

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
Національний університет «Запорізька політехніка»

Інформаційної безпеки та електронних комунікацій

(повне найменування інституту, факультету)

Інформаційних технологій та телекомунікацій

(повне найменування кафедри )

## Пояснювальна записка

до дипломного проекту (роботи)

Магістр

(ступінь вищої освіти)

на тему РОЗРОБКА МЕТОДА АВТОМАТИЗОВАНОГО РЕВЕРС  
ІНЖИНІРИНГУ ДРУКОВАНИХ ПЛАТ З ВИКОРИСТАННЯМ КОМП'ЮТЕРНОГО  
ЗОРУ

Виконав: студент(ка) \_6\_ курсу, групи БК-512м

Спеціальності 172 Телекомунікації та радіотехніка

(код і найменування спеціальності)

Освітня програма (спеціалізація)

Інтелектуальні технології мікросистемної  
радіоелектронної техніки

Керівник Наталія ФУРМАНОВА

(прізвище та ініціали)

Рецензент \_\_\_\_\_

(прізвище та ініціали)

2023

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
**Національний університет «Запорізька політехніка»**  
 (повне найменування закладу вищої освіти)

Факультет інформаційної безпеки та електронних комунікацій \_\_\_\_\_  
 Кафедра \_\_ Інформаційних технологій електронних засобів \_\_\_\_\_  
 Ступінь вищої освіти Магістр \_\_\_\_\_  
 Спеціальність 172 Телекомунікації та радіотехніка \_\_\_\_\_

(код і найменування)

Освітня програма (спеціалізація): Інтелектуальні технології мікросистемної радіоелектронної техніки \_\_\_\_\_

(назва освітньої програми (спеціалізації))

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

**Завідувач кафедри ІТЕЗ** \_\_\_\_\_

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20\_\_ року

**З А В Д А Н Н Я**  
**НА ДИПЛОМНИЙ ПРОЄКТ (РОБОТУ) СТУДЕНТА(КИ)**

Димитрієв Дмитро Євгенійович \_\_\_\_\_

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проєкту (роботи) Розробка метода автоматизованого реверс інжинірингу друкованих плат з використанням комп'ютерного зору \_\_\_\_\_

керівник проєкту (роботи) Фурманова Наталія Іванівна, к.т.н, доцент, доцент каф.ІТЕЗ \_\_\_\_\_,

( прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затвердені наказом закладу вищої освіти від «11» листопада 2023 року № 448

2. Строк подання студентом проєкту (роботи) 20 грудня \_\_\_\_\_

3. Вихідні дані до проєкту (роботи) правила трасування друкованих плат та розміщення ЕРЕ на друкованих платах \_\_\_\_\_

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Поняття та застосування реверс-інжинірингу, процес зворотного проектування друкованої плати, методи та інструменти для зворотного проектування друкованих плат, методи аналізу внутрішньої структури друкованої плати, метод локалізації електронних компонентів, корекція зображення та врахування внутрішніх шарів, виявлення компонентів друкованої плати в реальних умовах

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

23 слайди \_\_\_\_\_

## 6. Консультанти розділів проєкту (роботи)

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	прийняв виконане завдання
<b>1</b>	<b>Наталія ФУРМАНОВА</b>	<b>03.10.23</b>	
<b>2</b>	<b>Наталія ФУРМАНОВА</b>	<b>17.10.23</b>	
<b>3</b>	<b>Наталія ФУРМАНОВА</b>	<b>07.11.23</b>	
<b>4</b>	<b>Наталія ФУРМАНОВА</b>	<b>21.11.23</b>	
<b>нормоконтроль</b>	<b>Ірина ПОСПЕЄВА</b>	<b>01.12.23</b>	

7. Дата видачі завдання «04» \_\_вересня\_\_\_\_2023\_року.

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проєкту (роботи)	Строк виконання етапів проєкту (роботи)	Примітка
<b>1</b>	<b>Поняття та застосування реверс-інжинірингу</b>	<b>9.10.23</b>	
<b>2</b>	<b>Процес зворотного проєктування друкованої плати</b>	<b>11.10.23</b>	
<b>3</b>	<b>Методи та інструменти для зворотного проєктування друкованих плат</b>	<b>12.10.23</b>	
<b>4</b>	<b>Методи аналізу внутрішньої структури друкованої плати</b>	<b>20.10.23</b>	
<b>5</b>	<b>Метод локалізації електронних компонентів</b>	<b>15.11.23</b>	
<b>6</b>	<b>Корекція зображення та врахування внутрішніх шарів</b>	<b>25.11.23</b>	
<b>7</b>	<b>Виявлення компонентів друкованої плати в реальних умовах</b>	<b>02.12.23</b>	
<b>8</b>	<b>Оформлення ПЗ та захист дипломного проєкту</b>	<b>16.12.23</b>	

Студент(ка)

\_\_\_\_\_ Дмитро ДИМИТРСВ  
( підпис ) (прізвище та ініціали)

Керівник проєкту (роботи)

\_\_\_\_\_ Наталія ФУРМАНОВА  
( підпис ) (прізвище та ініціали)

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до магістерської роботи: 86 сторінок, 37 рисунків, 4 таблиць, 21 джерело.

БЕЗПЛОТНИЙ ЛІТАЛЬНИЙ АПАРАТ, ПОЛЬОТНИЙ КОНТРОЛЕР, ПРОТОКОЛ, ПРОГРАМА, MAVLINK, FRISKY

Мета роботи – дослідження методів реверс-інжинірінгу друкованих плат з використанням технологій комп'ютерного зору та розробка програмного забезпечення по обробці зображень друкованих плат для виявлення розташованих на платі компонентів та друкованих провідників.

Об'єкт дослідження: технологія комп'ютерного зору для обробки зображень друкованих плат.

Предмет дослідження: програмна реалізація обробки зображень друкованих плат методами комп'ютерного зору.

У цьому дипломному проєкті використовуються найсучасніші методи машинного навчання та класичні методи обробки зображень для побудови здійсненої та надійної системи аналізу. Робота складається з 3 основних частин:

- проєктування методів обробки зображень друкованих плат та підготовки даних;
- впровадження Швидшого виявлення компонентів R-CNN, виявлення К-середніх на основі XOR і відповідності за кількома шаблонами;
- дослідження підходу до внутрішнього з'єднання багатосарової друкованої плати.

## ЗМІСТ

Реферат .....	4
Вступ .....	7
1 Огляд області розробки та постановка задач .....	9
1.1 Поняття та застосування реверс-інжинірингу .....	9
1.2 Ріверс-інжинірінг друкованих плат .....	11
1.3 Проблеми та обмеження зворотного проектування друкованих плат .....	17
2 Методи, етапи та засоби зворотнього проектування .....	22
2.1 Процес зворотного проектування друкованої плати .....	22
2.2 Створення специфікації матеріалів (BOM) .....	28
2.3 Методи та інструменти для зворотного проектування друкованих плат .....	29
3. Алгоритмічні засади використання комп'ютерного зору для аналізу друкованих плат .....	38
3.1 Етапи використання комп'ютерного зору для аналізу друкованих плат ..	38
3.2 Методи аналізу внутрішньої структури друкованої плати.....	40
3.3 Методи виявлення об'єктів плати засобами комп'ютерного зору .....	44
3.4 Метод локалізації електронних компонентів .....	49
4 Особливості застосування запропонованих алгоритмів .....	67
4.1 Корекція зображення та врахування внутрішніх шарів.....	67
4.2 Виявлення компонентів друкованої плати в реальних умовах .....	71
4.3 Отримання внутрішнього з'єднання друкованої плати .....	76
4.4 Швидке виявлення R-CNN .....	78
Висновки .....	82
Перелік джерел посилання .....	83

Додаток А – Презентація.....	86
------------------------------	----

## ВСТУП

Сучасні тенденції виробництва передбачають усунення людини зі всіх ланок виробничого процесу. Проте є процеси, для виконання яких людина все ще залишається потрібною. До таких виробничих процесів можна віднести візуальний контроль. Одним з варіантів заміни людини на таких важливих ділянках виробництва є використання комп'ютерного зору.

Зворотне проектування друкованих плат є ключовим і складним процесом у динаміці електронної промисловості. Він включає в себе ретельний аналіз і ретельне відтворення існуючої друкованої плати (PCB) з кінцевою метою створення нового дизайну, який відповідає її функціональності. Цей процес слугує основою для багатьох цілей, включаючи ретельну заміну застарілих компонентів, захист цінної інтелектуальної власності та ретельний аналіз конкурентоспроможності.

Оцифрування друкованих плат (PCB) із зображень за допомогою методів інформатики є ефективним для аналізу схеми PCB. Ця автоматична оптична обробка може допомогти інженерам-електронникам швидше та глибше зрозуміти складні багатошарові друковані плати.

У роботі було розглянуто зворотнє проектування друкованих плат, досліджуючи його застосування, процеси, методи, інструменти, проблеми та найкращі практики.

У магістерській роботі досліджуються, проектуються та тестуються численні методи машинного навчання та комп'ютерного бачення для виділення схем друкованих плат із реальними даними друкованих плат. Набір даних зображень друкованої плати збирають професійні інженери з видалення шарів, які складаються з кожного шару друкованої плати та рентгенівських 3D-моделей усієї друкованої плати. Обрізання регіону інтересу (RoI) і вирівнювання зображення застосовуються спочатку, як і на етапі попередньої обробки. Виявлення та локалізація електронних компонентів реалізовано за допомогою мереж глибокого навчання (Faster R-CNN), кластеризації машинного навчання без нагляду (XOR-based K-середини) та

множинного зіставлення шаблонів. Для виділення багатошарової схеми металева схема друку сегментується в просторі кольорів YCbCr, після чого отримується з'єднання кожної мережі схеми.

# 1 ОГЛЯД ОБЛАСТІ РОЗРОБКИ ТА ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ

## 1.1 Поняття та застосування реверс-інжинірингу

Зворотне проектування, яке іноді називають реверс-інжинірингом — це процес, у якому програмне забезпечення, машини, літальні апарати, архітектурні споруди та інші продукти деконструюються для отримання з них проектною інформації. Часто зворотне проектування передбачає деконструкцію окремих компонентів більших продуктів. Процес зворотного проектування дає змогу визначити, як була розроблена деталь, щоб можна було її відтворити. Компанії часто використовують цей підхід, коли придбання запасних частин у виробника оригінального обладнання не є варіантом.

Процес зворотного проектування називається таким, оскільки він передбачає роботу у зворотному напрямку через початковий процес проектування. Однак при реверсі часто є обмеження в знаннях про інженерні методи, використані для створення продукту. Тому завдання полягає в тому, щоб отримати практичні знання про оригінальний дизайн, розбираючи продукт по частинах або шар за шарами.

Компанії часто використовують зворотне проектування старих електронних компонентів, таких як зняті з виробництва друковані плати (PCB) і з'єднувальні карти. Часто відповідні продукти надходять від виробників, які припинили свою діяльність. Якщо виробник все ще працює, він може більше не пропонувати цей виріб або частину. Компанії часто реконструюють стару електроніку заради безперервності.

Якщо старе комп'ютерне обладнання мало функції, які були втрачені через наступні зміни в технології, реверсивне проектування дозволяє виробникам заново відкрити ці формули та оновити їх. Зворотне проектування також дає змогу розробляти компоненти, які поєднують нове й старе, дозволяючи користувачам старішого обладнання підключати свої пристрої до сучасного обчислювального обладнання.

У деяких випадках єдиним способом отримати дизайн оригінального продукту є зворотне проектування. Для деяких старих продуктів, які не вироблялися 20 і більше років, оригінальні 2D-креслення більше не доступні. Часто відсутня можливість зв'язатися з оригінальним виробником, оскільки компанія вже не працює.

Компанії іноді використовують зворотний інжиніринг, щоб відновити дані дизайну своїх власних продуктів, які давно зняті з виробництва. Наприклад, невелика компанія, яка працює більше 40 років, могла виробляти численні продукти ще до появи систем автоматизованого проектування та зберігання цифрових файлів. Отже, ці старіші продукти можуть базуватися на давно втрачених паперових кресленнях. За допомогою зворотного проектування компанії можуть відновити втрачені проекти та створити архіви спадщини своїх продуктів.

Навіть якщо компанія все ще має свої паперові креслення, вони можуть захотіти створити їх цифрову версію, щоб зробити їх легшими для доступу та використання. Підприємство може використовувати певні методи зворотного проектування, щоб створити цей файл цифрового дизайну.

Фахівці з реставрації автомобілів іноді використовують зворотне проектування, щоб відтворити конструкції двигунів і частин кузова для старих автомобілів. Використання зворотного проектування для відновлення двигунів або відтворення важкодоступних деталей може знову зробити автомобілі 1920-1950-х років придатними для керування. Завдяки зворотній інженерії можна повернути до життя класичний автомобіль і зробити його повністю функціональним, не змінюючи конструкцію систем автомобіля.

Реверсивне проектування вимагає ряду кроків для збору точної інформації про розміри продукту. Зібрані дані можна зберігати в цифрових архівах. Часто інженери вдосконалюють дизайн новими розробками та інноваціями. Іноді вони точно повторюють оригінальну модель.

## 1.2 Ріверс-інжинірінг друкованих плат

Зворотне проектування друкованої плати — це процес аналізу існуючої друкованої плати (PCB) і відтворення її конструкції для створення нової, функціонально еквівалентної версії. Цей процес складається з кількох кроків, включаючи вилучення схематичних діаграм, реконструкцію макета друкованої плати та створення списку матеріалів (BOM).

Інженери беруться за зворотне проектування друкованих плат з кількох причин. Однією з них є необхідність заміни застарілих компонентів відповідними альтернативами.

Іншим мотивом є отримання інформації про продукт конкурента для аналізу конкуренції. Передові методи, такі як рентгенівська томографія, можуть бути використані для виявлення прихованих деталей конструкції. Крім того, це стратегічний інструмент для захисту інтелектуальної власності.

Зворотне проектування друкованих плат має широкий спектр застосувань в електронній промисловості, кожне з яких пропонує унікальні технічні завдання та можливості.

Основними напрямками застосування зворотнього проектування друкованих плат є:

- заміна застарілих компонентів;
- захист інтелектуальної власності;
- конкурентний аналіз;
- перевірка дизайну та усунення несправностей;
- контроль якості та оптимізація виробництва друкованих плат;
- заміна застарілих компонентів.

Розглянемо ці напрямки більш детально.

Одним із основних застосувань зворотнього проектування друкованих плат є заміна застарілих компонентів. Оскільки електронні компоненти старіють і стають застарілими, вони можуть бути недоступні для покупки або можуть стати непомірно

дорогими. У цих випадках інженери повинні знайти відповідні замінні компоненти, які зможуть зберегти функціональність оригінальної конструкції.

Практичний приклад: уявіть старовинний аудіопідсилювач, який роками був улюбленим обладнанням. Однак одного разу критичний транзистор застаріває, і знайти точну заміну стає неможливо. На допомогу приходять зворотне проектування друкованих плат.

Технічна інформація: інженери використовують такі формули, як закон Ома ( $V = IR$ ), щоб обчислити струм ( $I$ ), напругу ( $V$ ) і опір ( $R$ ). Під час вибору компонентів для заміни вони оцінюють такі параметри, як посилення транзистора ( $h_{fe}$ ) і розсіювання потужності ( $P_d$ ), щоб переконатися, що вони відповідають оригіналу.

Додаткові застосування: окрім заміни компонентів, зворотне проектування друкованої плати допомагає перепроектувати схеми для підвищення ефективності, покращення керування температурою та адаптації до нових галузевих стандартів.

#### Захист інтелектуальної власності

Іншим важливим застосуванням зворотного проектування друкованих плат є захист інтелектуальної власності (ІВ). В електронній промисловості компанії вкладають значні ресурси в дослідження та розробки для створення інноваційних продуктів і технологій. Захист цих інновацій від несанкціонованого копіювання або зворотного проектування конкурентами має вирішальне значення для підтримки конкурентної переваги та забезпечення довгострокового успіху компанії.

Зворотне проектування друкованих плат може відігравати важливу роль у захисті інтелектуальної власності, допомагаючи компаніям виявляти потенційні порушення патентних прав або порушення комерційної таємниці. Шляхом зворотного проектування власних продуктів або продуктів конкурентів інженери можуть проаналізувати дизайн і функціональність друкованих плат, щоб визначити, чи були скопійовані чи неправильно використані будь-які запатентовані технології чи запатентовані компоненти.

Практичний приклад: технологічна компанія розробила інноваційний фітнес-трекер із унікальним алгоритмом об'єднання датчиків, який точно вимірює

активність користувачів. Щоб захистити цей прорив, вони використовують зворотне проектування друкованих плат для моніторингу ринку на наявність неавторизованих клонів.

Технічні ідеї. Інженери виконують аналіз сигналів і статистичні методи для зворотного проектування алгоритмів і методів об'єднання датчиків. Вони застосовують математичні висновки та моделювання, щоб підтвердити унікальність своєї технології.

Додаткові програми. Зворотне проектування друкованої плати поширюється на виявлення порушень прав інтелектуальної власності в інтегральних схемах (IC), мікропрограмному забезпеченні та вбудованих системах.

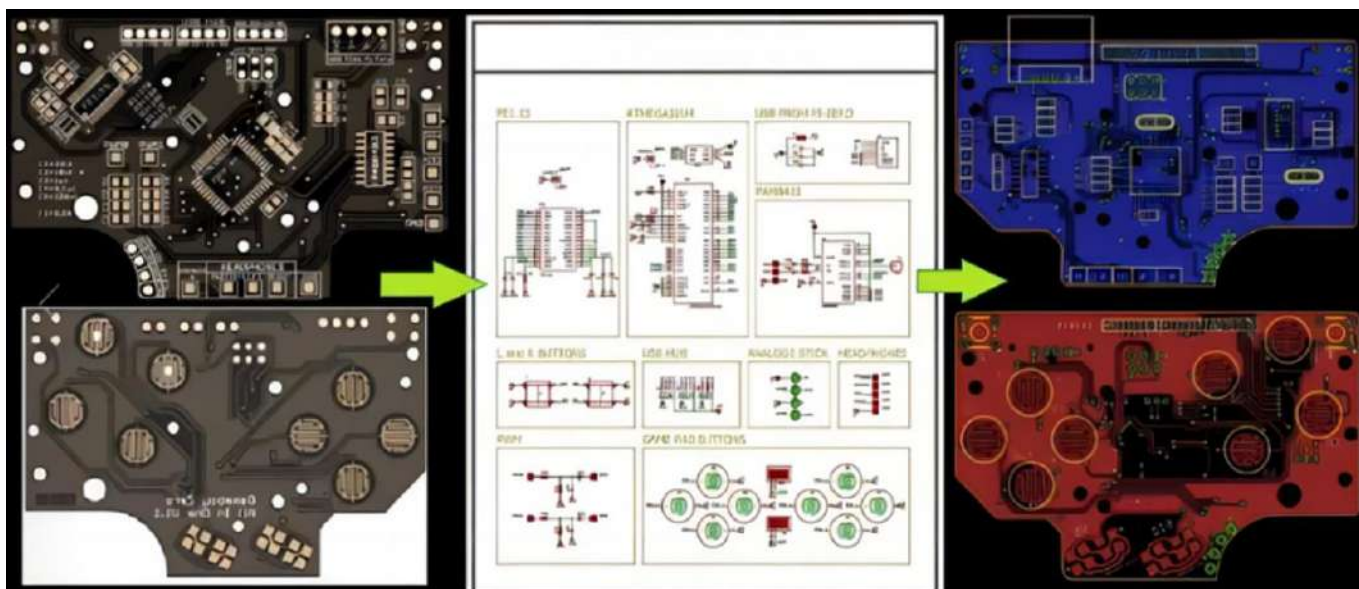


Рисунок 1.1 – Приклад використання реверс-інжинірингу

### Конкурентний аналіз

Зворотне проектування друкованих плат також можна використовувати як інструмент для аналізу конкуренції, що дозволяє компаніям отримати уявлення про дизайн і функціональність продуктів своїх конкурентів. Розуміючи сильні та слабкі сторони конкуруючих продуктів, компанії можуть визначити можливості для вдосконалення власного дизайну та розробити стратегії, щоб диференціювати себе на ринку.

Процес зворотного проектування друкованої плати конкурента включає аналіз схеми, компоновання та списку матеріалів для визначення вибору дизайну та компонентів, зроблених конкурентом. Ця інформація може дати цінну інформацію про філософію дизайну, виробничі процеси та структуру витрат конкурента.

Практичний приклад: виробник електроніки хоче зрозуміти, як смартфон конкурента забезпечує найкращий час автономної роботи. Вони розробляють друковану плату пристрою, щоб розкрити стратегії керування живленням і оптимізувати їх конструкції.

Технічні ідеї: інженери заглиблюються в схеми керування живленням, використовуючи такі рівняння енергоефективності:

$$\text{Efficiency (\%)} = P_{\text{out}}/P_{\text{in}} \times 100\% \quad (1.1)$$

де Efficiency – ефективність;

$P_{\text{out}}$  – вихідна потужність;

$P_{\text{in}}$  – вхідна потужність.

Вони аналізують цілісність сигналу за допомогою рівнянь лінії передачі, забезпечуючи високу швидкість передачі даних і мінімальне погіршення сигналу.

Додаткові застосування: реверсивна інженерія друкованих плат може виявити вибір RF (радіочастот) конкурентів, уможливіючи кращі конструкції радіочастотних схем для бездротових пристроїв. Він також застосовується в протоколах зворотного проектування для комунікаційних інтерфейсів.

Перевірка дизайну та усунення несправностей

Зворотне проектування друкованих плат відіграє ключову роль у перевірці конструкції та пошуку несправностей, пропонуючи інженерам цінний набір інструментів для забезпечення функціональності та надійності електронних виробів. Протягом життєвого циклу розробки продукту, від створення прототипу до масового виробництва, неминуче виникають труднощі та проблеми. Це застосування зворотного проектування друкованих плат допомагає ідентифікувати та ефективно вирішувати ці проблеми.

Практичний приклад. У розробці складних електронних пристроїв, таких як смартфони або пристрої Інтернету речей, забезпечення сталої продуктивності є першорядним. Однак під час тестування можуть виникати періодичні проблеми з підключенням. Шляхом зворотного проектування друкованих плат уражених блоків і проведення детального аналізу сигналу інженери можуть відстежити основні причини цих проблем. Наприклад, вони можуть виявити перешкоди сигналу, розбіжності імпедансу або несправні компоненти, які призводять до погіршення сигналу.

Технічна інформація. Реверсивне проектування друкованої плати для перевірки дизайну передбачає комплексне дослідження електричних характеристик плати. Інженери використовують ряд технічних інструментів і методологій, зокрема:

Методи обробки сигналів. Аналіз Фур'є та спектральний аналіз допомагають визначити характеристики частотної області та джерела шуму, що впливають на цілісність сигналу.

Розрахунок відповідності імпедансу: інженери розраховують імпеданс лінії передачі, забезпечуючи належне поширення сигналу та мінімізуючи відбиття сигналу.

Аналіз запасу шуму. інженери оцінюють запас шуму, щоб переконатися, що цифрові сигнали залишаються в межах визначених порогів напруги, зменшуючи ризик пошкодження даних.

Термічний аналіз: у пристроях, чутливих до температури, інструменти термічного аналізу та обчислення використовуються для оцінки розсіювання тепла та забезпечення того, що компоненти залишаються в межах заданих діапазонів робочих температур.

Додаткові програми: окрім перевірки дизайну та усунення несправностей, зворотне проектування друкованих плат підтримує ітераційні вдосконалення дизайну. Інженери можуть визначити можливості для оптимізації конструкції за такими факторами, як енергоефективність, керування температурою та зниження витрат. Крім того, знання, отримані в результаті зворотного проектування, сприяють

удосконаленню майбутніх ітерацій продуктів, гарантуючи, що електронні пристрої розвиватимуться відповідно до вимог ринку, що постійно змінюється.

#### Контроль якості та оптимізація виробництва друкованих плат

У сфері зворотного проектування друкованих плат ця програма поєднує два важливі аспекти: контроль якості та оптимізацію виробництва. Контроль якості передбачає ретельну перевірку кожного етапу виробництва з використанням передових методів, таких як автоматизована оптична перевірка (AOI), рентгенівська перевірка та тестування в схемі (ICT), щоб виявити такі дефекти, як проблеми з паянням або зміщення компонентів, забезпечуючи високу якість друкованих плат. Одночасно оптимізація виробництва передбачає вдосконалення загального виробничого процесу. Інженери використовують такі технічні стратегії, як моделювання процесів для вдосконалення робочого процесу, аналіз матеріалів для зменшення відходів і економічності, а також методи статистичного контролю процесів (SPC) для моніторингу процесів у реальному часі. Ця інтеграція технічних підходів веде до ефективного, економічно ефективного та екологічно чистого виробництва друкованих плат, забезпечуючи стабільне виробництво високоякісних плат.

Практичний приклад. Складальна лінія друкованих плат має високий рівень браку через дефекти пайки. Зворотне проектування друкованих плат забракованих блоків допомагає точно визначити першопричини, що призводить до оптимізації процесу.

Технічна інформація. Інженери використовують методи статистичного керування процесами (SPC), такі як контрольні діаграми та аналіз можливостей процесу, щоб контролювати та покращувати виробничі процеси.

Додаткові застосування. зворотне проектування друкованої плати покращує оптимізацію продуктивності, зменшує відходи та забезпечує високу якість продукції.

Загалом зворотне проектування друкованих плат може надати цінну інформацію про продукти конкурентів, дозволяючи компаніям визначити можливості для вдосконалення та диференціації у своїх власних конструкціях.

Розуміючи вибір дизайну та вибір компонентів, зроблений конкурентами, компанії можуть приймати обґрунтовані рішення щодо власних зусиль щодо розробки продукту та підтримувати конкурентну перевагу на ринку.

### **1.3 Проблеми та обмеження зворотного проектування друкованих плат**

Хоча зворотне проектування друкованих плат може надати цінну інформацію та дозволити відтворення існуючих конструкцій, воно не позбавлене проблем і обмежень. У цьому розділі ми обговоримо деякі з найпоширеніших проблем, з якими стикаються під час процесу зворотного проектування друкованої плати, а також обмеження поточних методів і інструментів.

Складність сучасних друкованих плат. У міру розвитку технологій сучасні конструкції друкованих плат стають дедалі складнішими, мають вищу щільність компонентів, багат шарові структури та передові технології, такі як високошвидкісна сигналізація та вбудовані компоненти. Ці складності створюють значні проблеми для процесу зворотного проектування. Для забезпечення точних і надійних результатів інженери повинні ретельно орієнтуватися в складній маршрутизації, проблемах цілісності сигналу та взаємодії компонентів. Застосування передових інструментів для реконструкції компонування друкованої плати та створення схем стає вирішальним для ефективного вирішення цих складнощів.

При реверс-інжинірингу друкованих плат виникають наступні проблеми та обмеження:

- складність сучасних друкованих плат;
- доступ до прихованих функцій;
- ідентифікація компонентів;
- юридичні та етичні міркування;
- точність і надійність.

Доступ до прихованих функцій. Сучасні друковані плати часто містять приховані функції, такі як внутрішні шари, сховані переходи та вбудовані компоненти. Ці елементи мають вирішальне значення для розуміння повного дизайну, але можуть бути складними для доступу та аналізу лише за допомогою візуального огляду. Інженери повинні покладатися на передові методи, такі як рентгенівський огляд і рентгенівська томографія, щоб виявити ці приховані структури. Хоча ці методи дають безцінне розуміння, вони можуть вимагати багато часу та коштувати. Щоб пом'якшити ці проблеми, інженери повинні ретельно спланувати та визначити пріоритети, які приховані функції вимагають аналізу, збалансовуючи ретельність перевірки з обмеженнями проекту.

Ідентифікація компонентів. Точна ідентифікація компонентів на друкованій платі є фундаментальним, але складним аспектом зворотного проектування друкованої плати. Це завдання стає ще складнішим, якщо ви маєте справу зі спеціальними або застарілими компонентами, які можуть не мати доступних таблиць даних або маркування. Інженери повинні використовувати різні методи, включаючи характеристику компонентів за допомогою електричних випробувань і схематичних перехресних посилань, щоб визначити характеристики цих компонентів. Крім того, використання комплексних баз даних компонентів і інструментів з відкритим вихідним кодом, таких як бібліотеки компонентів у програмному забезпеченні EDA та керовані спільнотою платформи, такі як KiCad, може допомогти в ідентифікації та документуванні компонентів ефективно.

Юридичні та етичні міркування. Проведення зворотного проектування друкованих плат вимагає ретельного дотримання правових та етичних вказівок. Несанкціоноване зворотне проектування продуктів конкурентів може вважатися промисловим шпигунством і може призвести до серйозних правових наслідків. Компанії, які займаються зворотним проектуванням, повинні проконсультуватися з юрисконсульттом, щоб забезпечити дотримання чинних законів і нормативних актів, таких як права інтелектуальної власності та комерційні таємниці. Крім того, їм слід розглянути альтернативні підходи, як-от угоди про співпрацю чи ліцензійні угоди з

виробниками оригінального обладнання (OEM), щоб отримати необхідну інформацію про проект законним шляхом.

Точність і надійність. Забезпечення точності та надійності друкованої плати зі зворотним проектуванням є надзвичайно важливим. Помилки в схемі, макеті або специфікації можуть призвести до функціональних проблем або навіть катастрофічних збоїв у кінцевому продукті. Щоб вирішити цю проблему, інженери повинні впроваджувати суворі заходи контролю якості на кожному етапі процесу. Це включає використання таких інструментів, як перевірка правил проектування (DRC), програмне забезпечення для моделювання для аналізу цілісності сигналу та комплексне електричне тестування за допомогою таких інструментів, як мультиметри та логічні аналізатори, для перевірки функціональності компонентів і з'єднань. Впроваджуючи ці методи, інженери можуть мінімізувати ризик помилок і виробляти високоякісні друковані плати зі зворотним проектуванням, які відповідають оригінальним специфікаціям або перевищують їх.

Незважаючи на ці грізні проблеми та обмеження, зворотне проектування друкованих плат залишається незамінним інструментом для електронної промисловості. Це дозволяє компаніям замінювати застарілі компоненти, захищати інтелектуальну власність і отримувати цінну інформацію про продукти конкурентів. Щоб досягти успіху в проектах зворотного проектування, інженери повинні використовувати передові методи, використовувати потужні інструменти та дотримуватися правових і етичних стандартів, таким чином подолавши ці проблеми та одержуючи надійні результати.

Найкращі практики зворотного проектування друкованих плат

Дотримання найкращих практик зворотного проектування друкованих плат має важливе значення для забезпечення точних, ефективних і надійних результатів. Дотримуючись цих найкращих практик, інженери можуть мінімізувати ризик помилок, скоротити час, необхідний для зворотного проектування, і покращити загальну якість кінцевого дизайну друкованої плати. У цьому розділі ми обговоримо деякі з ключових передових практик для успішного зворотного проектування друкованих плат.

Ретельна підготовка: належна підготовка є важливою для успішного процесу зворотного проектування друкованої плати. Це включає в себе збір необхідних інструментів і обладнання, ретельне очищення друкованої плати для усунення будь-яких забруднень, які можуть перешкодити процесу перевірки та аналізу, і, якщо потрібно, видалення захисних покриттів або компонентів, які можуть перешкоджати доступу. Забезпечуючи комплексну підготовку, інженери можуть мінімізувати ризик помилок і неточностей у процесі зворотного проектування.

Системний підхід: інженери повинні прийняти системний підхід до зворотного проектування, розбиваючи процес на керовані кроки, такі як створення схеми, реконструкція макета друкованої плати та створення BOM. Дотримуючись структурованого процесу, інженери можуть гарантувати, що кожен аспект конструкції друкованої плати буде точно зафіксований і задокументований.

Використання передових методів і інструментів. Використання передових методів і інструментів, таких як рентгенівський огляд і спеціалізоване програмне забезпечення, може значно підвищити точність і ефективність процесу зворотного проектування. Інженери повинні бути в курсі останніх розробок у технології зворотного проектування друкованих плат і включати ці інструменти та методи у свій робочий процес.

Перевірка та валідація: забезпечення точності та надійності друкованої плати зі зворотним проектуванням має вирішальне значення. Інженери повинні проводити ретельну перевірку та валідацію на кожному етапі процесу, використовуючи такі інструменти, як перевірка правил проектування (DRC), складне моделювання для аналізу цілісності сигналу та точне електричне тестування за допомогою таких інструментів, як мультиметри та логічні аналізатори. Ці заходи зменшують ризик помилок і невідповідностей.

Відповідність юридичним та етичним вимогам: реверсивне проектування друкованих плат має проводитися в межах правових та етичних принципів. Інженери повинні проконсультуватися з юрисконсультом, щоб переконатися, що їх діяльність із зворотного проектування здійснюється відповідно до чинних законів і правил, і вони повинні поважати права інтелектуальної власності інших осіб.

Документація та комунікація: Ведення повної документації протягом усього процесу зворотного проектування є незамінним для гарантування точності та надійності остаточного дизайну друкованої плати. Інженери повинні ретельно документувати свої висновки, рішення та обґрунтування на кожному етапі. Ефективне спілкування з членами команди та зацікавленими сторонами має важливе значення для досягнення успішного результату.

Дотримуючись цих найкращих практик, інженери можуть подолати проблеми та обмеження, пов'язані із зворотним проектуванням друкованих плат, і досягти успішних результатів у своїх проектах.

В роботі розглянуто розробку зворотньої розробки друкованих плат з використанням комп'ютерного зору для забезпечення можливості ідентифікації електронних компонентів, визначення написів на них, виявлення малюнку доріжок.

## 2 МЕТОДИ, ЕТАПИ ТА ЗАСОБИ ЗВОРОТНЬОГО ПРОЕКТУВАННЯ

### 2.1 Процес зворотного проектування друкованої плати

Зворотне проектування друкованої плати — це складний процес, який складається з кількох ретельно виконаних етапів:

- підготовки;
- створення схеми;
- реконструкції макета друкованої плати;
- створення списку матеріалів (BOM).

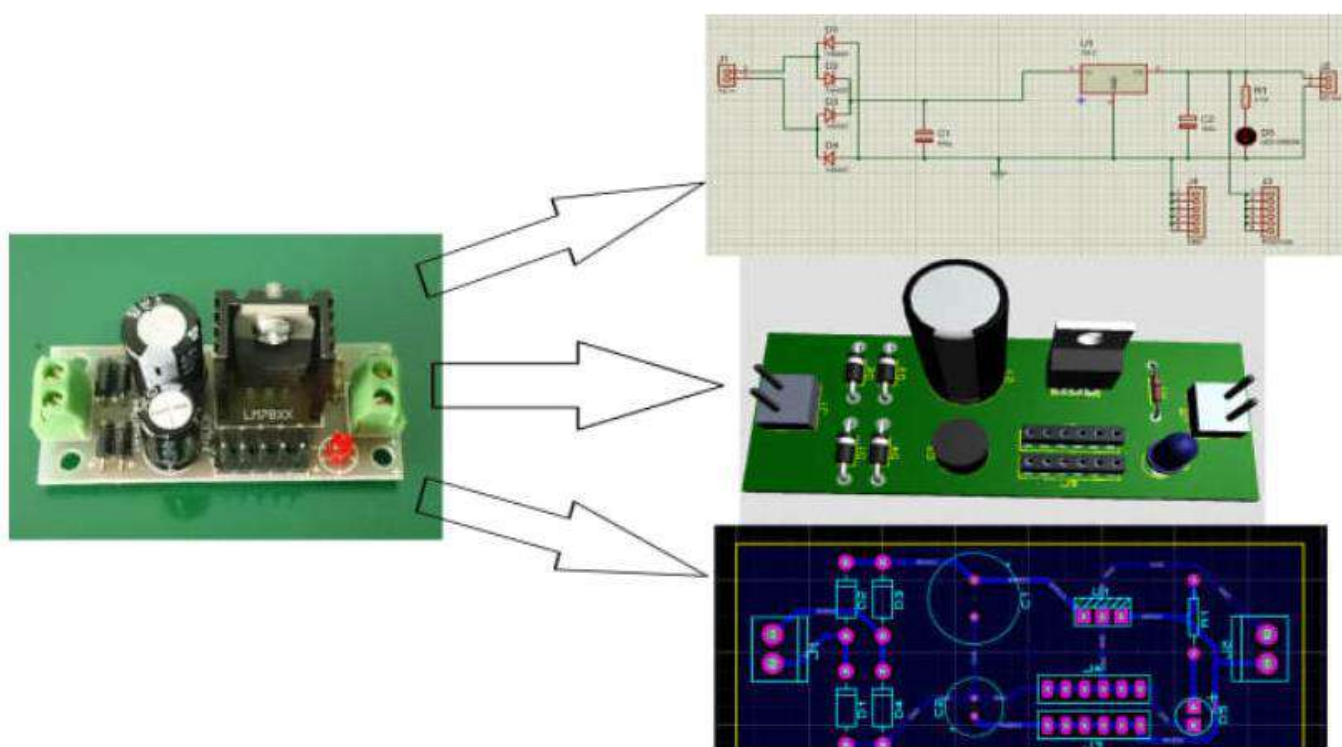


Рисунок 2.1 – Розбиття пристрою на моделі при зворотньому проектуванні

Кожна фаза є життєво важливою для точності та успіху загального зворотного проектування.

Правильна підготовка має важливе значення для успішного процесу зворотного проектування друкованої плати. Це передбачає стратегічну оркестровку основних інструментів і точне кондиціонування друкованих плат для поглибленого

аналізу. Арсенал засобів і обладнання для зворотного проектування друкованих плат включає:

Інструменти оптичної перевірки – це мікроскопи та камери високої роздільної здатності, оснащені такими функціями, як цифрове масштабування та регульоване освітлення для ретельного візуального огляду друкованої плати. Мета полягає в тому, щоб розкрити нюанси компонування друкованої плати.

Обладнання для рентгенівського контролю: використовуються для неруйнівного аналізу, рентгенівські апарати вдивляються у внутрішні шари та приховані отвори, розкриваючи приховані тонкощі плати. Сучасні методи рентгенівської томографії використовуються для точної 3D реконструкції друкованої плати.

Обладнання для випробувань електротехніки: мультиметри, осцилографи та літаючі зонди використовуються для всебічного визначення електричних характеристик. Ці прилади перевіряють не лише загальну функціональність друкованої плати, але й роботу окремих компонентів та їх взаємозв'язки.

Програмні інструменти: спеціалізоване програмне забезпечення EDA (Electronic Design Automation), таке як Altium Designer і KiCad, доповнює процес аналізу, забезпечуючи точне генерування схем, реконструкцію макета друкованої плати та створення специфікації.

Підготовка друкованої плати до зворотного проектування може включати кілька завдань, зокрема:

- повне очищення;
- стратегічне видалення покриття;
- відпаювання та вилучення компонентів.

Перше завдання полягає в тому, щоб ретельно очистити друковану плату, видаливши забруднювачі, такі як бруд, пил і тверді частки, які можуть приховати важливі деталі під час наступної перевірки та аналізу.

Стратегічне видалення покриття, якщо це виправдано, захисні або конформні покриття методично видаляються, оголюючи базові компоненти та складні сліди для ретельного вивчення.

Відпаювання та вилучення компонентів якщо того вимагає необхідність, виконується делікатний процес відпаювання, витягуючи компоненти з друкованої плати. Цей крок має важливе значення для поглибленого вивчення та аналізу основних слідів і складних зв'язків.

Значення цього етапу неможливо переоцінити; він формує міцну основу, на якій тримається весь процес зворотного проектування. Належна підготовка, схожа на калібрування наукових приладів, слугує для мінімізації можливостей помилок і неточностей, забезпечуючи отримання надійних і точних результатів на наступних етапах зворотного проектування.

Генерація схем є стрижнею в складному процесі зворотного проектування друкованих плат, утримуючи ключ до розгадки таємниць, прихованих у друкованій платі (PCB). Це мистецтво ретельного створення детального представлення лабіринтних електричних з'єднань і складного гобелена компонентів, які складають друковану плату. Ця схема, схожа на технічну схему, не тільки пояснює складну взаємодію схем, але й закладає основу для подальшої реконструкції макета друкованої плати.

Процес перетворення фізичної друкованої плати у комплексну схему зазвичай розгортається в послідовність кроків, які є складними та вимогливими:

- відстеження з'єднань;
- ідентифікація компонентів;
- створення схеми.

Основним першим кроком є ретельне відстеження з'єднань між окремими компонентами на друкованій платі. Це досягається за допомогою оптичних інструментів перевірки, оснащених високим збільшенням і точністю, і електричного випробувального обладнання, включаючи осцилографи та мультиметри. Складність цього завдання експоненціально зростає при роботі з багатошаровими друкованими платами, які містять щільну маршрутизацію та велику кількість компонентів.

При ідентифікації компонентів інженери беруть на себе роль судових слідчих, ретельно досліджуючи кожен компонент на друкованій платі з максимальною точністю. Це передбачає розшифровку не лише їхніх фізичних атрибутів, але й

глибше занурення в їхні внутрішні характеристики, включаючи тип, значення та функцію. Ця вичерпна ідентифікація компонентів є наріжним каменем, на якому будується точна схема, і має ключове значення для забезпечення бездоганної функціональності друкованої плати зі зворотним проектуванням.

Озброївшись великою кількістю ретельно зібраних даних, інженери приступають до створення цифрового зображення хитромудрого гобелена друкованої плати. Спеціалізовані програмні інструменти, наділені здатністю переводити матеріальне в цифрову сферу, володіють зіспритністю. Отримана схема є майстерним інженерним мистецтвом, насиченою символами компонентів, посиланнями

Мистецтво генерації схем не позбавлене частки проблем і вимагає застосування геніальних методів:

- складність навігації;
- дослідження прихованого.

Складність навігації відстеження з'єднань на густонаселених друкованих платах схоже на розшифровку заплутаного лабіринту, і потрібно бути дуже обережним, щоб переконатися, що кожне з'єднання точно транскрибовано. Ризик введення помилок є великим, що вимагає точності хірурга.

У пошуках вичерпної схеми інженери часто змушені досліджувати приховані заглиблення друкованої плати. Це включає заглиблення у внутрішні шари та виявлення прихованих отворів, завдання, яке стає здійсненним завдяки розгортанню сучасного рентгенівського обладнання для перевірки з використанням методів рентгенівської томографії.

Інженерам у цьому допомагають численні програмні засоби. Визначними серед них є інструменти автоматизації електронного проектування (EDA), такі як:

- Altium Designer;
- Cadence OrCAD;
- Mentor Graphics PADS.

Ці інструменти EDA пропонують багатогранний набір можливостей, який включає автоматичне відстеження з'єднань, великі бібліотеки компонентів і

механізми пильної перевірки помилок. Ці функції не тільки спрощують процес створення схеми, але підвищують точність і надійність кінцевої схеми.

Таким чином, генерація схем є алхімічним процесом, за допомогою якого матеріальна друкована плата перетворюється на цифрове представлення, інкапсулюючи суть її складних електричних з'єднань і компонентів. Це складна та заплутана подорож, у якій точність і передові технології поєднуються, щоб розкрити таємниці, приховані в серці друкованої плати.

#### Реконструкція компонування друкованої плати

Після створення схеми наступним кроком у процесі зворотного проектування друкованої плати є реконструкція макета друкованої плати. Компонування є критично важливим аспектом проектування друкованої плати, оскільки воно визначає фізичне розташування компонентів, трас і отворів на платі. Добре розроблена компонування може покращити цілісність сигналу, зменшити електромагнітні перешкоди та оптимізувати теплові характеристики.

Реконструкція компонування друкованої плати за схемою передбачає наступні кроки:

- розміщення компонентів;
- маршрутизація;
- перевірка проекту.

Інженери починають ретельну подорож, щоб визначити оптимальне розташування електронних компонентів на друкованій платі. Це завдання є багатограним і передбачає глибокий розгляд таких факторів, як цілісність сигналу, теплові характеристики та технологічність. Необхідно детально проаналізувати оригінальну друковану плату, щоб пролити світло на логічну основу розміщення компонентів. Інженери можуть виявити необхідність внести тонкі коригування для заміни компонентів або впровадити вдосконалення конструкції, дотримуючись принципів інтеграції пристроїв через отвір і поверхневого монтажу (SMD).

Після розумного розміщення компонентів інженери виконують складний процес маршрутизації електричних з'єднань з максимальною точністю. Схема виступає в якості дороговказного світла в цій спробі, окреслюючи шлях для слідів і

переходів, які встановлюють життєво важливі зв'язки. Цей етап вимагає ретельного підходу, щоб мінімізувати потенційні проблеми, такі як перешкоди сигналу, перехресні перешкоди та інші електромагнітні фактори. Дотримання правил проектування та виробничих обмежень не підлягає обговоренню; такі параметри, як ширина доріжки, відстань і розміри отворів, повинні бездоганно узгоджуватися, щоб забезпечити надійне та ефективне виготовлення друкованої плати.

Після завершення реконструкції макета інженери беруть участь у суворих процесах перевірки проекту. Мета полягає в тому, щоб підтвердити, що макет точно відображає схему та ретельно дотримується всіх специфікацій проекту. Цей процес перевірки охоплює низку видів діяльності, від виконання складного моделювання, що оцінює електричні характеристики, до всебічної перевірки правил проектування, що гарантує, що компонування відповідає галузевим стандартам або перевищує їх. Крім того, термічний аналіз стає найважливішим, гарантуючи, що друкована плата працюватиме з абсолютною точністю навіть за екстремальних умов.

Реконструкція компонування друкованої плати може бути складним і трудомістким процесом, особливо для багат шарових плат із щільною маршрутизацією та численними компонентами. Інженери повинні ретельно враховувати такі фактори, як цілісність сигналу, теплові характеристики та технологічність під час створення макета, гарантуючи, що друкована плата із зворотним проектуванням функціонуватиме належним чином.

Використовуючи потужні інструменти та ретельно дотримуючись детальних кроків, інженери орієнтуються в складному ландшафті реконструкції компонування друкованої плати. Вони гарантують, що кінцевий макет є не просто вірним відображенням оригіналу, а й оптимізованим проектом для чудової продуктивності друкованої плати. Таким чином, друкована плата зі зворотним проектуванням перетворюється на технологічний шедевр, який відповідає найвищим галузевим стандартам і використовує передові можливості.

## 2.2 Створення специфікації матеріалів (BOM)

Останнім кроком у процесі зворотного проектування друкованої плати є створення списку матеріалів (BOM). BOM — це вичерпний перелік усіх компонентів, які використовуються в друкованій платі, включаючи їхні специфікації, кількість і посилання. Точна специфікація має важливе значення для забезпечення того, щоб правильні компоненти були закуплені та зібрані під час процесу виготовлення, а також для підтримки запасів і керування моральним старінням компонентів.

Створення специфікації під час зворотного проектування друкованої плати передбачає виконання таких завдань:

Ідентифікація компонентів: Інженери починають суворий процес ретельної ідентифікації кожного складового елемента, що прикрашає друковану плату. Ця ідентифікація передбачає складний розбір кожного компонента, розгадування його типу, значення та функції. Ретельно зібрані дані про компоненти формують основу, на якій ретельно структурується точна специфікація, що в кінцевому підсумку завершується безперебійною роботою друкованої плати з реверсивним проектуванням.

Призначення посилального позначення: кожному компоненту, розташованому на друкованій платі, має бути присвоєно унікальне посилальне позначення. Ці позначки служать однозначними ідентифікаторами, які проходять через схему, макет і специфікацію. Формат посилальних позначень зазвичай відповідає стандартизованій номенклатурі, прикладом якої є позначення, такі як «R1», що позначає перший резистор, і «C1», що позначає перший конденсатор.

Інформація про джерела компонентів: ключовий аспект специфікації полягає у включенні вичерпної інформації про джерела. Окрім простих специфікацій компонентів, BOM має містити специфіку джерела, охоплюючи номери деталей виробника та ретельно підібрані списки затверджених постачальників. Це сховище інформації постає як незамінний ресурс, який гарантує, що правильні компоненти

розумно закупаються на етапі виготовлення. Він також діє як оплот проти потенційних пасток, пов'язаних із підробленими чи неякісними компонентами.

Щоб розрахувати загальну вартість компонентів, інженери використовують просте рівняння:

$$\text{Total Cost} = \sum (\text{Quantity} \times \text{Unit Cost}) \quad (2.1)$$

де «Quantity» означає кількість кожного необхідного компонента, «Unit Cost» — вартість одиниці.

Це рівняння забезпечує точні оцінки витрат, життєво важливі для складання бюджету та закупівель.

Підводячи підсумок, можна сказати, що створення комплексної та точної специфікації є критично важливим кроком у процесі зворотного проектування друкованої плати, гарантуючи, що правильні компоненти будуть отримані та зібрані під час виготовлення. Ретельно визначаючи компоненти, призначаючи посилавні позначки та надаючи інформацію про джерела, інженери можуть створити специфікацію, яка підтримує успішне виготовлення та складання друкованої плати за допомогою зворотного проектування.

## **2.3 Методи та інструменти для зворотного проектування друкованих плат**

Сфера зворотного проектування друкованих плат значною мірою покладається на набір ретельно розроблених методів і арсенал найсучасніших інструментів. Ці методології та інструменти є ключовими каменями, на яких базуються такі завдання, як ідентифікація компонентів, відстеження з'єднань і створення схем.

Найбільш широко використовувані методи та інструменти реверс-інжинірингу:

- оптична перевірка;

- рентгенівський аналіз;
- електричні випробування;
- програмні засоби.

Оптична перевірка є наріжним каменем у сфері зворотного проектування друкованих плат, полегшуючи візуальне паломництво складним ландшафтом друкованої плати та її компонентів. Ця подорож є квінтесенцією для багатьох завдань, починаючи від відстеження з'єднань до ідентифікації компонентів і, зрештою, перевірки точності схеми та компоновання.

Інструменти оптичної перевірки, які використовуються для зворотного проектування друкованих плат, включають:

- мікроскопи;
- камери високої роздільної здатності;
- системи автоматизованого оптичного контролю (АОІ).

Стереомікроскопи та їхні цифрові аналоги є бездоганними компаньйонами у збільшенні та ретельному дослідженні дрібних компонентів, ліній і отворів, що прикрашають друковану плату. Ці оптичні дива пропонують ряд варіантів збільшення від 10x до понад 100x, що дає змогу інженерам досліджувати найдрібніші тонкощі на дошці.

Камери високої роздільної здатності виявляються віртуозами у зйомці складних зображень друкованих плат, які підлягають подальшому аналізу за допомогою програмного забезпечення для обробки зображень. Ці камери мають роздільну здатність до кількох мегапікселів, що забезпечує рівень деталізації, необхідний для точного зворотного проектування.

Хоча системи автоматизованого оптичного контролю АОІ переважно використовуються для контролю якості у виробництві друкованих плат, системи АОІ мають потенціал у сфері зворотного проектування. Ці спеціалізовані пристрої організовують симфонію камер, матриць освітлення та алгоритмів обробки зображень, щоб ретельно перевіряти друковані плати на наявність аномалій або невідповідностей. Це слугує швидким засобом відстеження з'єднань і ідентифікації компонентів з непохитною точністю.

Методи оптичної перевірки, які використовуються в зворотному проектуванні друкованих плат, включають:

- візуальний огляд;
- обробка зображень.

Візуальний огляд, проведений за допомогою мікроскопів і камер високої роздільної здатності, дозволяє інженерам досліджувати складний гобелен друкованої плати. Ця вправа охоплює ідентифікацію компонентів, відстеження з'єднань і перевірку правильності схеми та компоновання.

Використовуючи потужність програмного забезпечення для обробки зображень, інженери аналізують безліч отриманих зображень друкованих плат. Це програмне забезпечення витягує безцінні відомості, окреслюючи контури компонентів, відстежуючи шляхи та прохідні місця. Такі дані допомагають прискорити створення схем і реконструкцію компоновання.

Використовуючи майстерність методів та інструментів оптичної перевірки, інженери, які починають одісею зворотного проектування друкованих плат, прокладають шлях до точності та ефективності у своїх починаннях.

Рентгенівська перевірка є ключовим методом у сфері зворотного проектування друкованих плат, служачи рентгенівським баченням серцевини прихованих тонкощів друкованої плати. Цей метод відіграє незамінну роль у виявленні особливостей, які уникають лише візуального огляду. Використовуючи потужність рентгенівського випромінювання, інженери можуть зазирнути крізь шари друкованої плати, глибоко заглиблюючись у її внутрішні структури, включаючи загадкові компоненти, такі як приховані отвори та внутрішні шари. Ці елементи є основою для розуміння цілісного дизайну друкованої плати.

Обладнання рентгенівського контролю:

- рентгенівські апарати;
- детектори рентгенівського випромінювання;
- програмне забезпечення для рентгенівського обстеження.

В основі цієї техніки лежать рентгенівські апарати, які випромінюють контрольоване рентгенівське випромінювання, яке проникає через друковану плату.

Ці промені розкривають раніше приховані особливості та структури всередині. Слід зазначити, що рентгенівські апарати, які використовуються для перевірки друкованих плат, працюють на нижчих рівнях енергії порівняно з їхніми медичними аналогами. Це не тільки забезпечує безпеку оператора, але й мінімізує ризик пошкодження друкованої плати.

Служачи очима цього процесу, рентгенівські детектори вловлюють рентгенівські промені, коли вони проходять через друковану плату. Згодом ці детектори перетворюють ці рентгенівські промені в цифрові зображення високої роздільної здатності. Якість і роздільна здатність цих детекторів відіграють важливу роль в отриманні детальних зображень внутрішньої структури друкованої плати.

Третім стовпом рентгенівського обстеження є спеціалізоване програмне забезпечення. Це програмне забезпечення відіграє ключову роль у розтині та аналізі зроблених рентгенівських зображень. Він витягує критично важливу інформацію, таку як стек рівнів, трасування маршрутів і проміжні місця розташування. Крім того, це програмне забезпечення часто має такі функції, як покращення зображення, інструменти вимірювання та поділ шарів, які можуть допомогти інженерам краще зрозуміти внутрішню структуру друкованої плати.

Інженери використовують програмне забезпечення рентгенівського контролю для ретельного розтину багатошарових друкованих плат. Цей розтин дає змогу виділити окремі шари для поглибленого незалежного аналізу. Ця техніка виявилася надзвичайно корисною під час відстеження з'єднань та ідентифікації компонентів, що знаходяться на внутрішніх шарах, які залишаються невловимими лише за допомогою оптичного огляду.

Приховані отвори, ці загадкові з'єднання, приховані у внутрішній частині друкованої плати, не поширюючись на зовнішні шари, розкриваються під час рентгенівського дослідження. Цей аналіз не тільки виявляє розташування, але й складне підключення цих прихованих переходів. Такі відкриття пропонують безцінне розуміння, служачи основою для реконструкції макета друкованої плати

Третя техніка, яка охоплює центри рентгенівського контролю, спрямована на відстеження лабіринтних маршрутів внутрішніх слідів. Ці приховані шляхи

залишаються невловимими для оптичного огляду, але є ключовими для всебічного розуміння дизайну друкованої плати. Обов'язково потрібно переконатися в точності реконструйованого макета.

Застосовуючи методи рентгенівського огляду та володіючи цими складними інструментами, інженери вирушають у подорож, яка дозволяє їм проникнути в загадкові внутрішні структури друкованої плати. Це забезпечує підвищену точність і повне розуміння, що веде до чудових результатів у сфері зворотного проектування. Більше того, щоб доповнити ці методи та інструменти, важливо включити використання списку з'єднань, який служить цінним посібником для розшифровки з'єднань у друкованій платі. Крім того, під час процесу зворотного проектування захоплення деталей друкованої плати може включати роботу з різними форматами файлів, такими як растрові зображення та файли Gerber. Щоб полегшити процес, можна застосувати такі програмні додатки, як Inkscape і Autotrace, які дозволяють конвертувати зображення у векторну графіку. Цей перехід від растрових зображень до векторної графіки спрощує завдання відтворення складних схем друкованих плат.

У середовищі співпраці, де прагнення до знань є відкритим вихідним кодом, інженери часто збираються разом, щоб поділитися своїм досвідом і думками, створюючи екосистему підтримки для послуг зворотного проектування. Орієнтуючись у дизайні друкованої плати, вони досліджують кожну сторону плати та ретельно вивчають тонкощі сторін друкованої плати. Примітно, що верхній шар ретельно перевіряється, оскільки він часто містить важливу інформацію.

Підводячи підсумок, використовуючи методи рентгенівської перевірки, передові програмні інструменти, інтегруючи критичну термінологію та співпрацю з відкритим вихідним кодом, інженери виконують комплексне дослідження прихованих таємниць друкованих плат, забезпечуючи тим самим точність і цілісність процесу зворотного проектування.

Електричне тестування є важливою технікою зворотного проектування друкованої плати, оскільки воно допомагає інженерам перевірити функціональність друкованої плати та її компонентів. Проводячи електричні випробування, інженери можуть переконатися, що реконструйована схема та компонування точно

відображають оригінальну друковану плату, а друкована плата зі зворотним проектуванням функціонуватиме належним чином.

Деякі поширені інструменти електричного тестування, які використовуються для зворотного проектування друкованих плат.

Мультиметри: мультиметри — це універсальні прилади, здатні вимірювати напругу (V), струм (I), опір (R) та інші електричні параметри. Інженери широко покладаються на них під час зворотного проектування друкованих плат для перевірки специфікацій компонентів, відстеження безперервності та виявлення коротких замикань або відкритих з'єднань. Типовий дисплей мультиметра показаний нижче:



Рисунок 2.2 – Мультиметр

Осцилографи служать безцінними інструментами для візуалізації та аналізу електричних сигналів у часовій області. Їх корисність поширюється на перевірку

поведінки аналогових схем, як-от джерел живлення та підсилювачів, а також на усунення проблем із цілісністю сигналу у високошвидкісних цифрових схемах. Зразок осцилографа зображено нижче:

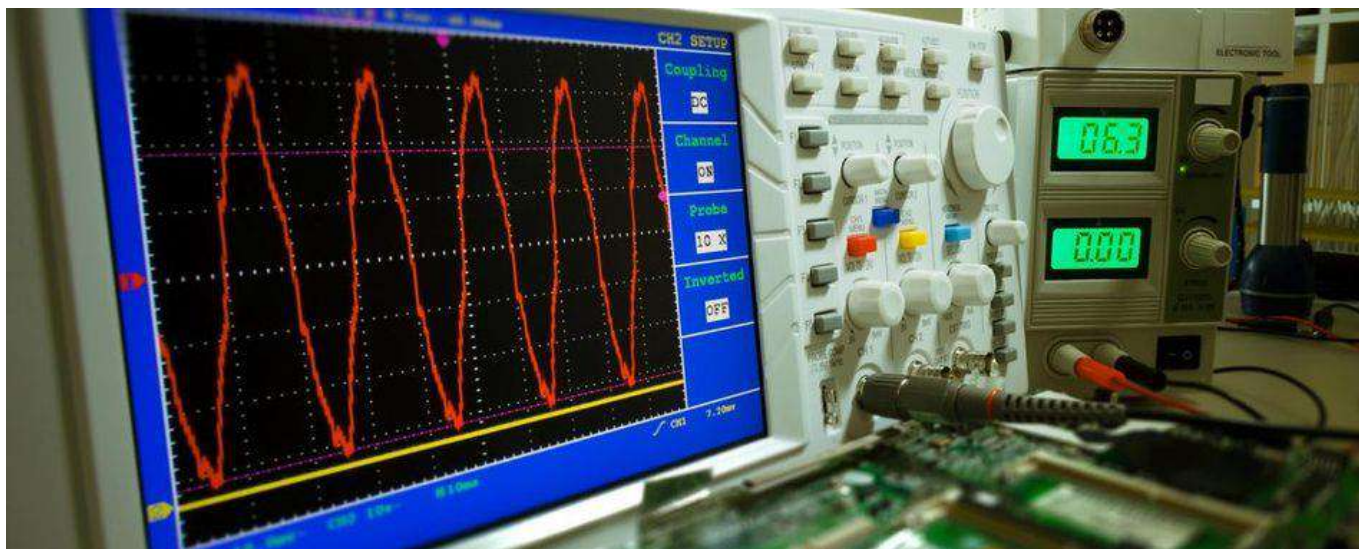


Рисунок 2.3 – Осцилографи

Логічні аналізатори використовуються для захоплення та аналізу цифрових сигналів, що дають змогу зрозуміти синхронізацію та стан цифрових схем. Вони можуть бути особливо корисними для налагодження складних цифрових систем, таких як мікроконтролери та конструкції на основі FPGA.

Методи електричних випробувань, які використовуються для зворотного проектування друкованих плат, включають:

Інженери використовують мультиметри для перевірки безперервності, гарантуючи цілісність електричних з'єднань між компонентами та виявляючи короткі замикання або розриви. Ця процедура є ключовою для гарантування точності реконструйованої схеми та компонування.

Тестування компонентів: інженери можуть використовувати мультиметри, осцилографи та інше випробувальне обладнання, щоб перевірити значення та функціональність компонентів на друкованій платі. Це тестування допомагає переконатися, що правильні компоненти визначено та включено до специфікації.

Тестування цілісності сигналу: осцилографи та логічні аналізатори виходять на перший план у дослідженні поведінки електричного сигналу на друкованій платі.

Це тестування точно визначає такі проблеми, як перехресні перешкоди, відбиття та електромагнітні перешкоди, надаючи важливу інформацію про продуктивність оригінальної друкованої плати та сприяючи покращенню дизайну зворотного проектування.

Вміло впроваджуючи методи електричних випробувань і використовуючи відповідні інструменти, інженери досягають точних і функціональних друкованих плат із зворотним проектуванням, забезпечуючи надійність і ефективність своїх результатів.

Програмні засоби відіграють важливу роль у процесі зворотного проектування друкованих плат, допомагаючи інженерам у таких завданнях, як створення схем, реконструкція макета друкованої плати та створення специфікації матеріалів. Ці інструменти допомагають оптимізувати процес зворотного проектування, підвищити точність і зменшити ймовірність помилок. У цьому розділі ми обговоримо деякі з найпопулярніших програмних засобів, які використовуються для зворотного проектування друкованих плат.

Altium Designer — це широко використовуваний інструмент автоматизації електронного проектування (EDA), який пропонує повний набір функцій для захоплення схем, компоновання друкованої плати та керування специфікацією. Його потужні можливості зворотного проектування включають автоматичне відстеження з'єднань, керування бібліотекою компонентів і перевірку помилок, що робить його ідеальним вибором для проектів зворотного проектування друкованих плат.

Cadence OrCAD стає ще одним улюбленим інструментом EDA, що забезпечує низку функцій для захоплення схем, компоновання друкованої плати та керування специфікацією. Його функції зворотного проектування охоплюють розширену генерацію схем, автоматизовану маршрутизацію та перевірку правил проектування, що дає змогу інженерам точно відтворювати конструкції друкованих плат із існуючих плат.

Mentor Graphics PADS — це інструмент EDA, який пропонує повний набір функцій для захоплення схем, компоновання друкованої плати та керування специфікацією матеріалів. Його можливості зворотного проектування включають

потужну генерацію схем, автоматизовану маршрутизацію та перевірку правил проектування, що робить його підходящим вибором для проектів зворотного проектування друкованих плат.

Zuken CR-8000 — це інструмент EDA, який надає повне рішення для захоплення схем, компоновання друкованої плати та керування специфікацією матеріалів. Його можливості зворотного проектування включають розширену генерацію схем, автоматизовану маршрутизацію та перевірку правил проектування, що може допомогти інженерам точно відтворити конструкції друкованих плат із існуючих плат.

Ці програмні інструменти пропонують ряд функцій і можливостей, які можуть допомогти інженерам у процесі зворотного проектування друкованих плат, допомагаючи забезпечити точні та ефективні результати. Використовуючи ці інструменти, інженери можуть оптимізувати процес зворотного проектування, зменшити ймовірність помилок і покращити загальну якість кінцевого дизайну друкованої плати.

В рамках дипломного проекту ми обмежуємось комп'ютерною обробкою зображень друкованих плат вважаючи, що вони вже пройшли етапи очищення та їх розташування оптимально щодо камери, а камера має достатню роздільну здатність.

### **3. АЛГОРИТМІЧНІ ЗАСАДИ ВИКОРИСТАННЯ КОМП'ЮТЕРНОГО ЗОРУ ДЛЯ АНАЛІЗУ ДРУКОВАНИХ ПЛАТ**

#### **3.1 Етапи використання комп'ютерного зору для аналізу друкованих плат**

Технології на основі комп'ютерного зору широко застосовується в багатьох галузях промисловості, перетворюючи фізичну модель на цифрове представлення [18]. Зокрема, для дослідження та розробки друкованих плат автоматична система комп'ютерного зору може допомогти дизайнерам та інженерам прискорити та оптимізувати їхню роботу.

З розвитком обробки зображень і машинного навчання в інформатиці з'явилися методи автоматичного розпізнавання, які допомагають інженерам у проектуванні та аналізі друкованих плат [12]. Для перевірки чіпів на основі кремнію список з'єднань схем можна отримати за допомогою електронного мікроскопа та розширених алгоритмів виявлення [7].

Метою цього проекту є дослідження автоматичних методів машинного навчання та обробки зображень для отримання інформації про схему фізичної друкованої плати, яка повинна включати інформацію про компоненти, з'єднання проводів і міжшарові зв'язки. Пропонується розглянути як глибоке навчання, так і класичні методи обробки зображень для виявлення електронних компонентів, розглянути багат шарове вирівнювання та з'єднання схем, ефективність виявлення та локалізації компонентів, схему багат шарової друкованої плати.

Розробка спрямована на отримання інформації про схему для друкованої плати з високою точністю та низькими затратами часу та обчислень.

Під час розробки задачу було розбито на підзадачі:

- розробка алгоритмів для кадрування RoI та вирівнювання багат шарової друкованої плати;

- реалізація алгоритму глибокого навчання для виявлення та локалізації компонентів.

- розробка класичних алгоритмів обробки зображень для покращення та доповнення виявлення компонентів;
- розробка методу сегментації зображення для виявлення металу внутрішнього шару;
- розробка процесу вилучення інформації про з'єднання елементів схеми;
- оцінка ефективності виявлення компонентів.

У проекті є три основні частини:

- попередня обробка зображення друкованої плати, під час якої кожен шар друкованої плати вирівнюється, а RoI обрізаються для наступного процесу;
- виявлення та локалізація електронних компонентів;
- сегментація металу внутрішнього шару та вилучення інформації про з'єднання.

У першій частині для визначення гомографічної матриці між двома суміжними шарами друкованої плати використовуються прискорені надійні функції (SURF) [3] і консенсус випадкової вибірки (RANSAC) [9]. Інваріантне масштабно-інваріантне перетворення ознак (SIFT) також намагається використовувати для виділення точок [2]. PCB Region of Interest (RoI) обрізається з необробленого зображення за допомогою сегментації з індексацією кольорів і щільності країв.

Для виявлення та локалізації компонентів ми застосовуємо три різні методи, щоб забезпечити високу точність результату аналізу схеми:

- перший метод — це швидке виявлення заперечень згорткової нейронної мережі на основі регіону (Faster R-CNN);
- другий — інноваційне виявлення K-середніх [17] на основі зображення Exclusive Or (XOR) із простим класифікатором згорткової нейронної мережі (CNN);
- останній процес — це зіставлення кількох шаблонів як доповнення, кероване вручну.

В роботі пропонується використовувати як стандартне цифрове зображення, так і рентгенівський зріз для підключення внутрішньої схеми друкованої плати, щоб покращити зображення провідного дроту. Інформація про підключення витягується шляхом накладання вирівняних шарів.

У проєкті дослідження виявлення компонентів друкованої плати та з'єднання внутрішньої схеми окремо не вивчається, як поєднати ці дві частини для створення повної схеми. Для виявлення компонентів ми класифікуємо компоненти лише на резистор, конденсатор, корпус інтегральної схеми (IC) і металеву пластину та обговорюємо конкретну модель цих компонентів.

В роботі основні практичні етапи були виконані на конкретних 7 друкованих платах, отриманих від Sparkfun. Причина полягає в тому, що Sparkfun пропонує схему та інформацію про компонування друкованої плати (тобто є з чим порівнювати отриманий розробленими методами результат), крім того, це економічний варіант. Набір даних для машинного навчання готували самі; таким чином, він обмежений і не може застосовуватися в інших випадках. Через обробку фізичної композиції якість зображення друкованої плати є неідеальною, що спричиняє певну проблему втрати інформації.

### **3.2 Методи аналізу внутрішньої структури друкованої плати**

Друкована плата з'єднує електронні компоненти за допомогою струмопровідних доріжок, контактних майданчиків. У сучасному виробництві друкована плата має кілька шарів, і між кожним шаром вони з'єднані струмопровідним матеріалом, що торкається прямо або свердлами. На її поверхні компоненти, як правило, припаяні до друкованої плати для електричного з'єднання та механічного кріплення до неї.

PCB містить ізоляційну підкладку для кожного шару, яка зазвичай є композитом зі скловолокна та прикріплена до неї, як схема друку, витравлена мідь. Як провідний матеріал мідь може бути присутня з обох сторін підкладки. Внутрішні шари виготовляються шляхом з'єднання кількох підкладок разом, як показано на рис. 3.1. Ми розглядаємо кожен мідний шар ізольовано, при цьому він з'єднаний контактною міддю сусідніх шарів.

У верхній частині друкованої плати це ізоляційна поверхня, яка з'єднує провідну мідну ланцюг і компоненти за допомогою паяльної маски, яка визначає площадки для кріплення компонентів із внутрішньою міддю. Шовкографія є ще однією важливою поверхнею, це маска слідів чорнила, яка використовується для ідентифікації компонентів, провідних точок, логотипів і знаків. У нашому проекті паяльна маска є небажаним фоном для виявлення компонентів, тоді як її контраст може допомогти нам сегментувати цілі. Шовкографія створює проблеми для виявлення припою та металевих компонентів, як ви можете бачити на рис. 3.2.

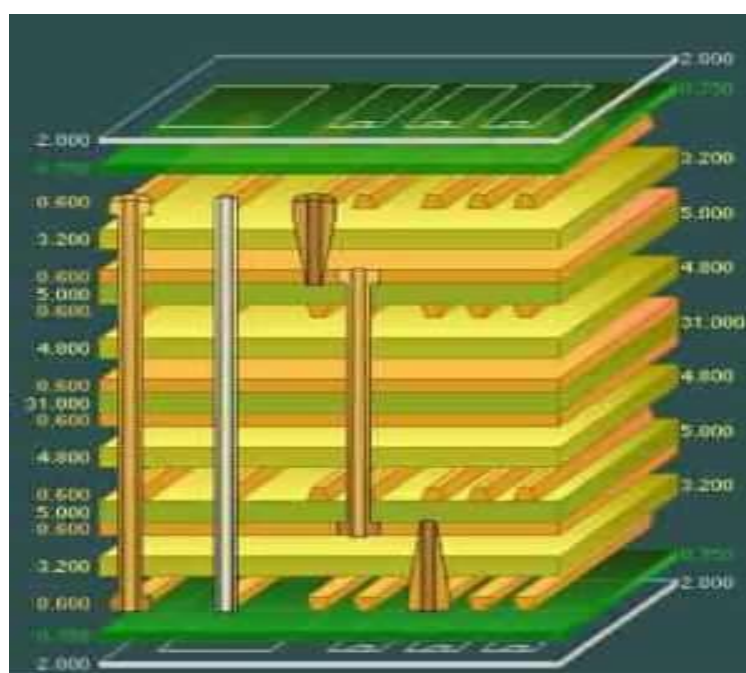


Рисунок 3.1 – Багатошарова структура

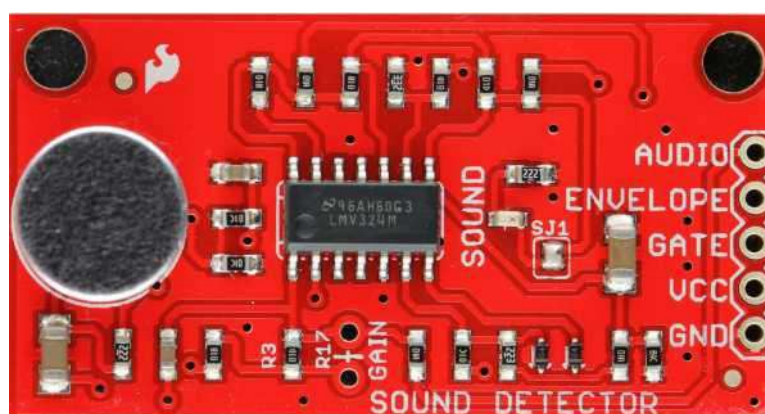


Рисунок 3.2 – Експериментальна плата

Для композиції друкованої плати розробник прототипу зазвичай використовує фізичні методи для видалення паяльної маски за допомогою таких інструментів, як наждачний папір і щітка для подряпин зі скловолокна. З розвитком виробництва широко використовуються методи хімічного видалення та лазерної абляції [13].

Після видалення паяльної маски наступним процесом є відстрочка, тобто доступ до внутрішніх мідних шарів багатошарової друкованої плати шляхом фізичного, руйнівного відстрочення. Наждачний папір є традиційним і надійним способом видалення шарів, як показано на рис.3.3. Інструмент Dremel використовується для різноманітних завдань, зокрема для різання, шліфування, свердління, фрезерування, полірування та шліфування.

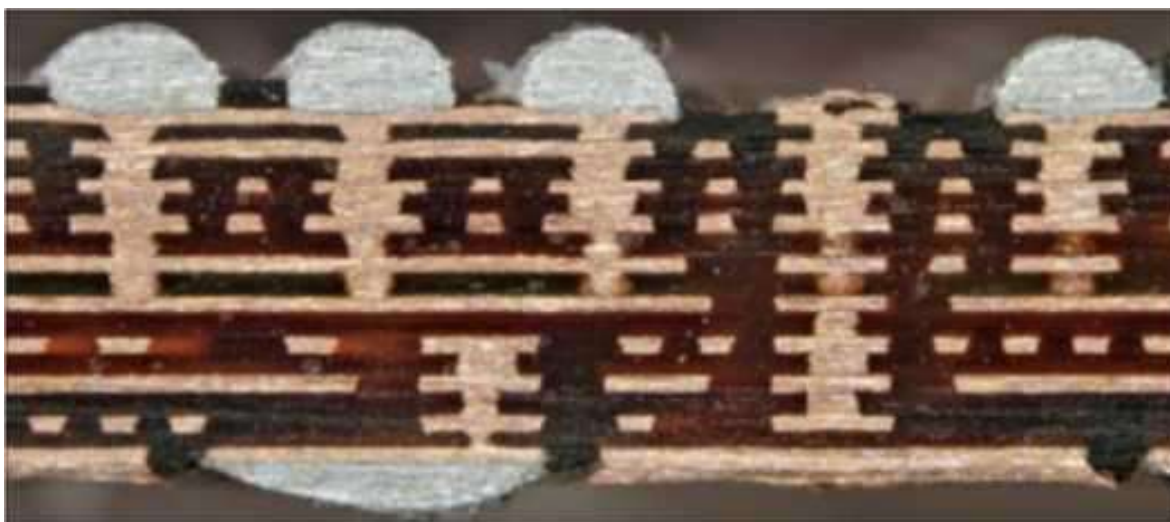


Рисунок 3.3 – Поперечний переріз багатошарової друкованої плати

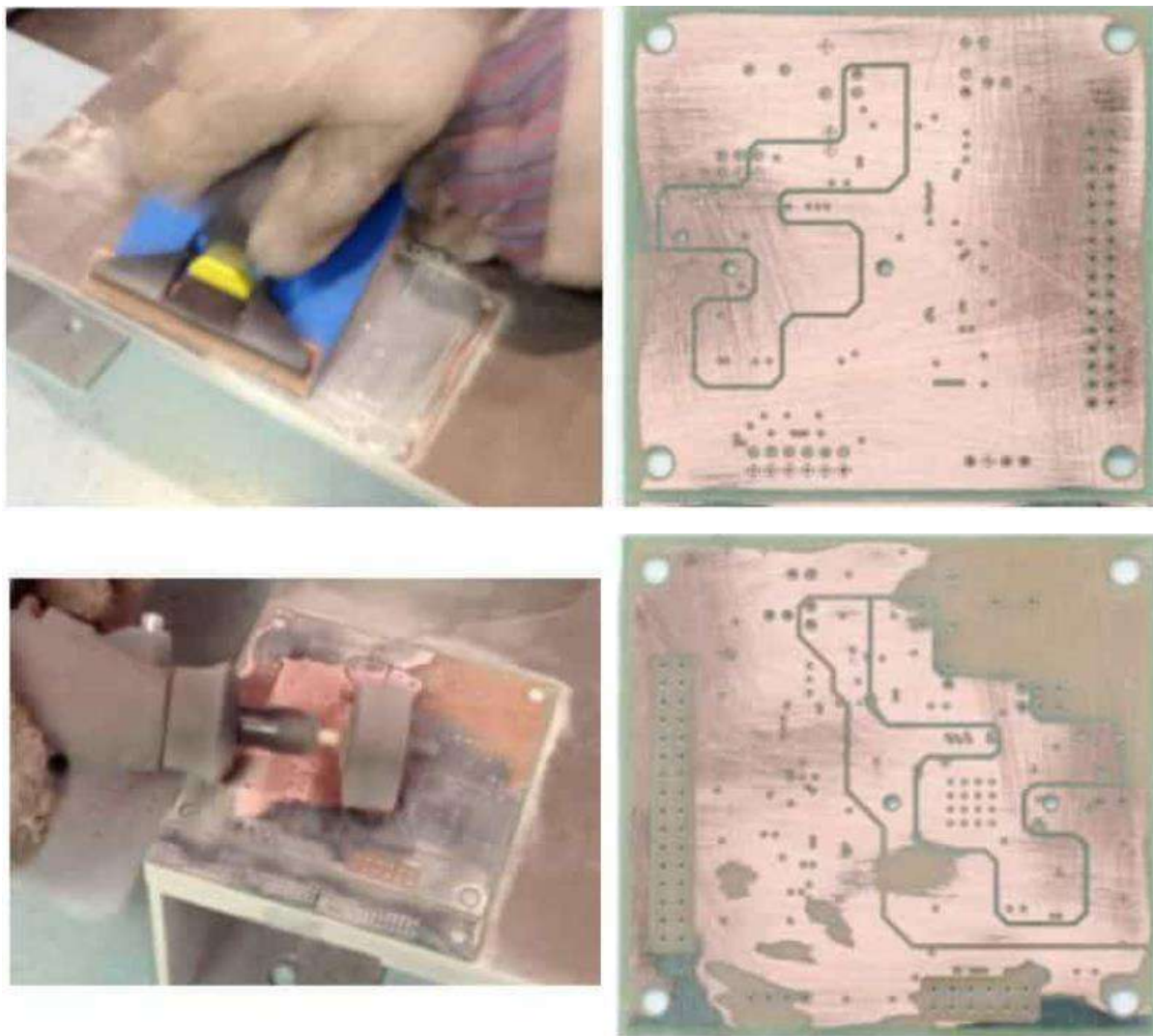


Рисунок 3.4 – Результати обробки плати наждачкою та дремелем

Як ми бачимо з результату фізичної обробки, є багато подряпин і пошкоджень цілісності міді друкованої плати, що може призвести до труднощів у розпізнаванні. Крім того, існує метод комп'ютерної томографії (КТ) за допомогою рентгенівського сканування для реконструкції 3D-моделі. На рис. 3.5 представлено робочий інтерфейс програмного забезпечення VGStudio1, який дає вигляд X, Y та Z поперечного перерізу друкованої плати.

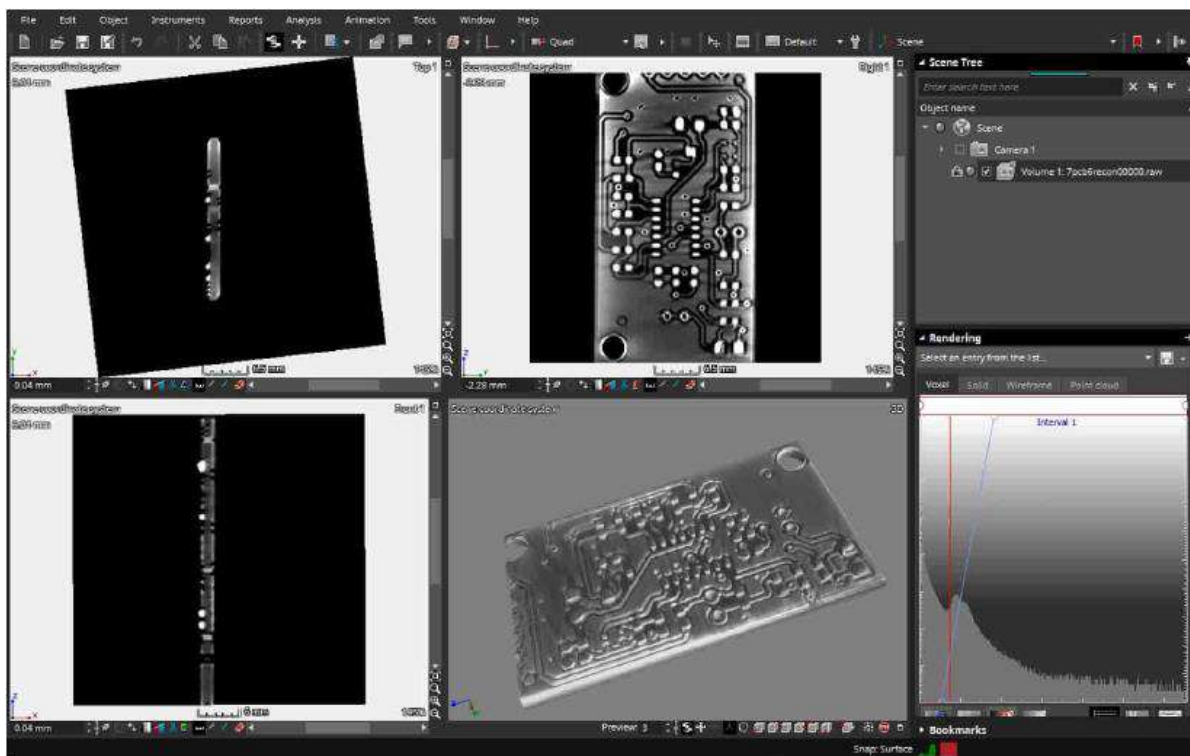


Рисунок 3.5 – Тривимірна модель друкованої плати отриманою методом КТ у VGStudio

### 3.3 Методи виявлення об'єктів плати засобами комп'ютерного зору

Нещодавно згорточна нейронна мережа (CNN) [18] значно вдосконалила комп'ютерну версію, ця архітектура глибокого навчання чудово працює в розпізнаванні об'єктів. У розробці класифікації CNN вона в основному містить три рівні: згортковий шар створює карту ознак для прогнозування ймовірностей класу для кожної ознаки шляхом застосування фільтра, який сканує все зображення; шар об'єднання зменшує кількість інформації згорткового рівня; Нарешті, сплюснена матриця проходить через повністю пов'язаний шар для класифікації зображень.

Окрім класифікації об'єкта зображення, локалізація об'єкта потрібна для багатьох завдань виявлення об'єктів, особливо в нашому проекті компонентів друкованої плати. R.Girshick та ін. запропонував R-CNN[11] у 2014 році, який використовує вибіркового метод пошуку [20], щоб знайти ROI на зображенні, а потім

помістити цю частину в традиційну нейронну мережу згортки. Як видно з назви, більш швидкий R-CNN є вдосконаленим алгоритмом від R-CNN, тоді як існує інша проміжна версія під назвою швидкий R-CNN [10]. У швидкому R-CNN вхідне зображення надсилається на попередньо навчену модель CNN замість застосування 2000-кратного CNN до RoI. Вибірковий алгоритм пошуку застосовано з картою ознак, яка є результатом моделі CNN. У найдосконалішій версії швидший R-CNN використовує мережу регіональних пропозицій (RPN) для заміни процесу вибіркового пошуку.

Існують інші підходи до виявлення об'єктів на основі нейронної мережі, наприклад YOLO та RetinaNet, Редмон та ін. [24]. You Only Look Once (YOLO) використовує єдину згорткову нейронну мережу для одночасного прогнозування розташування корпусу елемента та ймовірності його класу. YOLO швидкий, оскільки розглядає задачу виявлення як проблему регресії. Lin та ін. запропонували RetinaNet [19] що є єдиною мережевою архітектурою, яка складається з магістральної мережі та двох мереж, призначених для виконання завдань. Магістральна мережа обчислює карту характеристик для всього зображення, а дві міні-мережі відповідають за класифікацію об'єктів і регресію розташування обмежувальної рамки.

Для конкретної теми цього проекту компоненти — це невеликі об'єкти на друкованій платі, а виявлення компонентів — це перший крок вилучення інформації про схему, рівень точності важливіший, ніж витрати часу. У [20] він зробив оцінку різних методів глибокого навчання для виявлення невеликих об'єктів. З цього дослідження ми виявили, що YOLO є швидким методом для невеликих об'єктів; RetinaNet є хорошим із балансом швидкості та точності; хоча швидший R-CNN має хороші показники точності, якщо ігнорувати швидкість обробки, особливо він може мати справу з різними наборами даних у багатьох контекстах об'єктів, включаючи об'єкти в кількох масштабах. Тому швидший R-CNN є найкращим вибором для виявлення електронних компонентів у цьому дипломному проекті.

У 1973 році Андерберг запропонував метод K-середніх [1], який є технікою, яка використовується для поділу набору об'єктів на  $k$  груп таким чином, щоб кожна

група була однорідною щодо певних атрибутів на основі конкретного критерію. Основна ідея тут полягає в тому, що алгоритм намагається побудувати групи так, щоб два пікселі з одного кластера були якомога подібнішими, а дві точки з двох різних кластерів були якомога різноманітнішими.

K-means застосовано за допомогою алгоритму Ллойда [20] з ітерацією кластеризації, він призначає дані  $k$  кластерам, які визначаються їх центроїдами. Алгоритм працює таким чином:

- обирають  $k$  точок із даних як початкові центри кластерів;
- розраховують відстань кожного об'єкта кластера до центру кластера для поділу;
- знову обчислюють кожен центр кластера;
- обчислюють вимірювальну функцію.

Якщо метод досягне максимальної кількості ітерацій, він зупиниться, інакше – продовжить роботу.

Просторова кластеризація додатків із шумом на основі щільності (DBSCAN), представлена Естером та ін. [8], це метод кластеризації на основі щільності. DBSCAN відноситься до третьої категорії методів кластеризації і передбачає, що кластери є областями з високою щільністю в просторі даних.

У порівнянні з методами кластеризації без щільності, алгоритм DBSCAN чудово працює для виявлення об'єктів різних форм і розмірів. Крім того, коли існує значна щільність без будь-якої попередньої інформації про групи, присутні в наборі даних, DBSCAN може добре знайти ці кластери [29].

Для нашого завдання виявлення компонентів друкованої плати кластеризація K-середніх базується на колірній функції, тоді як DBSCAN використовує щільність розподілу піксельних даних. DBSCAN може дати точний результат виявлення, але потребує великих обчислювальних витрат і пам'яті. У конкретному випадку кластеризація K-means може забезпечити стійку та надійну продуктивність, а обчислення виконуються швидше з меншими витратами.

Масштабно-інваріантне перетворення ознак (SIFT) було запропоновано Лоу у 1999 році. Алгоритм SIFT складається з п'яти кроків:

- масштабно-просторове екстремальне виявлення;
- точна локалізація ключових точок;
- орієнтовне завдання;
- генерація дескрипторів ключових точок;
- зіставлення ключових точок SIFT.

SIFT використовує різницю Гауса (DOG) для апроксимації детектора плям, яку можна отримати шляхом віднімання двох зображень, розмитих ядром Гауса з різними  $\sigma$ .

Цей процес виконується для різних октав зображення в піраміді Гауса. Потім виконується порівняння між одним пікселем і його вісьмома сусідами в поточному шарі, а також 9 пікселями в верхньому і попередньому шарах. Локальні екстремуми вибираються як потенційні точки інтересу.

Крім того, функція прискорення та надійності (SURF) є вдосконаленням SIFT, який є менш складним із швидшим обчисленням. SURF використовує цілочисельне наближення визначника гессенського детектора плям, який можна обчислити за допомогою 3 цілочисельних операцій із використанням попередньо обчисленого інтегрального зображення. Його дескриптор ознак базується на сумі вейвлет-відповідей Хаара навколо точки інтересу.[3]

SIFT і SURF використовують для обчислення відповідності між зображеннями. Зокрема, SURF може обчислювати швидше, тоді як SIFT показує сильніше та точніше виявлення ознак у вирівнюванні зображення.

Підходи, засновані на шаблонах, дозволяють обчислювати найбільш ймовірні позиції окремого шаблонного зображення в більшому зображенні з незначними ручними анотаціями та з мінімальними обчислювальними витратами [4].

Однак, використовуючи єдиний шаблон, можливості виявлення обмежені, оскільки алгоритм шукає один шаблон інтенсивності, який може погано узагальнюватися для об'єктів з різними перспективами або характеристиками.

У [17] запропоновано багатшаблонний метод зіставлення для виявлення та локалізації об'єктів мікроскопічного зображення. Для відповідності кількох шаблонів він шукає за перекладом шаблону. Підготовлений вручну набір даних

містить набір шаблонів для пошуку (додаткові перспективи об'єкта, масштаби). Тоді одночасне виявлення об'єктів для різних категорій може бути виконано як ітераційна операція вище.

Для нашого виявлення електронних компонентів більшість компонентів в одному класі повністю однакові за кольором і формою (наприклад, резистори, конденсатори), вони представлені в повторюваній формі, представлений на зображенні друкованої плати. Порівняно зі складними методами зіставлення на основі функцій, зіставлення кількох шаблонів може виконувати обчислення швидше та показувати надійну продуктивність.

Останнім часом було проведено багато досліджень автоматизованого оптичного контролю друкованих плат (AOI) з використанням методів комп'ютерного зору. Для виявлення об'єктів Huang виявив дефекти друкованої плати за допомогою порівняння різниці зображень і згорткової нейронної мережі. Вони фотографують реальну друковану плату, а потім створюють дефекти за допомогою PhotoShop. Шляхом зіставлення зображень і порівняння шаблонних і тестових (дефектних) зображень встановлюються місця дефектів. Нарешті, класифікатор CNN застосовується для розпізнавання 6 різних типів дефектів.

Тан та ін. встановили новий набір даних про дефекти синтетичних друкованих плат і запропонували розширену нейронну мережу виявлення об'єктів із модулем Group Pyramid Pooling (GPP). Порівняно з Single Shot Detection (SSD), YOLO та Faster R-CNN запропоновані ними методи показують кращу продуктивність у виявленні дефектів друкованої плати. У цих дослідженнях використовується симуляційний набір даних про дефекти друкованих плат, що набагато легше очищати дані та оброблювати зображення. Cheoing застосував згорткову нейронну мережу до реальних компонентів і дефектів друкованої плати. Однак вони класифікували лише електронні компоненти за допомогою CNN і проігнорували локалізацію.

Для вилучення внутрішньої схеми PCB Erozan використав видобутий список мереж для синтетичної друкованої електроніки (PE). Після виявлення патчів ланцюгів застосовується алгоритм маркування підключених компонентів (CCL) для

автоматичної анотації під час вилучення списку з'єднань. Навід та ін. [2] використовували неруйнівну рентгенівську томографію РСВ для виділення компонентів і з'єднань. Інь та ін. запропонували метод сегментації внутрішнього металу друкованої плати, заснований на градієнті, який допомагає впоратися з труднощами сегментації тонкого дроту.

Наша робота стосується реальних друкованих плат і зосереджена на виявленні компонентів і з'єднанні внутрішньої схеми. Порівняно з дефектом друкованої плати, виявлення компонентів має різні цілі при роботі з одним зображенням. Компоненти можуть бути розташовані щільно, тому контрольованому машинному навчанню важко точно локалізувати та класифікувати компоненти. Тому ми збираємося комбінувати різні методи виявлення, щоб гарантувати точність. Зображення з видаленими компонентами можуть бути шаблоном для зображень із компонентами. Таким чином, розташування компонента буде знайдено шляхом порівняння різниці між тестовим і шаблонним зображеннями. Внутрішню схему друкованої плати можна виділити шляхом сегментації провідного металу з рентгенівських зрізів. Крім того, ми можемо використовувати умови вирівнювання та перекриття, щоб дослідити зв'язок між сусідніми шарами.

### **3.4 Метод локалізації електронних компонентів**

У цьому проекті друковані плати є загальнодоступними даними, які ми придбали в Інтернеті, і на них є повна документація щодо розводки шарів плати та схеми.

Система отримання зображень побудована за допомогою цифрової камери високої роздільної здатності. Ми виводимо зображення у форматі JPG для 7 різних друкованих плат. Кожне зображення має роздільну здатність 5184 x 3456 пікселів, витримку 1/60 секунди, діафрагму 8 і ISO 200. На рис.3.6 показано зображення друкованої плати, які ми отримали при різних станах обробки друкованої плати.

Для розуміння про структуру багатошарової друкованої плати використовується техніка комп'ютерної томографії (КТ) для сканування рентгенівської 3D-моделі друкованої плати. Комп'ютерна томографія, яку було використано – YXLON Cougar EVO 1. Вона може чітко показати глибоку структуру металу в кожному шарі, що є важливою інформацією для репрезентативної внутрішньої схеми друкованої плати. Рентгенівські зображення для шарів друкованої плати представлені на рис.3.7.

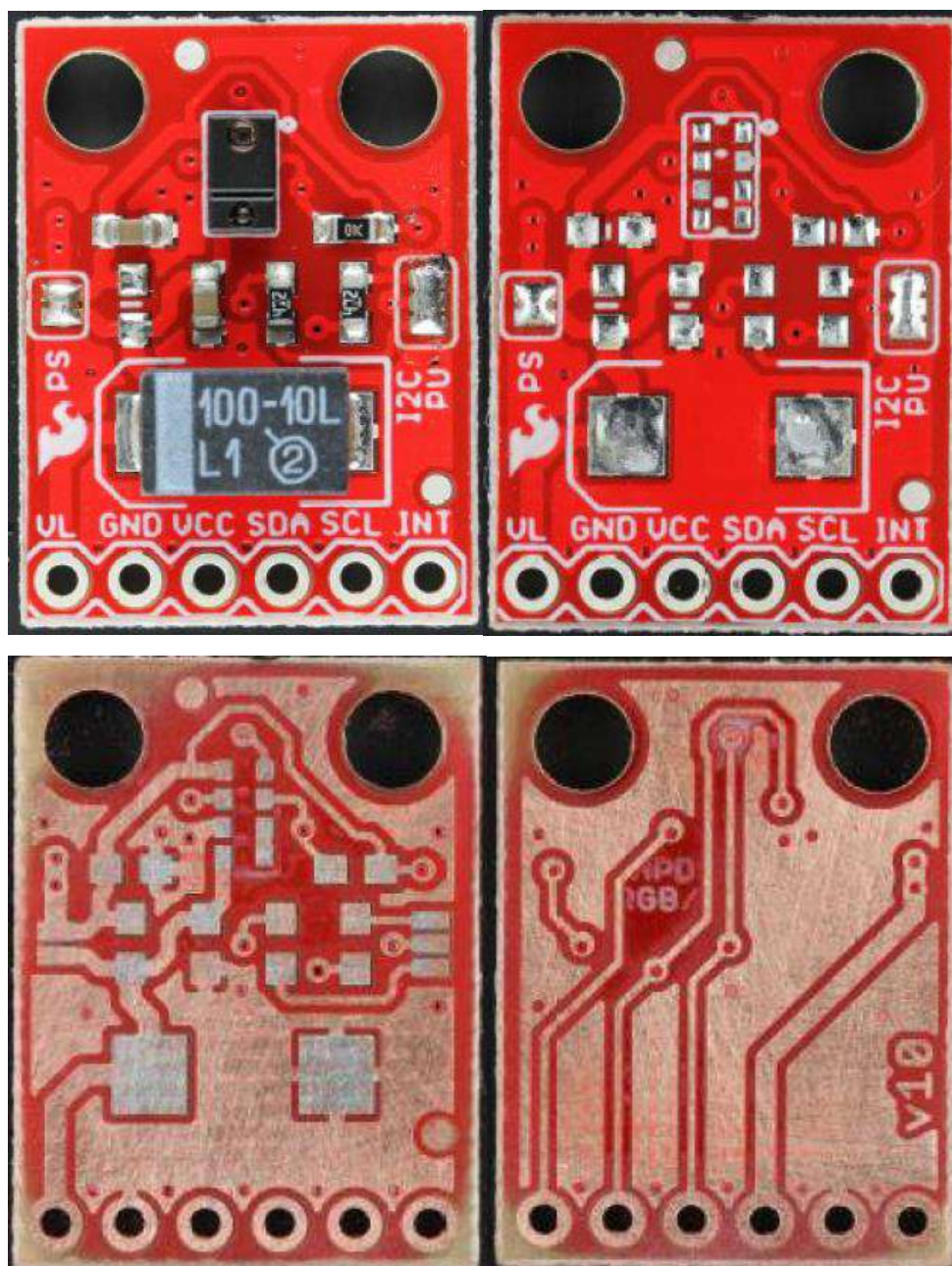


Рисунок 3.6 – Друкована плата (з елементами, без елементів, без маркування верхній та нижній шар)

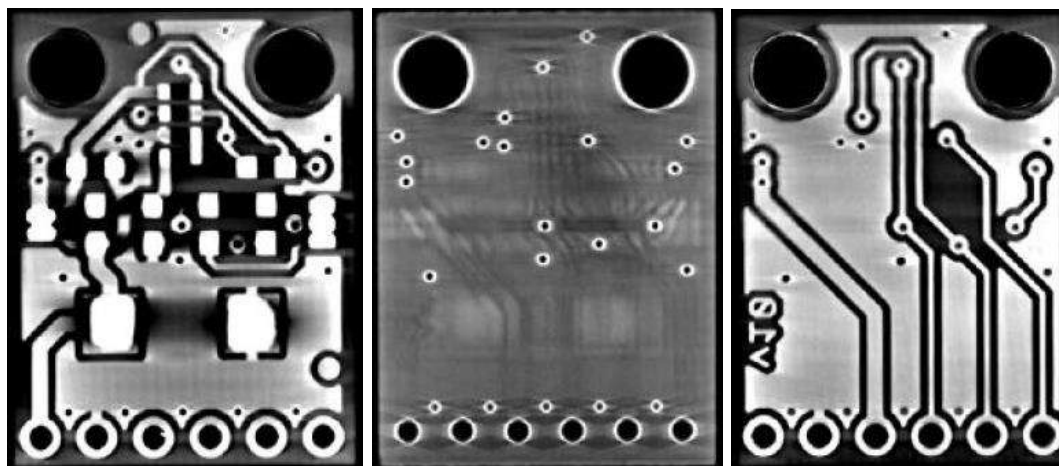


Рисунок 3.7 – Рентгенівські зрізи шарів друкованої плати

Зображення кожного шару друкованої плати не вирівнюються точно через процеси розбирання та створення зображень вручну. Тому нам потрібно відкоригувати всі зображення шару до вирівняних положень. Для досягнення цієї мети використовуються такі методи реєстрації зображень, як SIFT, SURF і RANSAC.

На першому кроці він виділяє точки інтересу та знаходить збіги між послідовними зображеннями на основі реалізації функції зіставлення. Алгоритм виявлення особливостей зображення SIFT застосовано в цьому розділі для пошуку незмінних масштабних точок інтересу. Потім ми використовуємо функцію OpenCV SIFT, щоб отримати дескриптори точок інтересу для подальшого використання на етапі зіставлення. Точки інтересу між двома зображеннями зіставляються на основі евклідової відстані між їхніми дескрипторами. Ми обчислюємо як найкращий збіг, так і другий найближчий збіг. Потім ми обчислюємо співвідношення (3.1), щоб виключити неузгоджені точки.

$$MatchRatio = \frac{bestDist}{secondBestDist} \quad (3.1)$$

Після завершення всіх вищезазначених кроків ми можемо отримати координати співставлених точок між двома послідовними зображеннями, як показано на рис. 3.8.

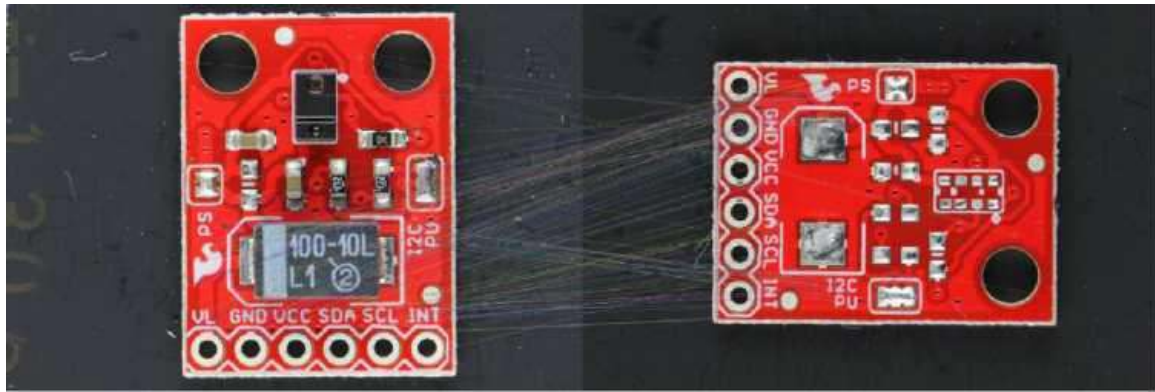


Рисунок 3.8 – Використання SIFT для пошуку збігів між двома зображеннями

Після цього ми робимо ще один крок далі і намагаємося знайти фундаментальну матрицю на основі зіставлених балів. RANSAC є одним із найвідоміших методів знаходження фундаментальної матриці. Він може виключати викиди та обчислювати матрицю, використовуючи лише внутрішні значення, таким чином гарантуючи вищу точність.

RANSAC можна виконати за такою процедурою:

- випадково оберається кілька відповідних точок і припускається, що ці точки є внутрішніми;
- встановлюється модель за допомогою цих пар точок;
- обчислюється кількість точок, які є інліерами (на цьому кроці використовується відстань Семпсона);
- повторіть кроки 1-3 і оновлюється фундаментальна матриця протягом кількох ітерацій;
- матриця з найбільшим внутрішнім відношенням вибирається як фундаментальна матриця

Ми встановлюємо зображення з компонентами як шаблон, а потім вирівнюємо вилучене зображення. Матриця гомографічного перетворення  $H$  обчислюється шляхом застосування відфільтрованих збігів RANSAC із сингулярним розкладанням (SVD) [12], як наведено в рівняннях 3.2 і 3.3.

$$[U, W, V] = svd(X) \quad (3.2)$$

$$H = U * W^{1/2} \quad (3.3)$$

де  $X$  — матриця відповідних точкових збігів,  
 $W$  — діагональна матриця, яка зберігає одновимірні власні значення,  
 $U$  і  $V$  — ортогональні матриці в лівій і правій частині  $W$  відповідно.

Після того, як ми обчислили гомографічну матрицю  $H$ , ми могли використати перспективну викривлену проєкцію (3.4), щоб виправити тестове зображення, як показано на рис. 3.9.

$$I' = HX = \begin{bmatrix} h_{00} & h_{01} & h_{02} \\ h_{10} & h_{11} & h_{12} \\ h_{20} & h_{21} & h_{22} \end{bmatrix} I \quad (3.4)$$

де  $I$  — тестове зображення,

$I'$  — вирівняне тестове зображення з гомографічною матрицею  $H$ .

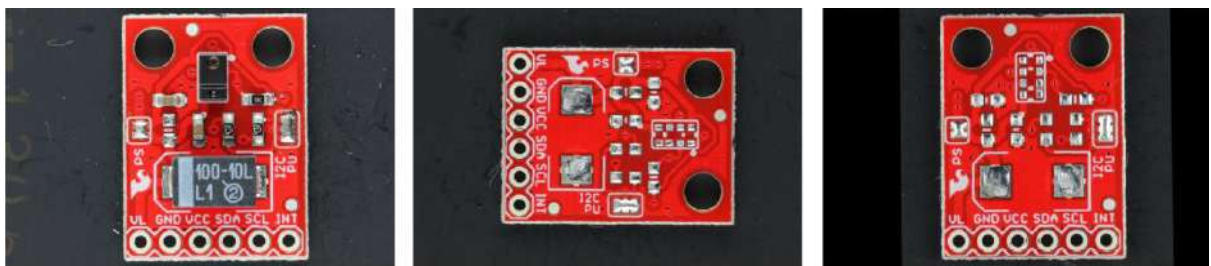


Рисунок 3.9 – Результат вирівнювання (шаблонне зображення, тестове зображення, виправлене зображення)

Оптичні кольорові зображення та рентгенівські зображення зазвичай містять нашу ціль (рисунок друкованої плати), а також непотрібну фонову інформацію. Щоб вирізати цікаву область, ми використовуємо сегментацію колірного простору, сегментацію щільності країв для аналізу характеристик друкованої плати.

Для рентгенівського зображення зрізу RoI — це металева дошка, яка має високу освітленість (енергію), і плата зазвичай знаходиться в центрі зображення. Ми обчислюємо сумарне значення пікселів для кожного рядка/стовпця від полів до центру зображення. Коли сума перевищує порогове значення, вона буде визначена як межа ROI. Поріг встановлюється як фіксована частка середнього значення всього зображення. Хоча для деяких шарів друкованої плати це, можливо, лише кілька металевих точок, які не можуть представляти інформацію про кордони, ми можемо вирішити цю проблему, вибравши найбільш схоже розташування та застосувавши його до меншин.

Для кольорового зображення ми використовуємо ту саму ідею, що й рентгенівські зображення, тоді як спочатку нам потрібно з'ясувати особливості області друкованої плати, щоб послабити вплив фону (у наших фото це чорна пластика дошка). По-перше, ми перетворюємо зображення RGB в індексований колірний простір. В індексованому колірному просторі маски генеруються за допомогою кластерів на основі різних кольорів. Таким чином, ми можемо розділити RoI і фон з обмеженим налаштуванням індексу, як показано на рис. 3.10.



Рисунок 3.10 – Сегментація ROI на основі кольорового індексу (плата з фоном, маска по кольору, виявлена плата)

Однак непросто точно сегментувати, коли колір фону близький до ROI. У конкретному випадку фоном зазвичай є цю кольорна плата багатошарової друкованої плати. Це призведе до помилки сегментації індексованого кольору. Щоб запобігти цій ситуації, ми встановлюємо попередні знання для перевірки результату попередньої сегментації. У цьому проекті співвідношення ширини та висоти

друкованої плати є попередньою умовою, яку можна обчислити за результатами сегментації рентгенівських променів. Якщо сегментація кольору не задовольняє цю умову, буде реалізовано сегментацію щільності країв. Шар РСВ містить складні схеми, які завжди мають дуже щільні краї. Таким чином, ми застосували розпізнавання країв Sobel для всього зображення, потім, як і вище, виявили велику суму кожного рядка та стовпця для визначення ROI РСВ, результат зображення проілюстровано на рис.3.11.

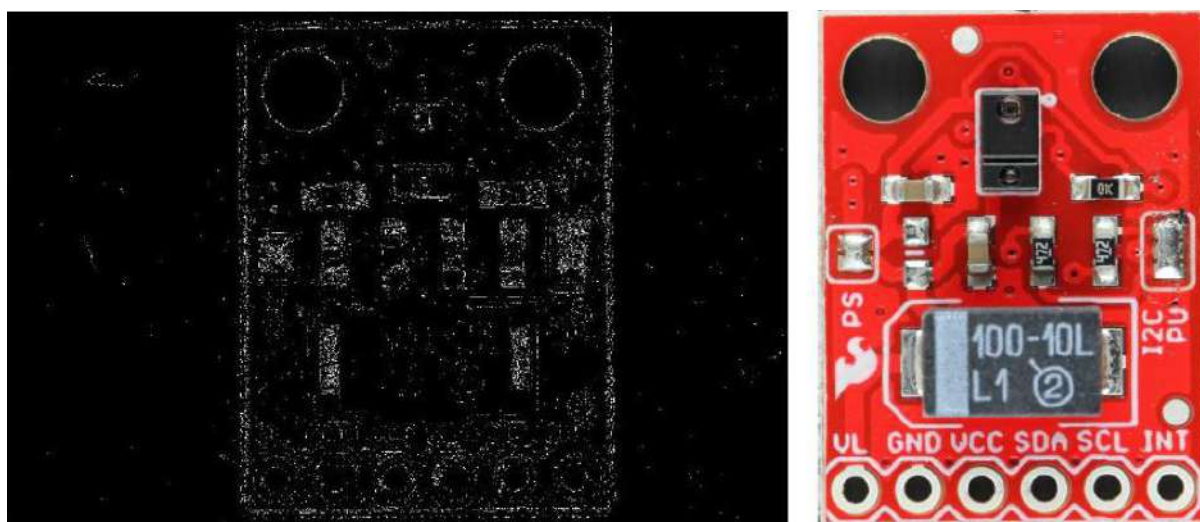


Рисунок 3.11 – Сегментація ROI на основі Sobel Edge

Компоненти та колодки були позначені окремо за допомогою потужного інструменту Python LabelImg2. Що стосується компонентів, ми поділяємо їх на 3 класи (резистор, конденсатор і мікросхема), позначені корпусом та назвою класу. Щоб підвищити точність виявлення, ми виявляємо металеву площадку за допомогою безкомпонентних зображень друкованої плати, з яких вручну видаляємо електронні компоненти перед отриманням зображення. LabelImg експортує файл мітки у форматі Pascal VOC, потім ми використовуємо онлайн-платформу Roboflow3 для перетворення необроблених зображень у навчену модель комп'ютерного зору. Roboflow може перетворювати зображення та файли міток у файли TFRecord і CSV для виявлення об'єктів Tensorflow. Під час генерації набору даних ми ділимо 70% на набір даних тренування, 15% на набір даних перевірки, а

решту на набір даних тестування. Зображення компонентів показано на рисунку 3.12.

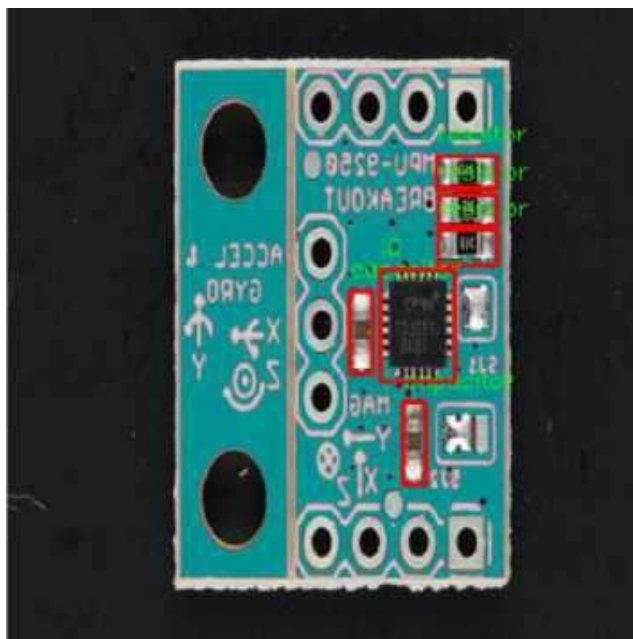


Рисунок 3.12 – Позначені компоненти в наборі даних плати

З обмеженою фізичною друкованою платою для надійної системи глибокого навчання необхідне розширення даних. По-перше, ми змінюємо колір плати, який є червоним для нашої справжньої друкованої плати, на блакитний, сірий, темно-синій, індиго, зелений, коричневий і білий. Ця зміна впроваджується шляхом заміни значення кольору в просторі RGB, як показано на рис. 3.13.



Рисунок 3.13 – Синтез нових зображення, змінюючи колір плати

Потім використовується обертання, щоб створити більше, хоча практичний досвід показує, що зображення друкованої плати завжди зберігає контур прямокутника, тому ми повертаємо їх лише на 90, 180 і 270 градусів. Крім того, ми

також повертаємо їх у вертикальному та горизонтальному напрямках. На останньому кроці ми додаємо гаусівський шум для випадкового вибору генерованих зображень, про які говорилося вище.

На рисунку 3.14 представлена повна архітектура швидшого алгоритму R-CNN. Перш за все, вхідні зображення з інформацією про мітки обмежувальної рамки пропускаються через попередньо навчену модель CNN. Для цього кроку ми використовуємо технологію передачі навчання, щоб посилити та прискорити процес навчання з обмеженим набором даних. Трансферне навчання надає досвідчені ваги, які були навчені з величезним набором даних. Ми можемо розглядати попередньо навчену модель як проміжний рівень у нашій користувацькій моделі CNN: рівень softmax з'єднується з попередньо навченим виходом CNN, а потім експортує визначену нами кількість класів. Наприклад, VGG-16 є популярною попередньо навченою моделлю CNN, її структура така, як показано на рис. 3.14.

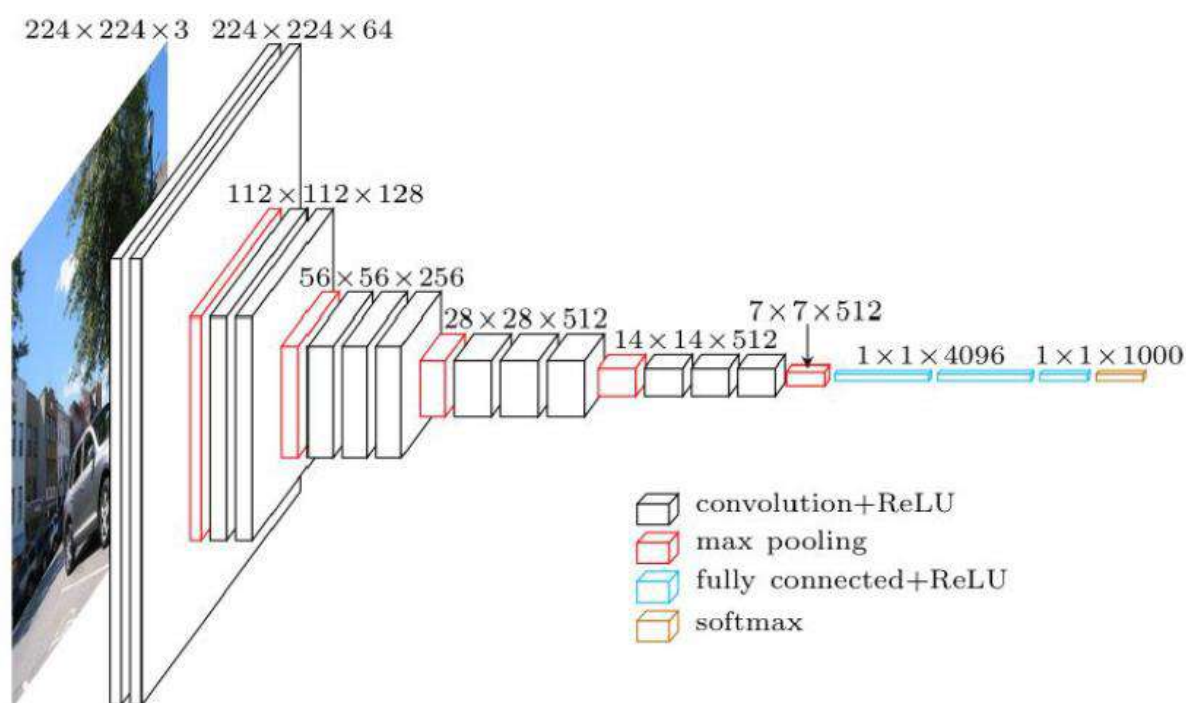


Рисунок 3.14 – Архітектура VGG-16

У нашому випадку вхід VGG-16 – це тензор  $224 \times 224 \times 3$ , а потім він проходить через згорткові шари. Нарешті виведемо карту об'єктів розміром  $256 \times 50 \times 37$ . Перетворення можна представити у вигляді рисунка 3.15.

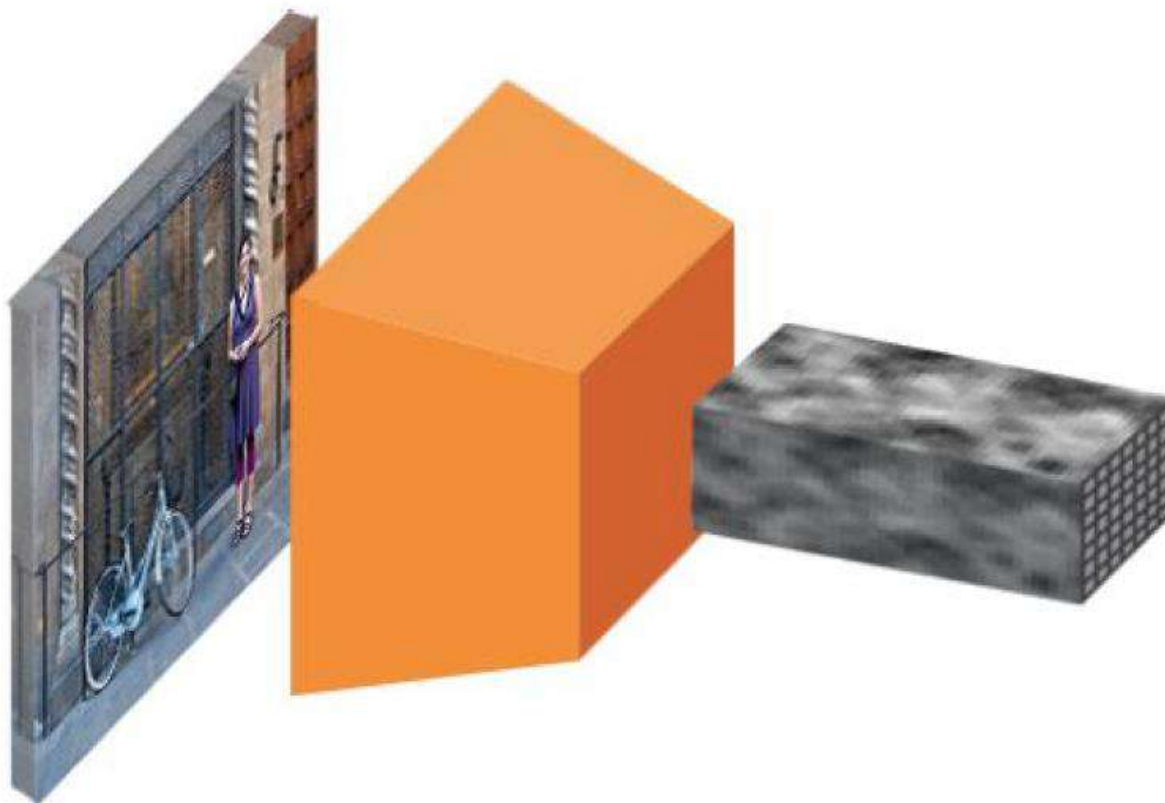


Рисунок 3.15 – перетворення від зображення до карти згорткових об'єктів

По-друге, RPN обчислюється за допомогою вихідної карти функцій CNN. З нашого попереднього прикладу, у кожному кадрі карти функцій VGG-i6 є  $50 \times 37$  точок. Ми розглядаємо кожну точку як явір, і кожен явір має різні співвідношення форми, а також розмір (ми можемо їх визначити). RPN ефективно реалізується повністю згортковим способом, як показано на малюнку 3.16. З архітектури RNP ми бачимо, що ми можемо отримати два прогнози для кожного прив'язки: один для бінарної класифікації (переднього плану чи фону), інший для регресії обмежувальної рамки (фактичний об'єкт).

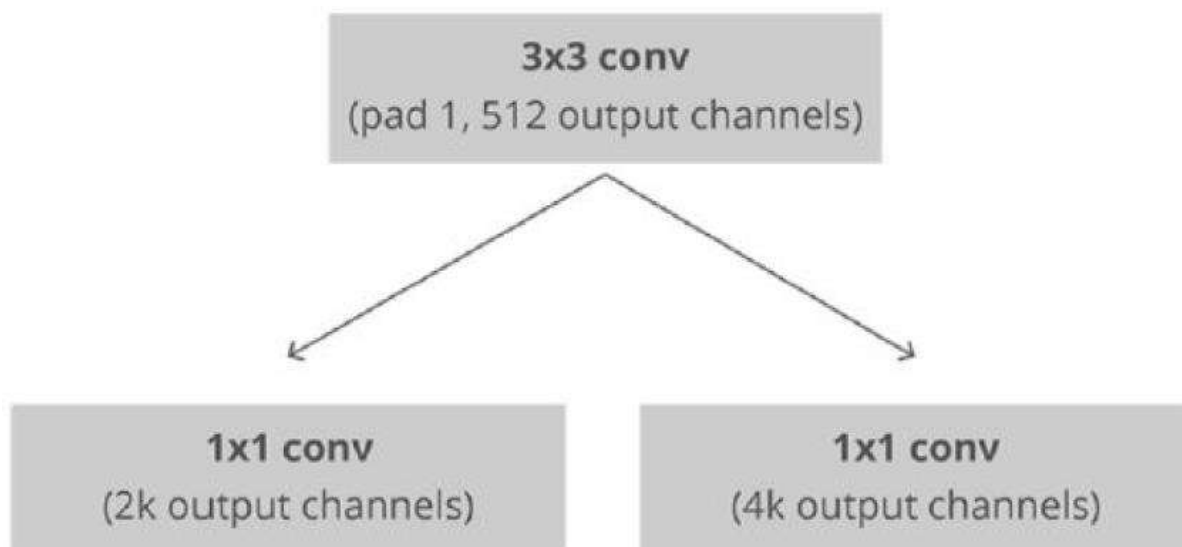


Рисунок 3.16 – Згорточна реалізація RPN

Після кроку RPN у нас є кілька пропозицій об'єктів без позначки класу. Карти згорткових функцій фіксованого розміру вирізаються шляхом об'єднання RoI, як на рис. 3.17. Потім його розплющують повністю з'єднаними шарами. Нарешті, місцеположення прямокутника фіксується функцією softmax для класифікації та лінійної регресії, як на рис. 3.18, фактично цей крок реалізує R-CNN із картами функцій фіксованого розміру.

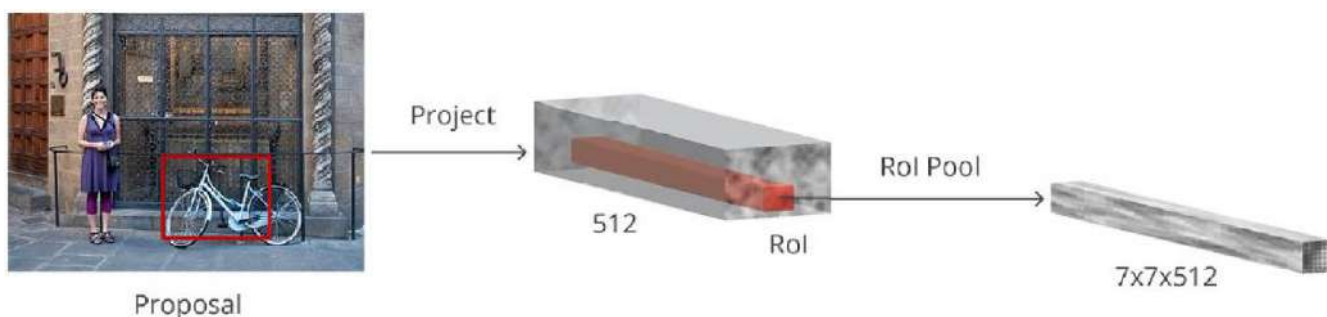


Рисунок 3.17 – Об'єднання регіонів інтересів

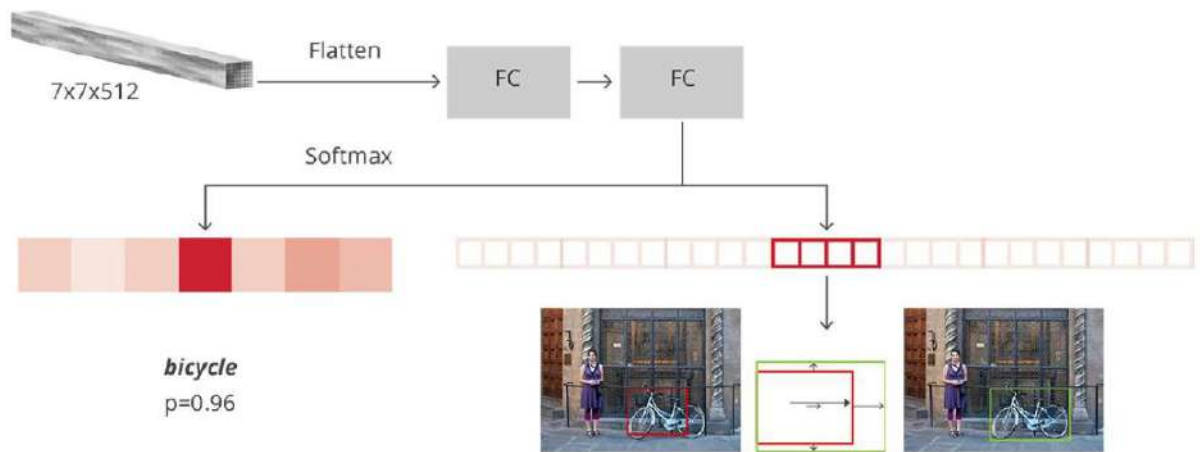


Рисунок 3.18 – Архітектура R-CNN [25]

Для оцінки наших алгоритмів використовуються значущі цифри. Показники точності та запам'ятовування є основними показниками для машинного навчання, які визначаються за допомогою істинно позитивних (TP), хибнопозитивних (FP), істинно негативних (TN) і хибно негативних (FN) у вигляді формул (3.5)-(3.7).

$$Accuracy = \frac{TP + TN}{TP + FN + FP + TN} \quad (3.5)$$

$$Recall = \frac{TP}{TP + FN} \quad (3.6)$$

$$Precision = \frac{TP}{TP + FP} \quad (3.7)$$

Для оцінки тестового набору даних вводиться середня середня точність (mAP) для вимірювання продуктивності моделі. Середня точність (AP) визначається рівнем точності та швидкістю пригадування, як у рівнянні:

$$AP = \int p(r)dr = \sum P(k)\Delta r(k) \quad (3.8)$$

де AP — це площа під кривою точності відкликання,  
 $p(r)$  — це точність при відкликанні  $r$ ,  
 $P(k)$  і  $r(k)$  — дискретний вираз.

Показник  $mAP$  є основним показником для оцінки ефективності моделі. Для  $C$  різних класів компонентів,  $mAP$  представляє середнє значення результату всіх класів у вигляді рівняння:

$$mAP = \frac{\sum_{i=1}^C AP_i}{C} \quad (3.9)$$

Виявлення компонентів за допомогою кластеризації K-Means

Контрольований метод машинного навчання потребує підготовки величезної кількості даних, що є життєво важливим для ефективності моделі навчання. У нашому проекті з обмеженими зображеннями друкованих плат Faster R-CNN складно виявити всі компоненти, особливо корпуси мікросхем мають різні форми та зовнішній вигляд.

Інформація про компонент – це різниця між зображенням поверхні друкованої плати та зображенням компонента. Ми можемо знайти розташування компонента, виконавши операцію XOR з цими двома зображеннями. Перед операцією XOR застосовується реєстрація зображень, щоб забезпечити їх попіксельне відображення. Операція XOR наведена в рівнянні (3.10).

$$dst(I) = src1(I) \oplus src2(I) \quad (3.10)$$

де  $dst(I)$  – це різницевий результат операції XOR,  
 $src1(I)$  і  $src2(I)$  – зображення з компонентами та без них.

Як ми можемо бачити на рис.3.19, отримане зображення підсвічує значення кольору в місці розташування компонента. Потім ми можемо помістити отримане зображення в кластер неконтрольованого машинного навчання для сегментації місця розміщення корпусу мікросхеми.

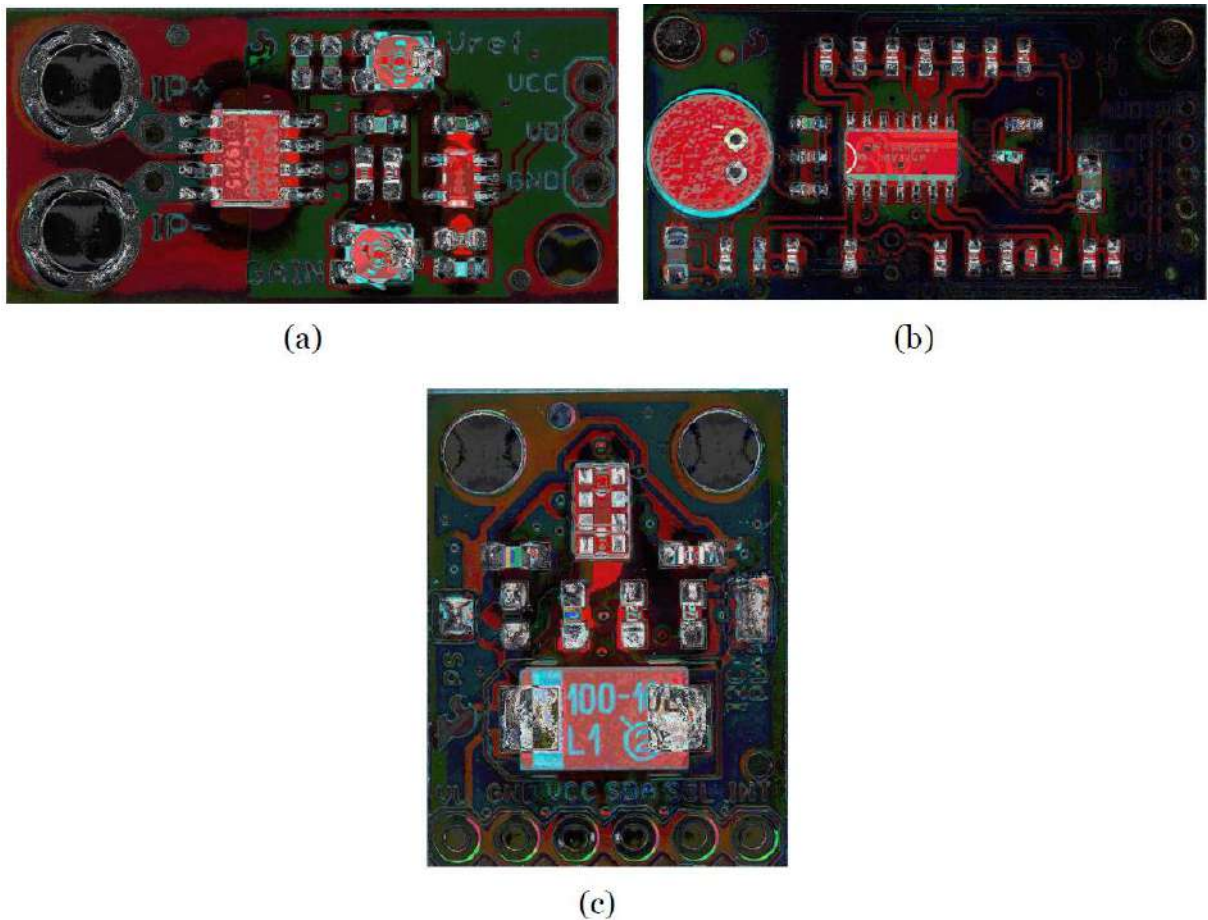
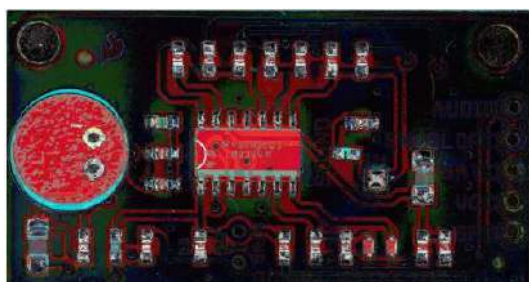


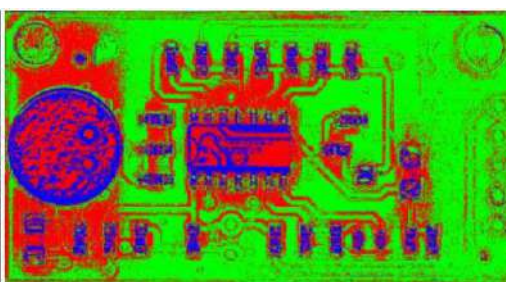
Рисунок 3.19 – Результат XOR (Кластеризація та сегментація)

Кластеризація К-середніх використовується в сегментації зображення XOR. К-означає кластеризацію, яка призначатиме кожному точці пікселя на зображенні точно одному з  $k$  можливих кластерів на основі подібності значення кольору.

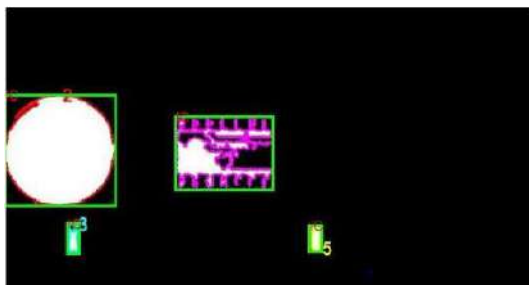
Для нашої задачі виявлення розташування корпусу мікросхеми ми застосували К-середні для групування зображення на три маски ( $k=3$ ). Як ми можемо бачити на рис. 3.20, ці важливі області згруповані з найвищим середнім рівнем сірого, потім ми виявляємо кожну пов'язану область і обрізаємо її квадратною рамкою. Ці площі є так званими IC RoI. Після того, як ми отримаємо інформацію про місцезнаходження складного корпусу мікросхеми, ми зможемо зануритися та ідентифікувати його металеві штирі.



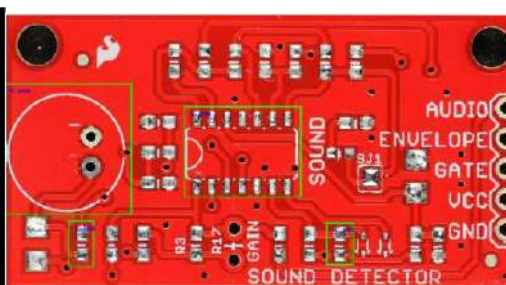
(a) Зображення XOR PCB



(b) K кластеризація з псевдокольоровою картою



(c) Область компонентів у бінарній масці



(d) Область компонента в зображенні, з видаленими компонентами

Рисунок 3.20 – Kmeans кластеризація

#### Виявлення контактної площадки компонента

На цьому кроці було отримано інформацію про колодки мікросхем, які є важливим роз'ємом для мікросхем у всій схемі. Ідентифікація металевих ніжок мікросхем вимагає сегментування кожної окремої площадки від компонента мікросхеми і визначення її розташування. Отримавши розташування корпусу мікросхеми, ми можемо отримати зображення без компонентів, а потім обрізати кожну область мікросхеми. Проста сегментація колірному простору може легко видалити фон. Досвідчене значення  $YCbCr$  для металевої площадки (припою) представлено в таблиці 3.1, тому ми встановлюємо ці пороги в її колірному просторі.

Таблиця 3.1 – Порогові значення припою в колірному просторі YCbCr

Канал	Пороговий діапазон
Y	[135, 255]
Cb	[120, 255]
Cr	[120,150]

Хоча фіксований поріг може бути нестабільним і надійним, коли змінюються умови освітлення та матеріал друкованої плати, у цій сегментації колірному простору важко ідентифікувати металеві штирі. Крім того, білий шовкограф є ще однією перешкодою для кольору. Через значну різницю між панелями та фоном K-Means, які ми представили вище, можуть вирішити цю проблему. На рис. 3.21 металеві штифти та інша інформація розділені на два кластери.

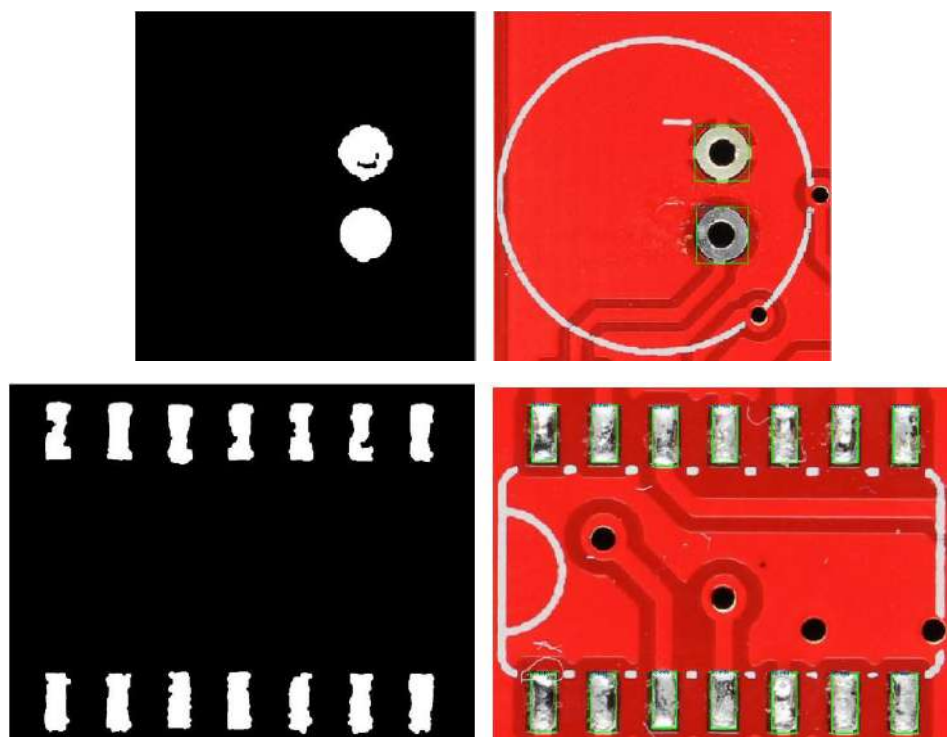


Рисунок 3.21 – Виявлення колодок компонента

Виявлення компонентів із відповідністю шаблону

Ми представили два методи машинного навчання, як зазначено вище. Через обмежений набір даних і певну якість зображення вони не можуть гарантувати високу точність виявлення. Для виділення схеми реальної друкованої плати

необхідно виявити якомога більше компонентів. В іншому випадку остаточна інформація про схему буде неповною або навіть неправильною. Ми застосовуємо зіставлення шаблонів зображень для виявлення інших складних компонентів, що залежить від ручної підготовки шаблонів компонентів.

#### Зіставлення кількох шаблонів

По-перше, у нашому проекті ми вручну обрізаємо електронні компоненти в набір даних, а потім робимо кожен шаблон із обертанням (90,180,270 градусів) і зміною масштабу (повторне масштабування до 0,5,0,8,1,2,1,5,2 разів) як розширення даних.

По-друге, для обчислення кореляційної карти було застосовано алгоритм ітераційного пошуку з прямокутним ковзаючим вікном над зображенням. Оцінка подібності кандидатської області (вікна) обчислюється шляхом порівняння з шаблонами в різниці інтенсивності пікселів і кореляції, де шаблони є класами компонентів у нашому проекті. Щоб пришвидшити цей процес пошуку, приблизне положення компонента відоме як попередня умова.

У той час як результати пошуку з кількома шаблонами спричиняють проблему накладання, як показано на рис. 3.22. Для цього завдання застосовується немаксимальне придушення (NMS) на основі визначеного користувачем ступеня перекриття області на основі ступеня перекриття між сусідніми обмежувальними рамками. NMS обчислює співвідношення між площею IoU для пари: якщо вони сильно перекриваються, співвідношення буде близьким до 1; якщо перекривання невелике, співвідношення буде прагнути до 0. Таким чином можна ефективно усунути накладення того самого об'єкта.

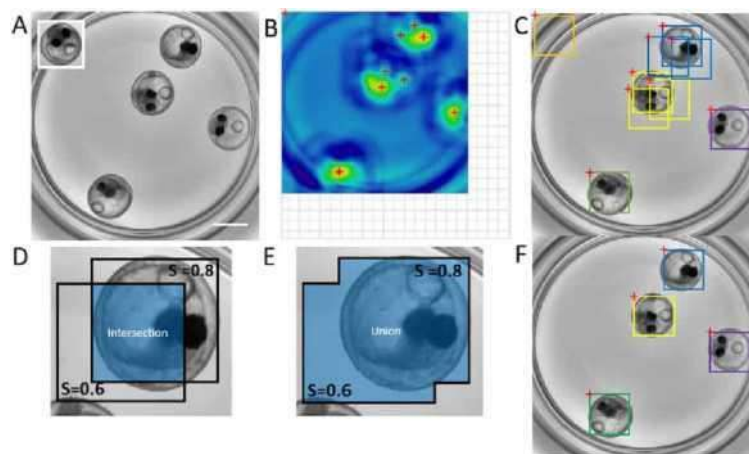


Рисунок 3.22 – Накладення відповідності за кількома шаблонами

## 4 ОСОБЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ ЗАПРОПОНОВАНИХ АЛГОРИТМІВ

### 4.1 Корекція зображення та врахування внутрішніх шарів

Реальних зображення друкованих плат можуть бути зібрані не на стандартному рівні горизонту/вертикалі, як наші шаблонні зображення які отримувалися на плоскому чорному пластиковому полі. Це спричинить помилку зіставлення шаблону через значну різницю в кореляційній карті. Ми пропонуємо метод корекції, заснований на техніці зіставлення шаблонів і реєстрації зображень. По-перше, ми застосовуємо кілька шаблонів, що відповідають оригінальному тестовому зображенню. Результат відповідності може бути недостатнім, оскільки ми обираємо лише компонент, який отримав найвищу оцінку подібності. Потім ми використовуємо метод реєстрації зображення, щоб обчислити матрицю гомографічного перетворення  $H$ . Оригінальне зображення можна виправити за допомогою цієї матриці  $H$  за допомогою перспективного викривлення. Для цього процесу виправлення наведено приклад на рис. 4.1. Коли зображення виправлено, ми знову застосовуємо зіставлення кількох шаблонів, і тоді це може вивести точніше виявлення та локалізацію компонентів.

Для багатошарової друкованої плати кожен внутрішній шар є металевим, надрукованим як провідний матеріал (мідь). Таким чином, сегментація металу є критично важливим процесом для аналізу та реконструкції схеми. Ми використовуємо кольорове знімання шарів і рентгенівське томографічне зображення для пошуку металевих ділянок.

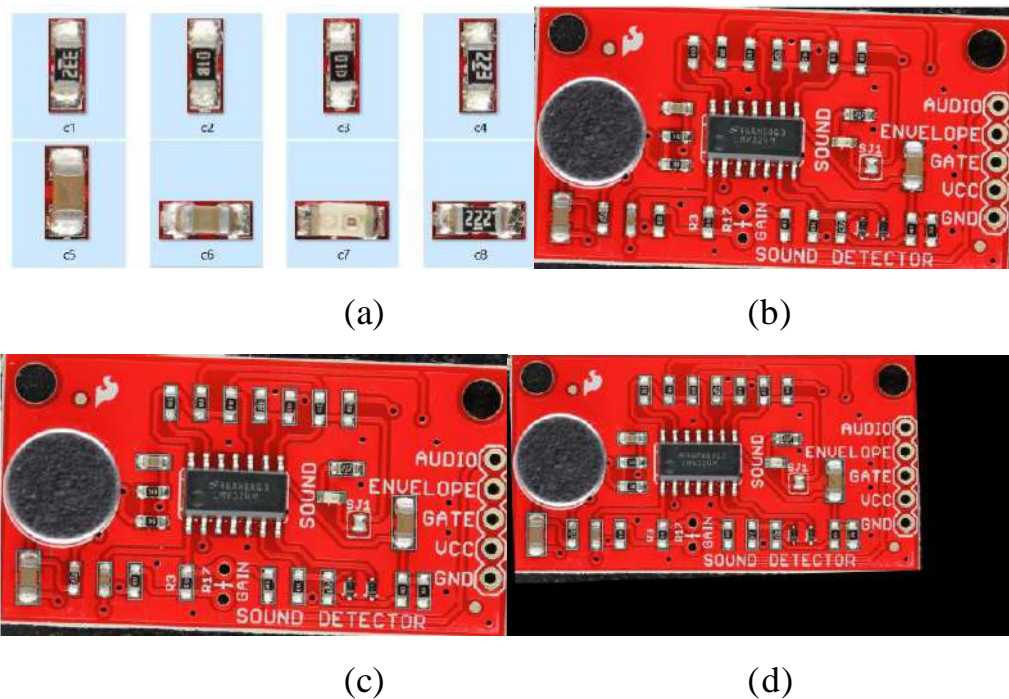


Рисунок 4.1 – Відповідність шаблонів кількох компонентів  
(а – підготовлені шаблони компонентів, б – повернена та масштабована плата,  
с – плата з виявленими шаблонами, d – результати виявлення шаблонів на  
скорегованій платі)

Метал має унікальну особливість у колірному просторі, для наших конкретних зображень з видаленням шару друкованої плати, колір міді з відносно високим значенням освітлення. Ми досліджуємо основні колірні простори, такі як RGB, HSV і YCbCr. Нарешті, ми вибираємо колірний простір YCbCr для сегментації металеві частини (мідь), оскільки її особливості є значними в освітленні (Y) і червоному каналі (Cr). Порогові значення слід скоригувати для спеціальних завдань. У цьому проекті ми отримуємо досвідчене порогове значення з експериментів, як представлено в таблиці 4.1. Результат сегментації показано на рисунку 4.2.

Однак після сегментації за кольором воно не ідеальне, у сегментованому зображенні багато шуму, дірок і непотрібної інформації. Ми застосовуємо математичну морфологію для усунення шуму та посилення металевих областей, операція відкриття та закриття введена на цьому кроці, щоб зберегти та покращити металеві області.

Таблиця 4.1 – Порогові значення пайки в колірному просторі YCbCr

канал	Пороговий діапазон
Y	[150, 255]
Cb	[0, 255]
Cr	[140, 255]

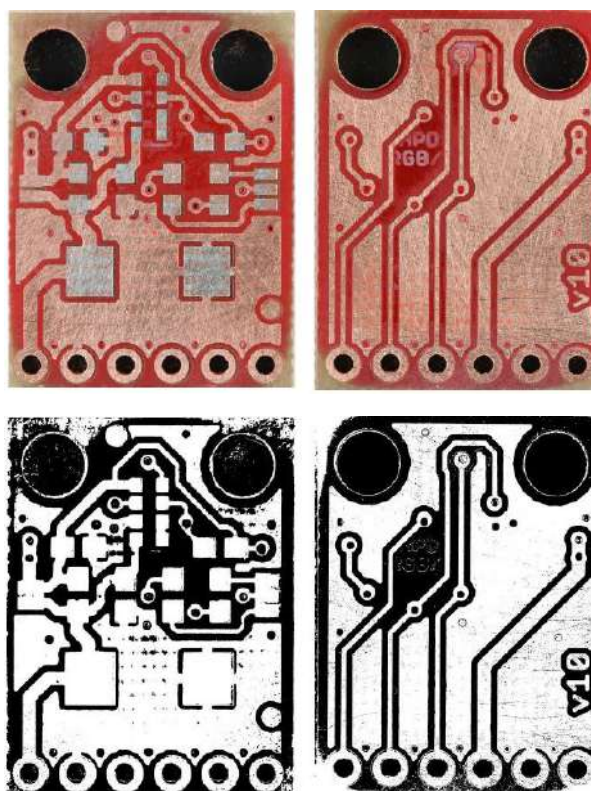


Рисунок 4.2 – Сегментація кольорів для плати з двох боків

Зрізи КТ-моделі повинні бути ідеальним і надійним рішенням. Водночас через роздільну здатність комп'ютерної томографії та обчислення реконструкції з втратами деяка інформація втрачається в нашому конкретному завданні. На рис. 4.3 представлено три рентгенівські зрізи різної глибини для одного шару друкованої плати. Як ви можете порівняти із зображенням, зробленим вручну, деякі металеві частини втрачаються на рентгенівських зрізах. Незважаючи на те, що ми можемо легко знайти металеві частини на зображенні з розшаровуванням за допомогою зорової системи людини, комп'ютеру важко розрізнити ці тонкі лінії та точки з обмеженою роздільною здатністю та шумом. Крім того, коли інженери вручну

зривають ці шари, завжди залишається подряпина, яка створює проблеми в нашій обробці зображень для сегментації металу.

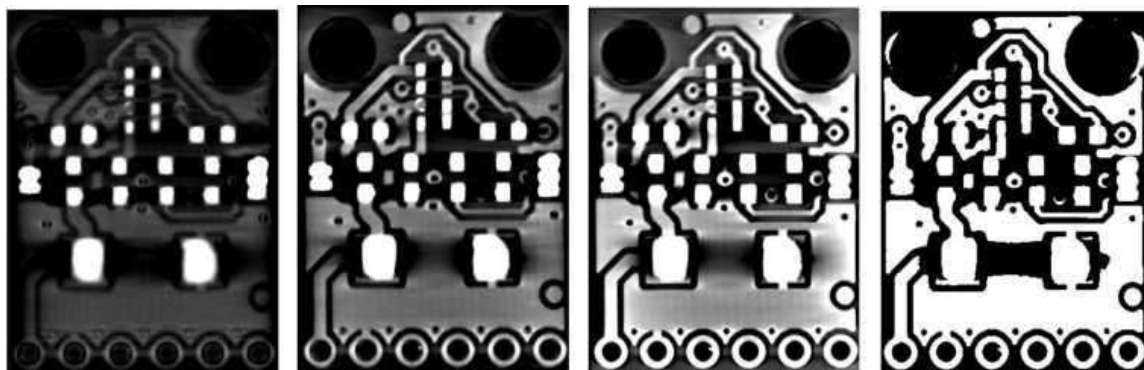


Рисунок 4.3 – Покращення рентгенівського зрізу

Щоб вирішити цю проблему, ми покращуємо якість шарового зображення за допомогою багатоканального злиття. Це проста операція, щоб використати ресурси, які ми маємо. Ми змінюємо розмір барвистого зображення, знімаємо шари та застосовуємо сегментацію колірного простору. Потім ми об'єднуємо ці зображення на піксельному рівні, щоб покращити металеву область, як на рис. 4.4.

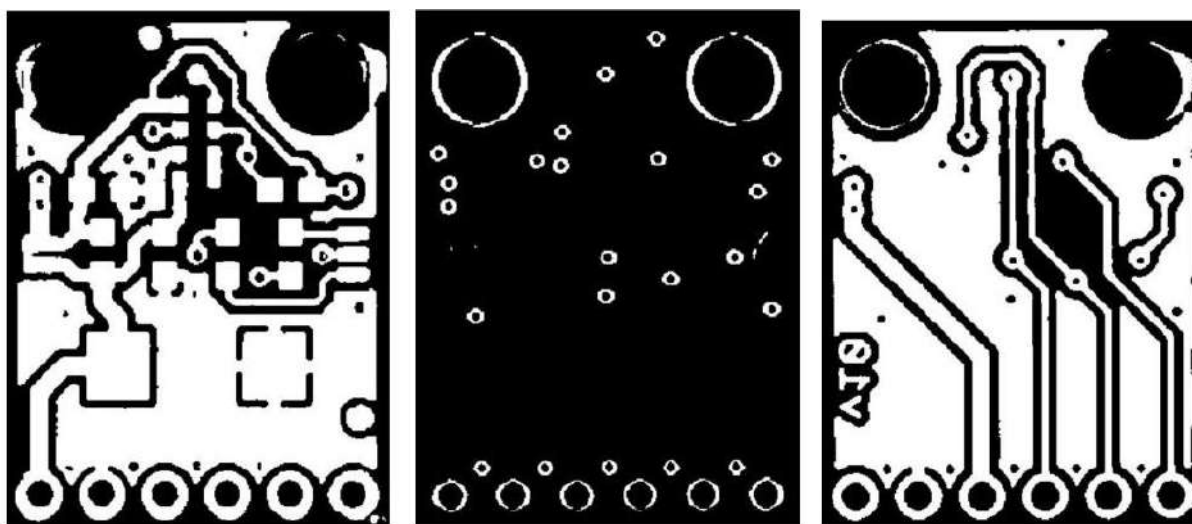


Рисунок 4.4 – Результат багатоканального покращення

У цьому розділі наведено діаграми робочого процесу, щоб представити реалізацію цього проекту. Є дві основні частини нашої роботи: виявлення компонентів і витяг внутрішньої інформації. Ми докладніше пояснюємо запропоновані нами методи, як-от виявлення К-середніх.

## 4.2 Виявлення компонентів друкованої плати в реальних умовах

Процес виявлення компонентів представляє процеси виявлення поверхневого шару. У ньому прямо пояснюється, як різні методи виявлення компонентів працюють разом і покращують базу даних для набору навчальних даних машинного навчання та відповідних шаблонів. Як ми згадували раніше, виявлення компонентів є першим етапом вилучення інформації про схему, і це важливо, оскільки воно впливає на наступні процеси. Тому ми комбінуємо різні методи, щоб забезпечити точність визначення компонентів.

На початку потрібно вручну створити позначений компонентний набір даних, щоб ініціювати швидке виявлення R-CNN. При виявленні компонентів вхідні зображення включають кольорове зображення поверхні із зображенням поверхні компонента та видаленого компонента для тієї самої друкованої плати. Після попередньої обробки вирівняні ділянки друкованої плати поміщаються в запропоноване визначення K-середніх. У виявленні K-середніх знаходять переважно корпуси мікросхем, які мають значні особливості в зображеннях XOR, а успішно виявлені компоненти вирізаються та додаються до бази даних. Чорні прямокутники заміняють виявлені компоненти в зображенні з компонентами, а потім у вхідному зображенні для Faster R-CNN. Нейронна мережа навчається з попередніми даними в базі даних, як виявлення K-середніх; успішні результати виявлення будуть зворотним зв'язком для покращення бази даних. Щоб гарантувати кінцевий результат, як останній процес застосовується мультишаблон, який використовує шаблони з бази даних і може потребувати створення шаблонів для конкретних завдань вручну.

Ми запропонували метод виявлення K-середніх, який використовує різницю між зображеннями з компонентами та з видаленими компонентами. Після K-mean кластеризації виявлені області обрізаються для подальшого виявлення металевих прокладок, де K-mean кластеризацію буде застосовано знову або використано кольорову сегментацію для швидкого виявлення. Для кожної друкованої плати

параметр  $k$  визначається шляхом пошуку сітки, а інші параметри також налаштовуються відповідно до конкретних умов зображення.

Із системи отримання зображень ми зібрали 7 зображень друкованої плати з роздільною здатністю 5184 x 3456, а потім обробили їх.

Ми вручну вирізали кожен компонент із оригінальних зображень друкованої плати, а потім позначили 4 різними тегамі: резистор, конденсатор, мікросхема та металеву панель. Для кожного класу є 30 зразків, які потім розділені на 25 і 5 для навчання та тестування відповідно. Три різні попередньо підготовлені моделі CNN (VGG-16, Inception V3 і Densent-169) використовуються окремо для навчання передачі через такий обмежений набір даних.

Розміри вхідних зображень змінено до 224 x 224 x 3 для відповідності згортковому шару. Тим часом ми визначаємо прив'язку для пошуку області, три розміри прив'язки для виявлення компонентів [32,64,128], для виявлення металевих прокладок – [16,32,64] встановлюємо співвідношення прив'язок як 1 : 1,  $\sqrt{2}$  : 1 і 1 :  $\sqrt{2}$ . Параметр Configure оптимізовано з досвідом [5]. Ми встановлюємо 40 епох і 1000 партій для кожної епохи. Ці параметри повинні налаштовуватися для конкретного зображення та цілі.

Існує 2 типи функцій втрат: функція втрат журналу для класифікації та функція втрат Smooth Li для регресії обмежувальної рамки в RPN, як пояснюється у рівняннях (4.1) і (4.2) відповідно.

$$L_{cls}(p_i, p_i^*) = -\log[p_i^* p_i + (1 - p_i^*)(1 - p_i)] \quad (4.1)$$

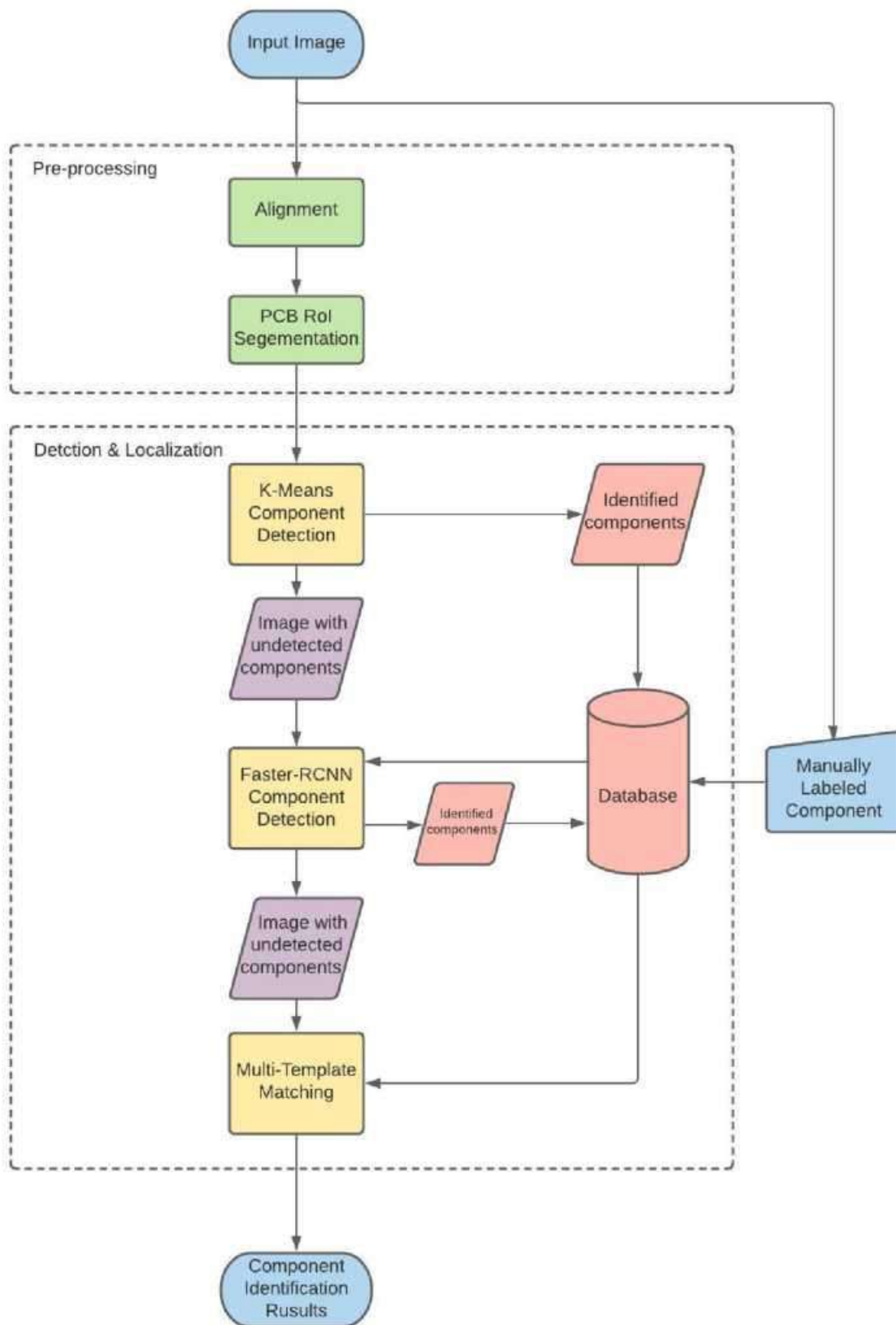


Рисунок 4.5 – Робочий процес виявлення компонентів

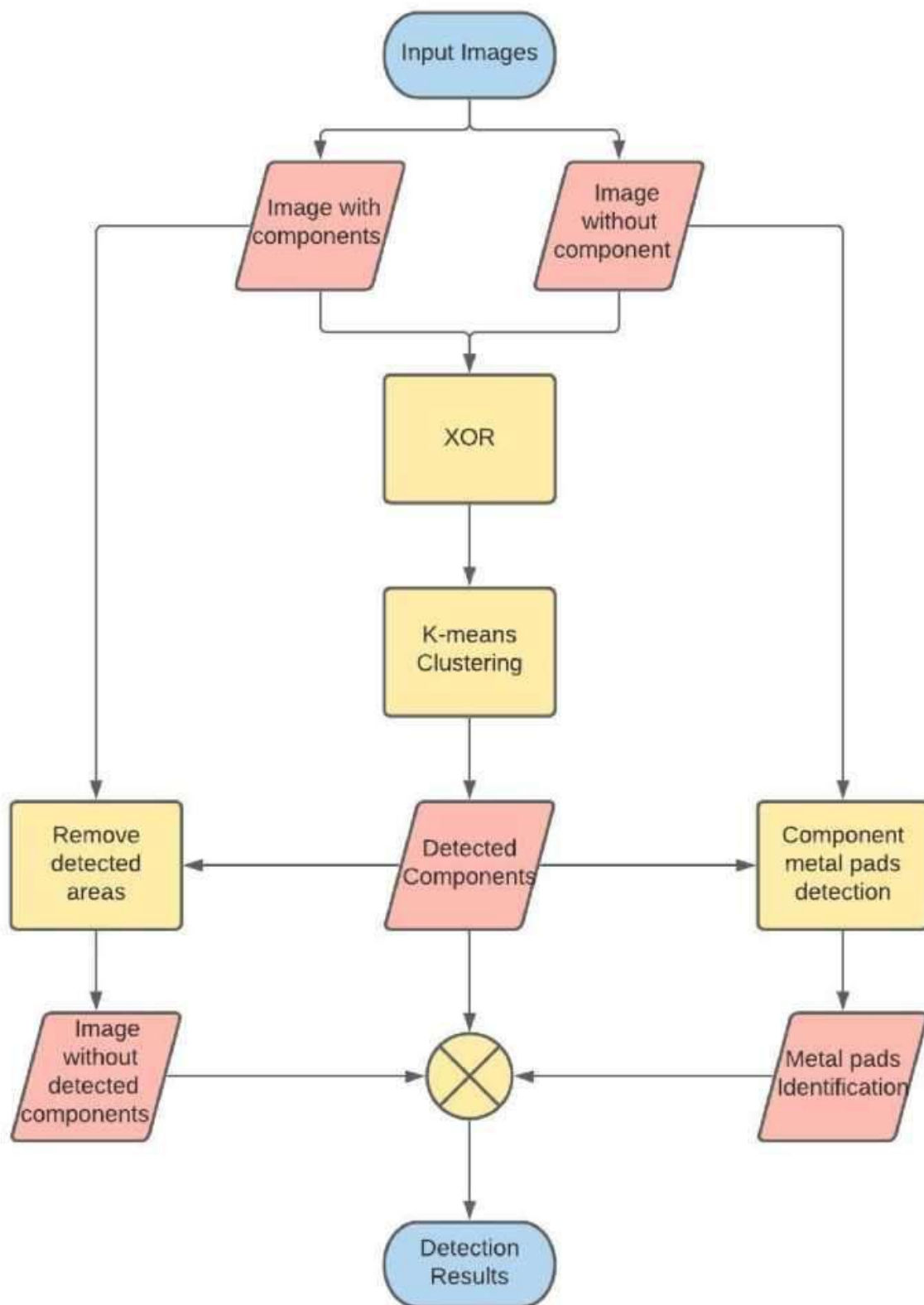


Рисунок 4.6 – Робочий процес виявлення К-середніх

Де  $p_i$  — цільовий клас, а  $p^*$  — фоновий клас.

$$L_{reg}(t_i, t_i^*) = \text{smooth}_{L_1}(t_i - t_i^*) = \begin{cases} 0.5(t_i - t_i^*)^2 \times \frac{1}{\sigma^2} & \text{if } |t_i - t_i^*| < \frac{1}{\sigma^2} \\ |t_i - t_i^*| - 0.5 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4.2)$$

де  $t_i$  — вектор розташування, який представляє прогнозований зсув прив'язки в RPN;

$t^*$  — той самий розмірний вектор, що й  $t_i$ , і це практичне зміщення порівняно з наземною правдою.

Загальна функція втрат обчислюється за допомогою  $L_{cls}$  і  $L_{reg}$ , як показано у рівнянні (4.3).

$$L_{total}(p_i, t_i) = \frac{1}{N_{cls}} \sum_i L_{cls}(p_i, p_i^*) + \lambda \frac{1}{N_{reg}} \sum_i p_i^* L_{reg}(t_i, t_i^*) \quad (4.3)$$

Як кінцевий детектор, мультишаблонне зіставлення надійне та надійне з доповненням вручну. Робочий процес 4.5 пояснює, як працює багатошаблонне зіставлення з оберненим зображенням. Ми застосовуємо запропонований метод зіставлення двічі: перше зіставлення намагається знайти одного найкращого кандидата, який отримує найвищу оцінку відображення подібності; потім цей кандидат вирізається для обчислення матриці перетворення гомографії; як тільки ми отримали матрицю, вхідне зображення можна було виправити, щоб вирівняти наші шаблони на тому самому рівні горизонту та в тому ж масштабі розміру; нарешті, ми знову застосовуємо зіставлення кількох шаблонів до виправленого зображення, це може покращити ефективність виявлення. Поріг оцінки кореляції становить 0,70, що є досвідченим налаштуванням параметра для наших конкретних завдань.

### 4.3 Отримання внутрішнього з'єднання друкованої плати

Витяг внутрішньої інформації відрізняється від виявлення компонентів. Ми використовуємо методи обробки зображень, щоб сегментувати провідні мідні частини в кожному внутрішньому шарі на цьому етапі, а потім знайти зв'язок між сусідніми шарами.

Робочий процес 4.8 показує три кроки цього етапу. По-перше, ми сегментуємо металеву частину з кольорового відстроченого зображення та рентгенівських зрізів, відповідно, де застосовуються методи сегментації колірному простору та адаптивної бінаризації. Об'єднання зображень із голосуванням більшості поєднує зображення з іншого каналу, що покращує шар

Загальна функція втрат обчислюється за допомогою  $Lds$  і  $Lreg$ , як показано у рівнянні (4.3).

Металева (провідна) інформація. Ми обчислюємо перекриття сусідніх шарів, де частини мають перекриття, що означає їх з'єднання. Таким чином можна отримати інформацію про багаторівневе з'єднання.

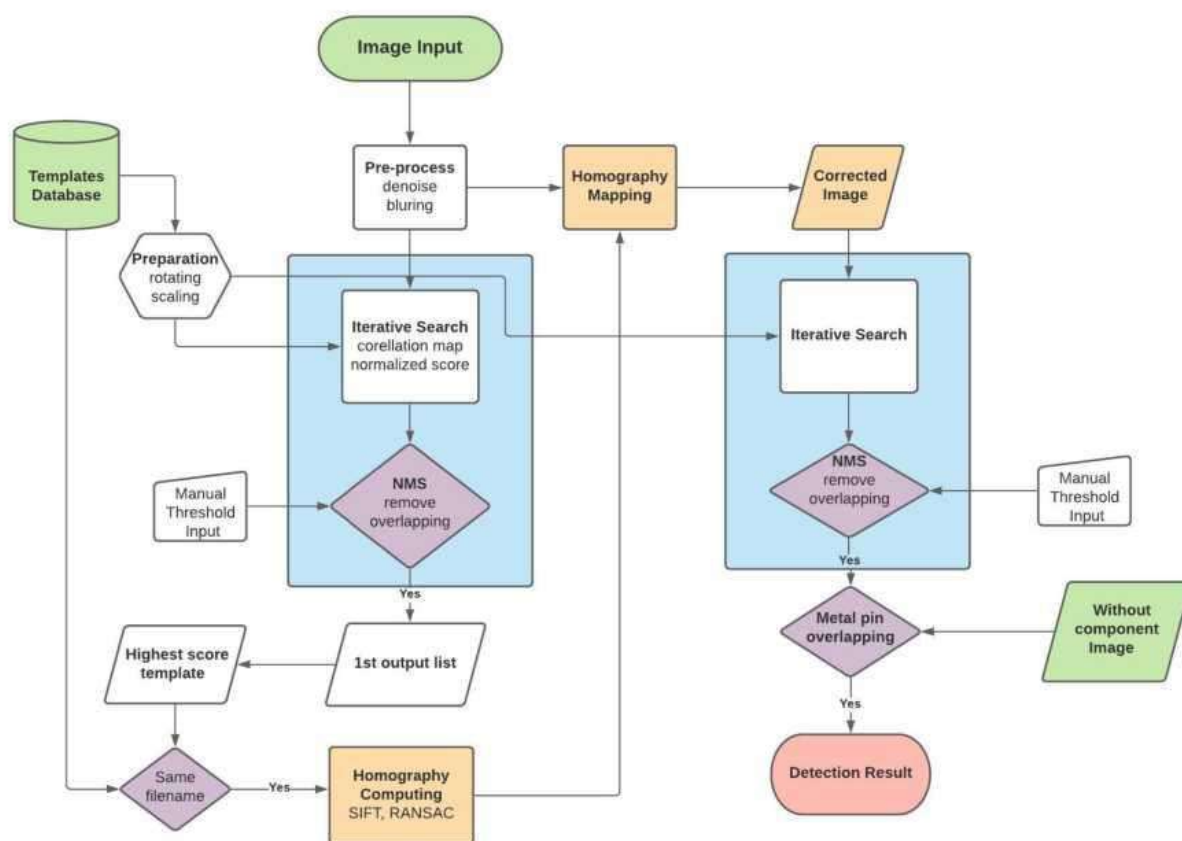


Рисунок 4.7 – Робочий процес зіставлення кількох шаблонів

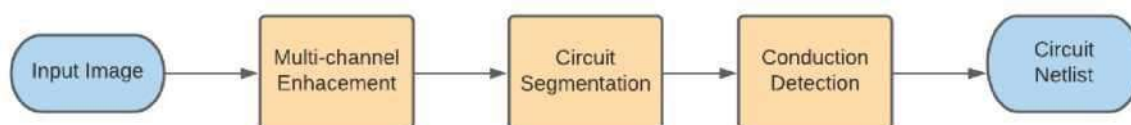


Рисунок 4.8 – Робочий процес вилучення внутрішнього з'єднання

### Результати та оцінка

Для швидшого виявлення R-CNN і K-середніх ми ілюструємо аналіз навчання та обговорення результатів. Зіставлення кількох шаблонів і з'єднання внутрішніх схем є доповненнями в цьому проекті. Ми представляємо зображення виявлення як результати обговорення їх ефективності.

#### 4.4 Швидке виявлення R-CNN

Для цього методу керованого машинного навчання ми показуємо аналіз кожного процесу та порівнюємо продуктивність різних моделей попереднього навчання.

Обмежена кількість зображень друкованих плат є найбільшою проблемою для керованого машинного навчання. Як зазначено в 3.3.1, ми застосували доповнення даних для 4 класів у цьому проекті, результат доповнення показано в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 – Кількість зразків із 4 класів у наборі навчальних даних

Клас	Оригінальний номер	Розширене число
Резистор	305	1220
Конденсатор	248	992
мікросхема	81	324
Контакти	1805	7220

Щоб візуалізувати процес навчання, ми будемо 3 лінійні діаграми загалом для 40 епох: середнє число обмежувальних прямокутників від RPN, які перекривають наземні коробки істинності, точність класифікатора для обмежувальних рамок від RPN (рис. 4.9) та лінійну діаграму втрат (рис. 4.10), які включають: класифікатор втрати RPN, регресію втрати RPN, класифікатор втрати детектора, регресію детектора втрати та загальну втрату. Ми встановили 40 епох і 1000 партій для кожної епохи.

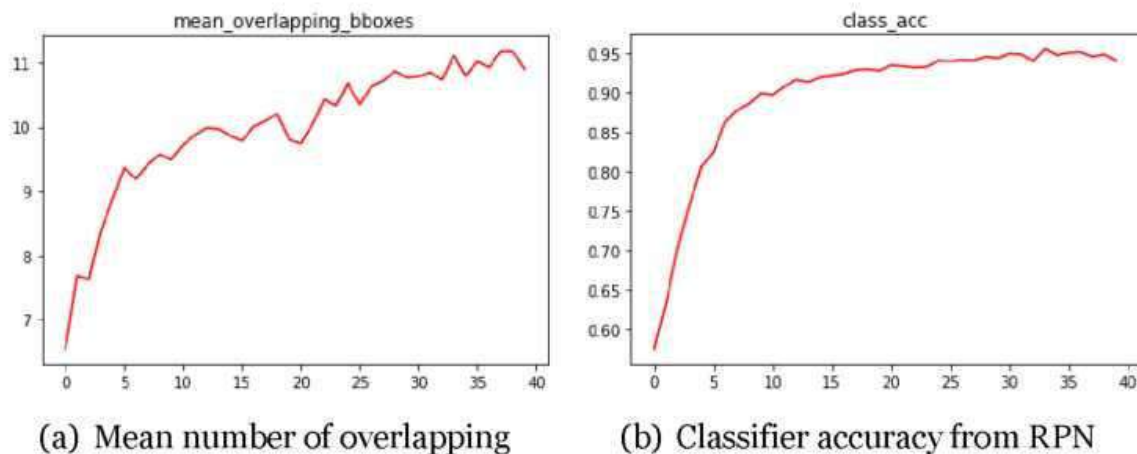


Рисунок 4.9 – Аналіз навчання для компонента.

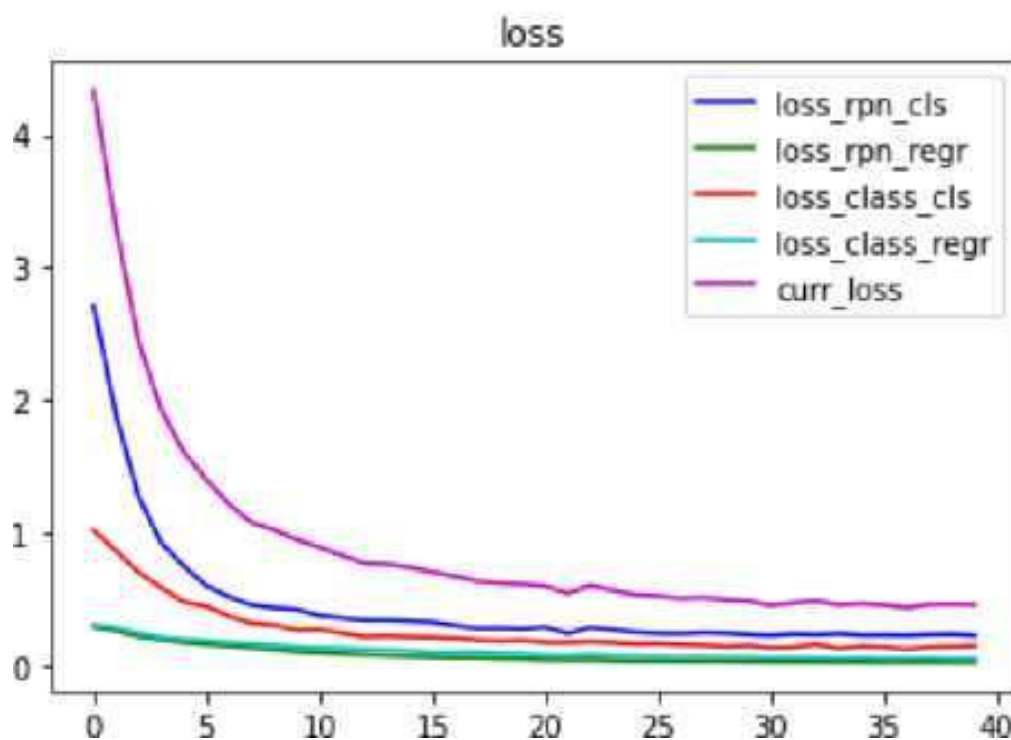


Рисунок 4.10 – Загальна втрата навчання для компонента

Як бачимо з наведених вище цифр, ці втрати швидко зменшувалися, наближаючись до нуля в епохи перших десятиліть. Водночас точність класифікатора значно зростає в цей період, а потім повільно зростає до 95% за останні 30 епох. Для середнього числа квадратів, що перекриваються між RPN і базовою правдою, воно зросло до 12 за 15 епох, а потім зберігає помірні коливання.

Загальна втрата знижується з 6,63 до 0,32, вона значна в перші 20 епох. Це прийнятний результат для обмежених даних із 40 тисячами пакетів.

Для виявлення металевих контактів лінійні діаграми мають схожі тенденції, і ми розміщуємо тут дві ключові цифри, як показано на рис.4.11.

Що стосується локалізації та розпізнавання компонентів, mAP представляє продуктивність для різних моделей. У нашому експерименті ми використовували три попередньо підготовлених моделі: VGG-16, Inception V3 і Densent-169. Ці результати наведено в таблиці 4.3. У порівнянні алгоритм Faster R-CNN із VGG-16 має найкращу продуктивність як для даних компонентів, так і для даних про металеві колодки.

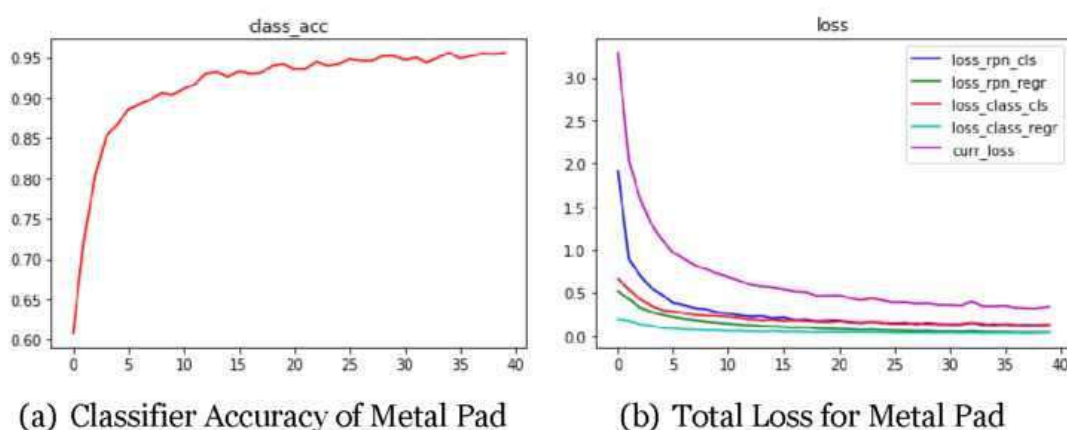


Рисунок 4.11 – Аналіз навчання для Metal Pad

Таблиця 4.3 – Результати швидкого R-CNN з іншою попередньо навченою моделлю

Набір даних	Попередньо навчена модель	mAP
компоненти	VGG — 16	71.2%
компоненти	Inception V2	63.4%
компоненти	Densent — 169	62.7%
Металева підложка	VGG — 16	69.4%
Металева підложка	Inception V2	62.6%
Металева підложка	Densent— 169	58.7%

Хоча компоненти мікросхем значно відрізняються на різних друкованих платах як за формою, так і за розміром, що спричинило проблеми з їх виявленням, зазвичай на зображенні друкованої плати є лише один або два компоненти мікросхем. Крім того, мікросхема має більший розмір, ніж інші компоненти; його згортка повинна бути досить помітною.

## ВИСНОВКИ

Магістерська робота спрямована на отримання інформації про схему із зображень друкованої плати. В роботі ми зосередилися на виявленні електронних компонентів і з'єднанні внутрішніх шарів. Була застосовано передові методи виявлення об'єктів і запропонована стійка генеративна система, яка може використовувати результат для покращення навчальної бази даних класифікації зображень електронних компонентів.

Запропонована нами обробка зображень друкованої плати не адаптується автоматично до різної якості зображення, як-от умови освітлення, проблеми фону та тіні компонентів. Хоча в реальних галузевих випадках важко забезпечити, щоб усі вхідні дані були уніфіковані в стандартній вимозі.

Існують різні компоненти для виробництва різних друкованих плат. Наразі ми маємо лише обмежені дані для нашого конкретного завдання. Навчальний набір даних машинного навчання потрібно розширити більшою кількістю зображень компонентів реального світу.

Можна прийти до висновку, що отримання інформації про схему із зображень реальних друкованих плат є проблемою в промисловості виробництва електроніки. Ці зображення зазвичай містять різні компоненти та багато подряпин за фізичним складом.

## ПЕРЕЛІК ДжЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Herchenbach, D., Li, W., and Breier, M. (2013). Segmentation and classification of THCs on PCBAs. In IEEE International Conference on Industrial Informatics, pages 59-64.
2. Koch, T., Breier, M., and Li, W. (2013). Heightmap generation for printed circuit boards (PCB) using laser triangulation for pre-processing optimization in industrial recycling applications. In IEEE International Conference on Industrial Informatics, pages 48-53.
3. Leutenegger, S., Chli, M., and Siegwart, R. Y. (2011). BRISK: Binary robust invariant scalable keypoints. In IEEE International Conference on Computer Vision, pages 2548-2555.
4. Li, W., Esders, B., and Breier, M. (2013). SMD segmentation for automated PCB recycling. In IEEE International Conference on Industrial Informatics, pages 65-70.
5. Rublee. E., Rabaud. V., Konolige. K, and Bradski. G. (2011). ORB: an efficient alternative to SIFT or SURF. In IEEE International Conference on Computer Vision, pages 2564-2571.
6. Van De Sande. K. E., Gevers. T., and Snoek. C. G. (2010). Evaluating color descriptors for object and scene recognition. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 32(9): 1582—1596.78
7. Lu, H.; Mehta, D.; Paradis, O.P.; Asadizanjani, N.; Tehranipoor, M.; Woodard, D. FICS-PCB: A Multi-Modal Image Dataset for Automated Printed Circuit Board Visual Inspection. IACR Cryptol. ePrint Arch. 2020, 2020, 366.
8. Botero, U.J.; Wilson, R.; Lu, H.; Rahman, M.T.; Mallaiyan, M.A.; Ganji, F.; Asadizanjani, N.; Tehranipoor, M.M.; Woodard, D.L.; Forte, D. Hardware Trust and Assurance through Reverse Engineering: A Tutorial and Outlook from Image Analysis and Machine Learning Perspectives. J. Emerg. Technol. Comput. Syst. 2021, 17. doi:10.1145/3464959.

9. Zhao, Z.Q.; Zheng, P.; tao Xu, S.; Wu, X. Object Detection With Deep Learning: A Review. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems* 2019, 30, 3212-3232.
10. Khan, F.; Anwer, R.M.; van de Weijer, J.; Bagdanov, A.D.; Vanrell, M.; Lopez, A.M. Color attributes for object detection. *2012 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition 2012*, pp. 3306-3313.
11. O'Mahony, N.; Campbell, S.; Carvalho, A.; Harapanahalli, S.; Hernandez, G.V.; Krpalkova, L.; Riordan, D.; Walsh, J. Deep Learning vs. Traditional Computer Vision. *Advances in Computer Vision*; Arai, K.; Kapoor, S., Eds.; Springer International Publishing: Cham, 2020; pp. 128-144.
12. Chavolla, E.; Zaldivar, D.; Cuevas, E.; Perez, M.A. Color spaces advantages and disadvantages in image color clustering segmentation. In *Advances in soft computing and machine learning in image processing*; Springer, 2018; pp. 3-22.
13. Rublee, E.; Rabaud, V.; Konolige, K.; Bradski, G. ORB: an efficient alternative to SIFT or SURF. *Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision, 2011*, pp. 2564-2571. doi:10.1109/ICCV.2011.6126544.
14. Duda, R.O.; Hart, P.E. Use of the Hough Transformation to Detect Lines and Curves in Pictures. *Commun. ACM* 1972, 15, 11-15. doi:10.1145/361237.361242.
15. Lindeberg, T. Image Matching Using Generalized Scale-Space Interest Points. *Scale Space and Variational Methods in Computer Vision*; Kuijper, A.; Bredies, K.; Pock, T.; Bischof, H., Eds.; Springer Berlin Heidelberg: Berlin, Heidelberg, 2013; pp. 355-367.
16. Lowe, D.G. Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints. *International Journal of Computer Vision* 2004, 60, 91-110. doi:10.1023/B:VISI.0000029664.99615.94.
17. Oztürk, S .; Akdemir, B. Application of feature extraction and classification methods for histopathological image using GLCM, LBP, LBGLCM, GLRLM and SFTA. *Procedia computer science* 2018, 132, 40-46.
18. Zhang, X.; Cui, J.; Wang, W.; Lin, C. A study for texture feature extraction of high-resolution satellite images based on a direction measure and gray level co-occurrence matrix fusion algorithm. *Sensors* 2017, 17, 1474.

19. Tabatabaei, S.M.; Chalechale, A. Noise-tolerant texture feature extraction through directional thresholded local binary pattern. *The Visual Computer* 2019, pp. 1-21.

20. Li, D.; Xu, L.; Ran, G.; Guo, Z. Computer Vision Based Research on PCB Recognition Using SSD Neural Network. *Journal of Physics: Conference Series* 2021, 1815, 012005.

21. Harshitha, R.; Apoorva, G.C.; Ashwini, M.C.; Kusuma, T.S. Components Free Electronic Board Defect Detection and Classification Using Image Processing Technique. *International journal of engineering research and technology* 2018, 6.

## **ДОДАТОК А – ПРЕЗЕНТАЦІЯ**