

Міністерство освіти і науки України  
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Автоматики і комп'ютеризованих технологій  
(повна назва)

Кафедра Комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та робототехніки  
(повна назва)

## КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА Пояснювальна записка

Другий (магістерський)  
(рівень вищої освіти)

Розроблення компонентів системи візуального контролю якості монтажу  
друкованих плат  
(тема)

Виконав:

студент II курсу, групи АУТПм-22-2

Шерстюк А. М.

(прізвище, ініціали)

Спеціальності 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

(код і повна назва спеціальності)

Тип програми Освітньо-професійна

(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма Автоматизоване управління технологічними процесами

(повна назва освітньої програми)

Керівник проф. Безкоровайний В. В.

(посада, прізвище, ініціал)

Допускається до захисту

Зав. кафедри КІТАР

(підпис)

Невлюдов І. Ш.

(прізвище, ініціали)

2024 р.

*Я, як студент ХНУРЕ (Шерстюк Андрій Максимович), розумію і підтримую політику закладу із академічної доброчесності. Я не надав і не одержував недозволену допомогу під час підготовки кваліфікаційної роботи. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.*

Дата

12.01.2024 р.

*Шерстюк А. М.*



# ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ

Факультет \_\_\_\_\_ *АКТ* \_\_\_\_\_

Кафедра \_\_\_\_\_ *КІТАР* \_\_\_\_\_

Рівень вищої освіти \_\_\_\_\_ *Другий (магістерський)* \_\_\_\_\_

Спеціальність *151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології* \_\_\_\_\_

Тип програми \_\_\_\_\_ *Освітньо-професійна* \_\_\_\_\_

Освітня програма *Автоматизоване управління технологічними процесами* \_\_\_\_\_

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри КІТАР \_\_\_\_\_

(підпис)

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20 \_\_\_\_ р.

## ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

студентові \_\_\_\_\_ *Шерстюку Андрію Максимовичу* \_\_\_\_\_  
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи *«Розроблення компонентів системи візуального контролю якості монтажу друкованих плат»*

Затверджена наказом по університету від *03.11.2023 р. № 1286 Ст*

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії *23 січня 2024 р.*

3. Вихідні дані до роботи *Об'єкт дослідження – технологічний процес виготовлення друкованих плат. Предмет дослідження – процес візуального контролю якості друкованих плат. Функція системи – виявлення дефектів друкованих плат з використанням навченої згорткової нейронної мережі. Технічне забезпечення: камера для створення зображення; освітлювальний пристрій; персональний комп'ютер. Предмет розробки – апаратно-програмний засіб з настільним інтерфейсом.*

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі *Вступ. Аналіз процесу контролю якості монтажу друкованих плат. Аналіз технічних та програмних рішень. Постановка мети та задач дослідження. Опис технології для вирішення поставленої задачі. Дослідження та розрахунок параметрів процесу. Розроблення математичного та програмного забезпечення системи. Планування та проведення експериментальних досліджень. Охорона праці. Висновки. Перелік джерел посилання. Апробація наукових результатів дослідження*

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій Графічний матеріал у вигляді презентації (10–12 слайдів у форматі.pptx).

Консультанти розділів роботи

Найменування розділу	Консультант (посада, прізвище, ім'я, по батькові)	Позначка консультанта про виконання розділу	
		підпис	дата

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз технічного завдання	13.11.2023	Виконано
2	Аналіз процесу контролю якості монтажу друкованих плат	20.11.2023	Виконано
3	Опрацювання літератури за темою роботи	23.11.2023	Виконано
4	Постановка задачі дослідження	27.11.2023	Виконано
5	Вибір методів розв'язання	29.11.2023	Виконано
6	Розробка вимог до програмного засобу	04.12.2023	Виконано
7	Опис розробленої моделі	07.12.2023	Виконано
7	Розробка програмного засобу	09.12.2023	Виконано
8	Проведення експериментальних досліджень з програмним засобом	11.12.2023	Виконано
9	Розробка розділу охорони праці	25.12.2023	Виконано
10	Оформлення пояснювальної записки	02.01.2024	Виконано
11	Подання роботи на перевірку Інтернет-сервісом Unichesk	13.01.2024	Виконано
12	Подання роботи на рецензію	15.01.2024	Виконано
13	Подання роботи на підпис завідувачу кафедри	22.01.2024	Виконано
14	Подання кваліфікаційної роботи до ЕК	24.01.2024	Виконано

Дата видачі завдання 03.11.2023

Студент   
(підпис)

Шерстюк А. М.  
(прізвище, ініціали)

Керівник роботи \_\_\_\_\_  
(підпис)

проф. Безкоровайний В. В.  
(посада, прізвище, ініціали)

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 73 с., 20 рис., 2 дод., 35 джерел.

ВІЗУАЛЬНИЙ КОНТРОЛЬ ЯКОСТІ, ГЛИБИННЕ НАВЧАННЯ, ДРУКОВАНА ПЛАТА, ЗОБРАЖЕННЯ, ЗГОРТКОВА НЕЙРОННА МЕРЕЖА, КОМП'ЮТЕРНИЙ ЗІР, ТЕХНОЛОГІЯ ПОВЕРХНЕВОГО МОНТАЖУ.

Об'єкт дослідження – технологічний процес виготовлення друкованих плат.

Предмет дослідження – процес візуального контролю якості друкованих плат.

Мета дослідження – підвищення ефективності технологій приладобудування за рахунок розробки компонентів системи візуального контролю якості монтажу друкованих плат.

Методи дослідження – метод зворотного розповсюдження помилки для навчання нейронної мережі, метод математичної статистики для обробки результатів досліджень, метод комп'ютерного зору для створення програмного засобу, сучасні інформаційні технології.

У роботі досліджено один з аспектів проблеми керування приладобудівним виробництвом – задачу візуального контролю якості монтажу друкованих плат. Запропоновано здійснювати дефектування друкованих плат з використанням навченої згорткової нейронної мережі, яка здійснює порівняння тестового зображення з еталонним. Практична частина реалізована за допомогою програмного засобу, реалізованого мовою Python. Проведено експериментальні дослідження зі знаходження дефектів друкованих плат.

Результати кваліфікаційної роботи апробовані у статті та 3-х тезах фахових наукових конференцій.

## ABSTRACT

Explanatory note: 73 pages, 20 figures, 2 app., 35 sources.

VISUAL QUALITY CONTROL, DEEP LEARNING, PRINTED BOARD, IMAGING, CONVOLUTIONAL NEURAL NETWORKS, COMPUTER VISION, SURFACE MOUNT TECHNOLOGY.

The object of research is the technological process of manufacturing printed circuit boards.

The subject of research is the process of visual control of the quality of printed circuit boards.

The purpose of the research is to improve the efficiency of instrument-making technologies through the development of components of the visual quality control system for the assembly of printed circuit boards.

Research methods – error backpropagation method for neural network training, mathematical statistics method for processing research results, computer vision method for creating a software tool, modern information technologies.

The work examines one of the aspects of the problem of managing the instrument manufacturing production – the task of visual control of the quality of the assembly of printed circuit boards. It is proposed to defect printed circuit boards using a trained convolutional neural network, which compares the test image with the reference image.

The practical part is implemented using a software tool implemented in the Python language. Experimental studies on finding defects of printed circuit boards have been conducted.

The results of the qualification work were tested in the article and 3 theses of professional scientific conferences.

## ЗМІСТ

Перелік скорочень.....	9
Вступ.....	10
1 Аналіз процесу контролю якості монтажу друкованих плат.....	12
1.1 Процес складання друкованої плати.....	12
1.1.1 Підготовка поверхні та перевірка обладнання.....	12
1.1.2 Виготовлення друкованих плат.....	14
1.1.3 Вихідна перевірка матеріалів.....	15
1.1.4 Скринінг паяльної пасти поверхневого монтажу.....	17
1.1.5 Розміщення компонентів на платі.....	19
1.1.6 Пайка оплавленням.....	21
1.1.7 Хвильова пайка.....	22
1.1.8 Ручна пайка.....	24
1.1.9 Дефекти, що виникають при паянні друкованої плати.....	25
1.1.10 Фінальна інспекція.....	28
1.2 Аналіз існуючих технологій для контролю якості друкованих плат.....	29
1.2.1 Внутрішньосхемне тестування.....	29
1.2.2 Автоматична оптична інспекція.....	30
1.2.3 Рентгенівські контрольні технологічні установки.....	30
1.2.4 Контроль якості друкованих плат з використанням нейронних мереж.....	32
1.3 Аналіз технічних рішень.....	33
1.3.1 Підбір та опис відеокамер.....	33
1.3.2 Вибір джерела освітлення.....	36
1.3.3 Огляд існуючих архітектур нейронних мереж.....	37
1.4 Аналіз існуючих мов програмування.....	42
1.4.1 Мова програмування C++.....	42
1.4.2 Мова програмування Java.....	42
1.4.3 Мова програмування Python.....	42

1.5	Постановка завдання та висновки до першого розділу.....	44
2	Вибір технології для вирішення поставленої задачі.....	46
2.1	Розрахунок роздільної здатності камери.....	46
2.2	Розрахунок параметрів згорткової нейронної мережі.....	47
2.2.1	Вибір метрики для детектування об'єктів.....	47
2.2.2	Опис навчального набору даних.....	48
2.3	Висновки до другого розділу.....	49
3	Розробка автоматизованої системи контролю якості монтажу друкованих плат.....	51
3.1	Розробка схеми алгоритму роботи системи.....	52
3.2	Ідентифікація модулів системи.....	52
3.3	Розробка додатку для автоматизованої системи контролю якості монтажу друкованих плат.....	52
3.3.1	Опис бібліотек.....	52
3.3.2	Опис класів та функції програми.....	55
3.4	Навчання згорткової нейронної мережі.....	59
3.5	Висновки до третього розділу.....	60
4	Проведення експериментальних досліджень.....	62
4.1	Інструкція користувача.....	62
4.1.1	Обробка вхідних зображень.....	62
4.1.2	Зберігання отриманих результатів.....	64
4.2	Висновки до четвертого розділу.....	65
5	Охорона праці.....	66
	Висновки.....	67
	Перелік джерел посилання.....	69
	Додаток А Апробація наукових результатів дослідження.....	74
	Додаток Б Демонстраційний матеріал.....	99

## ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

АОІ – автоматизована оптична інспекція;  
АРК – автоматизований рентгенівський контроль;  
АСКЯ – автоматизована система контролю якості;  
ВТ – внутрішньосхемний тест;  
ДП – друкована плата;  
ЗНМ – згорткова нейронна мережа;  
ККЯ – команда контролю якості;  
КМОП – комплементарна структура метал-оксид-напівпровідник;  
КЯ – контроль якості;  
МЛ – металевий лист;  
МРП – мережа регіональних пропозицій;  
МДП – монтаж друкованої плати;  
ПВ – проектування для виробництва;  
ПЗС – прилад із зарядовим зв'язком;  
ПМ – поверхневий монтаж;  
ПМФ – пірамідальною мережею функцій;  
СМ – специфікація матеріалів;  
BGA – Ball-Grid-Array;  
DFM – Design for manufacturability;  
FR-4 – Flame retardant;  
HDI – High Dencity Interconnect ;  
LED – Light-emitting diode;  
PoP – Package-on-Package;  
SMD – Surface mounted device;  
VGA – Video Graphics Array;  
YOLO – You-Only-Look-Once.

## ВСТУП

На всіх стадіях складально-монтажних операцій друкованих плат (ДП) виконуються операції контролю: вхідний контроль, операційний контроль, вихідний контроль. За рівнем охоплення більшість операцій відносяться до суцільного контролю, тобто, перевірки піддаються всі модулі. Виявлені дефекти фіксуються у супровідній документації на вузол для подальшого усунення, для статистичного обліку та з метою виявлення й усунення причин їх появи. Протоколювання дефектів відповідно до програми веде і автоматичне обладнання.

Візуальний огляд друкованої плати вимагає унікального набору методів перевірки та тестування. Перевірка збірки ДП передбачає перевірку конструктивних особливостей за допомогою візуальних, електричних, структурних і функціональних методів. Існують різні способи тестування друкованих плат. Однак вибір методу залежить від складності плати, застосування, дизайну тощо.

Пропонується здійснювати дефектування друкованих плат з використанням навченої згорткової нейронної мережі, яка буде порівнювати тестове зображення з еталонним зображенням.

Метою цього дослідження є підвищення ефективності технологій приладобудування за рахунок розробки компонентів системи візуального контролю якості монтажу друкованих плат.

Об'єктом дослідження є технологічний процес виготовлення друкованих плат.

Предметом дослідження є процес візуального контролю якості друкованих плат.

Методи дослідження – метод зворотного розповсюдження помилки для навчання нейронної мережі, метод математичної статистики для обробки результатів досліджень, метод комп'ютерного зору для створення програмного засобу, сучасні інформаційні технології.

Для вирішення поставленої мети потрібно вирішити наступні завдання:

- провести аналіз процесу контролю якості монтажу друкованих плат;
- провести дослідження та розрахунок параметрів процесу контролю якості монтажу друкованих плат;
- розробити автоматизовану систему контролю якості монтажу друкованих плат;
- провести експериментальні дослідження з програмним засобом автоматизованої системи контролю якості монтажу друкованих плат;
- розглянути питання охорони праці;
- оформити пояснювальну записку згідно з [1] та [2].

За результатами виконаного дослідження опубліковано статтю у збірнику студентських наукових статей та тези трьох доповідей на науково-практичних конференціях.

# 1 АНАЛІЗ ПРОЦЕСУ КОНТРОЛЮ ЯКОСТІ МОНТАЖУ ДРУКОВАНИХ ПЛАТ

## 1.1 Процес складання друкованої плати

Процес монтажу друкованої плати (МДП) завжди починається з найпростішого блоку друкованої плати: основи, яка складається з кількох шарів, і кожен із них відіграє важливу роль у функціональності кінцевої друкованої плати. Ці шари, що чергуються, включають [3]:

- підкладку;
- мідь;
- паяльна маску;
- шовкографію.

Кількість кроків для процесу складання ДП залежить від конкретного проекту, як показано на схемі (рис 1.1), кожен з кроків пояснюється в наступних розділах.

### 1.1.1 Підготовка поверхні та перевірка обладнання

Щоб забезпечити ефективний процес складання, виробничій команді потрібно надати чисту специфікацію матеріалів (СМ) та примітки до складання з усіма необхідними виносками, такими як посилальні позначки, орієнтація компонентів та інструкції щодо частин, які миються та які не миються.

Підприємство виготовляє друковані плати відповідно до вказівок DFM (Design for Manufacturability), перш ніж вони потраплять до монтажного цеху. Дотримання контрольних показників DFM має вирішальне значення, щоб уникнути можливих виробничих помилок, таких як кислотні пастки, недостатня відстань між слідами та мідні стружки [4].

Після виготовлення плат завод відправляє їх на складальний цех.

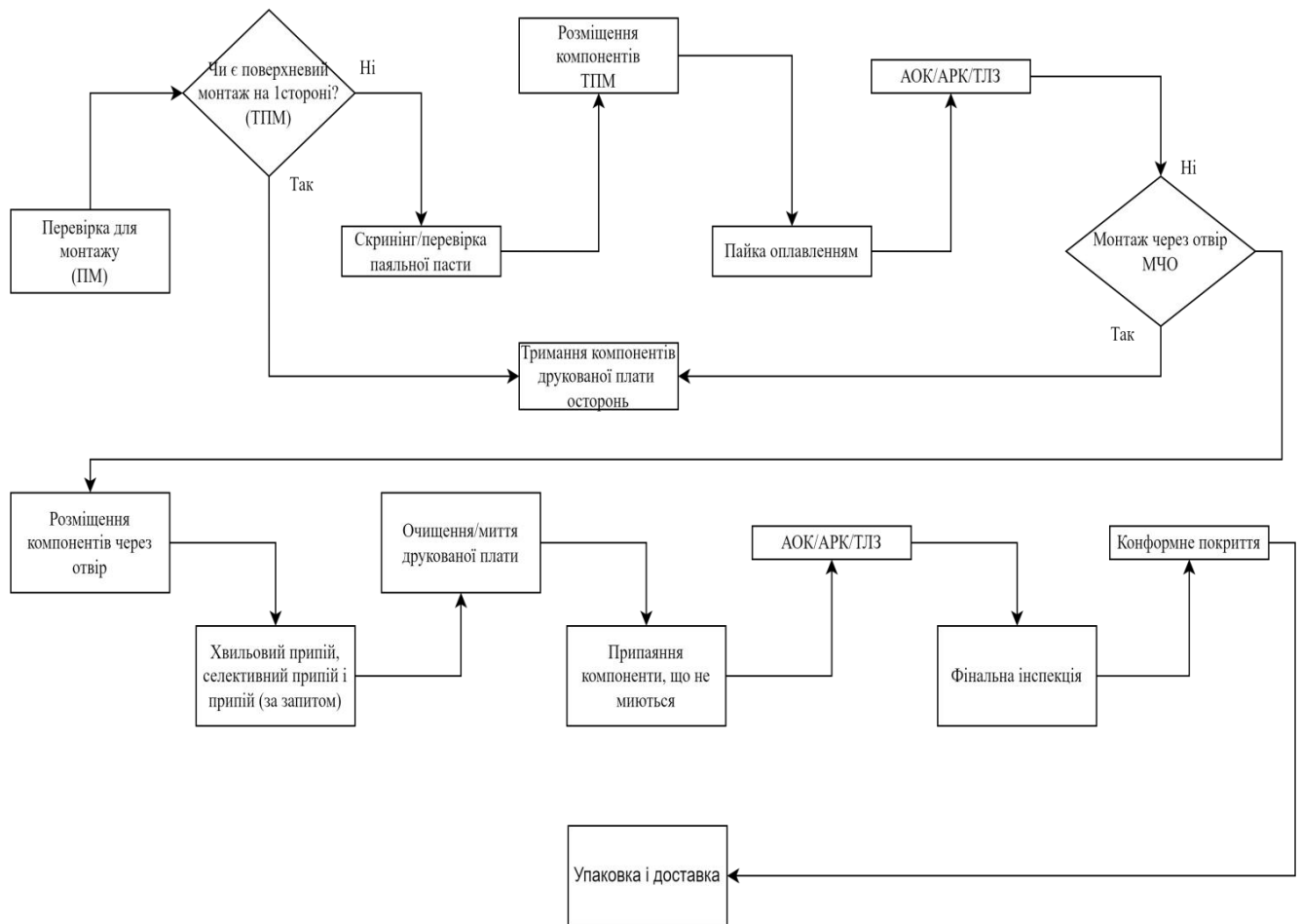


Рисунок 1.1 – Схема процесу складання друкованої плати

Дизайнер завжди повинні дотримуватися вказівок проєкту для виробництва (ПВ), щоб уникнути повторного обертання друкованої плати. Основна мета цього кроку – це уникнути можливих помилок у складанні та зменшити загальну вартість вашої ДП. Інженери ПВ гарантують [4]:

- правильне виконання частин, перелічених у СМ;
- точні розміри слідів компонентів;
- достатню відстань між компонентами;
- дотримання специфікації свердла;
- включення адекватних методів теплового полегшення друкованої плати;
- правила зазору крайки плати дотримані.

Після перевірки цих параметрів виробнича команда розміщує компоненти на друкованій платі для того щоб, почати процес поверхневого монтажу (ПМ).

Процес поверхневого монтажу передбачає розміщення та паяння електронних компонентів на платі за допомогою автоматизованої системи, яка називається машиною підбору та розміщення. Перед установкою SMD (Surface Mounted Device) монтажне підприємство перевіряє наявність компонентів, які не миються. Якщо вони є, ми складемо їх на більш пізньому етапі (після миття друкованої плати).

Збірка ПМ включає наступні кроки [4-5]:

- скринінг/перевірка паяльної пасти;
- розміщення компонентів;
- пайка оплавленням;
- рентгенівський контроль;
- тестування літаючого зонду.

Усі перелічені вище кроки будуть розглянуті докладніше у наступних розділах.

### 1.1.2 Виготовлення друкованих плат

Процес виготовлення друкованої плати складається з кількох етапів. Для створення першого шару схеми потрібна діелектрична речовина. Найпоширенішою речовиною для основи дошки є скловолокно, відоме як FR-4 (Flame Retardant).

Наступним кроком у процесі виготовлення друкованої плати є додавання наскрізних отворів, резиста для пайки та шовкового трафарету до дошки.

Нарешті, на етапі підготовки до паяння компонентів на ДП можна нанести попереднє нанесення паяльної пасти за допомогою трафарету або методом струминного друку паянням [6].

Добре ознайомившись з цим процесом, досвідчений інженер може спроектувати власну друковану плату для швидкого та ефективного процесу складання з використанням мінімальної кількості кроків (рис 1.2).

### 1.1.3 Вихідна перевірка матеріалів

Команда виготовлення ДП працює одночасно з ККЯ (команда контролю якості) друкованих плат, яка перевіряє кожен плату перед тим як вони потраплять до замовників. Але деякі дрібні компанії не роблять процедуру перевірки якості ДП, тому для нас завжди важливо перевірити якість нашої друкованої плати, перш ніж витратити час і ресурси на збірку та обробку плати. Очевидно, що продуктивність друкованої плати все одно буде залежати від того, чи було проектування та виготовлення виконано належним чином, навіть із правильно розробленою схемою, послідовним складанням та налагодженням.

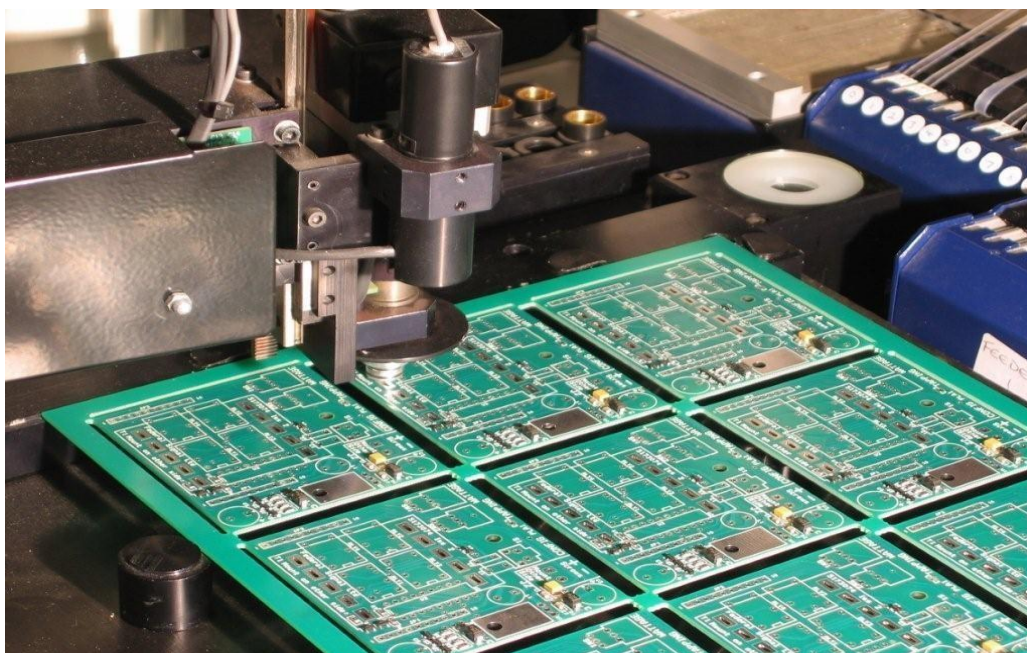


Рисунок 1.2 – Виготовлення друкованої плати [7]

Таким чином, для підприємства надзвичайно важливо запровадити контроль якості від проектування друкованої плати до виробництва. Контроль якості друкованих плат повинен здійснюватися в усіх процесах його розробки, моніторингу та вимірювання під час проектування, виробництва та перевірки. Процес проектування ДП є найважливішим етапом розробки високоякісної друкованої плати. Тому під час цього процесу необхідно приділяти належну увагу [8].

ККЯ повинна переконатися, що всі технічні вимоги дотримані, щоб гарантувати технологічність друкованої плати. Рішення, прийняті під час процесу проектування, впливають на стадію виготовлення та виробництва.

Проектування для технологічності передбачає організацію топології компонування ДП таким чином, щоб вирішити проблеми, пов'язані з виготовленням і складанням. Конструкція для технологічності оптимізує виробничий процес і гарантує високу якість виробництва та відповідність

Ви повинні враховувати кілька факторів, щоб забезпечити стабільну роботу друкованої плати. По-перше, має бути гарантована надійність виробника друкованих плат. Постачальник повинен мати кваліфіковану і досвідчену команду виробників, щоб забезпечити задовільну виробничу компетентність у проекті. Виробник повинен мати широкий спектр можливостей, щоб мати можливість постачати різноманітні друковані плати, такі як алюмінієві друковані плати, безгалогенні друковані плати та друковані плати HDI (High Density Interconnect), серед інших, якщо це потрібно для вашого застосування. По-друге, перед виготовленням ви повинні постійно перевіряти та підтверджувати топологію конструкції (рис. 1.3).



Рисунок 1.3 – Вихідна перевірка матеріалів [9]

Процес проектування передбачає кілька випробувань і модифікацій, тому дуже важливо, щоб остаточна версія креслення проекту була ретельно перевірена та підтверджена, що вона відповідає вимогам, наданим виробником ДП [9].

#### 1.1.4 Скринінг паяльної пасти поверхневого монтажу

Першим етапом процесу складання друкованої плати є нанесення паяльної пасти на поверхню друкованої плати. Основна мета нанесення паяльної пасти на поверхню ДП це – заповнення отворів плати відповідною кількістю паяльної пасти, щоб пізніше можна було прикріпити електричні компоненти на плату. Шар припою повинен потрапити в отвори, а плоска поверхня друкованої плати повинна залишатись недоторканою. Тому застосування високоселективної техніки є обов'язковим для заповнення отворів різного розміру плівкою відповідної товщини. Однією з найбільш широко використовуваних технік є друк паяльною пастою.

На цьому етапі команда виробників покриває металевим листом всю поверхню голої друкованої плати, за винятком отворів, які будуть пізніше заповнені паяльною пастою. Цей металевий лист широко називають трафаретом, його виготовляють із латуні чи нержавіючої сталі. Трафарет має бути оброблений відповідно до шаблону ДП, визначеного промисловим дизайном, де отвори всередині листа мають таку саму форму, ширину та довжину, що й їхні парні отвори на друкованій платі [10].

Розробка трафарету є надзвичайно складним завданням, оскільки точність форми та однорідність товщини трафарету є важливими для точного та цілеспрямованого складання друкованої плати. Типовий діапазон товщини трафарету становить від 0,0254 мм до 0,762 мм.

Товщина трафарету – це параметр, який залежить від типів електричних компонентів, які використовуються в конкретній друкованій платі, і визначається окремо для кожної ДП. Навіть найменше заниження або завищення

розміру металевого листа може спричинити значні проблеми на наступних етапах процесу складання друкованої плати. Більші отвори трафарету спричиняють такі дефекти, як кульки або перемички. Ці явища виникають під час застосування припою, коли плівка покриває частини поверхні друкованої плати або навіть весь шлях між двома сусідніми отворами. Результатом обох випадків є розімкнуте електричне коло, що робить друковану плату повністю нефункціональною. Після вибору необхідних параметрів трафарету металевий лист із заданим складом і товщиною замовляється на металургійному заводі, який перевіряє рівномірність товщини листа за допомогою рентгенівського датчика, а потім його відправляють до нашого підприємства [10-11].

Для нанесення паяльної пасти під час складання ДП використовується унікальний тип принтера. Цей тип принтера широко називають ракельним принтером. Внутрішня система зору принтера вирівнює трафарет вертикально над дошками. Крім того, принтер використовує три орієнтири, які зазвичай називають глобальними реперними мітками, для найточнішого позиціонування трафарету на дошці. Зокрема, глобальна реперна позначка негайно визначає та виправляє будь-яке можливе зміщення друкованої плати по осях X і Y перед операцією друку та під час друку. Таким чином, можливого зсуву дошки або трафарету під тиском ракеля повністю уникають.

Тиск ракеля – це параметр, який необхідно контролювати з особливою увагою. Підвищення тиску може спричинити численні проблеми, наприклад більший зсув пасти, що спричиняє розтікання пасти по плоскій поверхні ДП та спричиняє так зване перемикання та витікання паяльної пасти. Оскільки паста є високов'язкою суспензією, для її течії потрібна значна сила. Тиск ракеля має бути достатнім для створення сили, яка подолає високу силу тертя між високов'язкою пастою та трафаретом. Паста рухається по всій ширині області друку в контрольованому рулоні, заповнюючи всі отвори трафарету, одночасно змітаючи її з верхньої сторони поверхні трафарету лезами ракеля. Стандартний діапазон робочого тиску ракеля становить від 0,13 кг до 0,27 кг на погонний сантиметр площі друку. Рухома ракель повинна створювати інерцію, під

впливом якої паста затікає всередину отворів ДП [10–11].

Різкі, але контрольовані рухи ракелей викликають інерцію, тому швидкість є ще одним параметром, який необхідно постійно контролювати. Оскільки тиск і швидкість ракеля прямо пропорційні, швидкість повинна постійно бути нижче 75 мм на секунду. Вищі швидкості спричиняють вищу силу тертя між лезами та трафаретом, що з часом призводить до механічної поломки лез.

Третій важливий параметр друку припоєм – це кут між ракелями та трафаретом. Цей кут становить  $60^\circ$  з наступної причини: він утворює оптимальний нахил, завдяки чому паста рухається вниз до розчинів друкованої плати під дією сили тяжіння. Якщо кут додається, це може спричинити витягування пасти-тримача з отворів трафарету та, як внаслідок, недостатню кількість паяльної пасти. Навпаки, леза залишають на трафареті залишки паяльної пасти після того, як ракель завершить друк, коли кут зменшується.

Звичайна операція друку триває від 15 до 45 секунд на друковану плату. Друк є найтривалішим етапом збирання друкованої плати, за яким слідує процес відділення, під час якого трафарет відокремлюється від друкованої плати [10–11].

Після завершення операції друку ККЯ мусить провести ретельну перевірку, щоб впевнитись, що припої було нанесено на необхідні ділянки і всі отвори ДП заповнені достатньою кількістю пасти. Перевірка після друку має важливе значення для забезпечення якості нанесених шарів паяльної пасти та їх придатності для наступного ступінчастого монтажу електричних компонентів.

#### 1.1.5 Розміщення компонентів на платі

На ринку доступно багато різних типів машин для розміщення компонентів (також відомих як машини Pick & Place встановлення), які мають на меті якомога точніше та швидше розмістити компоненти для поверхневого монтажу.

Зі збільшенням різноманітності доступних компонентів зросли і

можливості цих машин, тому вибір конкретного виробника може стати непростю перспективою. Тип бізнесу матиме велике значення для прийняття рішення, оскільки деякі машини розроблені спеціально для швидкості, тоді як інші більше зосереджені на гнучкості.

Машини, розроблені для високої швидкості, зазвичай називають «чипшутерами», і вони можуть досягати швидкості розміщення компонентів до 100 000 кп/г (компонентів на годину). Гнучкі розсипники можуть обробляти компоненти від 10,5 до 150 мм роз'ємів і мають можливість перевіряти/розміщувати мікро-BGA (Ball-Grid-Array) і PoP (Package-on-Package) пристрої [12].

Загальна концепція полягає в тому, що друковані плати, надруковані паяльною пастою, подаються в машину розміщення, де вони транспортуються за допомогою конвеєра до зони розміщення та затискаються. Потім система бачення машини підтверджує фіксоване положення ДП за допомогою контрольних позначок і запускає програму розміщення компонентів (рис. 1.4).



Рисунок 1.4 – Розміщення компонентів за допомогою машини Pick & Place [12]

Процес розміщення компонентів складається з збирання кожного компонента по черзі з живильника за допомогою насадки та транспортування в запрограмоване положення. Кожен тип машини розміщення має власний формат для програм, але всі вони містять однакову інформацію, включаючи номери

деталей, посилання на друковану плату, обертання, інформацію про упаковку та положення X/Y.

Після завершення збірки розтискають і транспортують конвеєром до наступної машини в лінії [12].

#### 1.1.6 Пайка оплавленням

Після того як деталі було надійно закріплено за допомогою паяльної пасти на платі, команда виробників може перейти до етапу паяння оплавленням.

Метод паяння оплавленням є сучасним механізмом для складання більшості ДП на сьогоднішній час. Пайка оплавленням забезпечує масове виробництво з дуже швидкою швидкістю, дозволяючи відокремити розміщення компонентів від фактичного процесу пайки. Цей метод забезпечує надійний спосіб пайки величезної кількості компонентів і контактних площадок, завдяки чому дуже легко моніторити та контролювати сам процес (рис. 1.5) [13].



Рисунок 1.5 – Метод паяння оплавленням [13]

Паяння оплавленням – це процес, у якому паяльна паста використовується для постійного припаювання SMD-компонентів до їхніх контактних площадок, після чого вся збірка ПМ-проекту друкованої плати піддається впливу контрольованого теплового середовища всередині нагрівального блоку, який називається піч оплавлення. Пайка оплавленням, як один із ключових процесів у

виробництві друкованих плат за технологією поверхневого монтажу, безпосередньо впливає на якість пайки та надійність електронних виробів. Її суть полягає в процесі нагрівання, який передбачає нагрівання повітря та використання вентиляторів для доставки нагрітого повітря до поверхні спаювання. Ця дія розплавляє паяльну пасту та утворює паяні з'єднання між компонентами поверхневого монтажу та друкованою платою без зміни вихідних характеристик електронних компонентів.

Піч оплавлення – це невелика піч у формі коробки для невеликих лабораторних операцій. Для великих виробників найкращим вибором є вбудована піч оплавлення. Вбудована піч оплавлення зазвичай використовується у виробництві друкованих плат за ПМ технологією. Вона складається з кількох зон нагріву, за якими йдуть секції охолодження. Кількість зон охолодження та нагріву печі для паяння оплавленням залежить від довжини та продуктивності печі. Під час процесу оплавлення в зони подається задане температурне значення за допомогою вбудованої програми. Це задане значення відповідає температурі, якій повинна піддаватися друкована плата, коли вона проходить через цю зону [13-14].

У процесі пайки оплавленням загальні дефекти процесу включають, серед іншого, порожнечі припою, тріщини, погане утворення припою та неналежну товщину інтерметалічної сполуки. З розвитком технології поверхневого монтажу ці поширені дефекти вдалося ефективно контролювати. Однак для продуктів з високими вимогами до надійності, таких як аерокосмічна продукція, необхідно брати до уваги додаткові міркування, включаючи надійність і термін служби від термічної втоми. Ці аспекти не можуть бути швидко ідентифіковані, отже, необхідність раннього розгляду на етапі проектування процесу [14].

#### 1.1.7 Хвильова пайка

Обробка паянням хвилею – це метод складання електронних компонентів на друкованих платах. Плата проходить через ємність з розплавленим припоєм

через похилу конвеєрну стрічку, в печі насос створює стоячі хвилі розплавленого припою. Коли друкована плата контактує з хвилею, деталі будуть припаяні до плати, створюючи механічно та електрично надійні з'єднання. Процес пайки хвилею в основному використовується для складання компонентів через отвір, але також може використовуватися для поверхневого монтажу.

Машина для паяння хвилею складається з нагрітої ванни для припою, яка підтримує температуру, необхідну для пайки. В середині резервуара розміщена хвиля припою, і ДП проходить над ним так, що нижня поверхня плати лише контактує з хвилею припою.

Слід відрегулювати висоту хвилі так, щоб вона не протікала через верхню поверхню плати, оскільки це може спричинити потрапляння припою в небажані місця. Плати зазвичай закріплюються на підносі на конвеєрі, який витримує температуру і не піддається паянню.

Для того, щоб гарантувати, що ділянка, яку потрібно припаяти, є чистою та вільною від окислення тощо, потрібен флюс. При паянні хвилею флюс повинен покривати всю нижню сторону вузла, яка проходить над рідким припоєм. Флюс наноситься на одну сторону плати, що спаюється, тобто на нижню сторону. Потрібен ретельний контроль кількості флюсу. Якщо його занадто мало, існує високий ризик поганих з'єднань, а якщо флюсу занадто багато, то він може залишитися на платі.

Процес паяння хвилею піддає друковані плати та пристрої відносно високим рівням тепла. Цей термічний удар може призвести до значного збільшення рівня відмови. Щоб подолати цю проблему, плати слід попередньо нагріти, щоб стабільно стабілізувати їх до бажаної температури, щоб мінімізувати термічний шок. Важливо дати друкованій платі охолонути в помірному темпі після пайки. Якщо ДП охолоне дуже швидко, вона може деформуватися, а паяні з'єднання можуть бути пошкоджені. З іншого боку, якщо плата охолоджується занадто повільно, ДП може стати крихкою, а деякі компоненти можуть бути пошкоджені високою температурою.

Друковані плати слід охолоджувати за допомогою водяного або

повітряного охолодження, щоб зменшити їх пошкодження.

Після пайки хвилиною зібрані друковані повинні пройти візуальний огляд і автоматизована оптична інспекція (AOI), щоб запобігти виникненню будь-яких проблем із замовниками.

### 1.1.8 Ручна пайка

Ручне паяння – це традиційний метод паяння друкованих плат, що являє собою процес нагрівання та розплавлення припою на металевих компонентах, друкованих платах або інших частинах для створення з'єднання або електричного з'єднання руками. Цей метод передбачає ручне нанесення паяльного матеріалу на компоненти плати та виробнича команда має переконатися, що припій нанесено правильно, у потрібній кількості, при правильній температурі та з необхідною точністю для створення міцного та надійного з'єднання [17].

Процес ручного паяння під час складання ДП передбачає використання нагрітого паяльника та невеликої кількості припою для з'єднання електронних компонентів із слідами друкованої плати. Процес ручного паяння зазвичай складається з наступних кроків:

- підготовка компонентів. Електронні компоненти потрібно правильно вирівняти та розташувати на друкованій платі за допомогою пінцета, перш ніж їх можна буде припаяти на місце;

- підготовка паяльника. Паяльник потрібно нагріти до відповідної температури, надто висока або надто низька температура може вплинути на ефект зварювання;

- нанесення припою. Поки компоненти знаходяться в потрібному місці, припій наноситься паяльником на з'єднання між компонентом і друкованою платою. Припій має розплавитися та розтектися навколо проводу компонента та в отвір друкованої плати;

- перевірка з'єднання. Коли припій охолоне, з'єднання можна перевірити та

переконалися, що воно надійне та правильно сформоване. Будь-який надлишок припою можна видалити за допомогою інструмента для розпаювання або обплетення [17].

Цей процес зазвичай повторюється для кожного електронного компонента на ДП. Щоб уникнути пошкодження електронних компонентів або ДП, під час паяння важливо дотримуватись балансу тепла та швидкості [17].

### 1.1.9 Дефекти, що виникають при паянні друкованої плати

Виготовлення друкованих плат включає в себе різні механічні та хімічні процеси. Оскільки отримання точності в механічних і хімічних процесах дуже складне, різноманітне дефекти та несправності утворюються під час виготовлення ДП. Ці виробничі дефекти призводять до погіршення продуктивності електронних приладів [18].

Ці дефекти, можна в цілому класифікувати на дефекти паяння та дефекти, пов'язані з паянням. Деревоподібна схема класифікації дефектів ДП наведена на рис 1.6.

Встановлене паяне з'єднання забезпечує механічну підтримку та електричну підтримку (електричне підключення) до компонентів і друкованої плати. У несправності мостового типу ми маємо надлишок припою в порту та вони можуть замкнути два різні порти. Це може бути викликано через надмірне осідання паяльної пасти, невідповідний профіль оплавлення, відносно великі паяльні площадки порівняно з проміжком між колодками, велику кількість припою на колодках через неправильний трафарет специфікації, неактивна паяльна паста, погане ущільнення між трафаретом і дошкою під час друку, невідповідність між трафаретом і ДП, погане розміщення компонентів або погане співвідношення розмірів ніжки компонента та ДП [18].

Несправності відкритого типу виникають через відсутністю припою. Відкриті розломи класифікуються на сильні відкриті розломи та слабкі відкриті розломи. При сильному відкритому розломі повне з'єднання буде відсутнє. При

слабкому відкритому розломі пайка буде частковою і в овертаймі слабкі відкриті розломи можуть стати сильними відкритими розломами.

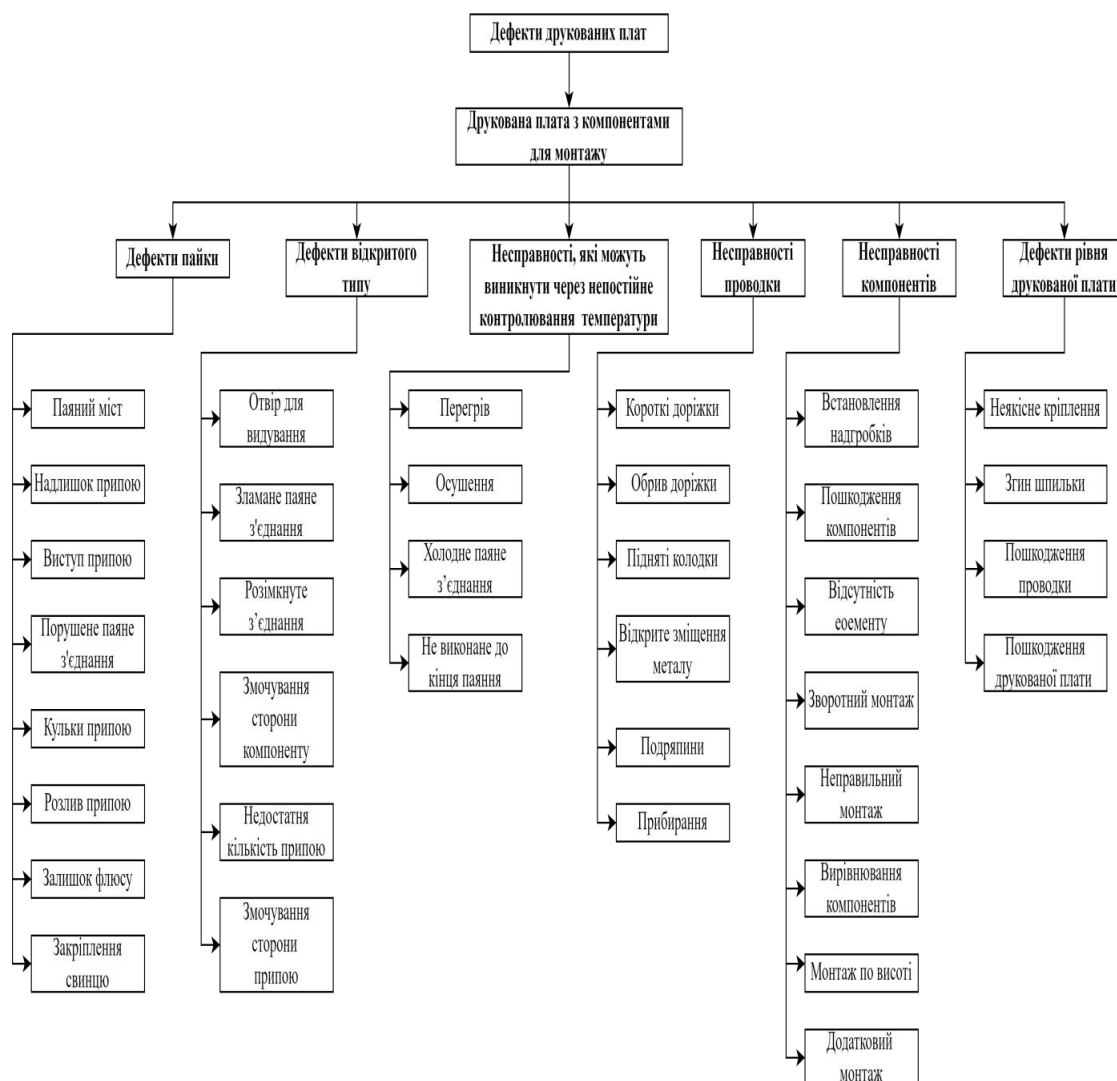


Рисунок 1.6 – Деревоподібна схема класифікації дефектів друкованої плати [18]

Вимоги до температури припою та контакту слід належним чином дотримуватися, інакше це призведе до несправностей. Перепади температури можуть призвести до розшарування друкованої плати, припою, пошкодження колодок, проблеми з надійністю з часом тощо [18].

Корозійні дефекти зазвичай спричинені неправильним зберіганням, використанням прострочених компонентів або умовами перевезення. Корозія компонентів свинцю створить поганий контакт із колодкою для пайки. Проблеми

з надійністю, спричинені корозією, пов'язані з зволоженням і здебільшого викликані атмосферними впливами (через окислення), якість свинцевого матеріалу або луджене покриття свинців. Цьому можна запобігти шляхом належного зберігання компонентів друкованої плати в контрольованому місці з низькими температурами і вологості. Температура має підтримуватися на рівні 250 °С при відносній вологості 60% з коливаннями температури +20 °С і відносній вологості +5%.

Помилки в проводці трапляються в проводці, що з'єднує різні компоненти друкованої плати. Крім того, надлишок травлення призведе до обриву доріжки. Підйом доріжки відбувається через надлишковий тиск із теплом під час паяння або через зовнішню силу. Проблеми з процесом і відшарування маскуванню, можуть бути спричинені оголеним зсувним металом, чого слід уникати. Крім того, подряпини під час процесу можуть призвести до оголення основного металу. Якщо очищення було проведено неналежним чином, надлишок матеріалу залишиться на друкованій платі, що призведе до коротких замикань у ДП [18].

Несправності компонентів виникають під час процесу розміщення компонентів на платі. Для того, щоб позбутися від дефектів пов'язаних з несправностями компонентів команда виробників повинна закріпити компоненти належним чином на друкованій платі. Небажано підняття компонента в процесі пайки, яке відбувається через неправильне розташування компонентів або проблеми з профілем. Під час пайки або під час стрес-тесту може виникнути фізичне пошкодження ДП. Це пов'язано з помилками програмування, через що деякі компоненти можуть бути загублені або пропущені під час виготовлення. Помилка зворотного монтажу може виникнути через помилку програмування або внаслідок зворотного монтажу компонентів. Дефекти вирівнювання компонентів виникають через помилки пайки та проблеми з профілем. Подібним чином під час виготовлення плати може виникнути помилка висоти монтажу. Крім того, додаткові дефекти кріплення виникають через помилки програмування [18].

### 1.1.10 Фінальна інспекція

Контроль якості (КЯ) – це важливий етап у процесі виробництва друкованих плат. Контроль якості забезпечує функціональність і надійність, має великий вплив на вартість, час та точність під час виробництва ДП і надає уявлення про технологія, на яку покладається виробник.

Необхідно контролювати якість різних етапів виробничої лінії, щоб весь процес виробництва ДП був безпомилковим і була досягнута його оптимальна точність.

Останнім часом філософія у виробництві полягає в тому, що контроль якості – це процес, який не ґрунтується на результатах. Це означає, що КЯ сам по собі не сприяє виробництву, а скоріше споживає час, робочу силу та кошти для перевірки дефектів, виниклих через несправність процесів на початку виробництва виробничої лінії.

Підприємства з виробництва друкованих плат рухаються до все більш надійних, простих у використанні, економічно ефективних і швидших методів виробництва. Оскільки електронних компонентів з кожним днем стає все менше, попит на компактну, міцну та доступну техніку зростає. Підприємство повинно збільшити виробництво необхідних ДП, вироблені плати повинні бути нечутливими до помилок.

Таким чином, повільний і помилковий КЯ стає перешкодою. Коли перевірка виконується вручну, вона чутлива до людських помилок і займає багато часу. Усунення несправностей плати може зайняти кілька днів. Тому дошки слід перевіряти щоразу на етапі конвеєра і процес повинен бути динамічним.

Ці питання можна вирішити за допомогою запровадження автоматизованої системи контролю якості (АСКЯ) на підприємстві. У наступному розділі буде розглянуто види автоматизованих систем контролю якості ДП та буде обрано менш ресурсозатратну та точну АСКЯ.

## 1.2 Аналіз існуючих технологій для контролю якості друкованих плат

### 1.2.1 Внутрішньосхемне тестування

Найпоширенішим методом тестування друкованих плат є внутрішньосхемний тест (ВТ). Цей тест на ємність передбачає перевірку як розриву, так і короткого замикання разом із значеннями компонентів і роботою мікросхеми. Щоб виміряти опір, невеликі пружинні шпильки вдавлюють у різні ділянки нігтьового ложа. Вдавлюючи щупи в цвяхове ложе, перевіряються паяні з'єднання плати.

Для початку випробування плати притискають до цвяхів (ложа щупів). У процесі проектування створюватимуться попередньо створені точки доступу на ДП, які дозволять тестувальникам схем отримати доступ до схеми. Розташування пресів визначається без проведення будь-яких попередніх досліджень, ґрунтуючись лише на досвіді дизайнерів ВТ-приладів. Цей процес, заснований на досвіді, часто призводить до великих зусиль на згинання, що викликає надмірне навантаження на друковану плату, пошкоджуючи її та спричиняючи збій у належній роботі друкованої плати (рис. 1.7) [20].



Рисунок 1.7 – Машина для внутрішньосхемного тестування [20]

Зазвичай виробники застосовують внутрішньосхемні тести на продуктах з незначною кількістю переглядів. Якщо ваша плата не має відповідних колодок, створених з метою тестування дизайну для виробництва, VT неможливі. Неможливо перейти на VT на півдорозі виробництва. Компанії-виробники включають методи тестування складання ДП як невід'ємну частину свого виробничого процесу [20-21].

### 1.2.2 Автоматична оптична інспекція

Автоматична оптична інспекція широко використовується у виробничих середовищах, оскільки вона забезпечує швидші та точніші результати, ніж ручні методи. Використовуючи камери 3D або 2D, AOI робить фотографії друкованої плати перед тим, як порівняти їх із детальною схемою. Техніки позначають для перевірки таблички, які певною мірою не відповідають схемі [21].

Ніколи не слід покладатися виключно на автоматизовану оптичну інспекцію. Плати не можуть завжди бути включені, і їх покриття не охоплює всі компоненти плати. В ідеалі ви повинні поєднати функціональний тест із літаючим зондом або з внутрішньосхемним тестуванням.

Автоматизована оптична система особливо корисна, якщо розміщувати її наприкінці процесу виготовлення спаяної плати. У такому випадку це може допомогти виявити проблеми, як нещільні припої на виробничій лінії. Тестування AOI може швидко виявляти та вирішувати проблеми, що виникають, перш ніж вони вплинуть на друковані плати, виготовлені згодом [21].

### 1.2.3 Рентгенівські контрольні технологічні установки

Для більшості виробників електроніки АРК (автоматизований рентгенівський контроль) є цінним інструментом перевірки. Автоматизований рентгенівський контроль використовується для контролю зібраних друкованих плат. Хоча це можна порівняти з AOI, замість світла в автоматизованому

рентгенівському контролю (АРК) використовується променеве випромінювання. Перевіряючи паяні з'єднання, стовбури та внутрішні сліди компонента, оператор може виявити дефекти під час виробничого процесу.

Рентгенівські знімки бувають як у 2D, так і в 3D форматах. За допомогою автоматизованого рентгенівського контролю можна перевірити приховані елементи ДП, наприклад, корпуси кулькової решітки з їхніми паяними з'єднаннями під корпусом мікросхеми (рис. 1.8) [21].

Рентгенівське випромінювання має унікальну перевагу в тому, що матеріали поглинають рентгенівське випромінювання пропорційно своїй атомній вазі, всі матеріали по-різному поглинають рентгенівське випромінювання залежно від їх щільності, атомного номера та товщини. Взагалі кажучи, матеріали, виготовлені з більш важких елементів, поглинають більше рентгенівського випромінювання та легко знімаються, тоді як матеріали, виготовлені з легших елементів, є більш прозорими для рентгенівських променів.

Для виконання АРК потрібно використовувати відповідне обладнання та кваліфіковану команду операторів, яка може належним чином інтерпретувати результати та їхній зв'язок зі змінними процесу та компонентів [22].

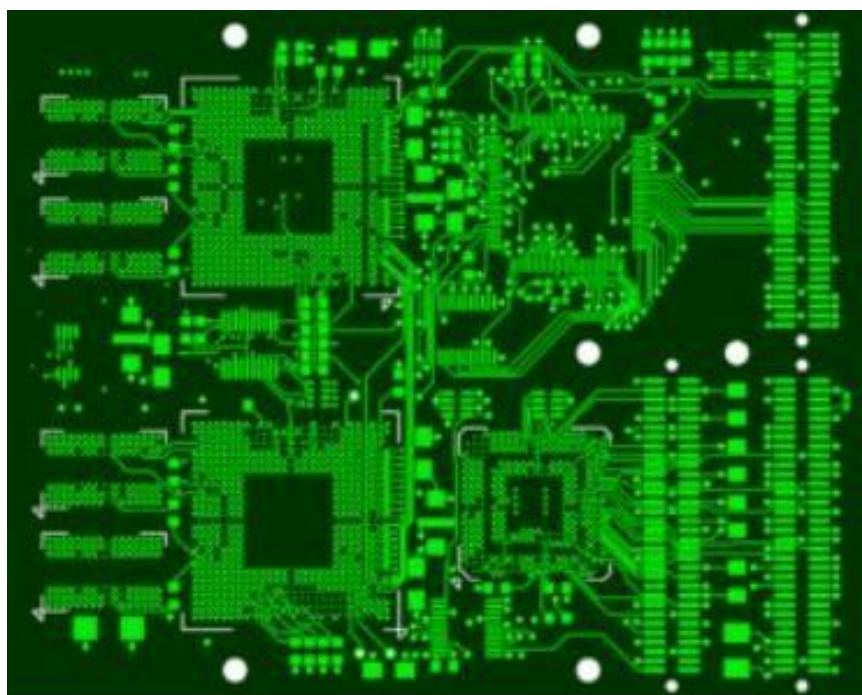


Рисунок 1.8 – Рентгенівський контроль [22]

### 1.2.4 Контроль якості друкованих плат з використанням нейронних мереж

Загалом виявлення дефектів друкованих плат можна розділити на дві категорії: прямий огляд людиною-оператором і методи машинного бачення на основі камери. Операторська перевірка дозволяє операторам легко виконувати візуальні перевірки за допомогою простих інструкцій. Однак оператори можуть легко втомитися від повторюваної роботи, і результати виявлення кожного оператора не є послідовними. Це фундаментальне обмеження людського судження та головна причина бракованих ДП, що залишають фабрику.

Щоб подолати ці обмеження, дослідники вивчили перевірку дефектів на основі машинного зору, яка складається з камери, джерела світла та операційної системи.

Основною метою цього підходу є контроль якості за допомогою автоматизованої системи оптичного контролю [23].

Для розробників доступні не лише методи з вищезазначених літературних досліджень, але й широкий спектр машинного зору та алгоритмів обробки зображень. В ідеалі можна розробити майже ідеальну систему АОІ, якщо всі типи дефектів повідомляти та вивчати заздалегідь. Однак не можна гарантувати, що система зустрине лише попередньо зареєстровані дефекти. У реальному виробничому середовищі завжди ймовірно, що можуть з'являться нові типи дефектів друкованих плат, і типова система виявлення на основі машинного зору не визначить їх правильно. У цьому випадку система перевірки дефектів повинна бути повторно відкалібрована з використанням нових даних вибірки щоразу, коли змінюються умови виробництва.

Це може бути головним недоліком традиційних систем перевірки на основі машинного зору, оскільки в останніх виробничих середовищах щороку відбуваються зміни в процесах [24].

Останнім часом поява методів глибокого навчання дозволила розробникам отримати більш узагальнені рішення для комп'ютерного та машинного зору. Зокрема, ЗНМ (згортова нейронна мережа) дали значні покращення у сфері

розпізнавання та виявлення зображень.

На відміну від традиційного алгоритму, де оригінальне зображення обробляється шляхом зрощування або вилучення функцій, алгоритми глибинного навчання автоматично виділяють ознаку із зображення шляхом його згортання. Після завершення згортання алгоритм обробляє дані зображення згортки в різних масштабах роздільної здатності шляхом об'єднання або підвищення дискретизації. Такий метод вилучення інформації надає глибинному навчанню сильну здатність до навчання, якої немає у традиційного методу машинного навчання [24-25].

Це робить його більш точним при вирішенні проблеми розпізнавання зображень. Крім того, продуктивність згорткових нейронних мереж наближається до рівня людей у задачах розпізнавання [25].

Для вирішення проблеми розпізнавання зображень друкованих плат із дефектами, ґрунтуючись на існуючих варіантах, саме цей метод візуального контролю ДП було обрано через те, що він є більш точним для вирішення вищезгаданої проблеми, ніж традиційні методи.

### 1.3 Аналіз технічних рішень

#### 1.3.1 Підбір та опис відеокамер

Промислові камери стають незамінним інструментом у різноманітних програмах машинного зору. Завдяки передовим технологіям ці камери здатні знімати високоякісні зображення та відео з метою аналізу та перевірки виявити дефекти і встановити можливість ремонту деталі або необхідність її заміни у різних електронних приладах. Вони відіграють вирішальну роль у різних галузях промисловості, включаючи автомобільну, електронну, фармацевтичну та харчову промисловість, для таких завдань, як розпізнавання об'єктів, перевірка дефектів, зчитування штрих-кодів та аналіз вимірювань. Найпоширенішими типами промислових камер є камери зонального сканування,

камери лінійного сканування, 3D-камери, теплові камери, гіперспектральні камери, мікроскопічні камери та ендоскопічні камери.

Основні функції та досягнення в технології промислових камер: захоплення зображень із високою роздільною здатністю, розширені можливості обробки зображень, висока швидкість захоплення зображень, сумісність з різними програмними та апаратними платформами та надійні корпуси, розроблені для суворих умов [26].

Переваги використання промислових камер у додатках машинного бачення: покращена якість зображення, чудова продуктивність через слабке освітлення, міцна та надійна конструкція, ефективна та точна обробка зображень, а також свобода оптимізації та спрощення автоматизованих процесів. Ці камери спеціально розроблені для того, щоб відповідати високим вимогам промислового середовища, з такими функціями, як висока роздільна здатність, висока частота кадрів і надійний корпус. Недоліками використання промислових камер у програмах машинного зору є – забезпечення сумісності з різними програмними та апаратними системами, робота з великими обсягами даних і забезпечення точної та надійної обробки зображень.

Камери машинного зору використовують різні технології для захоплення та обробки зображень. Деякі з найпоширеніших технологій: датчики КМОП (з комплементарною структурою метал-оксид-напівпровідник) і ПЗС (прилад із зарядовим зв'язком). КМОП-сенсори набули популярності в останні роки завдяки меншому енергоспоживанню та вищій швидкості зчитування порівняно з ПЗС-сенсорами. Ці датчики здатні створювати зображення високої роздільної здатності з відмінною якістю [26].

Промислові камери машинного бачення доступні в різних спектрах, включаючи монохромні та кольорові варіанти. Монохромні камери ідеально підходять для застосувань, де критично важливі аналіз зображення та точні вимірювання. З іншого боку, кольорові камери надають додаткову інформацію та підходять для програм, які вимагають диференціації та розпізнавання кольорів.

Промислові камери використовують різні інтерфейси для підключення до систем зору та інших компонентів. Деякі з найбільш часто використовуваних інтерфейсів: GigE Vision, USB3 Vision і Camera Link. GigE Vision отримав широке поширення завдяки високій швидкості передачі даних і сумісності з Ethernet. USB3 Vision забезпечує високу швидкість передачі зображень, що робить його придатним для програм із зображеннями з високою роздільною здатністю. Camera Link є популярним вибором для високопродуктивних промислових камер машинного зору.

Роздільна здатність камери є вирішальним фактором, який слід враховувати при виборі камери машинного зору для конкретного застосування. Роздільна здатність промислової камери – це кількість пікселів, яку вона може захопити.

Чим вища роздільна здатність, тим більше деталей може зафіксувати камера. Промислові камери зазвичай мають роздільну здатність від VGA (Video Graphics Array) (640 x 480 пікселів) до 64 мегапікселів [26].

У підсумку, потрібний тип промислової камери для ваших потреб залежить від конкретної програми, для якої ви її використовуєте.

Хорошим варіантом є камера телефону Xiaomi 12T Pro (рис. 1.9).



Рисунок 1.9 – Камера телефону Xiaomi 12T Pro [27]

Головні характеристики камери:

- роздільна здатність: 1220 x 2712 пікселів;
- поле зору: 120°;
- фокусна відстань: 7.01мм.

### 1.3.2 Вибір джерела освітлення

У зв'язку зі специфікою зйомки на високій швидкості, короткий час експозиції камери вимагає належного освітлення, щоб забезпечити достатнє світло. Флуоресцентні, кварцові галогенні та LED (Light-Emitting Diode) лампи є найбільш широко використовуваними типами освітлення в сучасних системах машинного зору, особливо для малих і середніх інспекційних станцій. Галогеніди металів, ксенон і натрій під високим тиском частіше використовуються у великомасштабних програмах або в областях, де потрібне дуже яскраве джерело. Галогенід металу, також відомий як ртуть, часто використовується в мікроскопії, оскільки він має багато дискретних піків довжини хвилі, що доповнює використання фільтрів для досліджень флуоресценції. Джерело ксенону корисне для застосувань, які вимагають дуже яскравого стробоскопа [28].

За останні роки LED технологія зростає у стабільності, інтенсивності та економічній ефективності; однак це все ще не настільки економічно ефективно для освітлення великої площі, особливо порівняно з люмінесцентними джерелами.

Однак, якщо гнучкість застосування, стабільність і довговічність є важливими параметрами, то світлодіодне освітлення може бути більш доречним. Залежно від точних вимог до освітлення, часто ви можете використовувати більше ніж один тип джерела для конкретної реалізації, і більшість експертів погоджуються, що один тип джерела не може належним чином вирішити всі проблеми з освітленням [28].

Як джерело освітлення було обрано настільну лампу IBV 645103-202 LED

(рис. 1.10).

Основні характеристики настільної лампи IBV 645103-202 LED:

- потужність: 3 Вт;
- робоча напруга: 230 В;
- світловий потік: 200 Лм;
- енергоспоживання: 3 кВт×год/1000 год;
- колірна температура: 4000К.



Рисунок 1.10 – Настільна лампа IBV 645103-202 LED [29]

Настільна лампа IBV 645103-202 LED – це джерело освітлення, яке працює при напрузі 3В. Її довжина складає 195 мм, її ширина складає 153 мм, та її висота складає 430 мм. Цикл життя лампи IBV 645103-202 LED становить близько 20000 годин. Для використання у зовнішніх або вологих умовах настільну лампу необхідно додатково захистити від вологи.

### 1.3.3 Огляд існуючих архітектур глибоких нейронних мереж

У цьому підрозділі буде розглянуто найсучасніші архітектури глибоких нейронних мереж: You-Only-Look-Once YOLO (You-Only-Look-Once), RetinaNet

і Faster R-CNN, та буде запропоновано власну архітектуру глибокої нейронної мережі.

(YOLO) – це одноетапна модель виявлення об'єктів. Вона складається з трьох основних компонентів, а саме хребет, шию та голову. Основою є згорткова нейронна мережа, яка приймає зображення різних розмірів як вхідні дані та формує загальні характеристики зображень. Шия являє собою серію мережевих шарів, які можуть об'єднувати ознаки для збагачення інформації. Оброблені об'єкти надходять на рівень передбачення, де класифікатор отримує клас об'єктів і генерує остаточні координати обмежувальної рамки [30].

Мережа ділить зображення на області сітки та передбачає прямокутні обмежувальні рамки в кожній області. Базова модель для YOLO подібна до GoogLeNet<sup>44</sup> із початковим модулем, заміненим згортковими шарами  $1 \times 1$  і  $3 \times 3$ . Остаточний прогноз створюється двома, повністю з'єднаними, шарами на всій згортковій карті об'єктів.

Функція втрат для мережі складається з двох частин: втрати локалізації для передбачення зсувів обмежувальної рамки та втрати класифікації для ймовірностей умовного класу. Втрати обчислюються як сума квадратів помилок. Більшість обмежувальних рамок не мають екземплярів об'єкта, тому важливо зменшити втрату фонових рамок. Два параметри ваги використовуються для балансування між координатами обмежувальної рамки та прогнозом оцінки достовірності для коробок без об'єктів [30].

Блок-схема на рис. 1.11 відображає структуру мережі YOLO.

Faster R-CNN поєднують дві мережі. По-перше, МРП (мережа регіональних пропозицій) генерує регіональні пропозиції. У свою чергу, мережа детекторів покладається на ці пропозиції для виявлення об'єктів. Faster R-CNN є значним покращенням у порівнянні зі своєю попередницею Fast R-CNN<sup>51</sup>, оскільки вона використовує МРП замість методу вибіркового пошуку для створення пропозицій регіону зображення. Мережа регіональних пропозицій ранжує прив'язки блоків регіонів зображень і вказує на блоки, які, швидше за все, містять об'єкти. Ці прив'язки відіграють важливу роль у моделях Faster R-

CNN. Типові Faster R-CNN використовують дев'ять прив'язок у кожній позиції зображення.

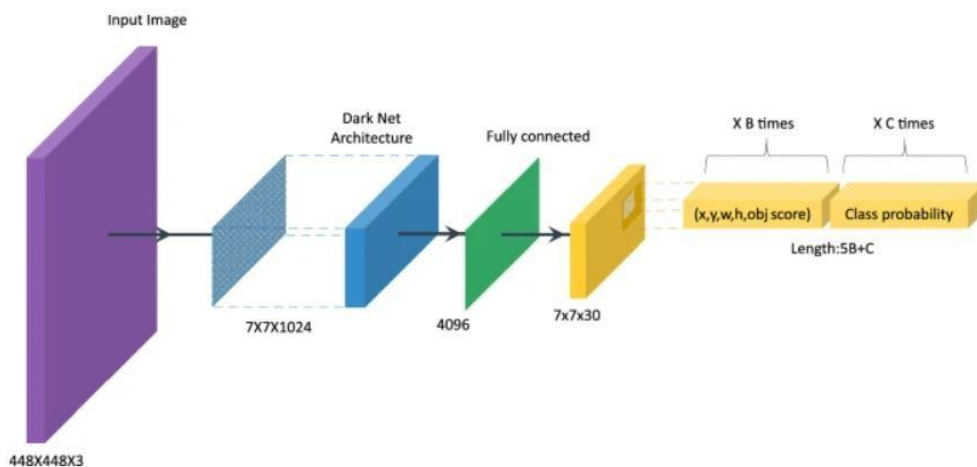


Рисунок 1.11 – структура мережі YOLO [30]

МРП виводить набір пропозицій для подальшого вивчення класифікатором і регресором для перевірки появи об'єктів. Таким чином, мережа регіональних пропозицій передбачає ймовірність того, що прив'язка є значущим об'єктом або частиною фону, а потім уточнює прив'язку. Потім вона позначає переднім планом прив'язки з більшим перекриттям з базовими блоками істинності. Навпаки, прив'язки з низьким перекриттям позначені як фон. Регресор обчислює втрати L1, використовуючи положення обмежувальної рамки та позитивних прив'язок. Конфігурація за замовчуванням використовує центральне положення, висоту та ширину як вхідні дані. Рівень об'єднання інтересів потім розділяє карту вхідних функцій на фіксовану кількість областей однакового розміру, а потім він застосовує максимальне об'єднання для кожної області, щоб забезпечити однакові розміри області незалежно від вхідних даних [30].

RetinaNet52 – це складена мережа, яка використовує магістральну, класифікаційну та регресійну підмережі. Типова магістраль використовує ResNet з ПМФ (пірамідальною мережею функцій), використовуючи два латерально з'єднаних шляхи. Шлях «знизу-вгору» використовує вихід остаточної карти функцій із набору послідовних згорткових шарів. Шлях «згори-вниз» використовує підвищення вибірки найближчого сусіда, щоб розширити останню

карту об'єктів до того самого розміру, що й попередній передостанній шар. Ці шари об'єднуються поелементним додаванням. Потім він виконує ітерації, доки карти функцій із шляху «знизу-вгору» не знайдуть відповідну карту функцій через бічні з'єднання. Цей процес робить модель масштабно-інваріантною.

Класифікаційна підмережа використовує згорткову мережу (CNN), приєднану до кожної ПМФ. Зазвичай він використовує чотири шари згортки  $3 \times 3$  із 256 фільтрами, після чого активується ReLU. Потім ще один шар згортки  $3 \times 3$  супроводжується активацією сигмовидної системи. Класифікаційні втрати, що використовуються, є варіантом фокусних втрат. Підмережа регресії приєднується до карт функцій ПМФ паралельно до підмережі класифікації, подібно до архітектури мережі класифікації. RetinaNet зазвичай вибирає блоки прив'язки 1к з найвищим показником достовірності з кожного рівня ПМФ. Щоб запобігти надлишковості, немаксимальне придушення можна застосувати незалежно до кожного класу, а потім вибрати опорний блок із найвищим показником достовірності та видалити блоки прив'язки, що перекриваються, за допомогою IoU більше 0,554. Нарешті, регресор виконує прогнозування зсуву, щоб уточнити вибір прив'язки та повернути передбачення обмежувальної рамки [30].

Для розв'язання поставленої задачі, ґрунтуючись на існуючих варіантах, було створено удосконалену структуру згорткової нейронної мережі. Структура запропонованої згорткової нейронної мережа схожа з однією із найпоширеніших архітектур глибинних згорткових нейронних мереж – ResNet (рис. 1.12).

У запропонованій нейронній мережі використовуються залишкові блоки, які містять обхідний зв'язок ідентичності, що дозволяє обходити один або більше шарів. Залишкові блоки призначені для зміни мети набору шарів навчання ідеальних ваг і порогів  $F(x)$  на навчання виходу залишкового блоку  $H(x) = F(x) + x$ . Після перетворення отримаємо  $F(x) = H(x) - x$ .

Тобто, залишковий блок намагається навчати залишкову функцію  $F(x)$  «Вхід» мінус «Вихід».

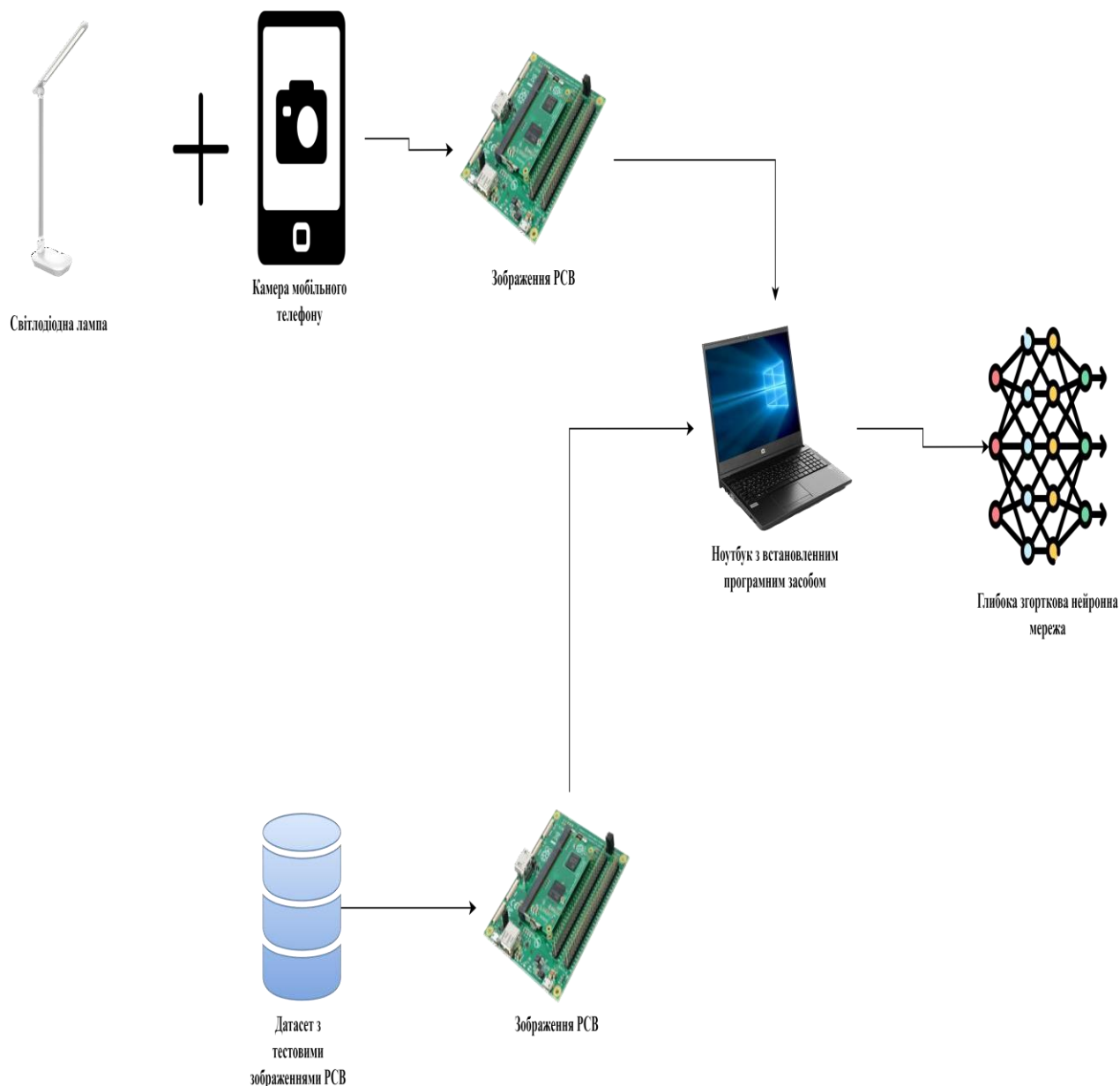


Рисунок 1.12 – Схема автоматизованої системи контролю якості монтажу друкованих плат

У такій схемі кожен блок налаштовує виведення попереднього блоку і йому не доводиться генерувати бажаний висновок з нуля. Додавання обхідних зв'язків дозволить поширити великі градієнти до вихідних шарів розробленої згорткової нейронної мережі, пом'якшуючи ефект проблеми градієнтів, що зникають, і покращуючи точність глибинних залишкових мереж порівняно з більш поверхневими аналогами.

## 1.4 Аналіз існуючих мов програмування

### 1.4.1 Мова програмування C++

Мова програмування C++ – одна з найпопулярніших у світі мов програмування. C++ можна знайти в сучасних операційних системах, графічних інтерфейсах користувача та вбудованих системах. C++ – це об'єктно-орієнтована мова програмування, яка надає чітку структуру програмам і дозволяє повторно використовувати код, знижуючи витрати на розробку. Мова C++ є портативною і може використовуватися для розробки програм, які можна адаптувати до багатьох платформ.

### 1.4.2 Мова програмування Java

Java – потужна мова програмування загального призначення. Він використовується для розробки настільних і мобільних додатків, обробки великих даних, вбудованих систем тощо. Програми Java зазвичай скомпільовані в байт-код, який може працювати на будь-якій віртуальній машині Java незалежно від базової архітектури комп'ютера. Синтаксис Java подібний до C і C++, але має менше можливостей низького рівня, ніж кожен з них. Середовище виконання Java надає динамічні можливості (такі як відображення та модифікація коду середовища виконання), які зазвичай недоступні в традиційних скомпільованих мовах.

### 1.4.3 Мова програмування Python

Python – це мова програмування загального призначення, яку можна ефективно використовувати для створення практично будь-яких програм, які не потребують прямого доступу до апаратного забезпечення комп'ютера. Вона доступна на багатьох платформах, включаючи Windows, Linux і Mac OS. Крім

того, багато безкоштовних сторонніх модулів Python, програми та інструменти, а також документація є широкодоступними для сучасних технологій, таких як наука про дані, машинне навчання, штучний інтелект і робототехніка. Це дозволяє розв'язувати безліч задач різними способами.

Мова Python була обрана мною, через те що вона проста у використанні та дуже легко вчиться. Python буде використовуватися для розробки візальної системи контролю якості монтажу друкованих плат. Синтаксис Python дозволяє програмістам писати комп'ютерні інструкції з використанням меншої кількості рядків ніж при написанні подібних інструкцій на інших мовах програмування, таких як Java, C++ або C#. Також простота синтаксису Python потребує менше часу для того, щоб зрозуміти код, написаний іншими програмістами.

Налагодження в python є дуже простим процесом, через відсутність етапу компіляції. Налагоджувач вихідного коду дозволяє перевіряти локальні та глобальні змінні, обчислення довільних виразів, встановлення точок зупинки, покрокове виконання рядків коду тощо.

Python має в наявності різні фреймворки графічного інтерфейсу користувача (GUI) від рідного Tkinter до низки інших кросплатформових рішень, таких як Gtk, Qt, Tk та wxWidgets. GUI-програмування на Python означає ефективний процес додавання кросс-платформених GUI інтерфейсів поверх наукового додатка, які є ефективними процес, який вимагає набагато менше коду, ніж у C/C++.

Python підтримує кілька парадигм програмування, таких як об'єктно-орієнтоване, імперативне та функціональне програмування. Його стандартна бібліотека велика і всеосяжна. Вона має повністю динамічну систему типів та циклічний збирач сміття для автоматичного керування пам'яттю. Python часто використовується як мова сценаріїв, як і інші динамічні мови, але також використовується у широкому діапазоні контекстів, не пов'язаних зі сценаріями.

Python код може бути упакований в автономні виконувани програми з використанням сторонніх інструментів.

В даний час розробляються різноманітні проекти на Python, які

забезпечують різні паралельні архітектури, включаючи архітектури із загальною пам'яттю та інтерфейс передачі повідомлень для архітектур із розподіленою пам'яттю.

### 1.5 Постановка завдання та висновки до першого розділу

Деякі методи вже були запропоновані для контролю якості друкованих плат.

Основні методи КЯ можуть бути охарактеризовані швидкістю виконання, вартістю та чутливістю до помилок. Автоматичні методи контролю якості широко використовується у виробничих середовищах, оскільки вони забезпечують швидші та точніші результати, ніж ручні методи.

На початку внутрішньосхемного тесту плату притискають до цвяхів (ложе щупів). У процесі проектування створюються попередньо створені точки доступу на ДП, які дозволять тестувальникам схем отримати доступ до схеми.

По-перше, одна із проблем цього методу полягає в тому, що тести неможливо проводити на продуктах з незначною кількістю переглядів. Якщо ваша плата не має відповідних колодок, створених з метою тестування дизайну для виробництва, ВТ неможливі.

По-друге, цей процес було засновано лише на досвіді. Це у свою чергу часто призводить до великих зусиль на згинання, що викликає надмірне навантаження на плату, пошкоджуючи її та спричиняючи збій у належній роботі друкованої плати.

Автоматична оптична інспекція – ще один метод, який широко використовується у виробничих середовищах. Головна особливість цього методу – це те, що тестування АОІ може швидко виявляти та вирішувати проблеми, що виникають, перш ніж вони вплинуть на друковані плати, виготовлені згодом.

Але ніколи не слід покладатися виключно на автоматизовану оптичну інспекцію, бо друковані плати не можуть завжди бути включені, і їх покриття не охоплює всі компоненти плати. В ідеалі ви повинні поєднати функціональний

тест із літаючим зондом або з внутрішньосхемним тестуванням.

Але все-таки більшості виробників електроніки АРК (автоматизований рентгенівський контроль) є більш цінним інструментом перевірки. Головною перевагою АРК над перерахованими вище методами є можливості перевірити приховані елементи ДП, наприклад, корпуси кулькової решітки з їхніми паяними з'єднаннями під корпусом мікросхеми.

Також на сьогоднішній час широке застосування у виробничому середовищі набули методи глибокого навчання дозволила розробникам отримати більш узагальнені рішення для комп'ютерного та машинного зору для вирішення проблеми розпізнавання зображень друкованих плат із дефектами.

Метою цього дослідження є розробка автоматизованої системи контролю якості монтажу друкованих плат з використанням технології штучної глибокої нейронної мережі. У цій роботі пропонується виконання дефектування друкованих плат з використанням навченої згорткової нейронної мережі, яка буде порівнювати тестове зображення з еталонним зображенням. Схему автоматизованої системи контролю якості монтажу друкованих плат наведено на рис 1.12.

Розроблювану АСКЯ пропонується використовувати на підприємстві з виробництва побутової техніки в Німеччині. Ця система має дуже важливе значення для керівництва компанії через те, що метою є підвищення якості продукції та зменшення впливу людини на процес контролю якості.

Тривалість процесу знаходження дефектів за допомогою глибокої нейронної мережі на кожній друкованій платі буде залежати від якості навчання ЗНМ, якості освітлення, роздільної здатності камери, що впливає на якість зображень, які використовуються для навчання нейронної мережі. Система припиняє свою роботу тільки тоді, коли усі вхідні зображення друкованих плат були оброблені за допомогою технології машинного зору і пройшли процес класифікації дефектів на друкованій платі за допомогою ЗНМ.

Автоматизована система контролю якості монтажу друкованих плат тісно пов'язана з автоматизованою системою розробки компонентів друкованих плат.

## 2 ВИБІР ТЕХНОЛОГІЇ ДЛЯ ВИРІШЕННЯ ПОСТАВЛЕНОЇ ЗАДАЧІ

### 2.1 Розрахунок роздільної здатності камери

Розрахунок просторової роздільної здатності для детектування дефектів на друкованих платах з використанням камери телефону Xiaomi 12T Pro.

Вхідні параметри:

- довжина хвилі камери ( $\lambda$ ): 940 нм;
- відстань до друкованої плати (D): 450 мм;
- розмір пікселя на матриці камери (d): 0.64 мкм.

Обчислимо дані. Кут огляду камери:

$$\theta = 2 \operatorname{atan} \left( \frac{d}{D} \right). \quad (2.1)$$

Підставивши дані отримаємо:

$$\alpha = 2 \operatorname{atan} \left( \frac{0.64 \times 10^{-6}}{450 \times 10^{-3}} \right) = 1422 \times 10^{-7} \text{ рад.}$$

Обчислимо роздільну здатність:

$$S = \frac{\lambda}{(2 \tan(\frac{\theta}{2}))}. \quad (2.2)$$

Підставивши дані отримаємо:

$$S = \frac{940 \times 10^{-9}}{(2 \tan(\frac{8.15 \times 10^{-3}}{2}))} \approx 6610 \text{ мкм.}$$

## 2.2 Розрахунок параметрів згорткової нейронної мережі

### 2.2.1 Вибір метрики для детектування об'єктів

Для оцінки результатів роботи алгоритмів об'єктного виявлення найбільш раціональною є метрика IoU.

Метрика IoU оцінює поділ між площею перекриття та площею об'єднання. Іншими словами, метрика IoU оцінює ступінь збігу між фактичним значенням  $gt$  і прогнозами  $pd$  [31]. Її оцінки змінюються від 0 до 1, де 1 буде ідеальним збігом між фактичним значенням та прогнозом. Вона розраховується за формулою:

$$IoU = \frac{\text{площа перекриття}}{\text{площа об'єднання}} \quad (2.3)$$

Precision вимірює, яка частка ідентифікованих об'єктів була коректною. Вона обчислюється як відношення кількості правильно ідентифікованих об'єктів до загальної кількості ідентифікованих об'єктів:

$$\text{Precision} = \frac{TP}{TP + FP}, \quad (2.4)$$

де  $TP$  – кількість правильно ідентифікованих об'єктів;

$FP$  – кількість неправильно ідентифікованих об'єктів.

Recall визначає частку дійсно присутніх об'єктів, які було ідентифіковано.

Вона обчислюється як відношення кількості правильно ідентифікованих об'єктів до загальної кількості дійсно присутніх об'єктів.

$$\text{Recall} = \frac{TP}{TP + FN} \quad (2.5)$$

де  $TP$  – кількість правильно ідентифікованих об'єктів;

$FN$  – загальна кількість дійсно присутніх об'єктів.

При побудові кривої запам'ятовування точності, оціненої за пороговим значенням IoU, можна отримуюмо середню точність:

$$AP\alpha = \int_0^1 p(r)dr, \quad (2.6)$$

де  $AP$  – середня точність;

$\alpha$  – порогове значення;

$p$  – точність.

При використанні багатокласового детектора об'єктів mAP оцінюється середнє значення  $AP$  для всіх класів:

$$MAP = \frac{\sum_{q=1}^Q AP(q)}{Q} \quad (2.7)$$

де  $AP$  – середня точність кожного класу  $q$ ;

$Q$  – кількість класів.

### 2.2.2 Опис навчального набору даних

Даний підрозділ описує важливі деталі про загальнодоступний набір РСВ даних для класифікації та виявлення дефектів друкованих плат.

Це синтетичний набір даних РСВ, що містить 1386 зображень із 6 видами дефектів (відсутній отвір, укус миші, розрив ланцюга, замикання, шпора, паразитна мідь) для використання завдань виявлення, класифікації та реєстрації.

Приклад зображення з набору даних РСВ наведено на рис. 2.1.

Для цього набору даних використовується 9 друкованих плат. Щоб створити набір даних із дефектами, штучні дефекти були додані до зображень друкованої плати в різних місцях і збережені як кілька зображень.

Дефекти в початковому наборі даних мають високу роздільну здатність,

оскільки зображення нижчої роздільної здатності зменшують корисну інформацію для виявлення об'єктів, що, в свою чергу, зменшить точність моделі. Але зображення з високою роздільною здатністю також можуть викликати проблеми під час обробки і навчання моделей нейронних мереж. Для забезпечення оптимального використання набору даних, використовуються методи збільшення даних, які дозволяють розширити обсяг навчальної вибірки.

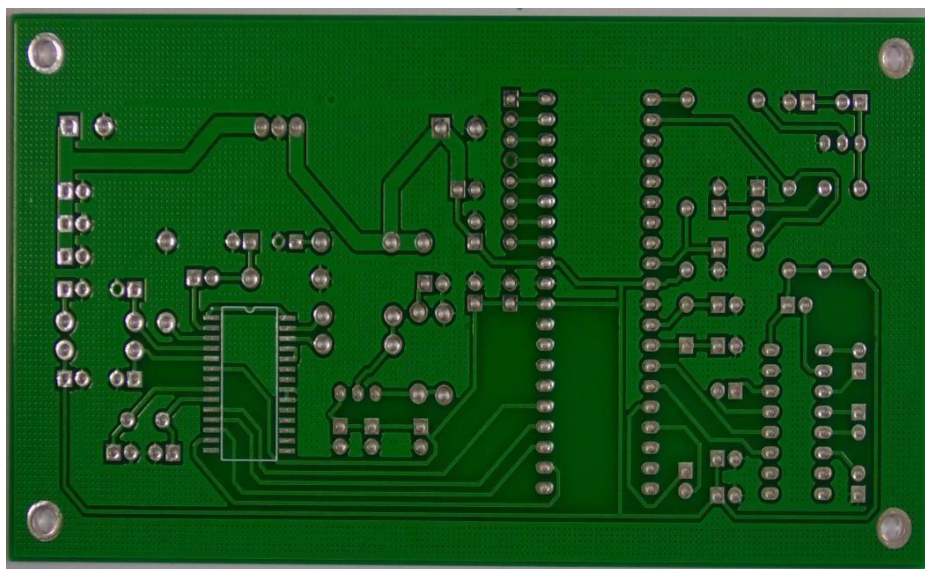


Рисунок 2.1 – Приклад зображення з набору даних РСВ

Загалом датасет містить 887 зображень для навчання та 253 зображення для тестування. Для кожного дефекту у датасеті мається 380 зображень як для навчання, так і для тестування.

### 2.3 Висновки до другого розділу

В ході написання другого розділу було проведено наступне:

- розраховано роздільну здатність камери;
- проведено розрахунок метрик для детектування об'єктів;
- описано навчальний набір даних для ЗНМ.

Встановлено, що роздільна здатність камери телефону Xiaomi 12T Pro дорівнює 6610 мкм, що є дуже великою величиною порівняно з роздільною здатністю інших розумних камер.

Визначено метрики для детектування об'єктів та описано синтетичний набір даних РСВ, який є у відкритому доступі в інтернеті. Було виявлено, що для забезпечення оптимального використання набору даних, потрібно використовувати методи збільшення даних, для розширення обсягу навчальної вибірки.

### 3 РОЗРОБКА АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ ЯКОСТІ МОНТАЖУ ДРУКОВАНИХ ПЛАТ

#### 3.1 Розробка схеми алгоритму роботи системи

Для подальшої роботи на автоматизованій системі контролю якості монтажу друкованих плат є загальне представлення алгоритму роботи системи.

Схема алгоритму роботи АСКЯ представлена на рис 3.1.

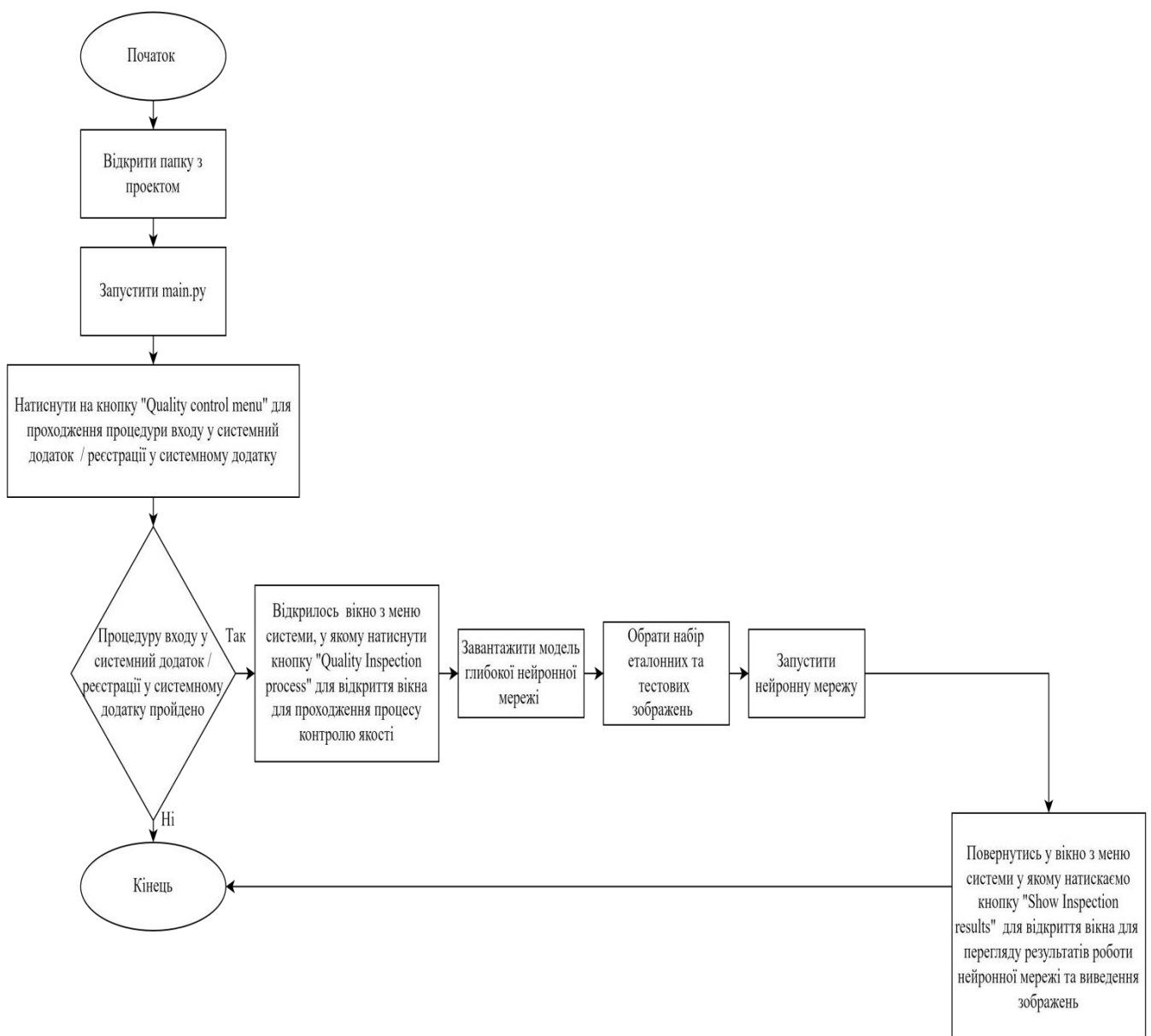


Рисунок 3.1 – Схема алгоритму роботи системи

### 3.2 Ідентифікація модулів системи

Наступним кроком потрібно провести ідентифікацію усіх модулів, що будуть використані для розроблення автоматизованої системи контролю якості монтажу друкованих плат (рис 3.2).

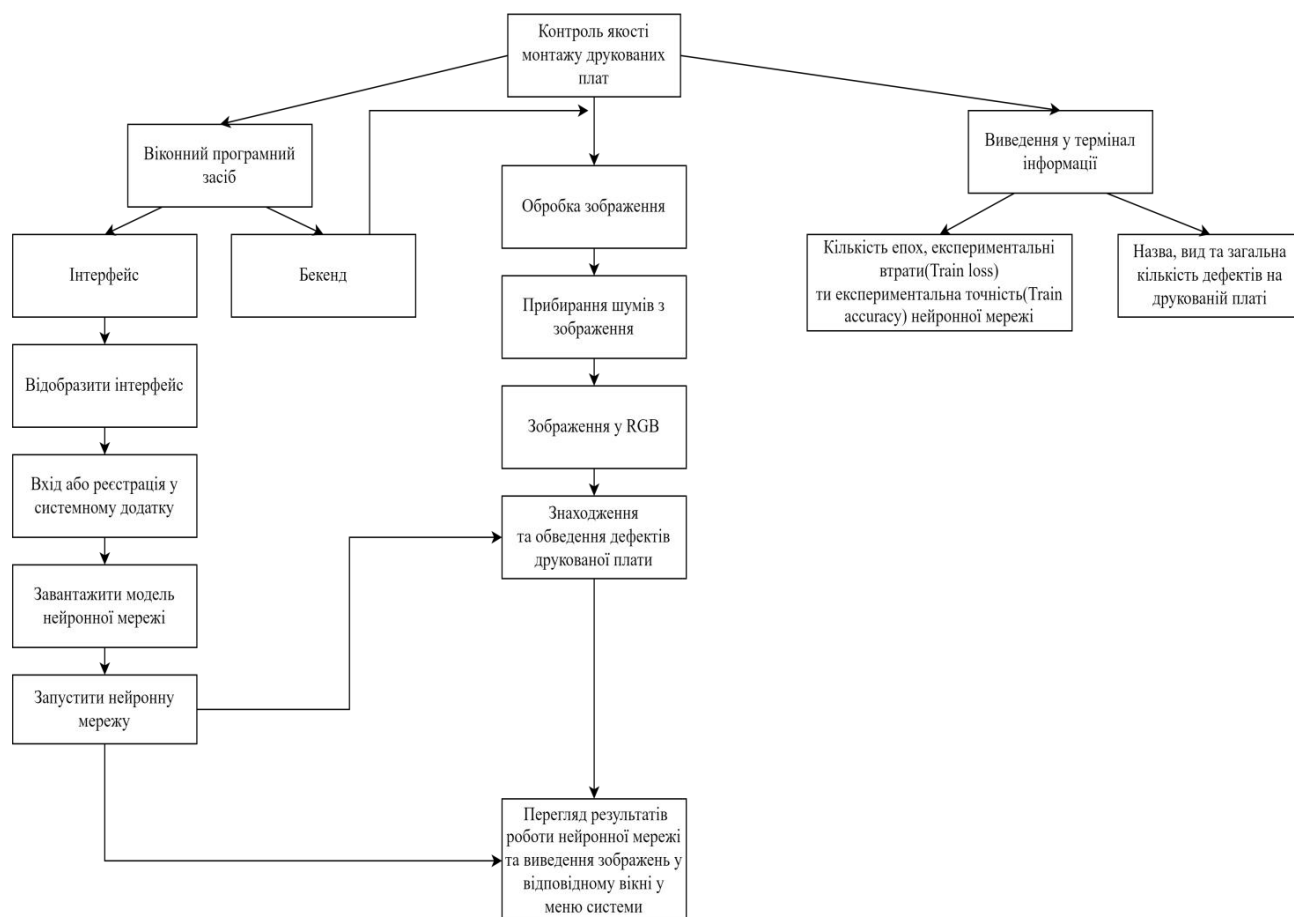


Рисунок 3.2 – Схема ідентифікації модулів системи

### 3.3 Розробка додатку для автоматизованої системи контролю якості монтажу друкованих плат

#### 3.3.1 Опис бібліотек

Спочатку підключаємо необхідні бібліотеки:

```
import tensorflow as tf
```

```
import keras
```

```
import PyQt5
import cv2
import matplotlib.pyplot as plt
import mysql.connector
import numpy as np
import os
import sys
from mysql.connector import Error
from PyQt5.QtCore import *
from PyQt5.QtGui import *
from PyQt5.QtWidgets import *
from PyQt5 import uic
from keras import layers
from keras import losses
from keras.models import Model
from keras.models import model_from_json
```

У якості бібліотек використано наступні:

– tensorflow – відкрита програмна бібліотека для машинного навчання, що була розроблена для вирішення завдань побудови та тренування нейронної мережі з метою автоматичного знаходження та класифікації образів, досягаючи якості людського сприйняття. За допомогою TensorFlow мож навчати та запускати глибокі нейронні мережі для класифікації рукописних цифр, розпізнавання зображень, вбудовування слів, рекурентних нейронних мереж, моделей послідовності для машинного перекладу, обробки природної мови та моделювання на основі рівняння в частинних похідних. Найкраще те, що TensorFlow підтримує масштабне прогнозування виробництва з тими самими моделями, що використовуються для навчання;

– keras – це відкрита бібліотека, призначена для людей, а не для машин. Keras дотримується найкращих практик для зменшення когнітивного

навантаження: він пропонує узгоджені та прості додатки, мінімізує кількість дій користувача, необхідних для типових випадків використання, і надає чіткі та дієві повідомлення про помилки. Keras також надає найвищий пріоритет створенню чудової документації та посібників для розробників;

- PyQt5 – набір розширень графічного фреймворку Qt для мови програмування Python. PyQt також має у своєму складі Qt Designer (Qt Creator) – дизайнер графічного інтерфейсу користувача. Програма ruic генерує Python код із файлів, створених у Qt Designer. Це робить PyQt дуже корисним інструментом швидкого прототипування. Крім того, можна додавати нові графічні елементи управління, написані на Python, Qt Designer;

- cv2 – бібліотека комп'ютерного зору OpenCV, обробки зображень та чисельних алгоритмів загального призначення з відкритим кодом;

- matplotlib – це комплексна бібліотека для створення статичних, анімованих та інтерактивних візуалізацій на Python;

- mysql – дозволяє програмам написаним на Python отримувати доступ до баз даних MySQL за допомогою API, сумісного зі специфікацією API бази даних Python v2.0;

- numpy – бібліотека з відкритим кодом для мови програмування Python. NumPy має у своєму складі комплексні математичні функції, генератори випадкових чисел, процедури лінійної алгебри, перетворення Фур'є тощо. Швидкі та універсальні концепції векторизації, індексації та трансляції NumPy є фактичними стандартами масивних обчислень сьогодні. NumPy підтримує широкий спектр апаратного забезпечення та обчислювальних платформ і добре працює з розподіленими бібліотеками, бібліотеками GPU та розрідженими масивами;

- os – модуль, що надає функції для взаємодії з операційною системою. os поставляється зі стандартними службовими модулями Python. Цей модуль забезпечує портативний спосіб використання залежних від операційної системи функцій. Модулі os і os.path містять багато функцій для взаємодії з файловою системою;

– `sys` – модуль, що надає різні функції та змінні, які використовуються для керування різними частинами середовища виконання Python. Це дозволяє працювати з інтерпретатором, оскільки забезпечує доступ до змінних і функцій, які сильно взаємодіють з інтерпретатором.

### 3.3.2 Опис класів та функцій програми

Клас `MainWindow` є головним класом у програмному засобі. Він забезпечує основні морфологічні операції з додатком. Він успадковує функціонал від класу віджета головного віна `QMainWindow`. Для завантаження конфігурації інтерфейсу користувача для програми у форматі `.ui` для головного вікна та дочірніх вікон програми використовується функція `loadUi()` з модулю `uic`:

```
class MainWindow(QMainWindow):
    def __init__(self):
        super(MainWindow, self).__init__()
        # Завантажуємо файл ui
        filepath = r'C:\Automated quality control system\Forms\mainwindow.ui'
        uic.loadUi(filepath, self)
```

На рис. 3.3 зображено головне вікно додатку АСКЯ монтажу друкованих плат.

Клас `QApplication` використовується для керування потоком користувацького графічного інтерфейсу програми та основними параметрами:

```
app = QApplication(sys.argv)
window = MainWindow()
try:
    sys.exit(app.exec_())
```

except:

```
print("Exiting")
```

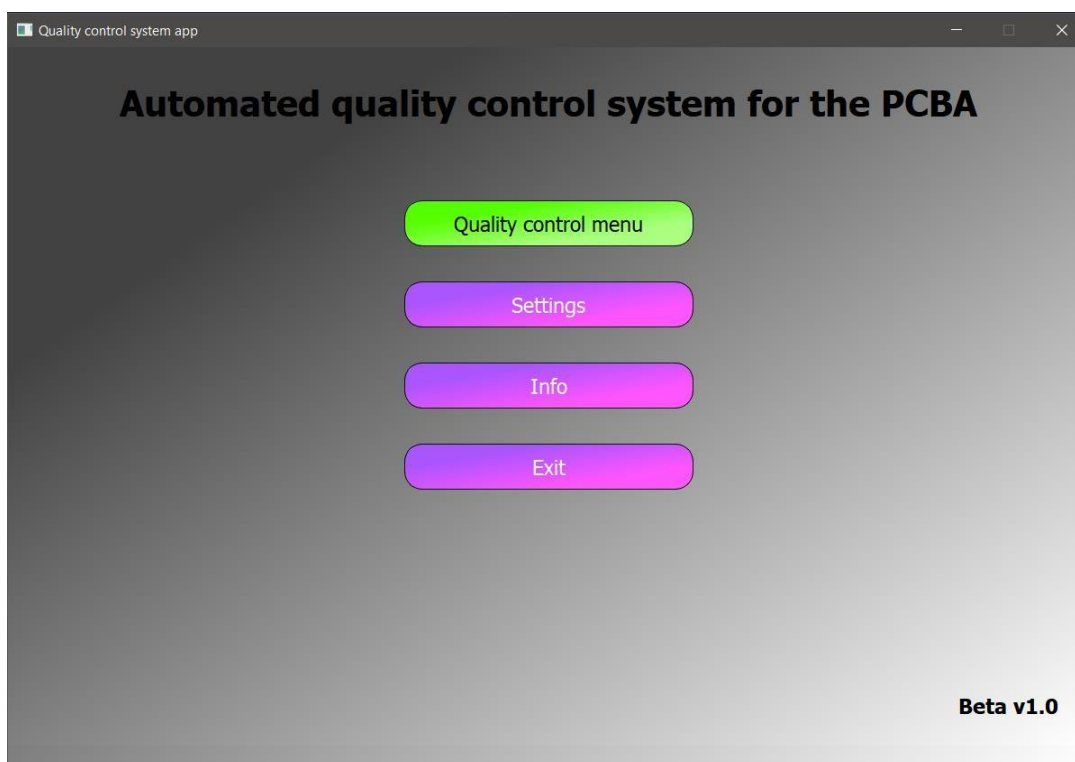


Рисунок 3.3 – Головне вікно програми

Спочатку потрібно натиснути на кнопку Quality control menu. При натисканні на кнопку спочатку відкриється вікно реєстрації у додатку:

```
def push_btn1_onClick(self, checked):
    if self.aqs_menu_window.isVisible() or
self.welcome_screen_window.isVisible():
        self.aqs_menu_window.hide()
        self.welcome_screen_window.hide()
    else:
        self.welcome_screen_window.show()self.hide()

self.btn1.clicked.connect(self.push_btn1_onClick)
```

Процедура реєстрації складається з входу користувача у існуючий акаунт або створення нового акаунта користувача. Функція `login_function()` відповідає за порівняння даних, що були введені у відповідні поля з даними у базі даних MySQL.

```

if connection.is_connected():
    cursor = connection.cursor()
    query = 'SELECT COUNT(*) FROM users WHERE
username=\'"+username+"\'"
    cursor.execute(query)
    result_usercount = cursor.fetchone()[0]

    if result_usercount > 0:
        query = 'SELECT email FROM users WHERE
username=\'"+username+"\'"
        cursor.execute(query)
        result_email = cursor.fetchone()[0]
        query = 'SELECT password FROM users WHERE
username=\'"+username+"\'"
        cursor.execute(query)
        result_pass = cursor.fetchone()[0]

```

На рис. 3.4 зображено вікно авторизації користувача у системі.

Після проходження процедури реєстрації відкриється вікно Quality control menu. У цьому вікні натискаємо кнопку Quality inspection process для відкриття вікна для встановлення параметрів процесу контролю якості:

```
self.QI_process_btn.clicked.connect(self.push_QI_process_btn_onClick)
```

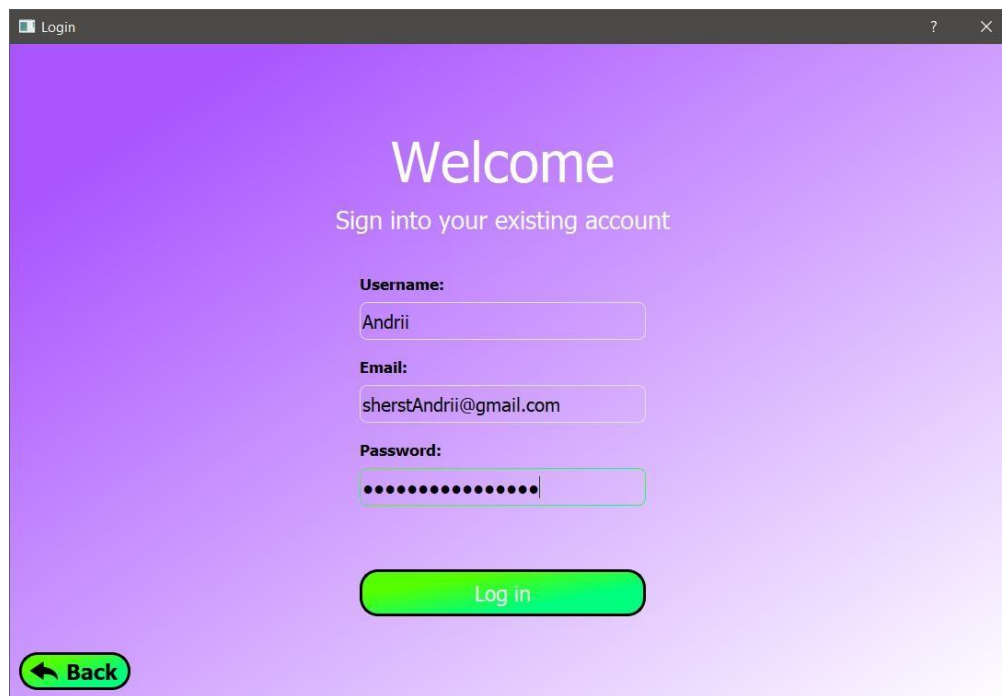


Рисунок 3.4 – вікно авторизації користувача у системі

У вікні для встановлення параметрів процесу контролю якості натискаємо кнопку Choose the neural network model, для того, щоб обрати модель нейронної мережі:

```

filepath = r'C:\Automated quality control
system\modules\deep_neural_network\model_files'
fnames, _filter = QFileDialog.getOpenFileNames(
    self, "Choose model and weights", filepath, "JSON Files (*.json)"
)
if fnames:
    self.file_list = [str(Path(fname)) for fname in fnames]
    self.loaded_nn_model = save_load.load_model_as_json(self.file_list[0],
self.file_list[1])

```

Модель згорткової нейронної мережі описана за допомогою класів NeuralNetworkBlock, NeuralNetworkBlocks, NeuralNetworkModelV1:

```

self.config_dict = model_config()
self.initializer = self.config_dict.get("initializer")
self.inputs = layers.Input(shape=self.model_shape)
self.x = layers.Conv2D(self.config_dict.get("initial_num_feature_maps"),
kernel_size=(3,3),\
strides=(1,1), kernel_initializer=self.initializer, padding="same")(self.inputs)
self.x = layers.BatchNormalization()(self.x)
self.x = layers.Activation("relu")(self.x)
self.x = NeuralNetworkBlocks(self.x)
self.x = layers.GlobalAveragePooling2D()(self.x)
self.x = layers.Flatten()(self.x)
self.outputs = layers.Dense(self.config_dict.get("num_classes"),
kernel_initializer=self.initializer)(self.x)

```

### 3.4 Навчання згорткової нейронної мережі

У програмі навчання нейронної мережі виконується за допомогою функції `train_model()`

```

model_hist = model.fit(train_ds,
    batch_size=config_dict.get("batch_size"),
    epochs=config_dict.get("num_epochs"),
    callbacks=config_dict.get("callbacks"),
    steps_per_epoch=train_ds.samples // 64,
    validation_data=val_ds,
    validation_steps=val_ds.samples // 64)

```

Прогнозування результатів нейронної мережі виконується за допомогою функції `test_ensemble()`:

```

for path in test_ds.filepaths:
    image = cv2.imread(path)
    image = cv2.resize(image, (224, 224))
    image = np.expand_dims(image, axis=0)
    nn_model_pred = nn_model.predict(image)

    nn_model_predictions.append(nn_model_pred[0])

```

Для тренування глибокої згорткової нейронної мережі було встановлено наступні параметри у функції:

- train\_ds – тренувальний набір даних;
- batch\_size – розмір одного батча, що дорівнює 256;
- epochs – кількість епох, що дорівнює 100;
- callbacks – зворотні виклики. Це потужні інструменти для налаштування поведінки моделі Keras під час її навчання, оцінки або висновку;
- steps\_per\_epoch – кількість кроків для кожної епохи;
- validation\_data – тестовий набір даних;

Після закінчення процесу тренування глибокої згорткової нейронної мережі її можна зберегти у HDF форматі:

```
model.save(save_model_filepath)
```

### 3.5 Висновки до третього розділу

У результаті написання третього розділу було створено програмний засіб для автоматизованої системи контролю якості монтажу друкованих плат з використанням глибокої згорткової нейронної мережі для знаходження таких дефектів ДП, як: відсутній отвір для закріплення компонентів ДП, «укус миші», відкритий контур, короткі доріжки, шпори та паразитна мідь.

Результати експериментальних досліджень з розробленим додатком

будуть представлені у четвертому розділі.

Програмний засіб забезпечує зручний користувацький інтерфейс та високу точність виявлення дефектів за допомогою засобів машинного навчання. Цей додаток було розроблено спеціально для висококваліфікованих користувачів, що мають гарні знання у галузях машинного навчання та виявлення дефектів друкованих плат.

## 4 ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

### 4.1 Інструкція користувача

Як вже було зазначено вище, додаток автоматизованої системи контролю якості монтажу друкованих плат було розроблено спеціально для висококваліфікованих користувачів. Тому для того, щоб кожен користувач системи міг правильно працювати з програмним засобом, було покроково написано інструкцію користувача, що пояснює яким чином потрібно оброблювати зображення для експериментальних досліджень з додатком, та як правильно зберігати зображення після закінчення процесу виявлення дефектів на ДП.

#### 4.1.1 Обробка вхідних зображень

Крок 1. У вікні Quality inspection process спочатку потрібно натиснути кнопки Choose train images dataset та Choose test images dataset для того, щоб обрати каталог з еталонними та тестовими зображеннями для тренування нейронної мережі. Процес обирання каталогу з тестовими зображеннями наведено на рис. 4.1.

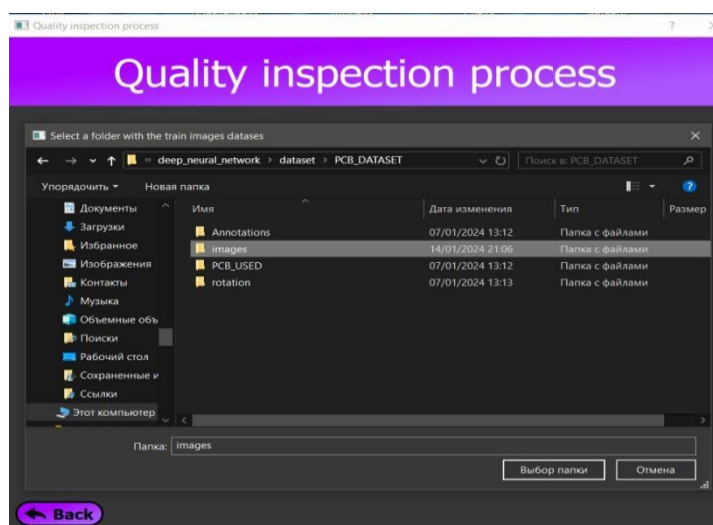


Рисунок 4.1 – Обираємо каталог з тестовими зображеннями

На рис. 4.2 – наведено приклад еталонного зображення ДП з відповідного каталогу.



Рисунок 4.2 – Еталонне зображення ДП

Крок 2. Наступним кроком потрібно завантажити вже навчену модель глибокої згорткової нейронної мережі (рис 4.3).

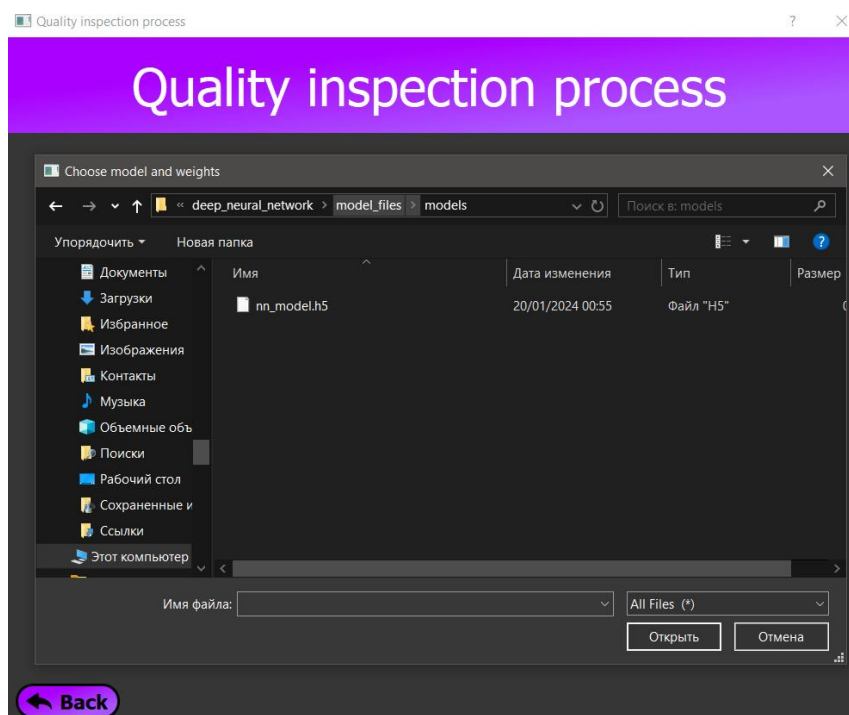


Рисунок 4.3 – Завантаження навченої моделі глибинної згорткової нейронної мережі

Крок 3. Далі перед тим як запустити нейронну мережу, проводиться процес обробки зображення з використанням функцій бібліотеки комп'ютерного зору OpenCV:

```
model = loaded_nn_model
measures = get_measures()
offset = 20
predictions = list()
for c in contours:
    x, y, w, h = cv2.boundingRect(c)
    x1 = x - offset
    x2 = x + w + offset
    y1 = y - offset
    y2 = y + h + offset
    ROI = img_test[y1:y2, x1:x2]
    try:
        ROI = cv2.resize(ROI, (224, 224))
        ROI = ROI.reshape(-1, 224, 224, 3)
        model_pred = model.predict(ROI)[0]

        pred = ensemble(model_pred, measures)
        predictions.append((x1, y1, x2, y2, pred))
    except cv2.error as e:
        print(f"cv2 error: {e}")
```

#### 4.1.2 Зберігання отриманих результатів

Крок 4. Для того, щоб користувач зміг побачити результати процесу виявлення дефектів з використанням згорткової нейронної мережі, йому потрібно відкрити вікно Quality inspection results (рис 4.4).



Рисунок 4.4 – Вікно для виведення результатів програми

#### 4.2 Висновки до четвертого розділу

В результаті написання четвертого розділу було написано інструкцію користувача для того, щоб кожен користувач системи міг правильно працювати з програмним засобом.

Додаток автоматизованої системи контролю якості монтажу друкованих плат було розроблено спеціально для висококваліфікованих користувачів. Тому для того, щоб кожен користувач системи міг правильно працювати з програмним засобом, було створено покрокову інструкцію користувача, що пояснює яким чином потрібно оброблювати зображення для експериментальних досліджень з додатком, та як правильно зберігати зображення після закінчення процесу виявлення дефектів на ДП.

## 5 ОХОРОНА ПРАЦІ

Техніка безпеки під час процесу контролю якості монтажу друкованих плат є одним з найважливіших питань, якому повинна приділятися найбільша увага. Завжди необхідно перевіряти, чи дотримано діючі у виробництві технологічні інструкції, стандарти і технічні умови.

Перед початком інспекції контролю якості (ІКЯ) на підприємстві працівник повинен переконатися, що всі друковані плати правильно розміщені на конвеєрній стрічці. Також перед тим як почати контроль якості ДП потрібно заздалегідь підготувати робоче місце та переконатися в тому, що натренована нейронна мережа має високу точність виявлення дефектів на платах.

Приміщення, в якому проводиться інспекція, повинно мати якісну систему освітлення та камеру з високою роздільною здатністю, для передавання дрібних деталей зображення з виявленими дефектами до системного додатку [32]. Світлодіодне освітлення на сьогоднішній день вважається найбільш універсальним і найбільш перспективним напрямком серед усього розмаїття технологій штучного освітлення.

Під час встановлення світлодіодної системи освітлення слід звертати увагу на будова світлодіодних світильників, температурну залежність та деградація світлодіодних кристалів внаслідок перегріву. Оскільки діоди живляться постійною і досить низькою напругою 12-24 В, у корпусі таких світильників розміщується напівпровідниковий пристрій для зниження напруги живлення та випрямлення струму.

В аварійних ситуаціях при аварійному відключенні електроенергії необхідно від'єднати обладнання від електричного струму головним вимикачем та вимкнути усі електронні прилади з розеток. Під час різних аварійних ситуаціях на підприємстві, світлодіодна система освітлення повинна мати у своєму складі аварійне евакуаційне освітлення, що забезпечує чудову видимість шляхів евакуації, та освітлення безпеки при аварійному вимкненні робочого освітлення [32].

## ВИСНОВКИ

У процесі виконання дослідження було отримано рішення завдання підвищення ефективності технологій приладобудування за рахунок розробки компонентів системи візуального контролю якості монтажу друкованих плат.

У розділах пояснювальної записки було наведено такі основні результати:

- аналіз процесу контролю якості монтажу друкованих плат;
- дослідження та розрахунок параметрів процесу контролю якості монтажу друкованих плат;
- розрахунок роздільної здатності камери;
- вибір метрики нейронної мережі для детектування об'єктів;
- розробка програмного забезпечення;
- опис технології використання програмного засобу;
- заходи з охорони праці.

Було виявлено, що для забезпечення оптимального використання набору даних, потрібно використовувати методи збільшення даних, для розширення обсягу навчальної вибірки.

Було створено програмний засіб для автоматизованої системи контролю якості монтажу друкованих плат, з використанням глибокої згорткової нейронної мережі для знаходження таких дефектів ДП, як: відсутній отвір для закріплення компонентів ДП, «укус миші», відкритий контур, короткі доріжки, шпори та паразитна мідь. Результати експериментальних досліджень з розробленим додатком будуть представлені у четвертому розділі.

Програмний засіб забезпечує зручний користувацький інтерфейс та високу точність виявлення дефектів за допомогою засобів машинного навчання. Цей додаток було розроблено спеціально для висококваліфікованих користувачів, що мають гарні знання у галузях машинного навчання та виявлення дефектів друкованих плат.

Створено інструкцію користувача для того, щоб кожен користувач системи міг правильно працювати з програмним засобом.

За результатами виконаного дослідження опубліковано чотири роботи: стаття у збірнику студентських наукових статей «Automation and Development of Electronic Devices» ADED-2023 (1), тези доповідей на Міжнародному молодіжному форумі «Радіоелектроніка та молодь у XXI столітті» (м. Харків), IV Всеукраїнській науково-практичній Інтернет-конференції «Інформаційні технології: моделі, алгоритми, системи (ITMAS – 2023)» (м. Миколаїв), Міжнародній науково-практичній конференції «Сучасні інформаційні і комунікаційні технології на транспорті, в промисловості та освіті» (м. Миколаїв) [25, 33–35].

Розроблювану АСКЯ пропонується використовувати на підприємстві з виробництва побутової техніки в Німеччині.

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Методичні вказівки з підготовки та захисту кваліфікаційної роботи здобувачами другого (магістерського) рівня вищої освіти спеціальності 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології, освітньо-професійних програм: «Автоматизоване управління технологічними процесами», «Комп'ютерно-інтегровані технологічні процеси і виробництва», «Комп'ютеризовані та робототехнічні системи» / Упоряд. І. Ш. Невлюдов, Р. В. Артюх, В. В. Безкоровайний, Н. П. Демська, В. В. Євсєєв, О. І. Филипенко, О. М. Цимбал. Харків: ХНУРЕ, 2021. 55 с.
2. ДСТУ 3008-15. Документація. звіти у сфері науки і техніки. структура і правила оформлення [Текст]. Введ. 2015-06-22. К. Держстандарт України, 2017. 29 с.
3. Printed Circuit Boards Assembly (PCBA) Process URL: <https://www.pcbcart.com/article/content/pcb-assembly-process.html> (дата звернення: 20.12.2023).
4. PCB Assembly Process URL: <https://www.protoexpress.com/kb/pcb-assembly-process-overview/> (дата звернення: 20.12.2023).
5. Faraj Karrar S. Printed Circuit Board Manufacturing / Karrar S. Faraj, Fadi Marouki // Al-Israa University College. 2020. 9 p.
6. Automation of the design process of printed circuit boards : Degree project in electronics and computer, first cycle / comp. by Qhorbani Ali, Simon Ström ; Royal Institute of Technology, School of Electrical Engineering and Computer Science. Sweden : KTH, 2018. 66 p.
7. PCB Fabrication URL: <https://www.besterpcb.com/pcb-fabrication/> (дата звернення: 20.12.2023).
8. L. R. D. Murthy. PCB Inspection in the Context of Smart Manufacturing / Abhishek Mukhopadhyay, Murthy L. R. D., Manish Arora, Amaresh Chakrabarti, Imon Mukherjee, Pradipta Biswas // Proceedings of ICoRD. 2019. Vol. 1. P. 655-663.
9. PCB Quality Control – Things to validate during Design, Fabrication,

Procurement and Inspection URL: <https://pcbdesignworld.com/article/pcb-quality-control-and-things-to-validate-during-design-fabrication-procurement-and-inspection> (дата звернення: 20.12.2023).

10. PCB Assembly URL: <https://www.semecs.com/exceptional-pcb-assembly> (дата звернення: 20.12.2023).

11. Sunar Mohamed S. M. Effect of stencil wall aperture on solder paste release via stencil printing / M. S. Mohamed Sunar, M. Abu Bakar, A. Jalar, F. Che Ani, M. R. Ramli // Journal of Physics: Conference Series, International Conference on Electronic and Advanced Materials. 2022. Vol. 2169. 8 p.

12. Surface mount process URL: <https://www.surfacemountprocess.com/component-placement-process.html> (дата звернення: 20.12.2023).

13. SMT PCB Reflow Soldering Process | Everything You need to Know URL: <https://www.circuits-diy.com/smt-pcb-reflow-soldering-process-everything-you-need-to-know/> (дата звернення: 20.12.2023).

14. Ran Linjie. Optimization Method for Hot Air Reflow Soldering Process Based on Robust Design / Linjie Ran, Dong Chen, Cai Chen, Yubing Gong // School of Mechanical and Electrical Engineering, Guilin University of Electronic Technology 2023. Vol. 13. P. 2716-2735.

15. Diepstraten Gerjan. Wave/Selective Soldering / Gerjan Diepstraten // Lead-free Soldering Process Development and Reliability. 2020. P. 19-42.

16. How to Go with Wave Soldering Process? URL: <https://www.quick-pcba.com/how-to-go-with-wave-soldering-process/> (дата звернення: 20.12.2023).

17. Manual soldering – requirements, process, equipment, common defects and tips URL: <https://www.pcbaaa.com/manual-soldering-requirements-process-equipment-common-defects-and-tips/> (дата звернення: 20.12.2023).

18. Sankar V. Udaya. A Review of Various Defects in PCB / V. Udaya Sankar<sup>1</sup>, Gayathri Lakshmi<sup>1</sup>, Y. Siva Sankar // Journal of Electronic Testing. 2022. Vol. 38. P. 481-491.

19. M B Kumar Punith. Automated Quality Inspection of PCB Assembly Using

Image Processing / Punith Kumar M B, Shreekanth T, Prajwal M R // I.J. Image, Graphics and Signal Processing. 2020. Vol. 3. P. 13-19.

20. Oliveira Rui. A Systematic Analysis of Printed Circuit Boards Bending during In-Circuit Tests / Rui Oliveira, Luís Freitas, Diogo Costa, José Vicente, Arminda Manuela Gonçalves, Teresa Malheiro, JoséMachado // Machines. 2022. Vol. 10. P. 135-151.

21. The 6 Most Common PCB Quality Assurance Tests URL: <https://www.omnidexcn.com/6-most-common-pcb-quality-assurance-tests/> (дата звернення: 20.12.2023).

22. What is Automated X-Ray Inspection for PCB? URL: <https://yic-asm.com/what-is-automated-x-ray-inspection-for-pcb/> (дата звернення: 20.12.2023).

23. Kim Jungsuk. Printed Circuit Board Defect Detection Using Deep Learning via A Skip-Connected Convolutional Autoencoder / Jungsuk Kim, Jungbeom Ko, Hojong Choi, Peter H. Kim // Sensors. 2021. Vol. 21. P. 4968-4981.

24. Lai Yunfei. A Comparison of Traditional Machine Learning and Deep Learning in Image Recognition / Yunfei Lai // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – Vol. 1314. – 9 p.

25. Шерстюк А. М. Системологічний аналіз проблеми автоматизації виявлення браку продукції приладобудівельного підприємства // Автоматизація та Приладобудування («Automation and Development of Electronic Devices» ADED-2023) [Електронний ресурс]: збірник студентських наукових статей / Харківський національний університет радіоелектроніки; [редкол.: І.Ш. Невлюдов та ін.]. Харків: ХНУРЕ, 2023. Вип. 1. С. 183–188. URL: <https://openarchive.nure.ua/server/api/core/bitstreams/4148ac57-d672-4bce-82e9-d304e589c9da/content> (дата звернення: 20.12.2023).

26. Industrial Cameras for Machine Vision Applications URL: <https://easyodm.tech/industrial-cameras-for-machine-vision-applications/> (дата звернення: 20.12.2023).

27. Xiaomi 12T Pro reviewed: 200 MP sensor from Samsung compared to the

Galaxy S22 Ultra. URL: <https://www.notebookcheck.net/Xiaomi-12T-Pro-reviewed-200-MP-sensor-from-Samsung-compared-to-the-Galaxy-S22-Ultra.671042.0.html> (дата звернення: 20.12.2023).

28. A Practical Guide to Machine Vision Lighting URL: <https://www.ni.com/en/shop/choosing-the-right-hardware-for-your-vision-applications/a-practical-guide-to-machine-vision-lighting.html> (дата звернення: 20.12.2023).

29. IBV LED Tischleuchte Schreibtischleuchte 3W Aluminium Tischlampe Neutralweiß 4000K mit Schalter URL: <https://www.gluehbirne.de/IBV-LED-Tischleuchte-Schreibtischleuchte-3W-Alumini-um-Tischlampe-Neutralweiss-4000K-mit-Schalter> (дата звернення: 20.12.2023).

30. Bhattacharya Abhiroop. End-to-end deep learning framework for printed circuit board manufacturing defect classification / Abhiroop Bhattacharya, Sylvain G. Cloutier // Scientific Reports. 2022. Vol. 12. 13 p.

31. Object Detection State of the Art 2022 [Електронний ресурс]. URL: <https://medium.com/@pedroazevedo6/object-detection-state-of-the-art-2022-ad750e0f6003> (дата звернення: 13.12.2023).

32. Світлодіодне освітлення: переваги, недоліки та сфера використання. URL: <https://europan.ua/news/svitlodiodne-osvitlennja-perevagi-nedoliki-ta-sfera-vikoristannja/> (дата звернення: 13.12.2023).

33. Шерстюк А. М., Безкоровайний В. В. Розпізнавання простих зображень за допомогою глибокого навчання штучних нейронних мереж // Інформаційні технології: моделі, алгоритми, системи (ITMAS – 2023): Матеріали IV Всеукраїнської науково-практичної інтернет конференції (30-31 жовтня 2023 р.). Миколаїв: НУК імені адмірала Макарова, 2023. С. 62–63. URL: <https://itconf.nuos.edu.ua/2023/proceedings> (дата звернення: 13.12.2023).

34. Шерстюк А. М., Безкоровайний В. В. Особливості використання технології машинного навчання у системах візуального контролю якості монтажу друкованих плат // Сучасні інформаційні та комунікаційні технології на транспорті, в промисловості і освіті: Тези XVII Міжнародної науково-практичної

конференції (Дніпро, 13-14 грудня 2023 р.). Д.: УДУНТ, 2023. С. 149. URL: <https://ust.edu.ua/diit/documentation/news/20-12-2023-hItP-sbornik-xvii-modern-it-conf-2023.pdf> (дата звернення: 13.12.2023).

35. Шерстюк А. М. Структура автоматизованої системи контролю якості виробів для технологічного процесу монтажу друкованих плат // 27-й Міжнародний молодіжний форум 3«Радіоелектроніка та молодь у XXI столітті». Зб. матеріалів форуму. Т. 2., Ч. I. Харків: ХНУРЕ. 2023. С. 160–161. URL: <https://openarchive.nure.ua/server/api/core/bitstreams/4148ac57-d672-4bce-82e9-d304e589c9da/content> (дата звернення: 13.12.2023).