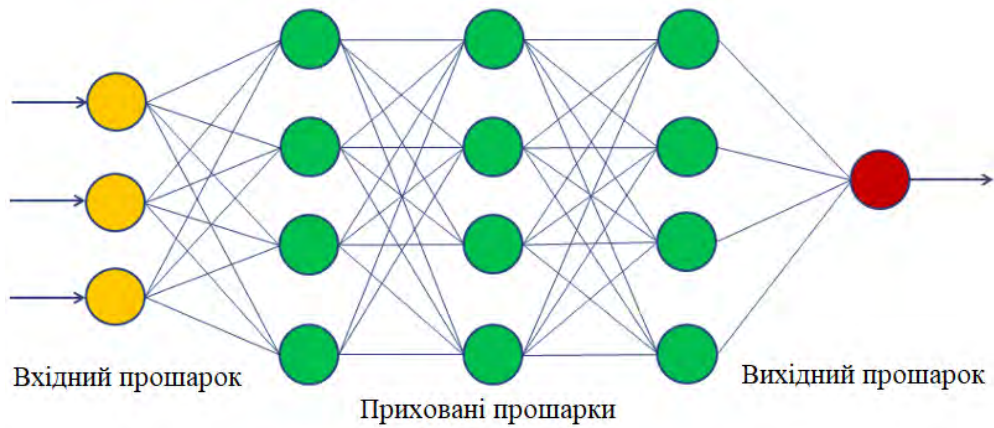


Рис. 2.4. Архітектура багатошарової мережі прямого розповсюдження

Для формального опису нейронів можна використати так звану функцію відображення  $\Gamma$ , яка присвоює кожному нейрону  $i$  підмножину  $\Gamma(i) \subseteq V$ , яка складається з усіх предків даного нейрона [26]. Підмножина  $\Gamma^{-1}(i) \subseteq V$ , яка складається з усіх попередників даного нейрона  $i$ . Кожен нейрон певного прошарку пов'язаний з усіма нейронами наступного прошарку. Зв'язок  $i$ -го та  $j$ -го нейронів характеризується ваговим коефіцієнтом  $\omega_{ij}$ , а  $i$ -го нейрона – пороговим коефіцієнтом  $\vartheta_i$  (рис. 2.5).

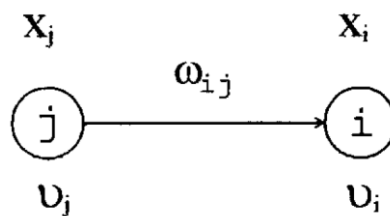


Рис. 2.5. Зв'язок між двома нейронами  $i$  та  $j$ .

Ваговий коефіцієнт відображає ступінь важливості даного зв'язку в нейронній мережі [27]. Вихідне значення (активність)  $i$ -го нейрона  $x_i$  визначається рівняннями (2.1) і (2.2)). Вони виражають:

$$x_i = f(\xi_i) \quad (2.1)$$

$$\xi_i = \vartheta_i + \sum_{j \in \Gamma^{-1}(i)} \omega_{ij} x_j \quad (2.2)$$

де  $\xi_i$  – потенціал  $i$ -го нейрона, а функція  $f(\xi_i)$  – так звана передавальна функція (сумування в рівнянні (2.2) здійснюється по всіх нейронах  $j$ , які передають сигнал  $i$ -му нейрону). Пороговий коефіцієнт можна розуміти як ваговий коефіцієнт зв'язку з формально доданим нейроном  $j$ , де  $x_j = 1$  (так зване зміщення).

Для передатної функції справедливо наступне:

$$f(\xi) = \frac{1}{1 + \exp(-\xi)} \quad (2.3)$$

Контрольований процес адаптації змінює порогові коефіцієнти  $\vartheta_i$  та вагові коефіцієнти  $\omega_{ij}$ , щоб мінімізувати суму квадратів різниць між обчисленими та необхідними вихідними значеннями. Це досягається шляхом мінімізації цільової функції  $E$ :

$$E = \sum_0 \frac{1}{2} (x_0 - \hat{x}_0)^2 \quad (2.4)$$

де  $x_0$  і  $\hat{x}_0$  є векторами, що складаються з обчислених і необхідних активностей вихідних нейронів, і підсумовування проходить по всіх вихідних нейронах  $o$ .

### 2.5.2. Мережі LSTM (Long short-term memory)

RNN (рекурентна нейронна мережа) — це тип нейронної мережі, який використовується для розробки моделей розпізнавання мовлення та прогнозування класів. Повторювані нейронні мережі запам'ятовують послідовність даних і використовують шаблони даних, щоб дати прогноз.

RNN використовує цикли зворотного зв'язку, що відрізняє його від інших нейронних мереж [28]. Ці цикли допомагають RNN обробляти послідовність даних. Цей цикл дозволяє ділитися даними з різними вузлами та прогнозувати відповідно до зібраної інформації. Цей процес можна назвати пам'яттю. Повторюваний модуль у стандартній RNN містить один рівень (рис. 2.6).

Мережі довготривалої короткочасної пам'яті, зазвичай звані LSTM, є особливим видом RNN. Вони були запроваджені, щоб уникнути проблеми тривалої залежності. У звичайному RNN проблема часто виникає під час підключення попередньої інформації до нової інформації. Якби RNN міг це

зробити, вони були б дуже корисними. Ця проблема називається довгостроковою залежністю.

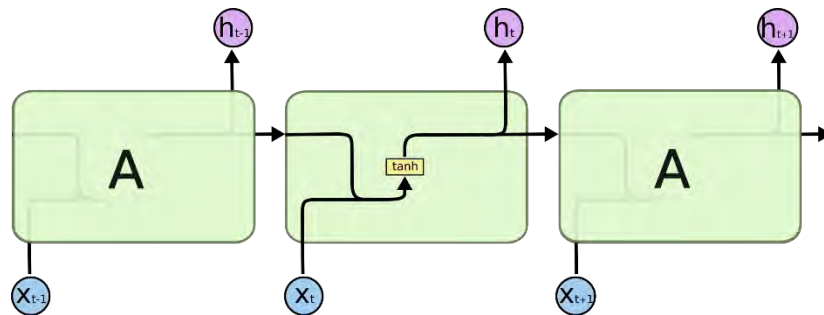


Рис. 2.6. Схема ланцюга стандартної RNN

За замовчуванням в поведінці LSTM – запам'ятовування інформації протягом тривалого періоду. Мережі LSTM мають подібну структуру до RNN, але модуль пам'яті або повторюваний модуль відрізняється. Блок-схема повторюваного модуля буде виглядати так, як на рис. 2.7.

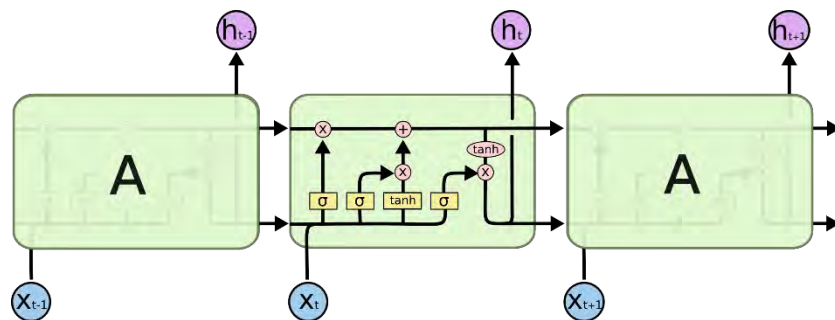


Рис. 2.7. Схема ланцюга LSTM

Повторюваний модуль у LSTM містить чотири взаємодіючі рівні. Як і на наведеній вище діаграмі, кожен рядок переносить весь вектор від виходу вузла до входу наступного вузла. Шар нейронної мережі вже навчений, а поточкові операції є математичними операціями, як вектори. Лінія злиття забезпечує конкатенацію векторів, а лінії, що розходяться, надсилають копії інформації до різних вузлів.

Горизонтальна лінія, що проходить через верх повторюваного модуля, є конвеєром даних. А ворота дозволяють інформації проходити через нижні частини модуля. Отже, у такому випадку ми можемо сказати, що мережі LSTM можуть видаляти або додавати інформацію. Деякі параметри функції активації також присутні в LSTM. Це односпрямована мережа LSTM, де мережа зберігає лише пряму інформацію.

### **2.5.3. BI-LSTM (Bi-directional long short term memory)**

Двонаправлена довго-короткочасна пам'ять (BI-LSTM) — це процес створення будь-якою НМ інформації про послідовність в обох напрямках назад (від майбутнього до минулого) або вперед (від минулого до майбутнього).

У двонаправленому режимі вхідні дані проходять у двох напрямках, що робить BI-LSTM відмінним від звичайного LSTM. За допомогою звичайного LSTM можна зробити вхідний потік в одному напрямку, назад або вперед. Однак у двонаправленому режимі ми можемо зробити вхідний потік в обох напрямках, щоб зберегти інформацію про майбутнє та минуле [29].

Наприклад, у реченні «хлопці йдуть до .....» ми не можемо заповнити порожній простір. Тим не менш, коли у нас є майбутнє речення «хлопці виходять зі школи», ми можемо легко передбачити минулий порожній простір, подібне, що ми хочемо виконати за допомогою нашої моделі, і двонаправлений LSTM дозволяє нейронній мережі виконати це.

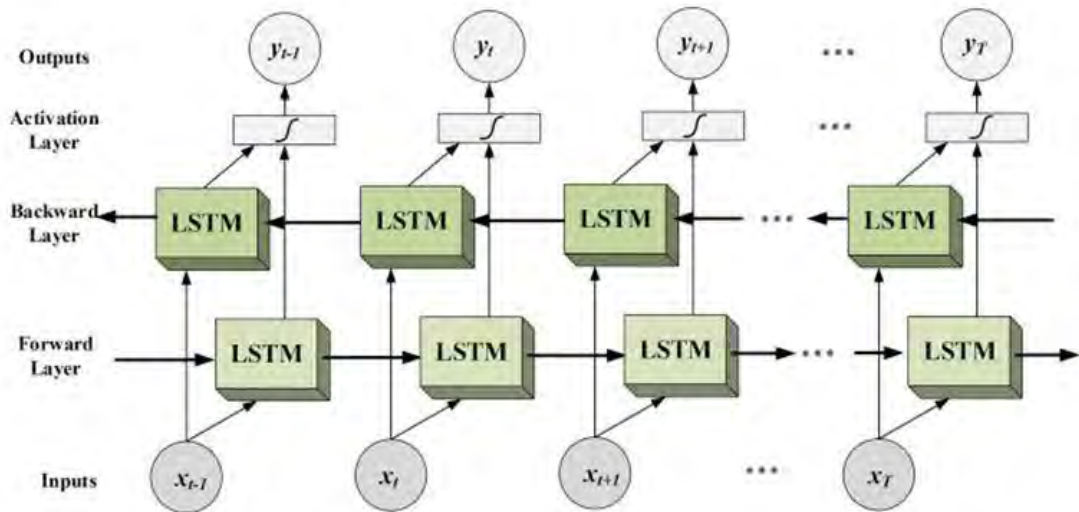


Рис. 2.8. Архітектура BI-LSTM

На рис. 2.8. можна побачити потік інформації від зворотного та прямого рівнів. BI-LSTM зазвичай використовується там, де потрібні послідовні завдання. Цей вид мережі можна використовувати в моделях класифікації тексту, розпізнавання мовлення та прогнозування.

#### 2.5.4. 1-D Convolutional

Згорткові нейронні мережі — це клас нейронних мереж прямого розповсюдження, що складається з кількох етапів згортки, які виконують завдання виділення ознак, і одного вихідного етапу, який об'єднує витягнуті високорівневі ознаки для прогнозування бажаного результату. На рис. 2.9. показаний приклад простої одновимірної архітектури CNN [30].

Помітна ж відмінність між CNN і традиційними НМ полягає в тому, що CNN за останнє десятиліття в основному успішно використовувалися в області розпізнавання образів у зображеннях [31]. Та недавно одновимірні CNN показали й значну перспективу в роботі зі структурованими текстовими даними, наприклад, мовними даними в таких завданнях як машинний переклад і класифікація документів [32]. Для багатьох завдань з текстових послідовностей 1-D CNN використовують найкращі практики сьогодення, такі



як розширені згортки, які часто працюють так само добре або краще, ніж архітектури RNN.

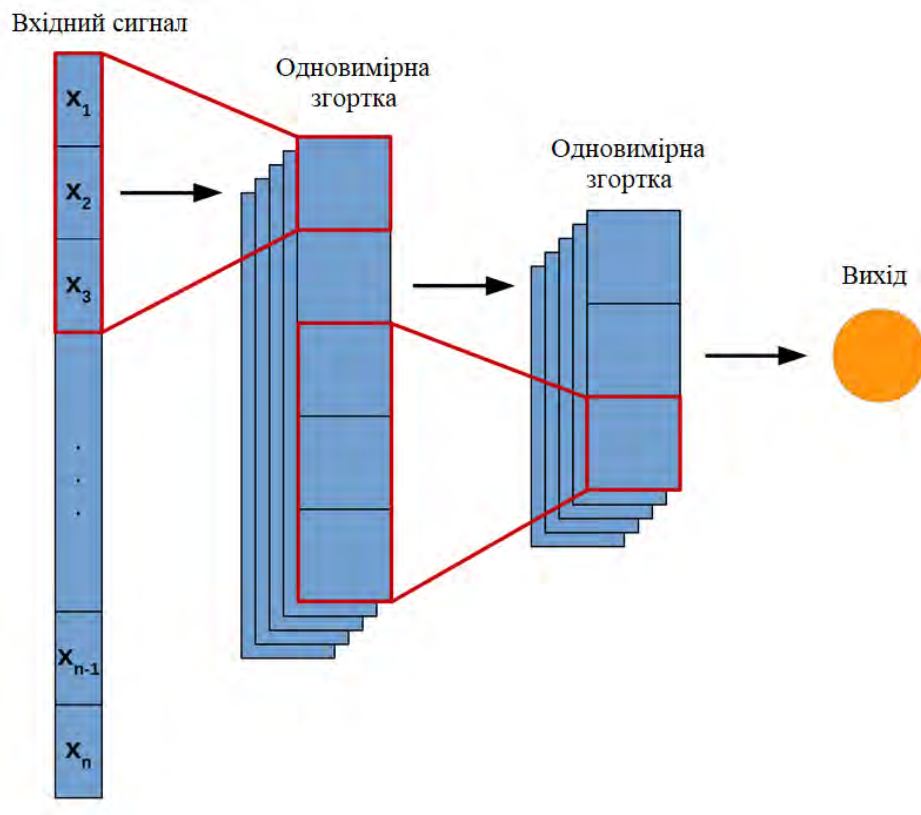


Рис. 2.9. Спрощена архітектура одновимірної CNN.

Кожен із етапів згортки показує набір навчальних згорткових фільтрів за якими слідує операція об'єднання. Ці згорткові фільтри діють, щоб витягнути характеристики високого рівня із наданого вхідного сигналу шляхом згортання набору вагових коефіцієнтів із вхідними даними та застосування нелінійної функції активації. Вихідні дані потім подаються в операцію об'єднання, яка зменшує просторовий розмір функцій, витягнутих згортковими фільтрами, підкреслюючи при цьому домінуючі особливості, отримані кожним фільтром [33]. У міру проходження вхідних даних через етапи згортки (зліва направо на рисунку), мережа дізнається більше особливостей для конкретної задачі.

## 2.6. Розробка алгоритму роботи системи

Розроблена автоматизована система класифікації матеріалу за температурним профілем працює за алгоритмом, що представлений на рис. 2.10.

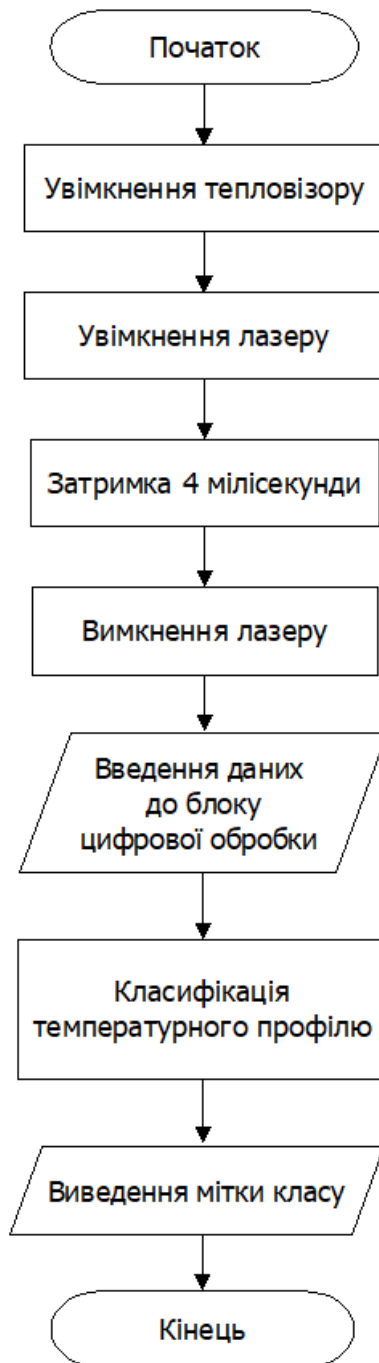


Рис. 2.10. Алгоритм роботи системи

Після ініціалізації системи (початку) вмикається тепловізор системи, та починає безперервно реєструвати температурні профілі. Він вмикається першочергово, щоб зафіксувати ще ненагріту поверхню зразка. Наступним за тепловізором вмикається лазерне джерело і миттєво починає нагрівати об'єкт. В системі передбачена затримка в 4 мілісекунди, протягом цього часу відбувається нагрів. Після затримки лазер вимикається для продовження подальшої фіксації температурних профілів, тільки вже охолодження зразка. Після отримання тепловізором останнього зображення, всі отримані дані вводяться в блок цифрової обробки для компонування під виконання класифікації. Після передачі даних відбувається сама класифікація. По закінченню процесу програма виводить на дисплей мітку ймовірного класу матеріалу – дерево, пластик, сталь чи алюміній. На цьому робота системи закінчена.

## **2.7. Висновки до розділу 2**

У другому розділі було синтезовано структурну схему проектувальної системи. На основі сформульованих вимог обрано такі компоненти системи як лазерне джерело та тепловізор. Необхідно, щоб лазер був достатньо потужний для швидкого нагріву, але й не надмірно потужним, щоб не пошкодити направленим променем нагріву досліджуваній об'єкт. Також було обрано модель тепловізора. Основними вимогами для тепловізійної камери були висока частота кадрів та компактність.

Так як нейронні мережі будуть тренуватися в імовірних умовах бідного та одноманітного набору даних, було обрано чотири типи нейронних мереж для здійснення класифікації матеріалу об'єкту за його температурним профілем. Після навчання кожної з них, отримані результати у вигляді доли правильних відповідей кожної з них та архітектурних особливостей буде зведено порівняльну таблицю та обрану найбільш вдалу з усіх.

На цьому етапі необхідно обрати середовище для моделювання набору даних для навчання та перевірки нейронних мереж, змоделювати нагрів різних за матеріалом та геометричним розміром зразків та перетворити температурні профілі у числові значення для подальшого опрацювання їх НМ.

## **РОЗДІЛ 3. Імітаційне моделювання**

### **3.1. Вибір середовища моделювання**

У рамках проекту необхідно змоделювати процес нагріву декількох різних за товщиною зразків по кожному з обраних матеріалів. Для цієї потреби було проаналізовано два найбільш затребуваних середовища моделювання на ринку – ANSYS та COMSOL Multiphysics.

Використання будь-якого програмного забезпечення значною мірою залежить від переслідуємої мети. ANSYS є надійним і широко прийнятим промисловим стандартним інструментом. Можливості ANSYS дуже потужні з вбудованими фізичними моделями. Проте ANSYS більше орієнтований саме на промисловість, у той час як COMSOL орієнтований більше на наукові кола. Це дається взнаки на практичному виконанні моделювання системами, як і на їх функціоналі.

Хоча ANSYS є дуже потужним програмним середовищем моделювання, але в задачах з мультифізики його моделі значно менш точні. COMSOL пропонує для такого роду задач окреме програмне рішення Multiphysics, що дозволяє більш детально змоделювати взаємодію різних за фізичним походженням явищ, що напряму впливає на якість моделювання і одержуваних даних.

Таким чином, COMSOL має високу гнучкість при вирішенні комплексної фізичної проблеми. Дозволяючи навіть можливість визначати власну фізику для будь-якої проблеми. COMSOL забезпечує більш гнучке налаштування моделі порівняно з ANSYS, хоча і потребує на це більше пам'яті.

COMSOL – це також високоавтоматизоване програмне середовище, що виражається у великій кількості вбудованих опцій, різноманітні інструментів для швидкого та простого моделювання. Багата вбудована бібліотека

матеріалів дозволяє автоматизовано додавати необхідні параметри для досліджуваних зразків.

Враховуючи зручність, швидкість та простоту моделювання, нарівні з високими показниками точності в мультифізичних задачах, та вбудовану бібліотеку матеріалів, для моделювання досліджуваних процесів нагріву вирішено застосовувати програмне середовище COMSOL.

### 3.2. Опис моделі тестових зразків

У якості зразків обрано типові об'єкти взаємодії в задачах з телеопераційного маніпулювання – невеликі за розміром, з твердих жорстких матеріалів.

Геометрично зразки представляють собою прямокутні паралелепіпеди висотою та шириною 100 мм, та змінною глибиною, від 1 до 30 мм.

Всі змодельовані значення глибини:

1 мм; 1,5 мм; 2 мм; 2,5 мм; 3 мм; 4 мм; 5 мм; 10 мм; 20 мм; 30 мм.

Для застосування системи було обрано 4 матеріали: Дерево (сосна), Акриловий пластик, Сталь, Алюміній. Характеристики кожного з матеріалів (таблиця 2.1.) були взяті з вбудованої бібліотеки COMSOL.

Таблиця 2.1. Характеристики обраних матеріалів

Матеріал	Теплоємність, Дж/ кг * К	Теплопровідність, Вт/ м * К	Густина, кг/ м <sup>3</sup>
Дерево (сосна)	2300	0,14	620
Пластик (акриловий)	1470	0,18	1190
Сталь	475	44,5	7850
Алюміній	900	238	2700

### 3.3. Опис параметрів моделювання

Щоб змоделювати нагрів зразків, застосовуємо вбудований в COMSOL інтерфейс фізики Heat Transfer in Solids. Він використовується для моделювання теплопередачі шляхом провідності, конвекції та випромінювання. За замовчуванням у всіх доменах активна модель Solid, яка і буде застосована для твердих матеріалів. В усіх вимірах простору підтримується стаціонарне моделювання, моделювання у частотній області та у часовій – дослідження, що залежить від часу, та використовується, у задачах, коли змінні змінюються з часом. Оскільки ми моделюємо нагрів протягом кінцевого часового проміжку, скористаємося моделюванням у часовій області.

При моделюванні нагріву застосовувались наступні модулі: Solid, Initial Values, Deposited Beam Power, Heat Flux (рис.3.1).

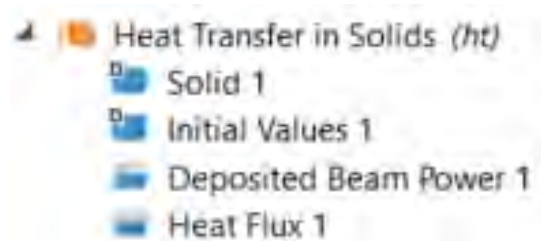


Рис. 3.1. Застосовані методи нагріву зразка

*Solid*. Цей модуль застосовує рівняння тепла для моделювання теплопередачі в твердих тілах:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p \mathbf{u} * \nabla T + \nabla * \mathbf{q} = Q$$
$$\mathbf{q} = -k \nabla T \quad (3.1)$$

, де:

$\rho$  [кг/м<sup>3</sup>] — густина твердої речовини;

$C_p$  [Дж/(кг·К)] — теплоємність твердого тіла за постійного тиску;

$k$  [Вт/(м·К)] — теплопровідність твердого тіла;

$\mathbf{u}$  [м/с] — поле швидкості, визначене підвузлом Translational Motion (у випадку, коли частини моделі рухаються в матеріальному кадрі);

$Q$  [Вт/м<sup>3</sup>] – джерело тепла.

Застосовуємо цей модуль для всього тіла зразка.

*Initial Values.* Цей вузол додає початкове значення для температури, яке може слугувати початковою умовою для перехідного моделювання.

Задаємо стандартне значенням, що є приблизно кімнатною температурою, 293,15 К (20°C). Застосовуємо цей модуль для всього тіла зразка.

*Deposited Beam Power.* Цей модуль моделює джерело тепла, що передає енергію до заданої грані через променями, такі як лазерні або електронні промені.

Параметр Beam orientation використовується для задання орієнтації променя  $\mathbf{e}$ . Виставляємо по осі  $y$ .

У розділі Beam profile задаються такі параметри, як: значення потужності накладеного променя  $P_0$ [Вт] та координати початкової точки променя  $O$ [м].  $P_0$  було задано функцією  $0.05 * step1(t)$ , тобто 50 мВт на коефіцієнт  $step1$ .  $Step1$ , у свою чергу, це функція від часу, яка змінюється від одиниці до нуля на 0,4 секунді в часовій області.

Тип розподілу Distribution type вибираємо Гаусівський (Gaussian) (3.2).

$$f(\mathbf{O}, \mathbf{e}) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{d^2}{2\sigma^2}\right), \quad d = \frac{\|\mathbf{e} \times (\mathbf{x} - \mathbf{O})\|}{\|\mathbf{e}\|} \quad (3.2)$$

, де  $\sigma$  [м] – стандартне відхилення (в даній системі – 0,3 мм).

Таким чином, ми нагріваємо зразок протягом 0,4 секунд лазерним променем потужністю в 50 мВт Гаусівським розподілом.

*Heat Flux.* Використовуємо цей модуль, щоб додати тепловий потік через грані зразка. Застосовуємо його до всіх граней. Параметр тип матеріалу (Material type) вказує, у матеріальному чи в просторових границях визначені



вхідні дані. Опція Solid вказує, що тепловий потік  $q_0$  визначено в границях матеріалу.

У налаштуваннях самого Heat Flux обираємо Конвективний тепловий потік (Convective Heat Flux) (3.3).

$$q_0 = h * (T_{ext} - T) \quad (3.3)$$

, де:

$h$  [Вт/м<sup>2</sup>К] – коефіцієнт теплопередачі;

$T_{ext}$  [К] – зовнішня температура;

$T$  [К] – температура об'єкту.

Опція за замовчуванням передбачає введення також визначеного користувачем значення для коефіцієнта теплопередачі  $h$  [Вт/м<sup>2</sup>К]. У нашому випадку він дорівнює 5.

### 3.4. Створення навчального набору даних

Вкрай важливим етапом в навчанні НМ є формування навчального набору даних. Повнота і якість вхідних даних будуть безпосередньо впливати на ефективність її роботи. Тому від вибірки вимагається в повноті відобразити властивості досліджуваних матеріалів.

Найважливішими показниками якісної вибірки є достатність, різноманітність та рівномірність представлення класів. Число прикладів для навчання повинно бути достатнім для того, щоб НМ отримала здатність до узагальнення, та щоб сформувати навчальну та тестову множини. Вона також має складатися з різноманітних комбінацій вхід-вихід, оскільки велика кількість навчальних прикладів при відсутності їх унікальності також позначиться на низькій ефективності НМ до узагальнення. Нарешті, необхідно щоб дані різних класів були збалансовані, тобто були представлені в приблизно однакових пропорціях. Інакше НМ в процесі навчання може

«перекоситися» в переважаючий клас і визначати його як найімовірніший у всіх наступних прогнозуваннях.

Для проекту було вирішено створити набір даних з чотирьох типів матеріалів, десяти товщин для кожного з матеріалів, фіксуючи температурні показники у п'яти різних точках впродовж двох секунд з кроком в 2 мілісекунди. Профілі нагріву зразка товщиною в 30 мм можна побачити на рис. 3.2 для дерева, рис. 3.3 для пластику, рис. 3.4 для сталі та рис. 3.5 для алюмінію.

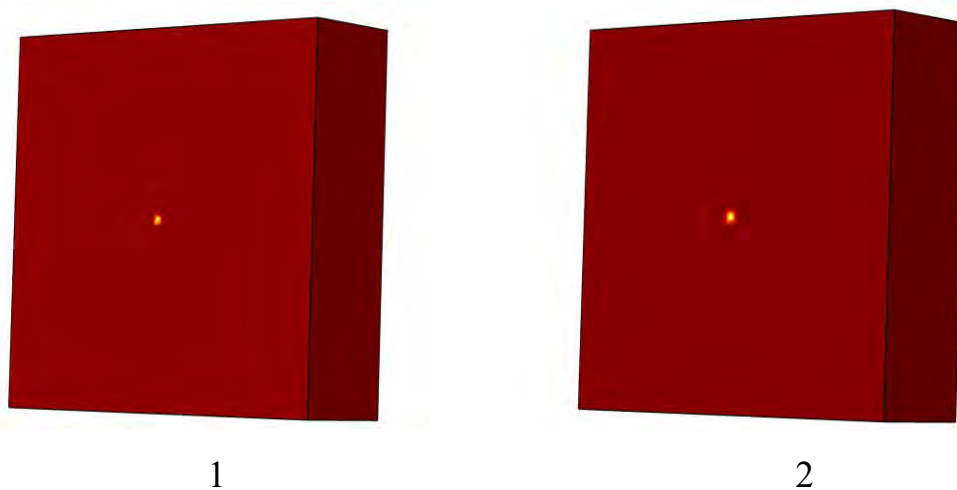


Рис. 3.2. Тепловий профіль зразка з дерева у момент кінця нагріву (1) та кінця вимірювання (2)

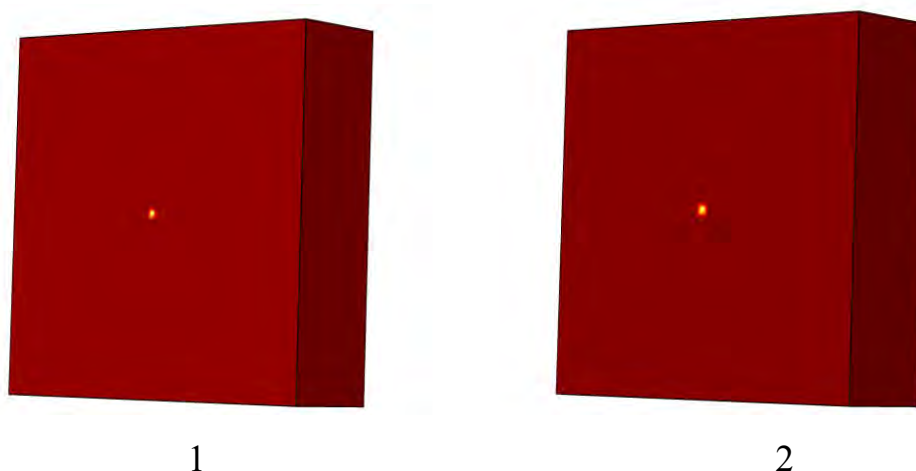


Рис. 3.3. Тепловий профіль зразка з акрилового пластику у момент кінця нагріву (1) та кінця вимірювання (2)

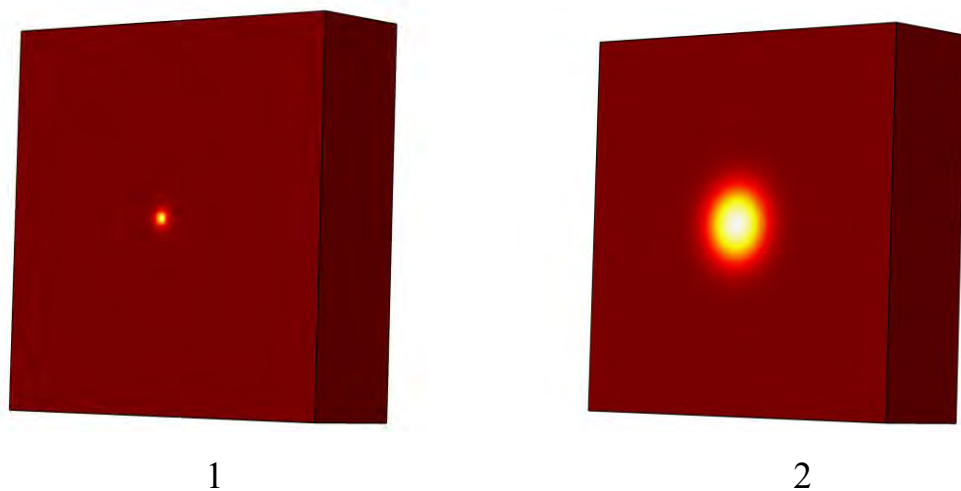


Рис. 3.4. Тепловий профіль зразка зі сталі у момент кінця нагріву (1) та кінця вимірювання (2)

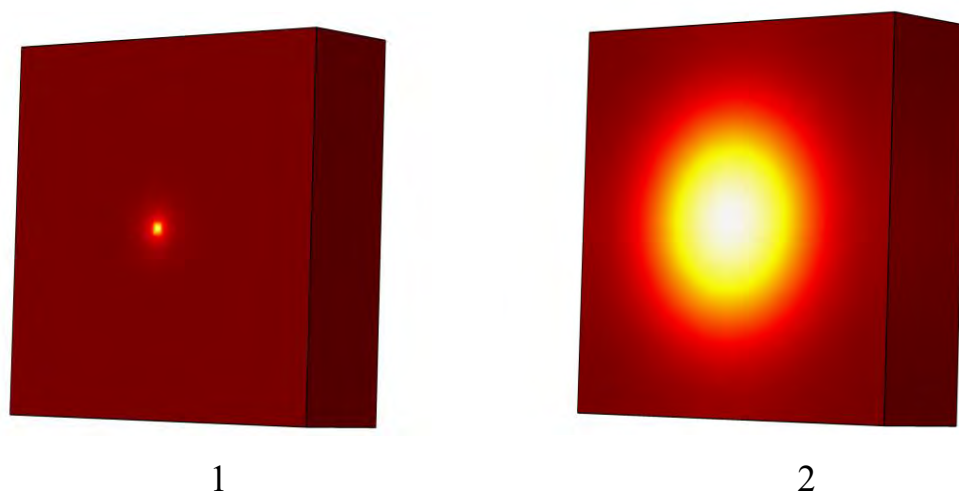


Рис. 3.5. Тепловий профіль зразка з алюмінію у момент кінця нагріву (1) та кінця вимірювання (2)

Таким чином, фінальний датасет склав таблицю в двісті рядків та сто один стовпчик (рис. 3.6). В кінці кожного рядку, після сто одного заміру проставлено клас матеріалу, до якого належить зразок – wood, plastic, steel або aluminum.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
1	0,1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15,16,17,18,19,20,21,22,23,24,25,26,27,28,29,30,31,32,33,34,35,36,37,38,39,40,41,42,43,44,45,46,47,48,49,50,51,52,53,54,55,56,57,58,59,60															
2	293.1520051906252,302.61004278583823,310.420353132717,317.03309952301674,322.90040871844127,328.11252827775655,332.5992656552557,336.8274420482946,340.96:															
3	293.1502691573101,294.14489105195497,294.6377431868764,294.8644559017415,294.99721593486527,295.0710758556097,295.0587725544708,295.0680317764575,295.138:															
4	293.15000167143296,293.16052815387263,293.1723826052838,293.1841746654288,293.1950544820362,293.2048466007088,293.21368748597774,293.22141567906056,293.2:															
5	293.1500039776905,293.16647670878814,293.17688676297433,293.1832216759477,293.1874964060835,293.19011243253584,293.1907574937403,293.1914268085932,293.19:															
6	293.1500002981566,293.15088798479565,293.1510038374488,293.1508100673196,293.1506185640259,293.15049333045886,293.1503845865921,293.1503403258123,293.150:															
7	293.15114391281975,298.8644142500728,304.0149314419468,308.6815739342346,312.9815528987944,316.93786194421335,320.53261715270156,323.9394321972354,327.22:															
8	293.1501482163846,293.84159388548767,294.39594606862437,294.8493198423039,295.24412480559295,295.5887596020712,295.87669195339885,296.15432875852207,296:															
9	293.15000143169857,293.1559319281519,293.15899394945694,293.1595863308921,293.15857987205305,293.1561432281276,293.1521452228586,293.1479419451082,293.14:															
10	293.1500026483979,293.1636602451723,293.17529228941015,293.1839434295348,293.1895385228733,293.1920528399436,293.1915056147871,293.1894465925972,293.1864:															
11	293.1500017386523,293.1568652703224,293.1604010891726,293.1616187026014,293.161638466408,293.16068283567074,293.1585787897731,293.156468051751,293.154771:															
12	293.150718351473,296.83674915514456,300.3185050269992,303.6091104055544,306.73515158451534,309.7017984114022,312.50502989369824,315.1913443990025,317.77:															
13	293.15001831471466,293.2586972637537,293.38741435910924,293.5336196098997,293.6929796545946,293.8646490305972,294.0492853199272,294.2401201722413,294.434:															
14	293.1499989594451,293.1444952098211,293.1389222944646,293.1332135781814,293.1273029980342,293.12117736357607,293.11484693404344,293.1083035040581,293.101:															
15	293.15000293477016,293.1645887678609,293.17766833364317,293.18952755184444,293.20060468881655,293.21098556600185,293.2206034333899,293.2300615567173,293.:															

Рис. 3.6. Фрагмент csv-файлу

Графіки всіх отриманих замірів впродовж п'ятдесяти вимірювань по кожному матеріалу можна побачити на рис. 3.7: а) для дерева, б) для пластику, в) для сталі та г) для алюмінію.

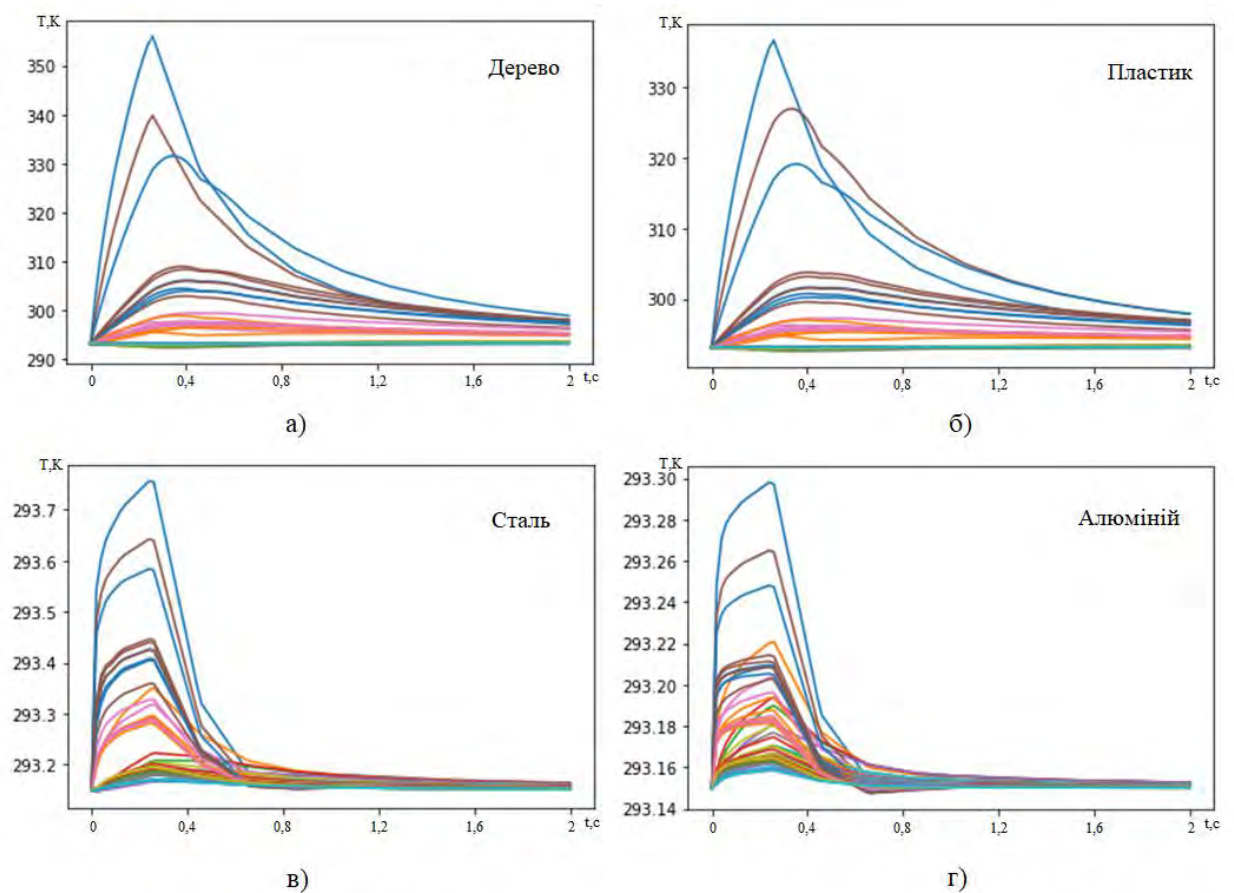


Рис. 3.7. Суміщений графік замірів зразків

В результаті моделювання ми отримали набір даних обсягом 200 зразків, далі його можна використати для навчання нейронних мереж. Такий обсяг вважається бідним для навчання нейронних мереж. Також, на основі приведених графіків можемо зробити висновки, багато замірів повторюються, формуючи деяку нестачу унікальних даних, що теж може негативно позначитись на ефективності НМ. До того, можемо споглядати, що показники дерева з пластиком та сталі з алюмінієм дуже схожі, тому набір даних ще й до того і складний.

Підсумовуючи, можемо сказати що набір даних вийшов бідним, дещо одноманітним та складним, в силу схожості даних різних матеріалів. Графіки дерева з пластиком та сталі з алюмінієм важко розрізнити навіть людині, а в ряді місць їх графіки і зовсім перетинаються, формуючи нетривіальну задачу по розробці НМ, здатних класифікувати тип матеріалу за такими даними.

### **3.5. Висновки до розділу 3**

У цьому розділі було обрано підходяще програмне середовище для зручного та швидкого моделювання зрізків декількох типів матеріалів. На основі наших потреб було обрано програмне середовище COMSOL. У цілях збільшення вибірки вимірювань було вирішено змінювати геометричних розмір зразків, а також реєструвати температурні профілів у різних точках на поверхні зразків. Були сформовані параметри зразків для створення датасету.

Нарешті, було сформовано набір даних із змодельованих вимірювань для навчання чотирьох нейронних мереж та перевірки їх ефективності по закінченню навчання. Можемо констатувати, що набір вийшов доволі складним, в силу його невеликого розміру, деякої повторюваності отриманих даних та сильної схожості в характеристиках матеріалів. Наразі стоїть непроста задача спроектувати систему, що зможе з прийнятною точністю визначати тип матеріалу на основі даного набору даних.

## **РОЗДІЛ 4. ТЕСТУВАННЯ РОЗРОБЛЕНИХ МОДЕЛЕЙ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ**

Після завершення всіх підготовчих робіт зі створення навчальних даних, приступаємо до створення моделей нейронних мереж. Всього було розроблено та навчено чотири нейронні мережі, описані в підпункті 2.5.

### **4.1. Класифікація з використанням багатошарової мережі прямого розповсюдження**

Перша архітектура – це класична звичайна повнозв'язна НМ прямого розповсюдження. Розроблена архітектура моделі представлена на рис. 4.1. Перший прошарок створено на 800 нейронів, з активаційною функцією `relu` та регуляризацією  $l_2$ . Після нього йде прошарок `Batch Normalization` для нормалізації даних перед передачею їх у наступний шар. За ним йде другий повнозв'язний прошарок на 100 нейронів, також з активаційною функцією `relu` та регуляризацією  $l_2$ . Потім знову прошарок нормалізації. На останньому, вихідному прошарку 4 нейрони, по кількості класів. Активаційна функція `softmax`, регуляризація  $l_2$ .

Після розробки всіх необхідних нейронів відбувається компіляція моделі. В якості оптимізатора було вибрано `Adam`, швидкість навчання задана в  $0,00001$  та стандартний для класифікацій критерій якості «категоріальна крос-ентропія». У якості метрики задана доля правильних відповідей.

Наступним етапом є навчання НМ. Шляхом спроб було визначено оптимальну кількість епох в 1000, оскільки навчальних даних обмаль, тому єдиним виходом є багато разів пропускати їх через мережу. На валідацію було виділено 15% від навчальних зразків.

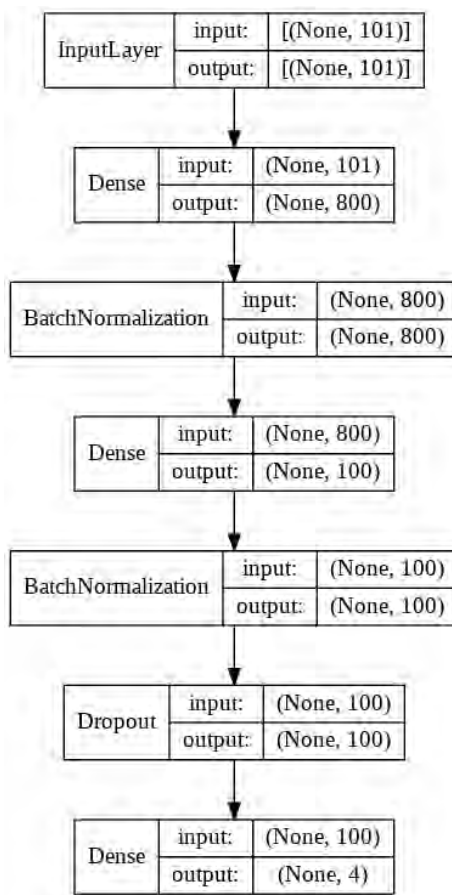


Рис. 4.1. Архітектура розробленої багатошарової мережі прямого розповсюдження

Будуємо графіки навчання на основі записаної історії правильних відповідей. Побудований графік показано на рис. 4.2.

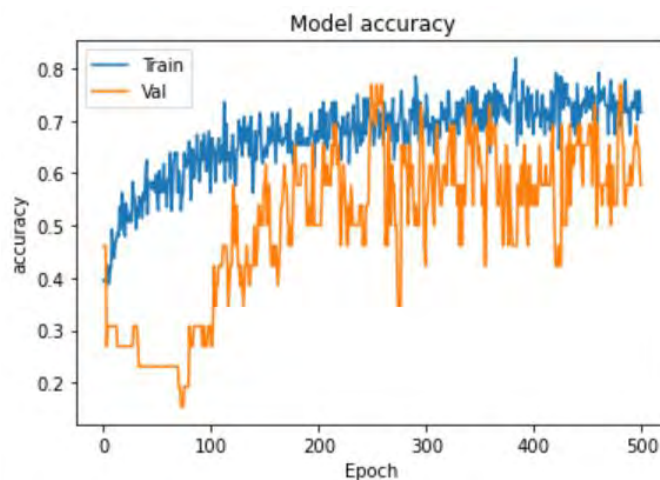


Рис. 4.2. Графік навчання спроектованої мережі прямого розповсюдження

Після закінчення навчання оцінюємо ефективність створеної моделі через метрики «точності» та втрат. Для цієї моделі значення правильних відповідей дорівнює 76,6%.

## 4.2. Класифікація з використанням мережі LSTM

Друга архітектура – це LSTM (Long short-term memory). Особливість цієї НМ в тому, що вона аналізує дані не по точкам окремо, а як єдиний часовий ряд, слідкуючи, як поводить себе графік значень, не втрачаючи взаємозв'язки з попередніми даними. Розроблена архітектура мережі LSTM показана на рис. 4.3.

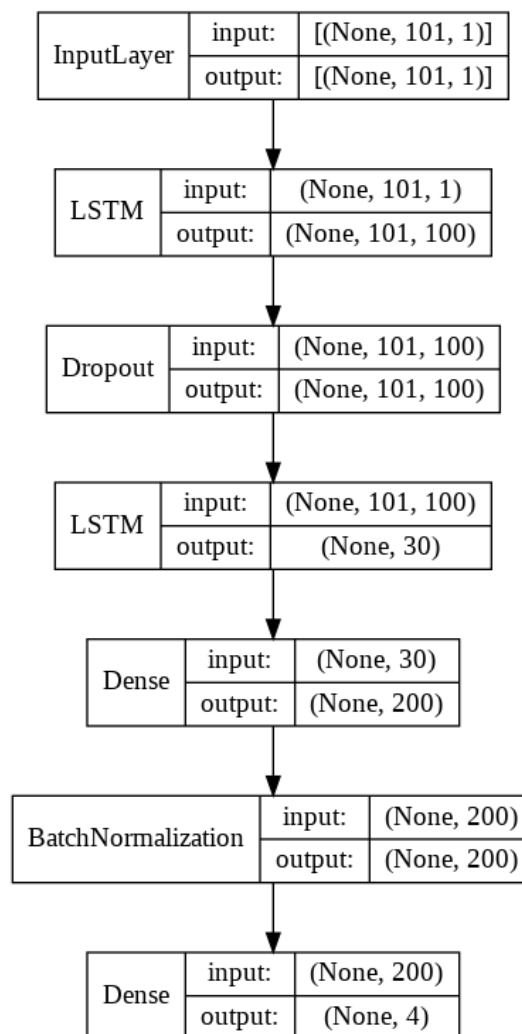


Рис. 4.3. Архітектура розробленої LSTM-мережі



Перші два прошарки LSTM як би виділяють діагностичні ознаки, за якими буде відбуватися класифікація. Сама класифікація відбувається в останні двох повнозв'язних прошарках.

Наступним етапом є навчання НМ. Шляхом тестування ефективності мережі прийнято оптимальну кількість епох 1500. На валідацію виділено 15% від всіх навчальних зразків.

Будуємо графіки навчання мережі. Отриманий графік зображений на рис. 4.4.

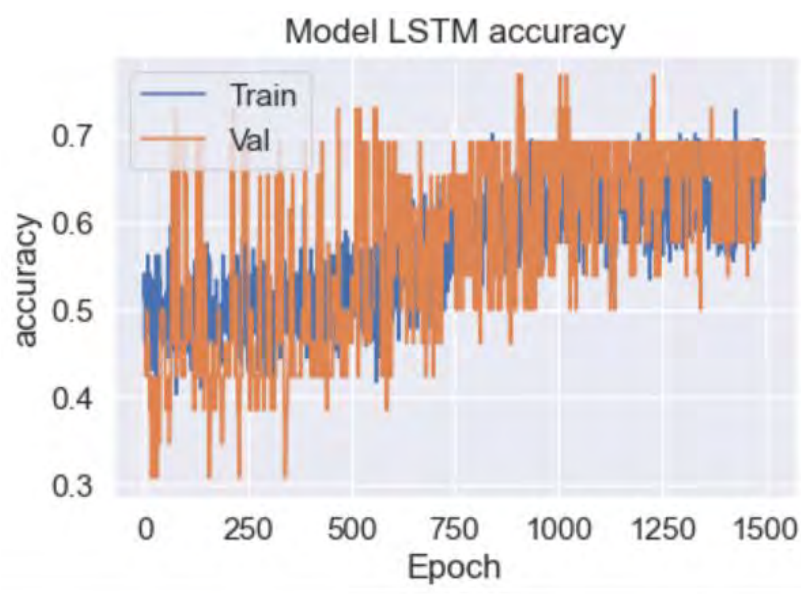


Рис. 4.4. Графік спроектованої LSTM-мережі

Проведена перевірка ефективності створеної моделі через метрики «точності» та втрат. Доля правильних відповідей цієї моделі складає 70%.

### 4.3. Класифікація з використанням мережі Bi-LSTM

Третя мережа – це Bi-LSTM (Bi-directional long short term memory). Її архітектура в точності повторює архітектуру звичайної LSTM, за винятком того, що вона проходить по даним вперед і назад. Якщо звичайна LSTM дивилася як змінюється у нашому випадку температурний профіль з часом, а Bi-LSTM ще створює його дзеркальну копію і нібито йде в зворотному

напрямку послідовності даних. Передбачається, що такий аналіз (водночас прямий і зворотній) дасть нам більше інформації, що покращить якість класифікації.

Архітектура мережі показана на рис. 4.5. Як і у минулій моделі, перші два прошарки Bi-LSTM немов виділяють діагностичні ознаки, за якими буде відбуватися класифікація, сама ж класифікація відбувається в останні двох повнозв'язних прошарках. У третьому прошарку ми зменшили кількість нейронів до 100, тому що аналіз виходить більш інформативним.

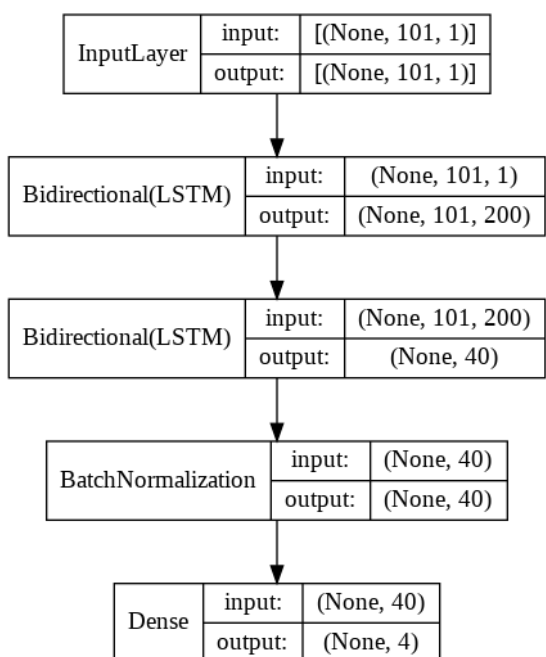


Рис. 4.5. Архітектура розробленої Bi-LSTM мережі

Після закінчення етапу проектування мережі переходимо до етапу навчання НМ. Архітектура дозволяє зменшити кількість навчальних епох до 1000. Валідаційна вибірка – 15%.

Будуємо графіки навчання (рис. 4.6):

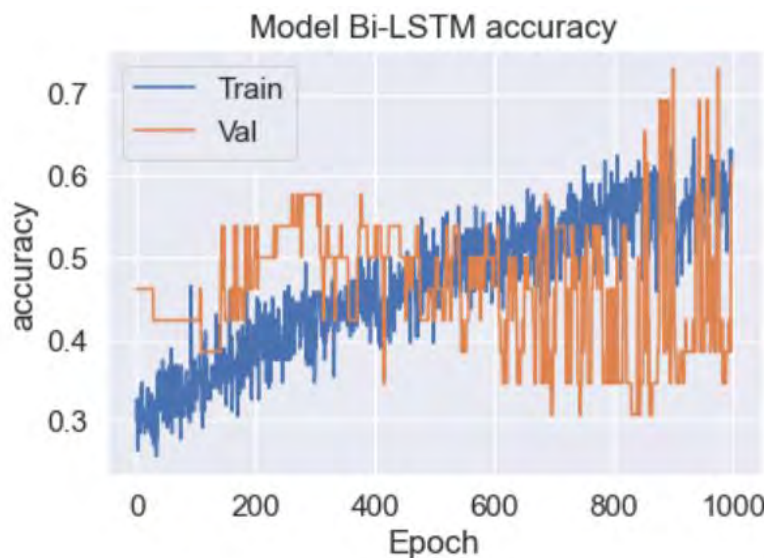


Рис. 4.6. Графік навчання розробленої мережі Bi-LSTM

Перевіряємо ефективність створеної моделі на долю вірних відповідей. Результати по даній моделі склали 73,3% правильних відповідей.

#### 4.4. Класифікація з використанням одновимірної згорткової мережі

Четверта мережа – це одновимірна згорткова НМ (1D-Convolutional). Вона, як і LSTM, дозволяє проаналізувати часовий ряд не як набір точок, а цілісну послідовність завдяки «вікну» елементів і операцій згортки з ним. Таким чином мережа послідовно, один за одним, проходить по всьому тепловому профілю, виконуючи операції згортки.

Всього в рамках архітектури мережі було створено 5 прошарків:

1. Згортковий прошарок з вікном 5 елементів;
2. Згортковий прошарок з вікном 3 елемента;
3. Згортковий прошарок з вікном 3 елемента;

Останні два прошарки – повнозв’язні класифікуючі. Повна архітектура приведена на рис. 4.7.

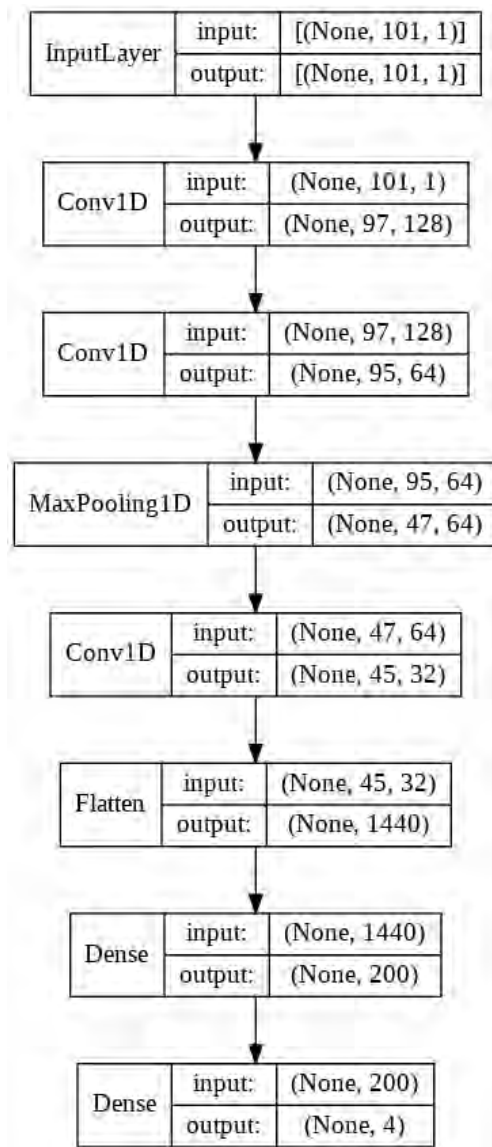


Рис. 4.7. Архітектура розробленої 1D-Convolutional мережі

Навчаємо мережу. Кількість епох обираємо 1000. На валідацію, знову ж таки, виділяємо 15% від всіх навчальних зразків.

Будуємо графіки навчання (рис. 4.8):

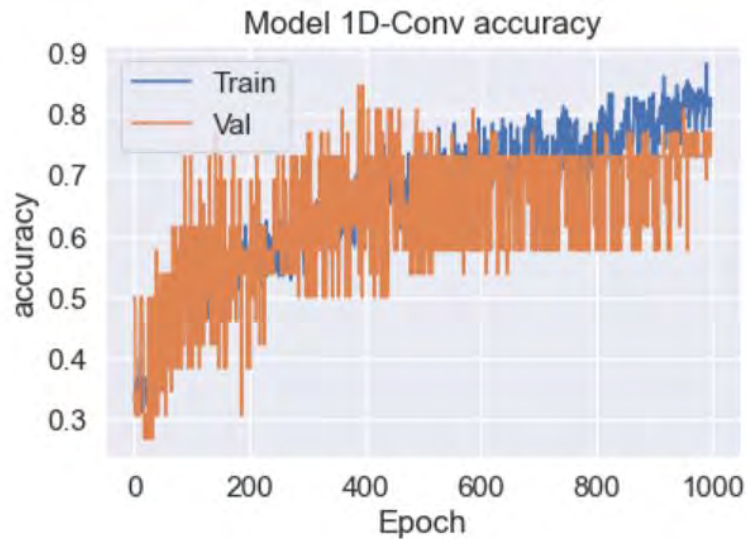


Рис. 4.8. Графік навчання розробленої 1D-Convolutional мережі

Після навчання оцінюємо ефективність створеної моделі. Для цієї мережі доля правильних відповідей становить 73,3%.

#### 4.5. Аналіз результатів

Метою паралельної розробки 4 різних архітектур НМ було виявлення найбільш оптимальних для роботи із поточним складним та обмеженим набором даних.

На основі розроблених архітектур мереж та отриманих результатів можна скласти порівняльну таблицю:

Таблиця 4.1. Порівняльна таблиця розроблених архітектур

Тип мережі	Кількість параметрів	Кількість епох навчання	Доля правильних відповідей, %
Feed-forward	163,904	1000	76,6
LSTM	63,924	1500	70
Bi-LSTM	121,544	1000	73,3
1D-Convolutional	320,588	1000	73,3

Як видно з таблиці 4.1, найбільший відсоток правильних відповідей було досягнуто у багатошаровій мережі прямого розповсюдження. У порівнянні в рештою архітектур, у неї також мінімальна кількість епох, що позитивно впливає на необхідний час для її навчання. Але велика кількість параметрів зменшує швидкість її навчання та роботи.

Архітектура LSTM має дещо більшу кількість епох, ніж решта мереж, проте суттєво меншу кількість параметрів, що на практиці буде означати меншу тривалість її навчання та більшу швидкодію у порівнянні з іншими мережами. Проте найменший відсоток правильних відповідей дозволяє сказати, що це найменш вдала з розроблених мереж.

Bi-LSTM мережа має всього 1000 навчальних епох, що, як і з мережею прямого розповсюдження, є мінімальним. Разом з невеликою кількістю параметрів, мережа буде швидко навчатись та працювати. Відсоток вірних відповідей є середнім по таблиці. Це порівняно непогана система, але не найбільш оптимальний варіант.

Мережа 1D-Convolutional в своїх результатах схожа з мережею Bi-LSTM – вона також навчається впродовж 1000 епох, та показує такий же відсоток правильних відповідей. Але вона має найбільшу кількість параметрів з усіх створених архітектур, тому порівняно з Bi-LSTM, буде повільніше навчатись та працювати.

Згідно з таблицею можна зробити висновок, що багатошарова мережа прямого розповсюдження виявилась найбільш вдалою з усіх розроблених. Найбільший відсоток правильних відповідей разом з мінімальною кількістю необхідних для її навчання епох та невеликою кількістю параметрів дозволяє сказати, що її використання є найбільш оптимальним.

Проте, оскільки у нас не бінарна класифікація, а декілька класів, вкрай важливо також проаналізувати долю правильних відповідей мережі по кожному з класів окремо, і у яких саме випадках система помиляється. Для таких цілей використовують так звані матриці розсіювання (confusion matrix). В ній представляються всі хибні та правильні відповіді мережі для кожного

класу, утворюючи таким чином матрицю. Матриця розсіювання для першої мережі прямого розповсюдження показана на рис. 4.9.



Рис. 4.9. Матриця розсіювання спроектованої мережі прямого розповсюдження

В рядках записані ті класи, які реально мають бути, тоді як в стовпчиках – ті класи, що визначила НМ. У місцях перетину класів по горизонталі та вертикалі – доля правильних відповідей для конкретно цього класу.

Як бачимо з матриці, мережа правильно класифікувала дерево у 71% випадків, у 7,1% класифікації дерева реально були сталю, та у 21% – зразками з алюмінію.

Пластик був класифікований вірно лише у 40% усіх випадків. Частіше, а саме у решті 60% зразків, що мережа класифікувала як пластик, насправді були алюмінієм.

Визначення сталі відбулося без нарікань. Із 100% зразків, що мережа віднесла до класу сталі, реально були зі сталі.

Класифікація алюмінію теж відбулось непогано. З 83% класифікацій алюмінію дійсно було алюмінієм, і 17% – пластиком.

Матриця розсіювання для спроектованої мережі на архітектурі LSTM показана на рис. 4.10.



Рис. 4.10. Матриця розсіювання спроектованої LSTM-мережі

Бачимо, що мережа краще класифікувала дерево за першу мережу – у 77% випадків класифікація була вірна, у 15% класифікації дерева насправді були сталлю, та у 0,77% – алюмінієм.

Набагато гірша ситуація з пластиком. Він був класифікований вірно лише у 25% випадків. У решті 75%, що мережа класифікувала пластиком, насправді були алюмінієм.

Класифікація сталі теж пройшла з помилками. Лише 67% мережі вдалося класифікувати правильно, решту 34% мережа порівну плутала з пластиком і алюмінієм.

А ось визначення алюмінію відбулося краще за першу мережу. 86% класифікацій алюмінію дійсно було алюмінієм, решта 14% – пластиком.

Матриця розсіювання наступної, Vi-LSTM моделі приведена на рис. 4.11.

По класифікації вона показує кращі результати разом з LSTM мережею – 77% вірних класифікацій. У 15% класифікацій були переплутані зі сталлю, 0,77% – з алюмінієм.



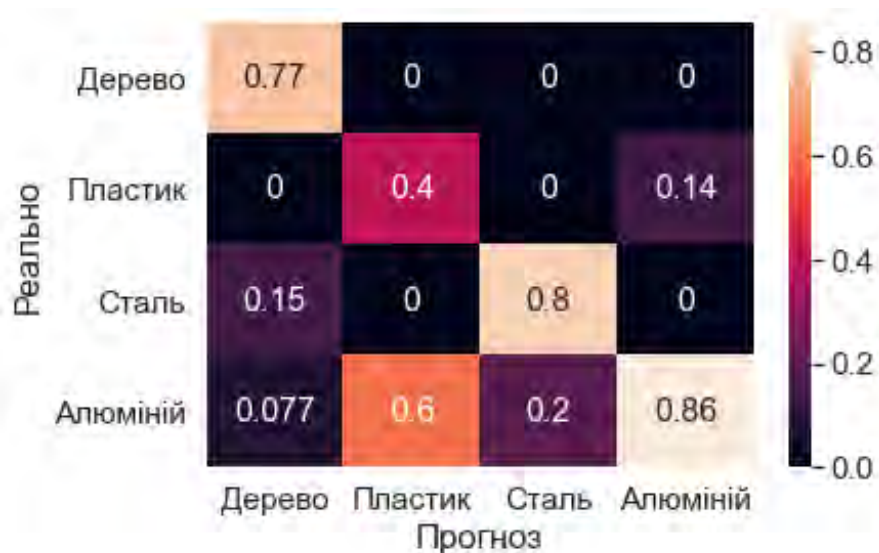


Рис. 4.11. Матриця розсіювання розробленої Bi-LSTM мережі

Класифікація пластика, все ще невдала, хоча і значно краще, ніж у звичайній LSTM-мережі. Пластик класифікований правильно лише у 40% всіх випадків. 60% профілів, що мережа віднесла до пластика, насправді ж були з алюмінію.

Можемо бачити також покращення в класифікації сталі. 80% мережі вдалося класифікувати правильно, інші 20% були насправді з алюмінію.

Визначення алюмінію співпадає з минулою мережею. 86% класифікацій були зроблені вірно, решта 14% виявились пластиком.

Матриця розсіювання для останньої, одновимірної згорткової мережі приведена на рис. 4.12.

З матриці видно, що мережа правильно класифікувала дерево у 71% випадків, у 14% класифікації дерева у дійсності були сталю, ще у 14% – зразками з алюмінію.

Пластик був класифікований вірно тільки у 43%. У 57% профілів, що мережа класифікувала пластиком, насправді ж були алюмінієм.

А от визначення сталі та алюмінію відбулося бездоганно. 100% класифікацій цих двох матеріалів мережею справді відповідали дійсності.



Рис. 4.12. Матриця розсіювання розробленої 1D-Convolutional мережі

Не дивлячись на те, що за чисельними показниками загальних правильних відповідей 1D-Convolutional мережа поступається багат шаровій мережі прямого розповсюдження, за аналізом показників матриць розсіювання мережа показує себе найкраще. Стовідсоткова доля правильних відповідей при класифікації двох із чотирьох типів матеріалів, найвища з усіх результатів достовірність класифікації пластику та оптимальна кількість необхідних епох для навчання в порівнянні з іншими розробленими мережами, дозволяє нам віддати перевагу останній, одновимірній згортковій НМ.

#### 4.6. Огляд потенційних шляхів підвищення ефективності системи

У даній роботі, в силу певних подій, не вдалося провести експеримент, тому не було використано весь потенціал тепловізійної камери. Оскільки використання тепловізора дозволяє фіксувати не лише температуру у конкретній точці, а й те, яким чином та з якою швидкістю підвищення температури в точці нагріву передається до сусідніх областей на тілі зразка (так звані теплові плями), можна користуватися й цими показниками у визначенні типу матеріалу. Теоретично, це повинно сильно підвищити

достовірність класифікації. Також, так як це є відносними температурами, необхідності у використанні тепловізійних камер високої роздільної здатності немає.

Надважливим аспектом є покращення набору даних для навчання мережі – збільшення його обсягу та збагачення насамперед унікальними вимірами.

Результати, опубліковані в цій роботі, є переконливим свідченням того, що теплові профілі об'єктів дійсно можуть слугувати вхідним сигналом для високоточної класифікації між класами їх матеріалів. Ця робота може слугувати основою для розробки швидкого, точного та безконтактного інструменту визначення характеристик матеріалу з потенційним застосуванням. Майбутня робота включає розширення меж цієї системи, роблячи її здатною класифікувати більше число класів та кількість зразків матеріалу. Можна використовувати вдосконалені алгоритми обробки сигналів для більш точного виділення ознак і більшої завадостійкості до умов навколишнього середовища. Зрештою, можливо розробити портативну версію системи з одноплатним комп'ютером замість робочої станції та мікротепловізійним датчиком або компактним пірометром замість тепловізійної камери. Така повністю мобільна установка значно розширила б можливі випадки застосування, оскільки її можна було б швидко запускати, з потенційною здатністю працювати в режимі реального часу та без необхідності здійснювати будь-який фізичний контакт із досліджуваним зразком. Це може уможливити такі сценарії використання, як ходячі роботи, які можуть ідентифікувати фізичні властивості невідомих об'єктів, перш ніж фізично маніпулювати ними. Такі сценарії, як рятувальні місії, логістичні операції або точна телеоперація (включаючи телехірургію), взаємодія людей-роботів і автономних роботів можуть широко застосовувати цю технологію.

#### **4.7. Висновки до розділу 4**

У четвертому розділі було розроблено чотири нейронні мережі, на чотирьох різних архітектурах – прямого розповсюдження, LSTM, Bi-LSTM, та одновимірній згортковій. Проаналізовано ефективність кожної з них, мережі були порівняні між собою за кількістю їх параметрів, навчальних епох, загальною долею правильних відповідей та за матрицями розсіювання кожної з мереж. За результатами аналізу виділено дві мережі – прямого розповсюдження та одновимірну згорткову. Згідно з порівняльною таблицею було зроблено висновок, що багат шарова мережа прямого розповсюдження є найбільш ефективною з розроблених. Найбільший відсоток правильних відповідей та мінімальна кількість необхідних для її ефективної роботи навчальних епох дозволило віддати перевагу їй. Проте, згідно з матрицями розсіювання мереж, краще вдалося класифікувати зразки по кожному з класів четвертій системі – одновимірній згортковій.

Було розглянуто потенційні шляхи підвищення ефективності системи. Основними з них: є використання характеру та швидкості розповсюдження тепла від точки нагріву по решті тілу зразка (так звані теплові плями), покращення набору даних для НМ шляхом більшого його наповнення різноманітними вимірами та розробка портативної моделі для швидких та зручних застосувань.

## **РОЗДІЛ 5. РОЗРОБКА СТАРТАП-ПРОЕКТУ «АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА ВИЗНАЧЕННЯ ТИПУ МАТЕРІАЛУ АКТИВНИМ ТЕПЛОВИМ МЕТОДОМ»**

В цьому розділі буде проведено маркетинговий аналіз проекту магістерської дисертації для визначення можливості його ринкового впровадження. Для аналізу використаний алгоритм наведений в [34].

### **5.1. Опис ідеї стартапу**

Розглянувши в попередніх розділах наявні на ринку методи та прилади визначення типу матеріалу, приходимо до висновку що ця галузь досить актуальна і водночас ще мало розвинена, потребує нових розробок. В цьому розділі буде проведено аналіз стартап проекту, а основу якого покладена ідея розробки приладу для класифікацію типу матеріалу на основі теплового неруйнівного методу. Прилад простий у використанні та може бути під'єднаний до робототехнічних пристроїв. Він дозволить швидко та безконтактно визначати тип матеріалу об'єкту та зі значною точністю розуміти його параметри та властивості, що покращить точність телеопераційних робіт.

У таблиці 5.1 зображено зміст ідеї та можливі базові потенційні ринки, в межах яких потрібно шукати групи потенційних клієнтів.

Таблиця 5.1. Опис ідеї стартап-проекту

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Розробка автоматизованої система визначення типу матеріалу активним тепловим методом з використанням нейронної мережі	Визначення характеристик об'єктів за їх тепловим профілем	Автоматизована система забезпечує високу точність та швидкість оцінки фізичних властивостей об'єктів, не вступаючи з ними безпосередньо в контакт

В таблиці 5.1 наведено головний напрямок використання автоматизованої системи, основними користувачами є організації та підприємства, що роботехнічними пристроями, які можуть виконувати телеопераційні роботи у складних та неструктурованих середовищах, покладаються головним чином на візуальний та / або слуховий зворотний зв'язок для взаємодії з віддаленим оператором.

Інформаційна карта стартап проекту наведена в таблиці 5.2, вона включає в себе назву та авторів проекту, необхідні ресурси, описує проблематику та основні цілі.

Таблиця 5.2. Інформаційна карта стартап-проекту

Назва стартап-проекту	Автоматизована система визначення типу матеріалу активним тепловим методом
Автори	Наконечний М. В., Момот А.С.
Проблематика, яку вирішує стартап- проект	Розпізнання фізичних властивостей оточуючих об'єктів безпосередньо не контактуючи з ними
Головні цілі та завдання проекту	За допомогою теплового методу та нейроних мереж швидко та надійно визначення матеріального складу об'єктів на основі їх теплової реакції на збудження
Головні цільові групи, на які спрямований проект	Компанії які виробляють робототехнічні системи, та компанії, що ними користуються
Необхідні ресурси	Людські, фінансові
Загальні очікувані результати	Система, яка здатна класифікувати різні матеріали в режимі реального часу, використовуючи ступінчасту термографію лазерного збудження та набір класифікаторів машинного навчання

Далі проводимо аналіз потенційних техніко-економічних переваг ідеї порівняно із пропозиціями конкурентів:

- визначаємо перелік техніко-економічних властивостей та характеристик ідеї;

- визначаємо попереднє коло конкурентів (проектів-конкурентів) або товарів-замінників чи товарів-аналогів, що вже існують на ринку, та проводимо збір інформації щодо значень техніко-економічних показників для ідеї власного проекту та проектів-конкурентів відповідно до визначеного вище переліку;

– проводимо порівняльний аналіз показників: для власної ідеї визначено показники, що мають а) гірші значення (W, слабкі); б) аналогічні (N, нейтральні) значення; в) кращі значення (S, сильні) (табл. 5.3).

Таблиця 5.3. Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проекту

№ п/п	Техніко-економічні характеристики ідеї	(потенційні) товари/концепції конкурентів			W (слабка сторона)	N (нейтральна сторона)	S (сильна сторона)
		Мій проект	Конкурент 1 Bruker	Конкурент 2 Siko			
1	Загальна вартість	7000	23000	10000			+
2	Автоматизоване вимірювання	+	+	-		+	
	Безконтактність методу	+	+	-			
	Мобільність	+	-	+			

Після проведення аналізу сильних, слабких та нейтральних характеристик стартап-проекту у Таблиці 5.2. можна зробити висновки, що порівняно із пропозиціями конкурентів дана система має переваги в базових можливостях приладів конкурентів, які можуть зацікавити клієнтів. З таблиці можна побачити, що стартап-проект має достатні якості для того, щоб зайняти місце на ринку та забезпечити споживача виконання функцій автоматизації системи визначення типу матеріалів.

## 5.2. Технологічний аудит ідеї проекту

Далі необхідно дослідити аудит технології, за допомогою якої можна реалізувати ідею проекту, для цього визначаємо всі ідеї проекту, за якими технологіями вони будуть реалізовуватись, чи наявні та доступні ці технології.

Визначення технологічної здійсненності ідеї проекту передбачає аналіз складових які вказані в таблиці 5.4.

Таблиця 5.4. Технологічна здійсненність ідеї проекту

№ п/п	Ідея проекту	Технології її реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій
1	Автоматизована система визначення типу матеріалу активним тепловим методом	Створення програму класифікації самостійно, використовуючи мову програмування Python і бібліотеки Tensorflow	Наявна	Доступна
		Замовлення розробки програми класифікації у компанії розробників	Наявна	Доступна
Обрана технологія реалізації ідеї проекту: було вирішено розроблювати програму самостійно, використовуючи обрану мову Python і бібліотеки Tensorflow.				

Методика реалізації ідеї проекту базується на моделюванні макету системи та розробці нейронних мереж для розпізнавання та визначення теплових характеристик об'єктів. При цьому це не потребує вагомих ресурсів і дає змогу проводити дослідження у широкому спектрі вхідних даних. За даними наведеними в таблиці 5.4 можемо зробити висновок, що всі ідеї проекту можна технологічно реалізувати оскільки технології наявні на ринку та доступна для авторів.

### 5.3. Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту

В даному підрозділі визначаємо ринкові можливості, які можна використати під час ринкового впровадження проекту, та ринкові загрози, які можуть перешкодити його реалізації. Визначення ринкових можливостей дозволяє спланувати напрям розвитку, потреб потенційних клієнтів та пропозицій проектів-конкурентів. Спочатку проведемо аналіз попиту: наявність попиту, обсяг, динаміка розвитку ринку.



Особливих конкурентів на ринку поки не існує, так як більшість існуючих приборів не є безконтактними системами та неавтоматизовані.

Таблиця 5.5. Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проекту

п/п	Показники стану ринку (найменування)	Характеристика
1	Кількість головних гравців, од	2
2	Загальний обсяг продаж, грн/ум.од	5000
3	Динаміка ринку (якісна оцінка)	Зростає
4	Наявність обмежень для входу (вказати характер обмежень)	Немає
5	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	Немає
6	Середня норма рентабельності в галузі (або по ринку), %	96%

Аналіз Таблиці 5.4 показує, що ринок має стабільну динаміку і хороший попит на запропонований нами продукт, ринок є достатньо привабливим для входження за попередньою оцінкою, тому є доцільним вихід на ринок.

Наступним кроком визначимо потенційних клієнтів, котрим будемо пропонувати нашу систему.

Таблиця 5.6. Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту

№ п/п	Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів до товару
1	Безконтактна система розпізнавання фізичних властивостей об'єктів без безпосереднього контакту з ними	дистанційна або автономна робототехніка	Особливості, викликані специфікою проведення дослідів	Точність, швидкість, надійність, безконтактність

В таблиці 5.6. було проаналізовано та описано фактори, котрі формують поведінку користувачів відносно нашої запропонованої системи та їх основні вимоги до продукції.

При застосуванні даної технології існують певні загрози, тож буде доцільно провести аналіз факторів ризику та можливостей при виведенні товару на ринок.

Таблиця 5.7. Фактори загроз

№ п/п	Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
1.	Новизна	Даний продукт є абсолютно новим і може викликати початкову недовіру в потенційних клієнтів	Наукове обґрунтування та підтвердження можливостей, що дає продукт, рекламна кампанія
2.	Клієнтська база	Ринок даних проборів ще не сформований, тому набрати початкову клієнтську базу буде дуже складно	Проведення рекламної компанії серед цільової аудиторії
3.	Відсутність навичок використання інноваційних систем даного типу	Так як система на даний момент немає аналогів, і до цього ніхто нічого схожого не використовував, то можуть бути складності з першими використаннями	Створення детальних інструкцій для користувачів
4.	Конкуренція	Можливий вихід на ринок іноземного конкурента	Постійне вдосконалення системи
5.	Обов'язкова наявність комп'ютера	Для використання продукту є необхідність наявності персонального комп'ютера	Адаптація ПЗ під будь-яку операційну систему

Аналіз факторів загроз дуже важливий для планування розвитку стартап-проекту, так як дає можливість повноцінно оцінити поточну ситуацію на ринку та відповідно до цього побудувати оптимальний план для подальшого функціонування та життєдіяльності проекту. З отриманої таблиці 5.7. видно, що для кожної загрози можна підібрати рішення, що вирішить проблему.

Але поряд із рядом загроз існують і певні можливості (таблиця 5.8).

Таблиця 5.8. Фактори можливостей

№ п/п	Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
-------	--------	------------------	--------------------------

1.	Потреба ринку в рішеннях даної проблеми	На разі на ринку не представлено конкурентів	Опитування споживачів, тестування нових функцій
2.	Іноземні інвестиції	Іноземні фонди зацікавлені у розвитку ринку	Співпраця з іноземними компаніями, створення конкурентно-спроможного продукту та розширення асортименту
3.	Відсутність систем даного типу	На даний час відсутні системи з такою ж точністю і ціною	Акцентування уваги покупців на унікальності системи
4.	Позиція в ціновому сегменті	Через відсутність вибору продукції можливо зайняти міцну позицію в ціновому сегменті	Розширення асортименту та технічних засобів для створення потрібного продукту
5.	Легкість інтерпретації	Система на виході дає зрозумілі навіть звичайній людині результати та тільки необхідну інформацію	Акцентування уваги на відсутності необхідності в додаткових знань для розуміння

Як висновок до аналізу факторів можливостей для запуску стартап-проекту на ринок можна сказати, що станом на теперішній час є перспективні можливості розвитку та досить сприятливі умови для розвитку стартап-проекту та залучення інвестицій.

Надалі проводиться аналіз пропозиції: визначаються загальні риси конкуренції на ринку за певними характеристиками, що дозволить оцінити місце стартап-проекту серед конкурентів.

Таблиця 5.9. Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

Особливості конкурентного середовища	В чому проявляється дана характеристика	Вплив на діяльність підприємства (можливі дії компанії, щоб бути конкурентоспроможною)
1. Вказати тип конкуренції: Конкуренція чиста	На ринку в Україні не встановлено монополії на продукт такого роду, тому можна вільно розвивати свій стартап-проект	Розвиток функціоналу у різних напрямках та різних цінових сегментах
2. За рівнем конкурентної боротьби: Міжнародний	Представники в багатьох країнах	Вихід продукції на міжнародний ринок
3. За галузевою ознакою: Внутрішньогалузева	В межах однієї галузі	Зниження цін, покращення реклами та

		залучення нових клієнтів
4. Конкуренція за видами товарів: Товарно-видова	Конкуренція, що виникає між товарами одного виду	Клієнтоорієнтовність та адаптивність до вимог ринку
5. За характером конкурентних переваг: Нецінова	Відсутність проектів з такими особливостями	Введення нових і підтримка існуючих особливостей які необхідні для клієнтів
6. За інтенсивністю: Марочна	Бренди відсутні	

Судячи з даної таблиці можна зробити висновок, що ситуація на ринку характеризується слабкою конкуренцією, тому відсутні фактори, котрі сильно обмежують входження в ринок нашої автоматизованої системи.

Після аналізу конкуренції проведемо більш детальний аналіз умов конкуренції в галузі.

Таблиця 5.10. Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером

	Прямі конкуренти в галузі	Потенційні конкуренти	Постачальники	Клієнти	Товари-замінники
Складові аналізу	Немає прямих конкурентів	Є два прилади схожих, які в майбутньому можуть стати прямими конкурентами	Постачальники не мають ніякого впливу на ринок	Основними клієнтами є підприємства, які займаються дистанційною або автономною робототехнікою	Відсутні
Висновки:	Конкуренції немає	Постійне вдосконалення системи щоб потенційні конкуренти не могли стати прямими конкурентами	Постачальники не диктують умови роботи на ринку	Для клієнтів вагомим питанням є ціна, та функціональність і точність	Конкуренції немає

Провівши аналіз таблиці можна зробити висновок, що з огляду на конкурентну ситуацію на ринку можливість роботи на ринку присутня. Також були визначені характеристики, які повинен мати проект і які дії повинна проводити компанія, щоб бути конкурентоспроможною на ринку.

Після аналізу визначається та обґрунтовується перелік факторів що впливають на конкурентоспроможність. Допоки проект не впроваджено в життя, цей аналіз важко провести точно, можна дати тільки попередню оцінку конкурентоспроможності.

Основоючись на аналізі конкуренції, а також враховуючи характеристики ідеї проекту, вимоги споживачів до товару, а також фактори маркетингового середовища, можна визначити перелік факторів конкурентоспроможності.

Аналіз факторів приведений в наступній Таблиця 5.11.

Таблиця 5.11. Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Обґрунтування (наведення чинників, що роблять фактор для порівняння конкурентних проектів значущим)
1	Ціновий	Невисока вартість
2	Новизна	Товар не має прямих конкурентів на ринку
3	Сервісне обслуговування	Якісне обслуговування
4	Точність	Прилад має хорошу точність
5.	Безконтактність об'єктами	з Для визначення характеристик об'єктів системі не потрібно безпосередньо контактувати з ними

Після оцінки конкуренції та основних факторів конкурентоспроможності, дані про які наведені в таблицях 5.10-5.11, можна сказати, що всі вищезгадані фактори досягаються проведенням додаткових досліджень та розрахунків. За цими факторами будуюмо таблицю слабких та сильних сторін стартап-проекту (див. табл. 5.12).

Таблиця 5.12. Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін «Автоматизованої система визначення типу матеріалу активним тепловим методом»

п/п	Фактор конкурентоспроможності	Бали 1-20	Рейтинг товарів-конкурентів у порівнянні						
			-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
1	Ціна								
2	Точність	14					+		
3	Новизна	20							+
4	Автоматизованість	19	+						+
5	Технічна підтримка	15					+		

З таблиць 5.11 та 5.12 бачимо, що фактори конкурентоспроможності суттєві та мають великий позитивний внесок при впровадженні нової автоматизованої системи для визначення типу матеріалу. Основною перевагою та головним досягненням є висока якість продукту та технічна підтримка на протязі всього терміну його використання споживачем.

Фінальним етапом ринкового аналізу можливостей впровадження проекту є складання SWOT-аналізу, тобто матриці аналізу сильних – Strength та слабких – Weak сторін, загроз – Troubles та можливостей – Opportunities (див. таблицю 5.13), на основі виділених ринкових загроз та можливостей, та сильних і слабких сторін.

Таблиця 5.13. SWOT- аналіз стартап-проекту

<p>Сильні сторони:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Відсутність прямих конкурентів</li> <li>2. Вартість</li> <li>3. Автоматизоване вимірювання</li> <li>4. Сервісне обслуговування</li> </ol>	<p>Слабкі сторони:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Початківець на ринку</li> <li>2. Невідомість для покупців</li> <li>3. Поява нових технологій</li> <li>4. Збільшення конкурентів на ринку</li> </ol>
<p>Можливості:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Створення нової ніші</li> <li>2. Заняття високої позиції в створеній ніші</li> <li>3. Покращення характеристик системи</li> <li>4. Збільшення обсягу клієнтів</li> </ol>	<p>Загрози:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Невідомість</li> <li>2. Відсутність клієнтської бази</li> <li>3. Новизна</li> </ol>

За методом оцінки внутрішніх та зовнішніх факторів, які мають вплив на розвиток фірми або проекту, що дозволяє оцінити сильні і слабкі сторони проекту, знайти нові можливості і визначити можливі загрози був поведений аналіз сильних та слабких сторін, що допоможе чітко бачити можливості та загрози для розвитку проекту.

На основі SWOT-аналізу розробляємо альтернативи ринкового впровадження стартап-проекту.

Таблиця 5.14. Альтернативи ринкового впровадження стартап-проекту

№ п/п	Альтернатива (орієнтовний комплекс	Ймовірність отримання ресурсів	Строки реалізації
-------	------------------------------------	--------------------------------	-------------------

	заходів) ринкової поведінки		
1	Стратегія нейтралізації ринкових загроз сильними сторонами стартапу	Висока	6 місяців
2	Стратегія компенсації слабких сторін стартапу наявними ринковими можливостями	Висока	5 місяців
3	Покращення розпізнавання типу матеріалів	Середня	7 місяці

Проаналізувавши дані наведені в таблиці 5.14 робимо висновок, що найкращою альтернативою є покращення розпізнавання типу матеріалів оскільки така альтернатива дає високу ймовірність закріпитись на ринку.

#### 5.4. Розроблення ринкової стратегії

Розроблення ринкової стратегії першим кроком передбачає визначення стратегії охоплення ринку [35]: опис цільових груп потенційних споживачів.

Таблиця 5.15. Вибір цільових груп потенційних споживачів

№ п/п	Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовність споживачів сприйняти продукт	Орієнтовний попит в межах цільової групи (сегменту)	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу у сегмент
1	Підприємства які працюють з робототехнічними приладами	Висока	Високий	Низька	Середня
2	Центри діагностики та неруйнівного контролю	Середній	Середній	Низька	Середня
Які цільові групи обрано: Під час аналізу потенційних груп споживачів було прийнято рішення що компанія буде працювати усіма цільовими групами потенційних клієнтів.					

Для виведення продукту на ринок необхідно розуміти цільову групу споживачів та їх особливості. Це допоможе адаптувати продукт під модель

ринку та визначити можливі стратегії просування проекту. За результатами аналізу потенційних груп споживачів обрано цільові групи потенційних а саме: підприємства, які працюють з робототехнічними приладами та центри діагностики та неруйнівного контролю.

Для роботи в обраному сегменті ринку необхідно сформувавши базову стратегію розвитку (див. табл. 5.16).

Таблиця 5.16. Визначення базової стратегії розвитку

№ п/п	Обрана альтернатива розвитку проекту	Стратегія охоплення ринку	Ключові конкурентоспроможні позиції відповідно до обраної альтернативи	Базова стратегія розвитку*
1	Вдосконалення	Диференційний маркетинг	Використання інновацій та адаптація до вимог ринку	Стратегія диференціації

За базову стратегію розвитку було взято стратегію диференціації, що передбачає надання товару важливих, з точки зору споживача, відмінних властивостей, які роблять систему, яка відрізняється від тієї, що є в конкурентів

Наступним кроком є вибір стратегії конкурентної поведінки (Таблиця 5.17).

Таблиця 5.17. Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

№ п/п	Чи є проект «першопрохідцем» на ринку?	Чи буде компанія шукати нових споживачів, або забирати існуючих у конкурентів?	Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурента, і які?	Стратегія конкурентної поведінки*
1	Так	Компанія буде шукати нових споживачів	Ні	Стратегія зайняття конкурентної ніші

За базову стратегію конкурентної поведінки була прийнята стратегія зайняття конкурентної ніші, коли компанія в якості цільового ринку вибирає один або декілька ринкових сегментів малого розміру. Головне завдання



компанії при цьому – це постійна підтримка та розвиток своєї конкурентної переваги.

На основі вимог споживачів з обраного сегменту до постачальника і продукту, а також в залежності від стратегії розвитку та стратегії конкурентної поведінки розробляємо стратегію позиціонування яка визначається у формування ринкової позиції, за яким споживачі мають ідентифікувати проект.

Таблиця 5.18. Визначення стратегії позиціонування

№ п/п	Вимоги до товару цільової аудиторії	Базова стратегія розвитку	Ключові конкурентоспроможні позиції власного стартап-проекту	Вибір асоціацій, які мають сформувати комплексну позицію власного проекту (три ключових)
1	Автоматизованість, швидкодія, точність	Стратегія диференціації	Функціональність, якість, зручність, комплексність	Функціональність, ціна, точність

Результатом даного підрозділу є система рішень щодо ринкової поведінки компанії, вона визначає в якому напрямі буде працювати компанія на ринку.

### 5.5. Розроблення маркетингової програми стартап-проекту

Під час розроблення маркетингової програми першим кроком є розробка маркетингової концепції товару, який отримає споживач. У таблиці 5.19 підсумовуємо результати аналізу конкурентоспроможності товару.

Таблиця 5.19. Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

№ п/п	Потреба	Вигода, яку пропонує товар	Ключові переваги перед конкурентами (існуючі або такі, що потрібно створити)
1	Ціна	Невисока вартість, доступність	Узгодження ціна-якість, збільшення кількості клієнтів
2	Автоматизація	Система зчитує теплові показники після нагріву	Зручне та швидке використання, можливість працювати з крихкими

		об'єкта, оброблює дані та видає результат	об'єктами, адже з ними не потрібно контактувати
3	Якісне обслуговування	Швидке і якісне обслуговування	Беззаперечна якість в обслуговуванні

В даній таблиці формуємо комплекс асоціацій за якими споживачі будуть ідентифікувати наш торговельний проект. Результатом даного підрозділу є система рішень щодо ринкової поведінки компанії, вона визначає в якому напрямі буде працювати компанія на ринку.

Для найкращого представлення товарів та послуг, що надає стартап-проект необхідно провести аналіз найкращих сторін проекту, переваг концепції потенційного товару тощо. Це дозволить мати сильніші сторони для можливості конкурувати та заохочувати потенційних клієнтів до співпраці.

З визначення ключових конкурентних переваг продукту розглянемо трирівневу маркетингову модель, що включатиме основні характеристики проекту.

Таблиця 5.20. Опис трьох рівнів моделі товару

Рівні товару	Сутність та складові		
I. Товар за задумом	Системи автоматизованого аналізу рентгенівських знімків легень		
II. Товар у реальному виконанні	Властивості/характеристики	М/Нм	Вр/Тх /Тл/Е/Ор
	1. Точність	Нм	Тх
	2. Технологічність	М	Тх
	3. Вартість обслуговування	М	Е
	4. Зручний інтерфейс	Нм	Е
	Якість: тестування в реальних умовах		
	Пакування: коробка		
	Марка: назва організації розробника		
III. Товар із підкріпленням	До продажу: Демонстрація можливостей системи		
	Після продажу: після продажне підтримка та обслуговування		
За рахунок чого потенційний товар буде захищено від копіювання: Патент, свідоцтво на авторське право			

В Таблиця 5.20. ми створюємо трирівневу модель нашого товару що включає задум товару та його вигоди, основні характеристики готового товару, спосіб його пакування та захисту від копіювання та плагіату.

Наступним кроком є визначення цінових меж, якими необхідно керуватися при встановленні ціни на потенційний товар, це передбачає аналіз цін товарів конкурентів, та доходів споживачів продукту (табл. 5.21).

Таблиця 5.21. Визначення меж встановлення ціни

№ п/п	Рівень цін на товари-замінники	Рівень цін на товари-аналоги	Рівень доходів цільової групи споживачів	Верхня та нижня межі встановлення ціни на товар/послугу
1	14000	10000-25000	100000-200000	5000-16000

Для визначення цінових меж кінцевого продукту проаналізовано ціноутворення конкурентних компаній, рівень доходів цільової групи та встановлено верхню та нижню межу вартості.

Наступним етапом після встановлення меж на реалізацію програмного продукту є визначення системи збуту (див. табл. 5.22).

Таблиця 5.22. Формування системи збуту

№ п/п	Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів	Функції збуту, які має виконувати постачальник товару	Глибина каналу збуту	Оптимальна система збуту
1	По одиночні Замовлення Продаж в розбірід	Прямий продаж	Висока	Проведення збуту силами фірм посередників, та власними силами

Було проведено розробку концепцію маркетингових комунікацій між користувачами та виробником. В нашому випадку, дана робота з виробником та реалізація продукту через прямий продаж.

Розробимо концепцію маркетингової комунікації, котра опирається на попередньо обрану основу для позиціонування, обрану специфіку поведінки користувачів.

Таблиця 5.23. Концепція маркетингових комунікацій

№ п/п	Специфіка поведінки цільових клієнтів	Канали комунікацій, якими користуються цільові клієнти	Ключові позиції, обрані для позиціонування	Завдання рекламного повідомлення	Концепція рекламного звернення
1	Гарантія якості, своєчасна підтримка	Інтернет, журнали, фахові видання, соціальні мережі, месенджери	Ціна, точність, швидкість, автоматизація, безконтактне визначення характеристик матеріалів	Акцентувати увагу на новизну і відсутність аналогів на нашому ринку, а також акцентування на ціні	Демонстрація можливостей, зацікавлення, визначення потреба та максимальне їх задоволення

Дані занесені до таблиці 5.23 - це ринкова програма, що складається із концепції товару, просування, збуту та аналіз ціноутворення, базується на цінностях та потребах клієнтів, конкурентних перевагах ідеї, стані ринкового середовища та на відповідній альтернативі ринкової поведінки.

## 5.6. Висновки до розділу

Підсумовуючи проведену роботу над розробкою стартап-проекту «Автоматизована система визначення типу матеріалу активним тепловим методом» слід зазначити, що наразі на ринку є можливість комерціалізувати проект, оскільки наявний достатній попит на продукцію та сприятливі умови для входу на ринок, зважаючи на відсутність прямої конкуренції та високу рентабельність. Аналізуючи потенційні групи клієнтів, ризики та можливості входу на ринок зазначаємо, що комерціалізація стартап проекту та залучення інвестицій при побудові якісного функціоналу підтримки проекту, відповідності термінам та задачам, є досить імовірною.

На даний момент система є унікальна, але в майбутньому можуть з'явитись конкуренти, і щоб даний прилад був на високій позиції в рейтингу в користувачів, потрібно постійно його розвивати. Можливий розвиток системи підвищення точності приладу.

Точність та надійність обладнання, а також вигідні цінові пропозиції є сприятливим варіантом для споживачів, проте для успішного функціонування стартап-проекту важливими є стратегії збуту, концепції маркетингових комунікацій, визначення ключових переваг концепції потенційного товару, провести аналіз конкурентоспроможності.

Отже, враховуючи все вище сказане, можна свідчити про досить успішну реалізацію системи визначення характеристик об'єктів по їх тепловому профілю без безпосереднього контакту з ними, яка реалізована з використанням сучасного програмного та апаратного забезпечення, є досить надійною, про що свідчить проведений аналіз.

Продукт відразу буде націлений як на внутрішній так і на міжнародний ринок, так як система є актуально, а товарів аналогів на даний час на ринку не існує.

Також передбачений захист на даний прилад в вигляді, реєстрації авторських прав, а також створення патентів на власні технології, що використовуються в даному патенті.

## ВИСНОВКИ

Для ефективного маніпулювання невідомими об'єктами необхідно розуміння їхніх фізичних властивостей. У задачах визначення типу матеріалу має потенціал тепловий неруйнівного метод.

У першому розділі даній роботі було розглянуто стан проблеми з визначення матеріалів та характеристик невідомих об'єктів, оглянуто сучасні методи класифікації типів матеріалів, їхні переваги та обмеження. Зважаючи на них, було обґрунтовано використання саме запропонованого активного теплового методу у задачах визначення матеріалу. Також було проведено огляд існуючих методів аналізу теплових профілів, розглянуті переваги використання НМ перед класичними методами класифікації.

Другий розділ був присвячений розробці програмно-технічних алгоритмів системи. В ньому було синтезовано структурну схему та алгоритм роботи системи, проведений опис передбачуваного об'єкту. Приведені необхідні параметри для лазерного джерела та теплової камери системи, на їх основі підібрані присутні на ринку моделі. Також було проаналізовано та обрано типи нейронних мереж для розробки.

Робота в третьому розділі проводилася над імітаційним моделюванням системи. Впродовж нього було обране середовище моделювання нагріву зразків, детально описані моделі тестових зразків, розібрані параметри моделювання. На основі проведеного моделювання було описане створення навчального набору даних для розроблених мереж.

У четвертому розділі було архітектури кожної розробленої мережі, конфігурації та графіки їх навчання. Врешті, було порівняно системи по зведеній таблиці – за кількості їх параметрів, початкових епох та загальному відсотку правильних відповідей, та по матрицям розсіювання мереж. На основі порівняння обрано найбільш оптимальну розроблену НМ. В підсумку

проведений огляд потенційних шляхів, якими можна підвищити ефективність системи.

У результаті створено систему, здатну за тепловими профілями об'єкту класифікувати тип матеріалу по одному з чотирьох класів – дерева, пластику, сталі та алюмінію. Для класифікатору було навчено 4 різні архітектури НМ, які показують долю правильних відповідей від 70 до 76,6%, що вже дозволяє використовувати систему для класифікації найбільш поширених матеріалів з високою достовірністю. Оскільки помітно, що цей результат є можливість покращити, можна використати різні підходи, які описані в підпункті 4.6.

Система може слугувати основою для створення швидкого, точного та безконтактного приладу для визначення характеристик матеріалу з широкими можливостями застосування.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Wang Q, Li P, Zuo W, et al. RAID-G: robust estimation of approximate infinite dimensional gaussian with application to material recognition. Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition; 2016 Jun; Las Vegas. pp. 4433–4441.
2. Brandao M, Shiguematsu YM, Hashimoto K, et al. Material recognition CNNs and hierarchical planning for biped robot locomotion on slippery terrain. Proceedings of the IEEE-RAS 16th International Conference on Humanoid Robots (Humanoids); 2016 Nov; Cancun. pp. 81–88.
3. Shirmohammadi S, Ferrero A. Camera as the instrument: the rising trend of vision based measurement. IEEE Instrum Meas Mag. 2014 Jun;17(3):41–47.
4. Roy N, Dudek G, Freedman P. Surface sensing and classification for efficient mobile robot navigation. Proc. IEEE int. conf. robot. autom. (ICRA). 2. 1996. p. 1224–8.
5. Edwards J, Lawry J, Rossiter J, Melhuish C. Extracting textural features from tactile sensors. Bioinspir Biomim 2008;3(3):035002.
6. Johnsson M, Balkenius C. Sense of touch in robots with self-organizing maps. IEEE Trans Rob (T-RO) 2011;27(3):498–507.
7. Christie J, Kottege N. Acoustics based terrain classification for legged robots, Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA); 2016 May; Stockholm. pp. 3596–3603.
8. Windau J, Shen W-M. An inertia-based surface identification system. Proc. IEEE int. conf. robot. autom. (ICRA). 2010. p. 2330–5.
9. Drimus A, Kootstra G, Bilberg A, Kragic D. Design of a flexible tactile sensor for classification of rigid and deformable objects. Rob Auto Syst 2014;62(1):3–15.



10. Sangpradit K, Liu H, Dasgupta P, Althoefer K, Seneviratne LD. Finite-element modeling of soft tissue rolling indentation. *IEEE Trans Biom Eng* 2011;58(12):3319–27.
11. Strese M, Schuwerk C, Iepure A, et al. Multimodal feature-based surface material classification. *IEEE Trans Haptics*. 2017 Apr./Jun;10(2):226–239.
12. А. О. Абрамович, І. С. Каширський, В. О. Піддубний. Дистанційна вихорострумова аналіза складу металевих об'єктів. *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.* 2017, т. 39, № 8, сс. 1035–1049.
13. Живкович А. В. Современные технологии бесконтактного измерения температуры / А. В. Живкович, А. В. Муравьев // *Материалы XVI Международной научно-практической конференции «Динамика научных исследований - 2020»*, 07-15 июля 2020, Пшемысль, Польша. – *Przemysł: Nauka i studia*, 2020. – Vol. 7. – С. 110-115.
14. Сторожик Д. В. Комплексування мультиспектральних зображень, як метод підвищення їх інформативності при бінарній сегментації / Д. В. Сторожик, О. В. Муравйов, А. Г. Протасов, В. Г. Баженов, Г. А. Богдан // *Наукові вісті КПІ*. – 2020. № 2. – С. 82-87.
15. Муравйов О. В. Автоматизація методу термографічної діагностики патологій організму людини / О. В. Муравйов, В. Ф. Петрик, Ю. Ю. Лисенко, Г. А. Богдан, А. В. Наконечная // *Таврійський науковий вісник. Серія: Технічні науки*. – 2022. – №1. – С. 47-53.
16. Pech-May NW, Wilbur N, Mendioroz A, et al. Simultaneous measurement of the in-plane and in-depth thermal diffusivity of solids using pulsed infrared thermography with focused illumination. *NDT & E Inter.* 2016;77(1):28–34.
17. Usamentiaga R, Venegas P, Guerediaga J, et al. Infrared thermography for temperature measurement and non-destructive testing. *Sensors*. 2014;14(7):12305–12348.

18. A. B. Ionov. Metrological problems of pyrometry: an analysis and the prospects for solving them. *Measurement Techniques*, Vol. 56, No. 6, September, 2013.
19. Кучеренко О. К. Ахроматизація та атермалізація об'єктивів інфрачервоної техніки / О. К. Кучеренко, О. В. Муравйов, В. М. Тягур // *Наукові вісті НТУУ «КПІ»*. – 2012. – вип. №5. – С. 114-117.
20. Муравьёв А. В. Композиции атермализованных трехкомпонентных инфракрасных объективов / А. В. Муравьёв, О. К. Кучеренко // *Наука и техника*. – 2015. – № 4. – С. 32-37.
21. Momot A. Deep learning automated data analysis of security infrared cameras / A. Momot, I. Skladchikov // *Slovak international scientific journal*. – 2021. – №52. – pp. 13–16.
22. Daniel Westreich, Justin Lessler, Michele Jonsson Funk. Propensity score estimation: neural networks, support vector machines, decision trees (CART), and meta-classifiers as alternatives to logistic regression. *Journal of Clinical Epidemiology* 63 (2010).
23. Галаган Р.М. Тестування нейромережевих модулів системи теплової дефектометрії за допомогою імітаційного моделювання / [Р. М. Галаган, А. С. Момот, А. Г. Протасов та ін.]. // *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. – 2022. – №6. – С. 49–55.
24. Momot A. The use of EfficientNet models in infrared image classification / A. Momot, I. Skladchikov // *XXI Міжнародна науково-технічна конференція «Приладобудування: стан і перспективи», 17-18 травня 2022 року, КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, Україна : збірник матеріалів конференції*. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – С. 204-207.
25. Daniel Svozil, Vladimir Kvasnicka, Jiri Pospichal. Introduction to multi-layer feed-forward neural networks. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems* 39 (1997) 43-62.

26. Jinming Zou, Yi Han, Sung-Sau So. Overview of Artificial Neural Networks. *Methods in Molecular Biology*, volume 458:14-22.
27. Momot A. Automation of ultrasound breast cancer images classification using deep neural networks / A. Momot, R. Galagan, M. Zabolueva // *Sciences of Europe*. – 2022. – №96. – pp. 38–41.
28. Momot A. Deep Learning Automated System for Thermal Defectometry of Multilayer Materials / A. Momot, R. Galagan, V. Gluhovskii. // *Devices and Methods of Measurements*. – 2021. – №12. – pp. 98–107.
29. Pritika Bahad, Preeti Saxena, Raj Kamal. Fake News Detection using Bi-directional LSTM-Recurrent Neural Network. Devi Ahilya University, Indore, 452001, India.
30. Keiron O’Shea, Ryan Nash. An Introduction to Convolutional Neural Networks. Department of Computer Science, Aberystwyth University, Ceredigion, SY23 3DB.
31. Patrice Y. Simard, Dave Steinkraus, John C. Platt. Best Practices for Convolutional Neural Networks Applied to Visual Document Analysis. Microsoft Research, One Microsoft Way, Redmond WA 98052.
32. Nal Kalchbrenner, Edward Grefenstette, Phil Blunsom. A Convolutional Neural Network for Modelling Sentences. Department of Computer Science University of Oxford.
33. Rikiya Yamashita, Mizuho Nishio, Richard Kinh Gian Do, Kaori Togashi. Convolutional neural networks: an overview and application in radiology. *Insights into Imaging* volume 9 (2018), 611–629.
34. Розроблення стартап-проекту [Електронний ресурс] : Методичні рекомендації до виконання розділу магістерських дисертацій для студентів інженерних спеціальностей / За заг. ред. О.А. Гавриша. – Київ : НТУУ «КПІ», 2016. – 28 с.
35. Гавриш, О. А. Розробка стартап-проектів. Конспект лекцій [Електронний ресурс] : навчальний посібник для студентів спеціальностей 151 – «Автоматизація та комп’ютерно-інтегровані

технології» та 152 – «Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка» / О. А. Гавриш, К. О. Бояринова, К. О. Копішинська ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові данні (1 файл: 2,88 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 188 с. – Назва з екрана.

# ДОДАТКИ

## Додаток А

Фрагмент програмного коду розробленої програми

```
import tensorflow as tf
from tensorflow.keras.models import Sequential
from tensorflow.keras.layers import Dense, Dropout, BatchNormalization, LSTM,
Bidirectional, Conv1D, MaxPooling1D, Flatten
from tensorflow.keras import optimizers
from tensorflow.keras import initializers
from keras.utils import plot_model
import pandas as pd
import matplotlib.pyplot as plt
import seaborn as sn
import numpy as np
from sklearn.model_selection import train_test_split
from sklearn.metrics import confusion_matrix
.....
```

Програмний код надається по запиту до авторів

## Додаток Б

### Список наукових праць

#### СПИСОК НАУКОВИХ ПРАЦЬ Наконечного Миколи Вікторовича

№ з/п	Найменування праць	Назва видавництва, журналу (номер, рік) або номер авторського свідоцтва, номер диплома на винахід	Кількість друкованих аркушів або сторінок разом	Прізвища співавторів праць
1	ВИКОРИСТАННЯ МАШИННОГО НАВЧАННЯ ДЛЯ КЛАСИФІКАЦІЇ МАТЕРІАЛІВ ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ ТЕПЛОВОГО КОНТРОЛЮ	XIII науково-практична конференція студентів, аспірантів та молодих вчених «Погляд у майбутнє приладобудування», 13-14 травня 2020 р., м. Київ, Україна: збірник праць конференції	4	-
2	ПЕРСПЕКТИВИ ЗАСТОСУВАННЯ НЕЙРОПРОЦЕСОРІВ В РОБОТИЗОВАНИХ СИСТЕМАХ НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ	XVI Всеукраїнська науково-практична конференція студентів, аспірантів та молодих вчених «Ефективність та автоматизація інженерних рішень у приладобудуванні», 08-09 грудня 2020 р., м. Київ, Україна: збірник праць конференції	4	-
3	ANALYSIS OF THE EFFICIENCY OF AUTOMATED MATERIAL TYPE CLASSIFICATION METHODS	XVIII Науково-технічна конференція студентів, аспірантів та молодих вчених «Ефективність та Автоматизація інженерних рішень у приладобудуванні – 2022», м. Київ, Україна: збірник праць конференції	3	-

Автор

в.о. завідувача кафедри

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

Микола НАКОНЕЧНИЙ

Юрій КИРИЧУК

# Додаток В

## Слайди презентації

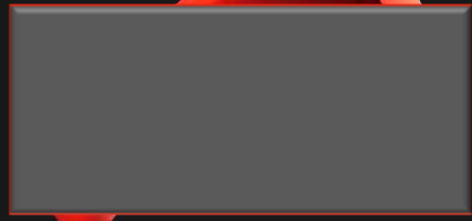


Київ 2022

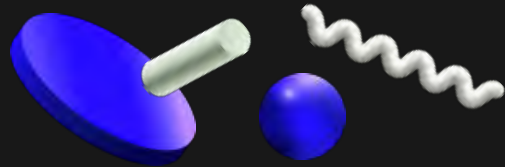




По мірі того, як роботи знаходять застосування в таких областях як будівництво, виробництво, взаємодія з людьми, в повітрі або в космічній області та в інших цивільних або військових програмах, також зростає попит на фізичну взаємодію з невідомим середовищем.



Стислий опис методів, підходів та засобів, застосованих у спроектованій системі

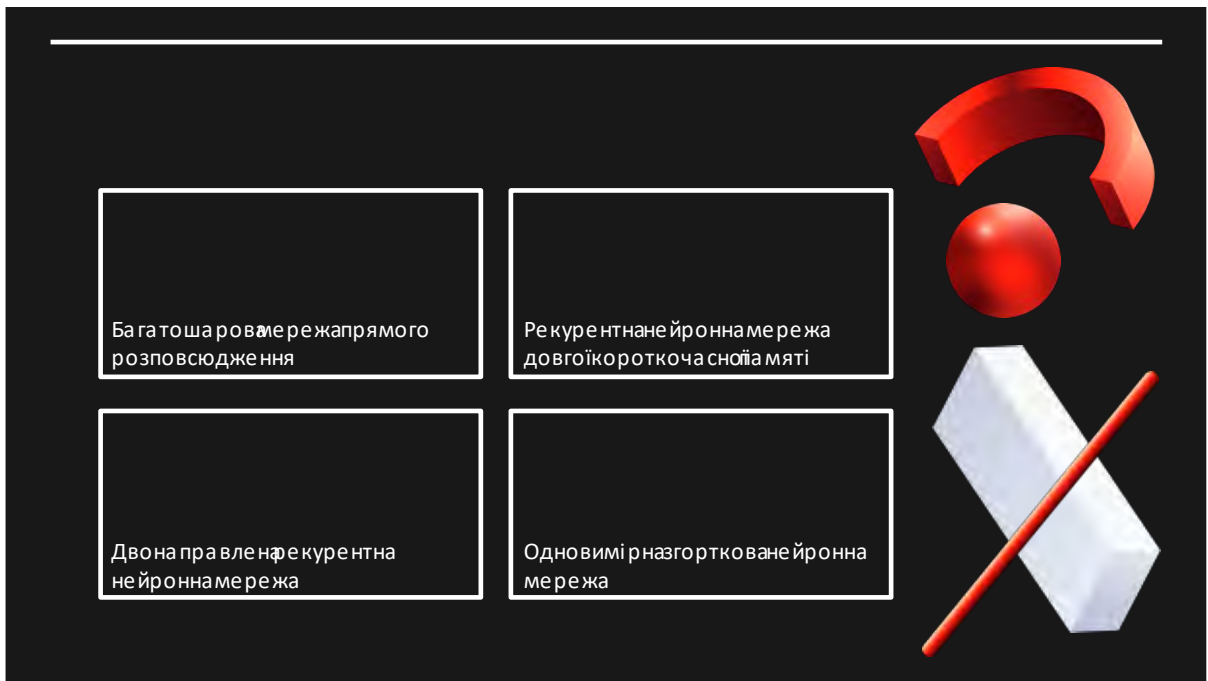
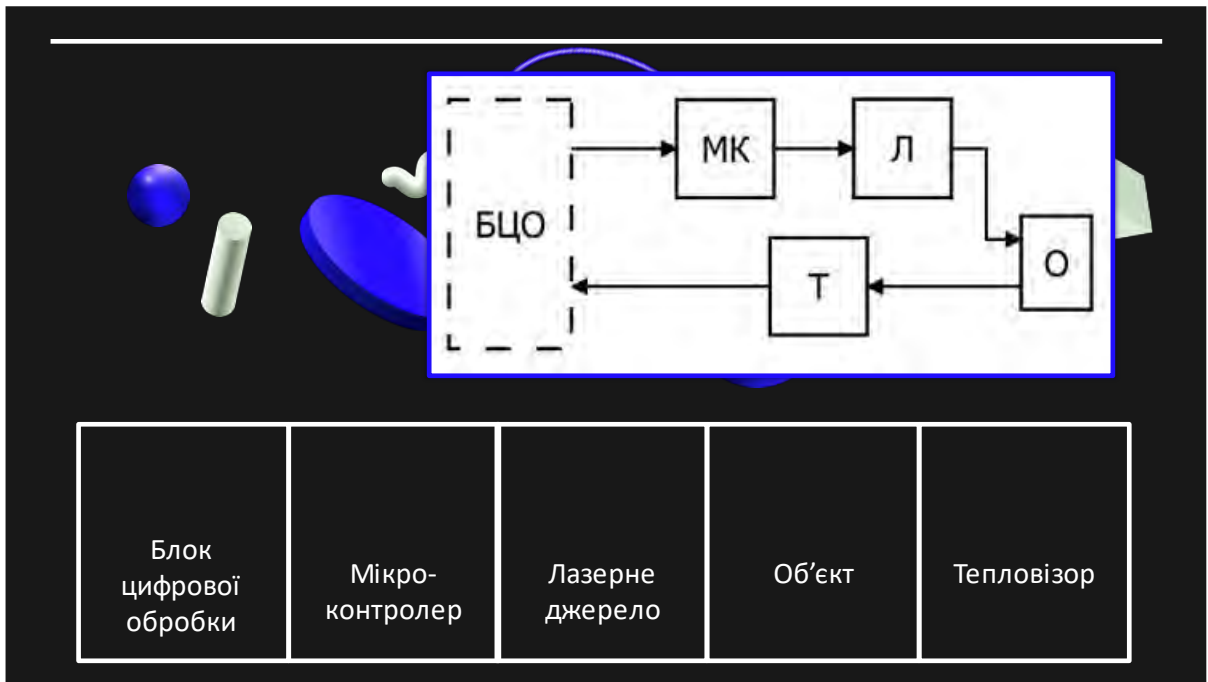


Унікальний тепловий профіль об'єкта дозволить класифікувати його тип

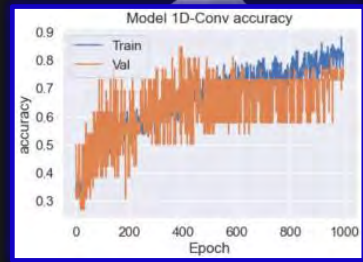
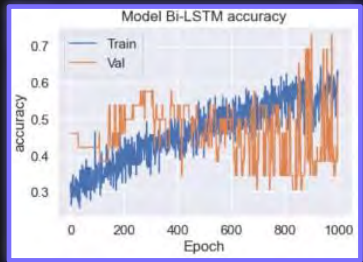
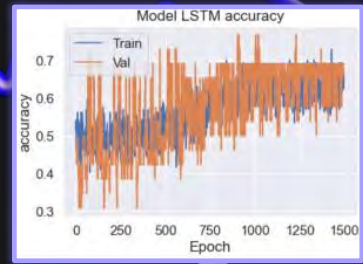
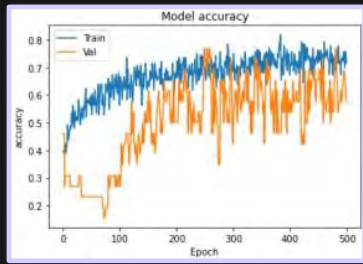
Термічна стимуляція забезпечить швидкий нагрів зразка для фіксації змін

Дані по характеру поширення тепла підвищать достовірність класифікації

Завадостійкість та можливість класифікації при схожих теплових профілях



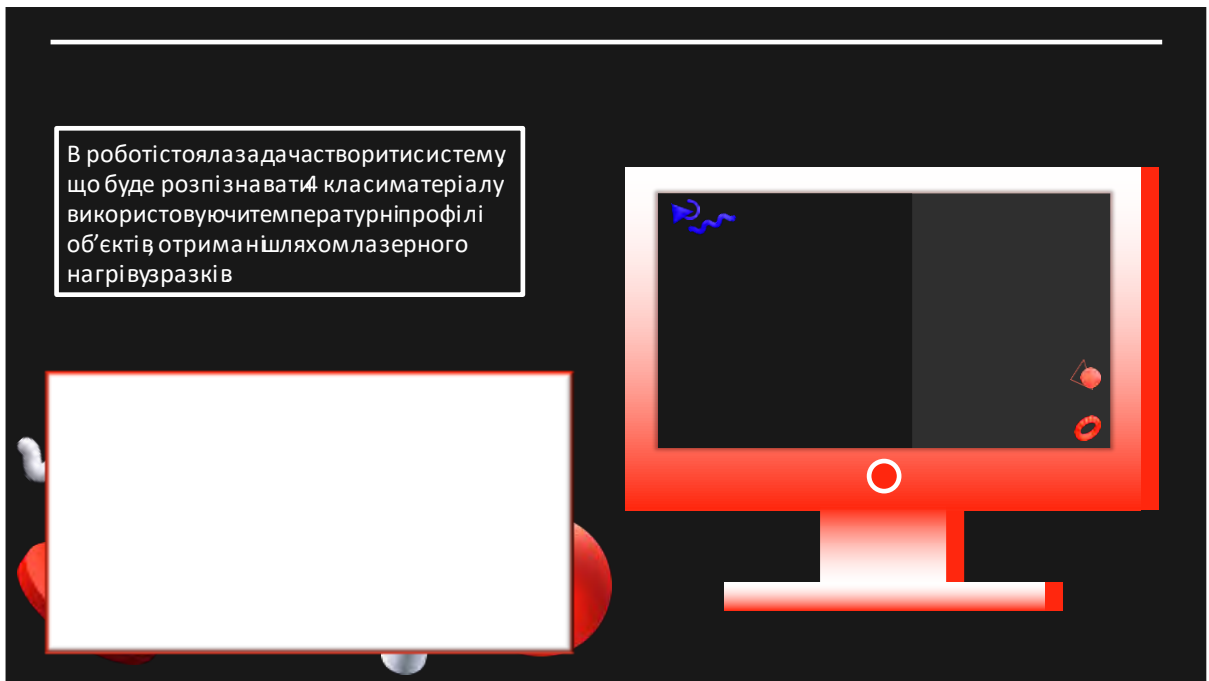


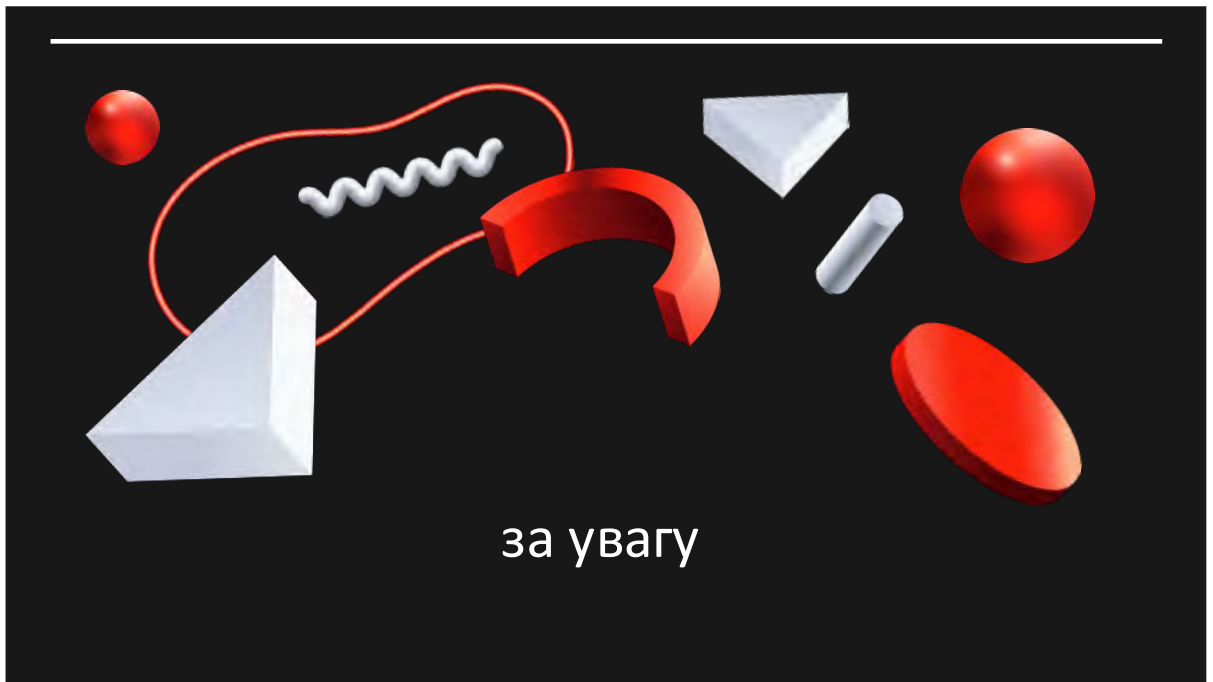


Тип мережі	Кількість параметрів	Кількість епох навчання	Доля правильних відповідей, %
<u>Feed-forward</u>	163,904	1000	76,6
LSTM	63,924	1500	70
Bi-LSTM	121,544	1000	73,3
<u>1D-Convolutional</u>	320,588	1000	73,3



- ▶ Відносно **низька** точність класифікації
- ▶ **Тривале** навчання моделей

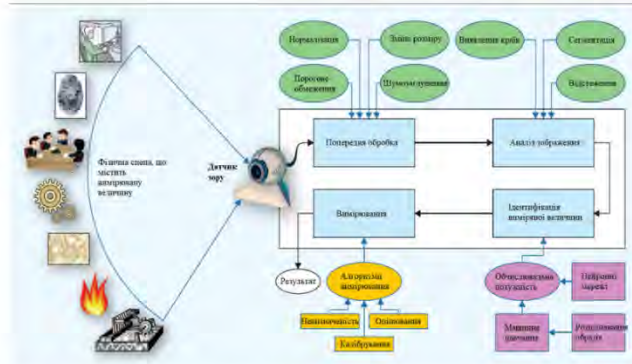




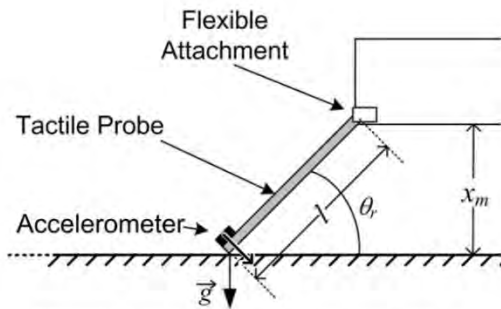
## Додаток Г

### Плакат «Методи визначення типів матеріалів»

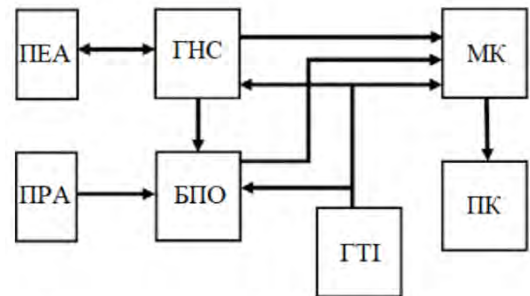
#### Методи визначення типів матеріалів



Архітектура системи на візуальній основі високого рівня

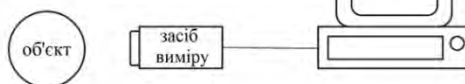


Приклад конструкції тактильного зонда



Приклад структурної схеми вихорострумової системи

#### 1. Пасивна термографія



#### 2. Активна термографія



Схеми систем пасивної та активної термографії

**Мета роботи:** розробка системи безконтактної класифікації 4 класів матеріалу використовуючи температурні профілі об'єктів, отримані шляхом лазерного нагріву зразків.



## Додаток Д

### Плакат «Програмно-технічні алгоритми системи»

#### Програмно-технічні алгоритми системи

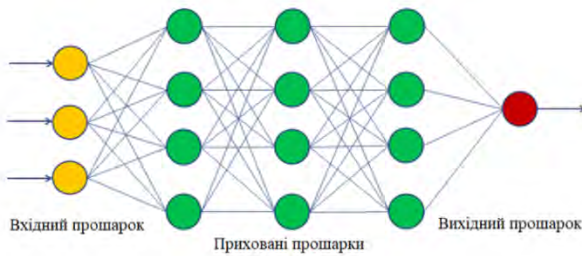
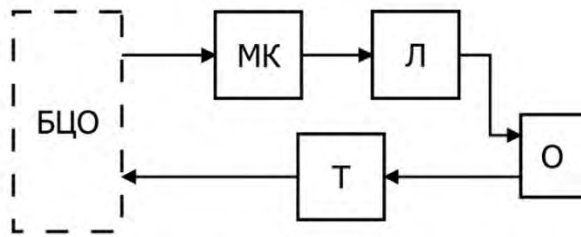


Схема багатшарової мережі прямого розповсюдження

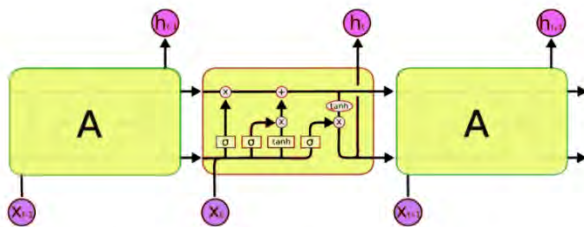


Схема ланцюга мережі LSTM

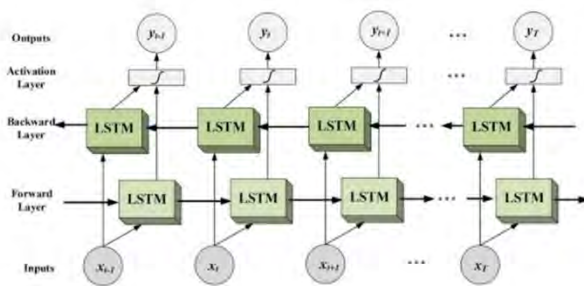
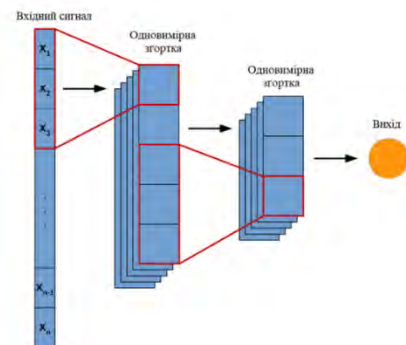


Схема ланцюга мережі BI-LSTM



Алгоритм роботи системи

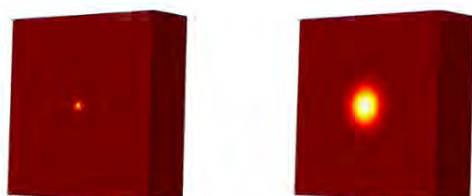


Спрощена архітектура одновимірної CNN

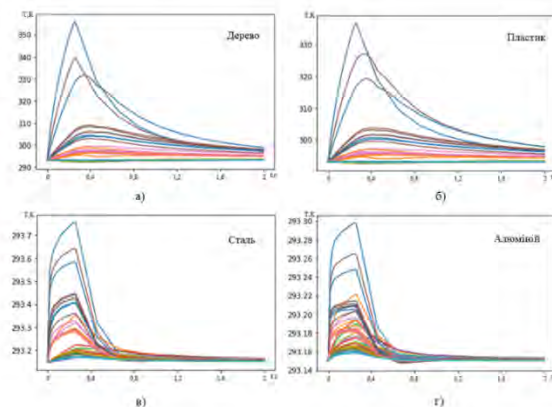
## Додаток Е

### Плакат «Моделювання та результати»

#### Моделювання та результати



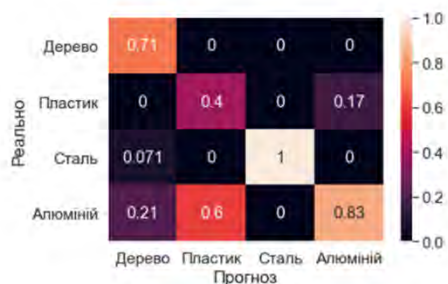
Нагрів моделі зразка (сталь) в момент кінця нагріву та кінця вимірювання



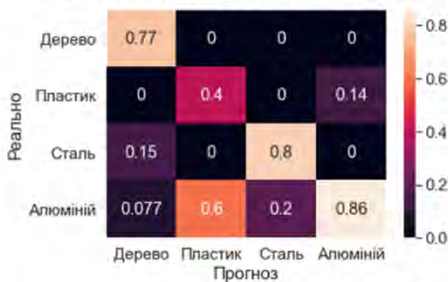
Суміщений графік замірів зразків

Тип мережі	Кількість параметрів	Кількість епох навчання	Доля правильних відповідей, %
<u>Feed-forward</u>	163,904	1000	76,6
LSTM	63,924	1500	70
Bi-LSTM	121,544	1000	73,3
<u>1D-Convolutional</u>	320,588	1000	73,3

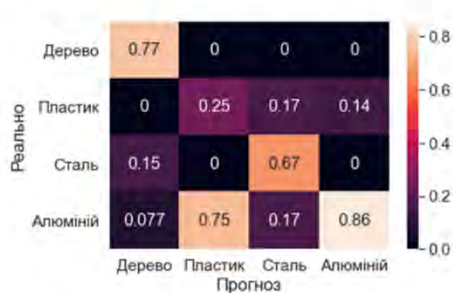
Порівняльна таблиця розроблених архітектур



Матриця розсіювання спроектованої Feed-forward мережі



Матриця розсіювання розробленої Bi-LSTM мережі



Матриця розсіювання спроектованої LSTM-мережі



Матриця розсіювання розробленої 1D-Conv мережі