

Центральноукраїнський національний технічний університет
Факультет будівництва, транспорту та енергетики
Кафедра «Автоматизації виробничих процесів»

«Допущено до захисту»
Зав. кафедри АВП
к.т.н., доцент
_____ Олександр ДІДИК
« ___ » _____ 2025 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
за другим (магістерським) рівнем вищої освіти

на тему
«Розробка системи контролю якості друкованих плат
на виробництві електроніки»

Виконав здобувач II курсу групи АК-24М
ОПП «Автоматизація та комп'ютерно-
інтегровані технології»
спеціальності 174 «Автоматизація,
комп'ютерно-інтегровані технології та
робототехніка»

_____ Едуард КИТУН
« ___ » _____ 2025 р.

Керівник проекту
доцент, канд.техн.наук
_____ Дмитро ТРУШАКОВ
« ___ » _____ 2025 р.

Рецензент
_____ Олег КИСЛУН
« ___ » _____ 2025 р.

м. Кропивницький

Центральноукраїнський національний технічний університет

Факультет будівництва, транспорту та енергетики
Кафедра автоматизації виробничих процесів
Рівень вищої освіти магістр
Галузь знань 17 Електроніка, автоматизація та електронні комунікації
Спеціальність 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка»
Освітньо-професійна програма «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані-технології»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри Дідик О.К.

“ ” _____ 2025 року

**ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ
ЗА ДРУГИМ (МАГІСТЕРСЬКИМ) РІВНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ
ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ**

Китуна Едуарда Васильовича

(прізвище, ім'я, по батькові)

- Тема роботи Розробка системи контролю якості друкованих плат на виробництві електроніки
- Керівник роботи Трушаков Дмитро Володимирович, канд. техн. наук, доцент,
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
- Строк подання студентом роботи до захисту 01.12.2025 р.
- Мета та завдання випускної кваліфікаційної роботи Розробити та дослідити методи і засоби контролю якості друкованих плат 1. Аналіз існуючих методів та засобів контролю якості друкованих плат; 2. Розробка функціональної та принципової схем системи, дослідження шляхів побудови системи контролю якості друкованих плат; 3. Розрахунок характеристик елементів автоматики; 4. Математичне моделювання процесу виявлення дефектів друкованих плат.
- Консультанти по роботі, із зазначенням розділів роботи

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		данія видав	завдання прийняв
<i>Охорона праці</i>	<i>Жесан Р.В.</i>		

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів випускної кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	<i>Призначення та область застосування пристрою</i>	20.10.25	
2	<i>Аналіз існуючих методів контролю якості друкованих плат</i>	28.10.25	
3	<i>Вибір принципу побудови системи виявлення дефектів друкованих плат</i>	06.11.25	
4	<i>Розробка та дослідження блоку реєстрації та обробки інформації</i>	15.11.25	
5	<i>Математичне моделювання процесу виявлення дефектів друкованих плат</i>	20.11.25	
6	<i>Розгляд заходів з охорони праці</i>	26.11.25	

Дата видачі завдання 01.09.2025 р.

Керівник роботи _____ Д.В. Трушаков «___» _____ 2025 р.

Завдання прийнято до виконання

Здобувач _____ Е.В. Китун «___» _____ 2025 р.

Анотація

на випускнї кваліфікаційнї роботї студента групи АК-24М Китуна Едуарда Васильовича зі спеціальності 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка» на тему: «Розробка системи контролю якості друкованих плат на виробництві електроніки».

В даній магістерській роботі досліджено візуальні методи спектральної діагностики та шляхи реєстрації дефектних ділянок та компонентів друкованої плати.

Проаналізовано можливості використання високоточних промислових сенсорів видимого спектра, ультрафіолетового та інфрачервоного діапазонів для виявлення різних типів дефектів від геометричних до функціональних, та хімічних. Розроблено архітектуру обробки даних, яка включає методики калібрування, просторової реєстрації YOLO та модель зведення результатів Fusion, яка на основі інтеграції інформації з усіх трьох сенсорів приймає єдине, достовірне діагностичне рішення. Впровадження даної системи дає змогу підвищити точність контролю та мінімізувати хибні спрацювання.

Ключові слова: оптичний контроль, друковані плати, комп'ютерний зір, машинне навчання, автоматизована система.

Summary

on final qualification work of the student of the AK-24M group, Kytun Eduard Vasylyovych, majoring in 174 “Automation, computer-integrated technologies and robotics” on the topic: “Development of a Printed Circuit Board Quality Control System in Electronics Manufacturing”.

This Master's thesis investigates visual methods of spectral diagnostics and the ways to register defective areas and components of a printed circuit board.

The possibilities of using high-precision industrial sensors in the visible light, ultraviolet, and infrared ranges for detecting various types of defects—from geometric to functional and chemical—were analyzed. a data processing architecture was developed, which includes calibration techniques, YOLO spatial registration, and a Fusion result summary model. This model, based on the integration of information from all three sensors, makes a single, reliable diagnostic decision. The implementation of this system enables increased control accuracy and minimizes false alarms.

Keywords: optical inspection, printed circuit boards, computer vision, machine learning, automated system.

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

AOI- Автоматизований оптичний контроль (Automated Optical Inspection):

ДП (PCB) - Друкована плата (Printed Circuit Board):

ІЧ (IR) - Інфрачервоний (Infrared) спектральний діапазон:

УФ (UV)- Ультрафіолетовий (Ultraviolet) спектральний діапазон;

CNN - Згортова нейронна мережа (Convolutional Neural Network);

WD - Робоча відстань (Working Distance);

FOV - Поле зору (Field of View);

QE - Квантова ефективність (Quantum Efficiency);

ІС - Інтегральна схема (Integrated Circuit);

BGA - Масив кульок (Ball Grid Array);

БД – База даних;

ПК – Персональний комп'ютер;

ОС – Операційна система;

ОЗУ – Оперативний запам'ятовуючий пристрій;

ЗМІСТ

ВСТУП	3
1. АНАЛІЗ ПРОБЛЕМИ, ОБҐРУНТУВАННЯ ТА ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ	5
1.1. Аналіз проблеми.....	5
1.2. Класифікація дефектів друкованих плат	5
1.3. Обґрунтування теми.....	17
2. ВИЗНАЧЕННЯ ВИМОГ ТА АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ МЕТОДІВ ТА ЗАСОБІВ КОНТРОЛЮ ЯКОСТІ ДРУКОВАНИХ ПЛАТ ЗА ДОПОМОГОЮ КОМП'ЮТЕРНОГО ЗОРУ	18
2.1. Вимоги до системи контролю якості	18
2.2. Аналіз існуючих методів та засобів візуального контролю якості.....	19
2.3. Загальний огляд сучасних промислових рішень	22
2.4. Додаткові технології та їх роль у контролі якості.....	23
3. ПРОЄКТУВАННЯ ТА РОЗРОБКА МУЛЬТИСЕНСОРНОЇ СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ ЯКОСТІ	29
3.1 Вибір та обґрунтування технологій.....	29
3.2 Опис апаратної частини (Hardware)	31
3.3 Розрахунок ключових параметрів системи	39
3.4 Опис програмної частини (Software).....	40
4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА АПРОБАЦІЯ	44
4.1 Опис експериментального стенду та підготовчі роботи.....	44
4.2 Методика проведення експериментів	45
4.3 Аналіз та обговорення отриманих результатів	48
5. ВПРОВАДЖЕННЯ СИСТЕМИ В ЕКСПЛУАТАЦІЮ	49
5.1 Послідовність дій для впровадження системи в експлуатацію.	49
6. ШЛЯХИ МОДЕРНІЗАЦІЇ СИСТЕМИ	55
6.1 Розширення функціоналу системи виявлення дефектів.	55
6.2 Можливість самопокращення.	56

6.3 Підсумок та аналіз статистики за допомогою Агентів чи систем штучного інтелекту.....	58
ВИСНОВКИ	59
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ	60
ДОДАТКИ	

ВСТУП

Актуальність даної теми зумовлена тим, що виробництво електроніки в наш час вимагає постійного зростання якості та надійності продукції. Ключовими елементами будь якого сучасного електронного приладу є друковані плати (ДП), якість яких безпосередньо впливає на працездатність та довговічність самих виробів. Дефекти, які можуть виникати в процесі виготовлення та монтажу ДП, пов'язаних із браком, необхідністю повторного виробництва та зниженням репутації компанії, можуть призвести до значного просідання сегменту економіки виробництва на підприємстві.

Традиційні методи контролю якості, такі як візуальний огляд, є суб'єктивними, трудомісткими та малоефективними для сучасного високошвидкісного виробництва. Такі методи контролю не дозволяють виявляти мікро дефекти, які з розвитком сучасних технологій поверхневого монтажу (SMT) та постійного зменшення розміру компонентів стають все більш поширеним явищем.

Автоматизація процесів контролю якості є невід'ємним елементом індустрії. Використання систем контролю якості (АСКЯ) на базі машинного навчання та технологій комп'ютерного зору дозволяє на порядки підвищити ефективність, точність та об'єктивність інспекції, мінімізувавши при цьому вплив людського фактора та дає змогу забезпечити безперервний моніторинг виробничого процесу. Це робить тему розробки такої системи надзвичайно актуальною для сучасної промисловості.

Метою даної магістерської роботи є розробка та дослідження автоматизованої системи контролю якості друкованих плат на виробництві електроніки з використанням технологій комп'ютерного зору та машинного навчання.

Об'єктом дослідження є сам процес контролю якості під час виробництва друкованих плат.

Предметом дослідження являються алгоритми та методи автоматизованого виявлення дефектів на друкованих платах за допомогою технологій комп'ютерного зору.

Методи досліджень. В процесі виконання роботи було використано методи машинного навчання, методи системного аналізу, різні теорії обробки зображень, а також методи експериментальних досліджень.

Наукова новизна цієї роботи полягає в теоретичному обґрунтуванні та розробці мультисенсорної системи контролю якості друкованих плат, яка поєднує в собі ставший стандартом у подібних системах візуальний аналіз у видимому діапазоні світла, з додатковими спектральними покриттями, такими як ультрафіолетовий (УФ), інфрачервоний (ІЧ) та тепловий діапазони. Така інтеграція дозволяє виявляти дефекти, які є неочевидними для звичайних оптичних систем.

Практична цінність даної роботи полягає в розширенні можливостей автоматизованих систем контролю якості за межі стандартного візуального аналізу. Описаний підхід забезпечує підвищення точності та надійності детекції браку, враховуючи що діапазон кожного спектру дає можливість виявляти дефекти різних типів, це дозволяє отримати комплексну картину якості плати.

Також розроблена система без проблем може бути інтегрована та використана на реальних виробничих підприємствах з метою автоматизації контролю якості, таке інтегрування призведе до зниження рівня браку та підвищення продуктивності і швидкості виробництва в цілому, за рахунок виключення людського фактору в процесі інспекції.

1.АНАЛІЗ ПРОБЛЕМИ, ОБҐРУНТУВАННЯ ТА ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

1.1. Аналіз проблеми

Проблема забезпечення високої якості ДП у виробництві електроніки є надзвичайно гострою. Друковані плати (ДП), є основою для будь-якого електронного пристрою та джерелом більшості потенційних проблем працездатності. Дефекти, які можуть виникати на етапах виготовлення та монтажу електронних компонентів, можуть бути як видимими, так і прихованими. Наприклад - обрив доріжки, коротке замикання, або ж розшарування текстоліту та порожнини у внутрішньому просторі паяльного з'єднання.

Виробничі процеси сьогодення відрізняються швидкістю та високою щільністю монтажу, тому ручний візуальний контроль став неефективним. Людина не здатна виявити мікронні дефекти, а такі фактори як можливість втоми та суб'єктивність оцінки призводять до значної кількості відсотків непоміченого браку. В результаті, дефекти часто можуть виявлятися аж на етапі фінального тестування або, ще гірше, вже під час експлуатації, що спричиняє значні економічні збитки та втрату репутації.

Існуючі комерційні системи автоматичного візуального контролю якості для друкованих плат (AOI) вирішують проблему, але лиш частково, зазвичай їх зона охоплення обмежена лише видимим спектром світла. Що не дає їм змоги виявляти приховані дефекти, як наприклад проблеми з пайкою BGA-компонентів, внутрішні розшарування або теплові аномалії, що вказують на потенційні несправності.

1.2. Класифікація дефектів друкованих плат

Сам по собі процес проектування та виробництва друкованих плат є доволі непростим та багатоетапним завданням, що вимагає дуже великої точності в розрахунках при проектуванні та не меншої точності під час їх

збірки. Оскільки їх електричні принципові схеми (Приклад на Рисунку 1.1) є складними, це призводить до того що ризики допустити помилку в процесі виготовлення помітно зростають в порівнянні з схемами більш простих електронних плат та приладів. Процес збірки друкованих плат зображено на (Рисунку 1.2)

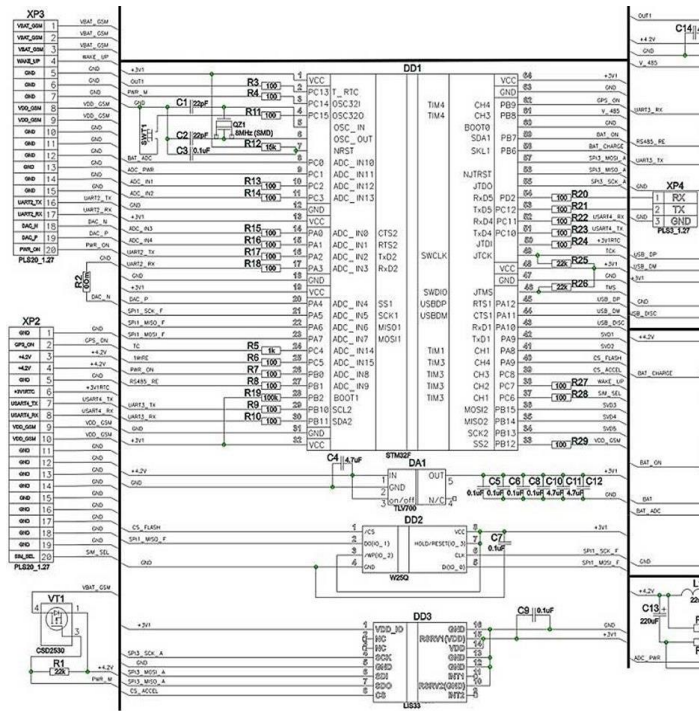


Рисунок 1.1 – Приклад електричної принципової схеми друкованої плати

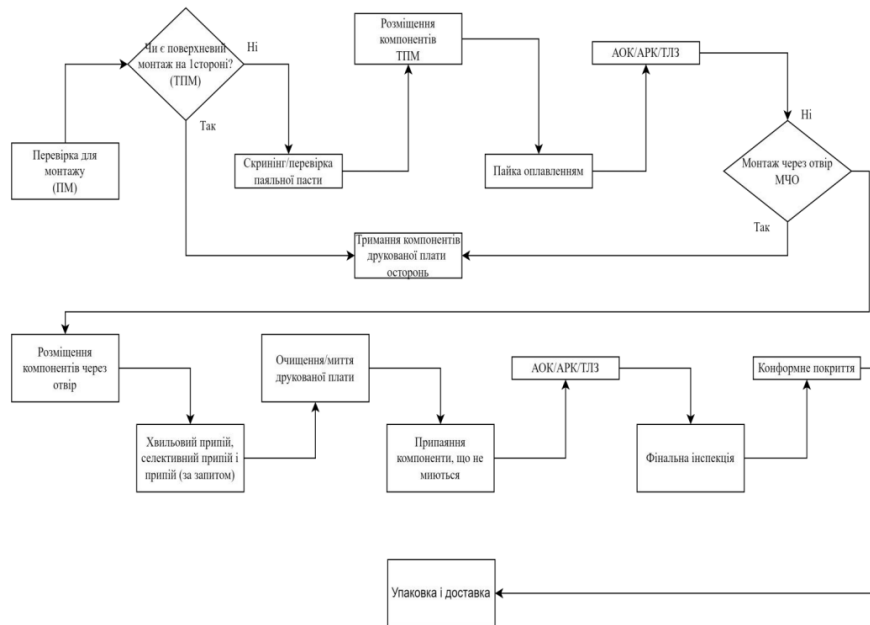


Рисунок 1.2 – Приклад процесу збірки друкованих плат

На схемі (Рисунок 1.3) зображено загальну структуру дефектів друкованих плат та їх типів, що можуть виникати в процесі виготовлення. Під схемою будуть коротко описані деякі з них.

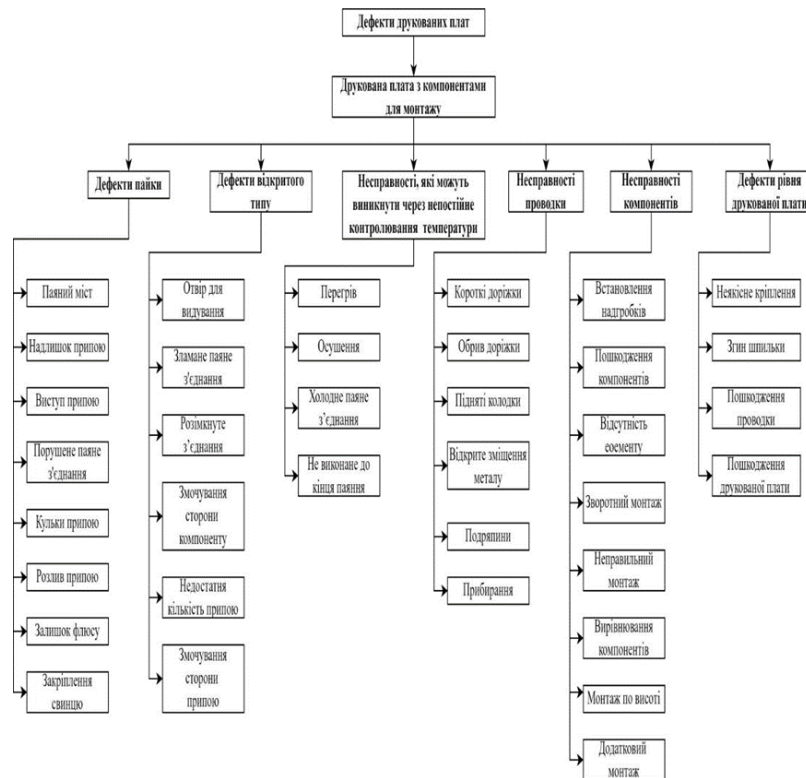


Рисунок 1.3 – Загальна структура дефектів друкованих плат та їх типів

Дефекти, які можуть виникати в процесі травлення

Хімічне травлення мідної фольги є ключовим етапом у формуванні провідного малюнка друкованої плати. Цей процес є дуже чутливим до низки фізичних та хімічних факторів, які можуть спричинити формування серйозних дефектів.

Хімічні чинники: Використання травильного розчину (наприклад, хлориду заліза або хлориду міді) вимагає дуже точного контролю його концентрації та насиченості. Надмірний рівень концентрації або занадто тривале травлення можуть призвести до «підтравлення» (undercutting) — горизонтальне травлення міді під захисним шаром фоторезисту. Це в свою чергу спричиняє звуження провідних доріжок, збільшуючи електричний опір і ризик обриву.

Фізичні чинники: Рівномірність подачі розчину та його температура є ключовими факторами що впливають на отримання однорідного результату. Замала циркуляція розчину призведе до неповного травлення (etch-out), залишивши небажані ділянки міді між доріжками, це сприяє появі коротких замикань. Інший дефект — «зубчастість» (ragged edges), він в свою чергу спричиняється нерівномірним травленням, призводить до того що краї доріжок виходять нерівними та знижується надійність з'єднання.

Дефекти, які можуть виникати під час пайки

Процес пайки, особливо, коли оплавлення припою автоматизоване (reflow soldering), часто стає джерелом низки дефектів. Якість паяних з'єднань критично залежить від точності дотримання температурного профілю, який складається з чотирьох основних зон.

Зона попереднього нагріву: (Рисунок 1.4) дуже швидкий нагрів може призвести до теплового шоку, пошкодити компоненти або саму плату. Занадто повільний нагрів в свою чергу, може призвести до передчасної активації флюсу.

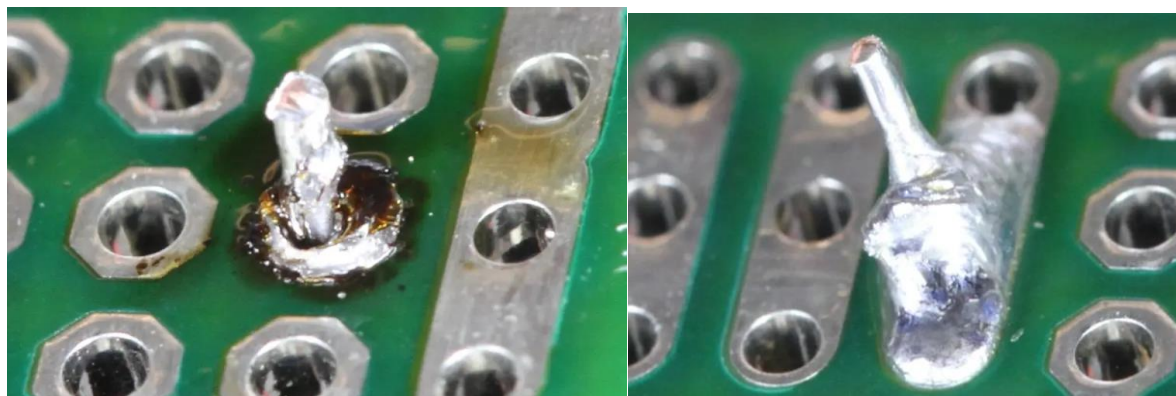


Рисунок 1.4 - Приклад пошкоджень при дуже швидкому нагріві та наслідки передчасної активації флюсу

Зона активації флюсу: У цій температурній зоні флюс очищує поверхні від оксидів. Недостатня активація може призвести до виникнення «холодної пайки» (cold solder joint) — матового, пористого з'єднання, така структура

спричиняє поганий електричний контакт. Дуже часто при цьому дефекті виникають кільцеві тріщини у припою (Рисунок 1.5).



Рисунок 1.5 - Дефект холодна пайка та кільцеві тріщини

Зона оплавлення: В ній температура досягає точки плавлення припою. Зависока температура або перетримання в часі можуть пошкодити компоненти. Неправильний температурний профіль у цій зоні може призвести до утворення «містків» (solder bridges), дефект при якому припоєм з'єднує сусідні контакти (Рисунок 1.6).

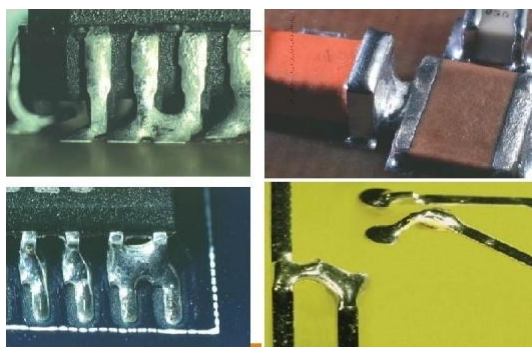


Рисунок 1.6 - Дефект місток

Зона охолодження: Швидке охолодження сприяє зміцненню з'єднання, тоді як занадто повільне може призвести до кристалізації припою (Рисунок 1.7), що зробить його ламким.



Рисунок №1.7 - Дефект кристалізація припою

Інші дефекти, які можуть виникати під час пайки

Також під час пайки може виникати низка інших дефектів, які можуть не залежати від температурних зон напряду, або ж взагалі можуть бути спричинені у результаті найрізноманітніших допущених недоліків.

Голова на подушці - цей дефект може виникати через недостатній прогрів вузла в зоні пайки або ж через занадто високу швидкість конвеєра (Рисунок 1.8).

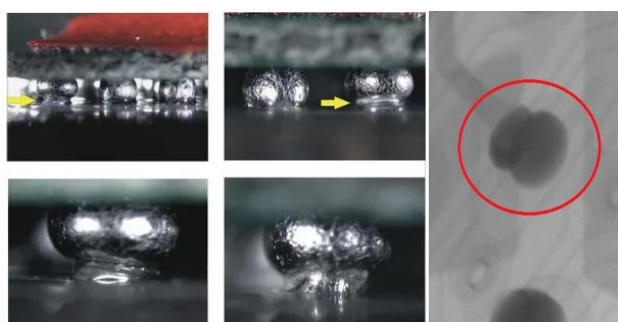


Рисунок 1.8 - Дефект голова на подушці

Дефект надгробок виникає через нерівномірний прогрів компонентів пайки, або ж внаслідок різниці в часі плавлення припою (Рисунок 1.9).



Рисунок 1.9 - Дефект надгробок

Копланарність – це стан компонента при якому всі його контакти (виводи) знаходяться у одній площині, тобто на одній висоті відносно один одного. Копланарний дефект пайки (Рисунок 1.10) означає що один або декілька контактів відхилені (зазвичай припідняті) відносно інших, це

призводить до того що під час монтажу компонента на платі, припідняті виводи не контактують з доріжками на платі, внаслідок чого не припаюються до неї, тому припій не може заповнити зазор і сформувати надійне з'єднання, через це виникає непропай або розімкнутий ланцюг (відсутність електричного та механічного контакту).



Рисунок 1.10 - Копланарний дефект пайки

Головним ризиком недостатньої кількості припою є відсутність необхідного об'єму металевого сплаву для формування надійного та міцного паяного шва потрібної форми (Рисунок 1.11). Це призводить до: зниження механічної міцності, погіршення електропровідності та зниження стійкості з'єднання до окислів, вібрацій та теплових явищ, що значно знижує срок служби виробів



Рисунок 1.11 - Недостатня кількість припою

Надмірна кількість припою призводить до перевитрат та погіршення якості паяного з'єднання, тому що, завелика кількість припою (Рисунок 1.12) зазвичай може приховувати за собою такі дефекти як, наприклад, погане змочування, тріщини або дефект копланарності, а також може спричиняти видимі дефекти, такі як, місток, надгробок або навіть дрібні кульки припою

навколо компонентів чи між доріжками, які часто стають причинами коротких замикань та можуть вивести прилад з ладу.



Рисунок 1.12 - Надмірна кількість припою

Недостатньо флюсу, або погане змочування між припоєм та площадкою.

Змочування – це здатність рідини розтікатися по поверхні тіла та формувати стійку й тонку плівку. В пайці, як можна зрозуміти замість рідини та твердої поверхні, як правило маються на увазі припій та поверхня плати відповідно.

Процес змочування ґрунтується на балансі сил поверхневого натягу:

1. Коли сила тяжіння між атомами адгезія (припій та метал, що спаюються) більша, ніж сила тяжіння всередині самого припою (когезія), то він розтікається по поверхні плати рівномірним шаром. Це гарне змочування;

2. Якщо ж сила тяжіння навпаки більша між атомами всередині припою, то він збирається в кулю, що утворює високий кут контакту. Це погане змочування, або незмочування;

Роль флюса: Щоб забезпечити гарне змочування поверхня металу має бути ідеально чиста. Флюс видаляє оксидну плівку та забруднення, які перешкоджають прямому контакту між розплавленим припоєм та основним металом.

Кількісно якість змочування оцінюється крайовим кутом. Це кут між поверхнею металу і краєм припою:

При гарному змочуванні: Кут гострий ($0 < 90^\circ$ або близький до нуля). Припій розтікається і утворює плавний перехід (галтель). Такий перехід забезпечує та високу міцність та велику площу контакту.

Погане змочування/незмочування: Тупий кут ($0 \geq 90^\circ$). При поганому змочуванні (рисунок 1.13) припій прилипає частково та збирається в одну кульку або кілька нерівних грудок, залишаючи непокритими великі ділянки контактної площадки.



Рисунок 1.13 - Недостатньо флюсу, або погане змочування між припоєм та площадкою

Дефект діра (Пустота/Void) – це газовий міхур, який сформувався всередині припою та затвердів разом з ним (Рисунок 1.14). Найчастіше дефект виникає внаслідок неповного виходу летючих компонентів флюсу або вологи з паяльної пасти в процесі оплавлення, часто через зависоку швидкість нагрівання.

Головними наслідками порожнин являються, погіршення механічної міцності з'єднання та тепловідведення від компонента, це збільшує ризику його відмови внаслідок перегріву.

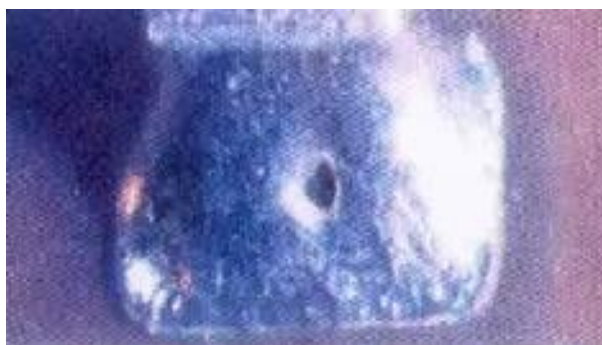


Рисунок 1.14 - Дефект діра

Дефект тріщина(Crack) - це розрив всередині або на поверхні металевій структурі паяного з'єднання (Рисунок 1.15). Найчастіше тріщини виникають внаслідок втоми матеріалу, яка виникає через термоциклування, тобто часту зміну температури (причиною його є різниця у коефіцієнтах теплового розширення в матеріалах компонентів та самої плати). Також тріщини можуть бути спричинені механічним впливом, ударами, згинаннями, тощо.

Результатом тріщини може стати тимчасове, часткове або повне переривання електричного контакту (розімкнений ланцюг), це викликає нестабільну роботу або повну відмову електронного пристрою.



Рисунок 1.15 - Дефект тріщина

Відхилення - це дефект при якому SMD компонент встановлений неточно відносно свого посадкового місця на платі (PCB), тобто корпус компонента чи його виводи частково, або повністю зміщено відносно контактної площадки (Рисунок 1.16). Цей дефект може виникати через неправильну роботу Pick-and-Place machine (автоматизований робот для високоточного та швидкого розміщення електронних компонентів на друкованих платах), дефект трафаретного друку, який призводить до зміщення паяльної пасти, зміщення при оплавленні, некоректну геометрію майданчиків, або зношування пристосувань для монтажу. Наслідками дефекту зміщення можуть стати: частковий неприпій, короткі замикання, недостатня міцність;

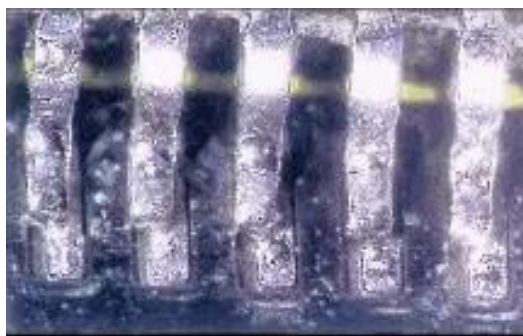


Рисунок 1.16 - Дефект відхилення

Дефект не обрізаний штифт характерний для компонентів, які встановлюються в отвори (ТНТ - Through-Hole Technology). Стандарти вимагають обрізки виступаючої частини виводу до певної довжини (в межах від 0.8 мм до 1.5 мм). Дефект виникає внаслідок відсутності операції обрізання (Рисунок 1.17) через збій в обладнанні, або людський фактор. Цей дефект може призвести до коротких замикань, механічних пошкоджень та проблем під час збірки виробу.

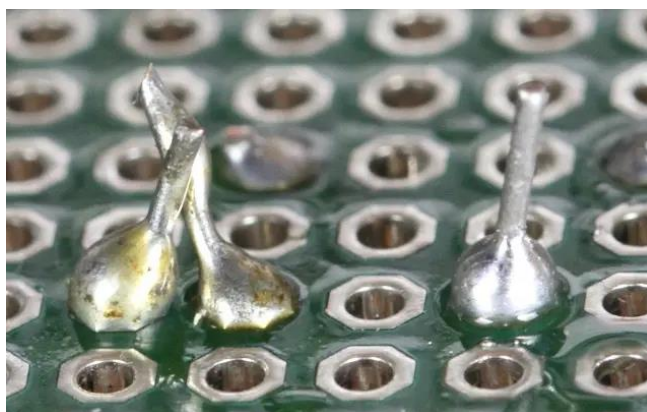


Рисунок 1.17 - Дефект не обрізаний штифт

Дефект відвалювання припою означає одне з двох ключових порушень в процесі пайки:

Десмачування (Dewetting) - коли припій через забруднення або окислення основного металу під тонким покриттям спочатку змочує поверхню металу, але потім відтягується назад, збираючись у невеликі краплі.

Несмачування (Non-Wetting) - коли припій взагалі не прилипає до металу через сильну оксидну плівку або забруднення на поверхні, які флюс не зміг видалити

Ці дефекти означають, що розплавлений припій не зміг якісно вступити в контакт із чистим металом посадкового місця або виводу. Це призводить до того що залишається лише тонка, ненадійна плівка припою, що призводить до слабкого, високоомного з'єднання, або ж до повного неприпою (відсутність електричного контакту) (Рисунок 1.18).



Рисунок 1.18 - Відвалювання припою

Розкиданий припій (Крапли/Кульки припою) – це дефект, при якому дрібні бризки припою осідають або розлітаються на поверхню плати залишаючись там окремо від основних паяних з'єднань (Рисунок 1.19).

Причинами можуть стати: Волога та забруднення. неякісна паяльна паста та невірно налаштований температурний профіль при оплавленні, сукупність цих факторів призводить до того що, абсорбована паяльна паста чи органічні забруднення під час швидкого нагріву перетворюються в пар, який стрімко починає виходити буквально вистрілюючи бризками припою навколо.

Наслідками таких дефектів є: короткі замикання, виникнення проблеми з тестуванням та косметичні дефекти які можуть вимагати дорогої процедури очищення плати.

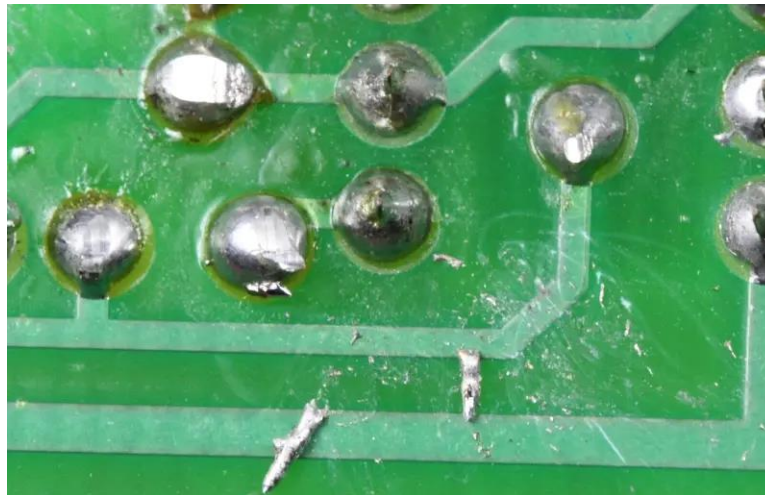


Рисунок 1.19 - Краплі припою

1.3. Обґрунтування теми

З огляду на відомості наведені вище, я вважаю, що для промисловості є нагальна потреба в розробці більш досконалих та універсальних систем контролю якості. Саме тому я думаю що розширити загальну функціональність та підвищити точність подібних систем шляхом розробки мультисенсорної системи, яка поєднує візуальний аналіз із застосуванням інших діапазонів світла та теплового зображення, є хорошим варіантом який дозволить вийти за межі нинішніх традиційних підходів.

Такий мультисенсорний підхід може забезпечити:

Підвищення точності: Інтеграція УФ, ІЧ та теплових сенсорів, що дозволить суттєво розширити спектр виявлення дефектів — від пошкоджень паяльної маски до невидимих на звичайні камери теплових аномалій чи неявних пошкоджень та дефектів доріжок і посадочних місць на ланцюгах плат.

Комплексність аналізу: На відміну від одного типу даних, система отримуватиме комплексну інформацію про стан плат, що підвищуватиме надійність та точність її аналізу, а також детальність звітності в цілому.

Зниження витрат: Автоматизувавши процес та своєчасно виявляючи дефекти на ранніх стадіях виробництва можна суттєво мінімізувати відсоток браку та зменшити витрати на ремонт.

2. ВИЗНАЧЕННЯ ВИМОГ ТА АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ МЕТОДІВ ТА ЗАСОБІВ ВІЗУАЛЬНОГО КОНТРОЛЮ ЯКОСТІ ДРУКОВАНИХ ПЛАТ ЗА ДОПОМОГОЮ КОМП'ЮТЕРНОГО ЗОРУ

2.1. Вимоги до системи контролю якості

Перед тим як, аналізувати існуючі методи, важливо визначитися з ключовими вимогами, яким повинні відповідати сучасні системи візуального контролю якості:

Висока точність та надійність. Система має максимально зводити до мінімуму кількість помилок першого та другого роду, тобто пропуски дефектів та хибні виявлення відповідно, а також забезпечувати високу вірогідність ідентифікації всіх критичних дефектів.

Висока швидкість інспекції. Система повинна бути здатною працювати на швидкості не меншій ніж на виробничій лінії, щоб не спричиняти "вузьких місць".

Адаптивність та гнучкість. Можливість легко переналаштовуватися для інспекції різних типів компонентів, плат та дефектів.

Об'єктивність. Усунення впливу людського фактора, яке повинно забезпечити стабільну і повторювану якість контролю.

Комплексність. Здатність виявлення широкого спектру дефектів, включаючи невидимі для людського ока чи звичайної камери.

2.2. Аналіз існуючих методів та засобів візуального контролю якості

Сучасні системи візуального контролю якості (Automatic Optical Inspection, AOI) використовують різні методи та алгоритми для аналізу

зображень, отриманих з камер. Різновиди цих методів коротко описані в цьому пункті.

Методи на основі порівняння зі зразком (Golden Board).

Принцип роботи полягає в тому, що система зберігає зображення "ідеальної" плати-еталона (golden board), яка пройшла всі перевірки. Кожна наступна плата порівнюється з цим еталоном.

Переваги: Відносно проста реалізація та висока швидкість виявлення великих і явних відхилень.

Недоліки: Чутливий до малих відмінностей у процесі виробництва (відтінки кольорів, незначні зміщення, тощо), що призводить до великої кількості хибних спрацювань. Не може виявляти дефекти, які вже були на "еталонному" зразку.

Методи на основі правил (Rule-Based Inspection).

Принцип роботи полягає в тому, що у процесі виявлення дефектів, система оперує заздалегідь визначеними правилами та параметрами для перевірки геометричних характеристик плати (таких як, ширина доріжок, розриви, відстань між ними, розмір паяних майданчиків, тощо).

Переваги: Відсутня потреба у великому наборі даних для навчання, висока об'єктивність при тестуванні.

Недоліки: Доволі велике й часозатратне програмування правил, немає змоги виявляти нетипові дефекти, чутливість до змін у виробничому процесі, що вимагає постійного моніторингу та оновлення правил.

Методи на основі комп'ютерного зору (Computer Vision)

Принцип роботи полягає в тому, що Методи на основі комп'ютерного зору використовують алгоритми обробки зображень для аналізу текстури, кольору та форми об'єктів. До таких методів належать:

Сегментація зображень - це процес, коли зображення діляться на окремі ділянки (наприклад, фон, доріжки, паяльні майданчики).

Аналіз контурів – це процес, виявлення та аналізу форми компонентів і паяних з'єднань для виявлення відхилень.

Аналіз текстури – це процес, виявлення дефектів, таких як "холодна пайка" (матова текстура) або надлишок припою.

Переваги: Висока точність, здатність виявлення широкого спектру дефектів.

Недоліки: Вимагає складних алгоритмів, чутливість до умов освітлення.

Методи на основі машинного навчання (Machine Learning).

Принцип роботи полягає в тому що, система навчається на великих наборах даних, які містять зображення плат як еталонного зразка (без дефектів), так і з дефектами різних типів. Сучасні підходи використовують:

Детекція об'єктів (Object Detection) - це процес, виявлення та локалізації різних видів компонентів і варіантів дефектів на зображеннях (використовуються технології як, наприклад, YOLO, SSD).

Сегментація інстанцій (Instance Segmentation) – це процес, визначення контурів об'єктів що знаходяться на платі на піксельному рівні, це дає можливість виявляти навіть дрібні дефекти.

Для навчання моделей комп'ютерного зору працюючих за принципом Machine Learning існують кілька гарних датасетів з фото та описами дефектів на них. Одними з таких датасетів є Kaggle PCB Defect dataset та Deep PCB Defect dataset, приклади фото з датасетів я наведу нижче (Рисунки 2.1 та 2.2 відповідно).

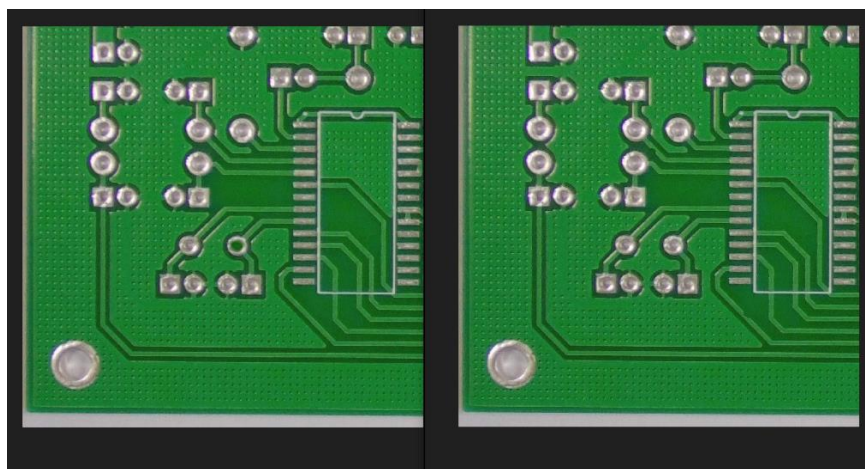


Рисунок 2.1 – Приклади зображень з набору “Kaggle PCB Defect dataset”

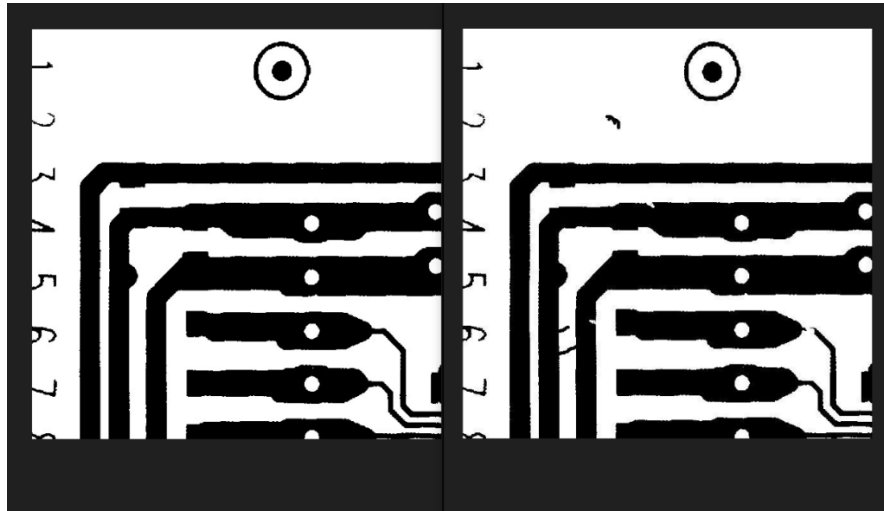


Рисунок 2.2 – Приклади зображень з набору “Deep PCB Defect dataset”

Переваги: Висока адаптивність, можливість виявлення непередбачених заздалегідь типів дефектів, стійкість до змін в освітленні, найвища точність серед усіх методів.

Недоліки: Методи на основі машинного навчання є складними в налагодженні, вимагають великі обсяги даних для навчання та потребують потужних обчислювальних ресурсів.

Зазвичай, базовий загальний принцип процесу тестування в таких системах виглядає приблизно наступним чином (Рисунок 2.3)



Рисунок 2.3 – Загальний базовий принцип процесу тестування друкованих плат

2.3. Загальний огляд сучасних промислових рішень

Варіанти систем автоматичного оптичного контролю (АОІ) що запропоновані провідними виробниками.

Сучасний ринок АОІ-систем представляє кілька провідних гравців. Порівняльний аналіз їх рішень, дає розуміння поточного рівня розвитку технологій у подібних сферах індустрії.

Omron відома своєю системою 3D АОІ з використанням багатокутного освітлення та лазерного сканування. Це відкриває можливості для створення повних 3D-моделей плат та виявлення дефектів висоти та об'єму, як наприклад, недостатню кількість пасти на майданчиках.

Koh Young – це одна з лідируючих компаній у галузі 3D-інспекції паяльної пасти та компонентів. Їхня технологія базується на основі проекційної муарової інтерферометрії за рахунок чого може з високою точністю вимірювати об'єм припою та положення компонентів, що є одним з ключових факторів в процесі виявлення дефектів.

Mirtec пропонує точні, високошвидкісні системи з комбінуванням 2D та 3D технологій. Такий підхід забезпечує баланс між швидкістю та точністю інспекції.

Системи автоматичного рентгенівського контролю (АХІ).

Рентгенівські системи є невід'ємною частиною контролю якості для складних плат.

2D АХІ використовує плоскі рентгенівські зображення щоб виявляти дефекти, таких типів, як короткі замикання під компонентами або наявність порожнин у паяних з'єднаннях (Рисунок 2.4). Цей метод є доволі швидким, але не надає достатньої кількості інформації про висоту і форму з'єднань.

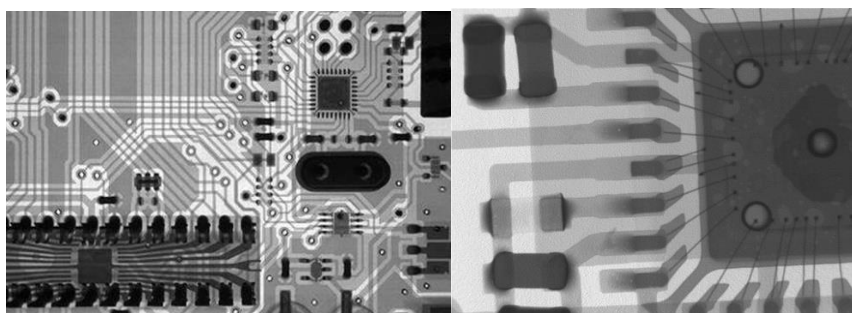


Рисунок 2.4 - Приклади 2D рентгенівських знімків

3D АХІ (Computed Tomography) застосовує обертову рентгенівську зйомку (Рисунок 2.5), такий підхід дає можливість створювати тривимірні моделі плат, що в свою чергу дає змогу перевіряти приховані багат шарові з'єднання на наявність дефектів та аналізувати форму і якість BGA-кульок з високою точністю.

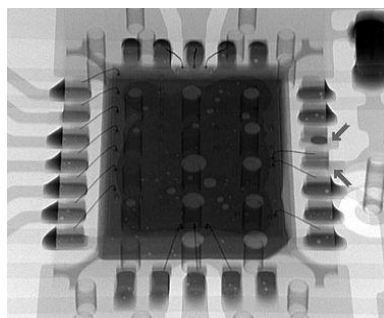


Рисунок 2.5 - Приклад 3D рентгенівського знімку

2.4. Додаткові технології та їх роль у контролі якості

Як виявлення доволі широкого спектру дефектів, недостатньо використовувати класичні візуальні методи у видимому спектрі, їх треба доповнити іншими спектральними діапазонами, а отже і кількість обладнання має збільшитися. Класифікацію візуально-оптичних методів визначення дефектів друкованих плат зображено на (Таблиці 2.1), а класифікацію вибору обладнання за способами визначення дефектів зображено на (Рисунку 2.7).

Таблиця 2.1 - Візуально-оптичні методи визначення дефектів

Клас методу	Принцип дії	Придатність для аналізу	
		поверхневого	прихованого
Видимий спектр YOLO/CNN	Аналіз зображень (контур, колір, геометрія, висота пайки) у видимому світлі.	+	-
УФ-контроль (Флуоресценція)	Збудження хімічних речовин (флюсу) ультрафіолетовим випромінюванням.	+	-
ІЧ-термографія	Реєстрація ІЧ-випромінювання (тепла), що виділяється ДП під час роботи.	+	±
Внутрішньосхемне тестування (ICT)	Електричне вимірювання параметрів (опір, ємність) кожного вузла.	±	+
Функціональне тестування	Перевірка працездатності плати за схемою реального використання.	±	+
Рентгенівський контроль (АХІ)	Проникнення рентгенівських променів крізь матеріал.	-	+

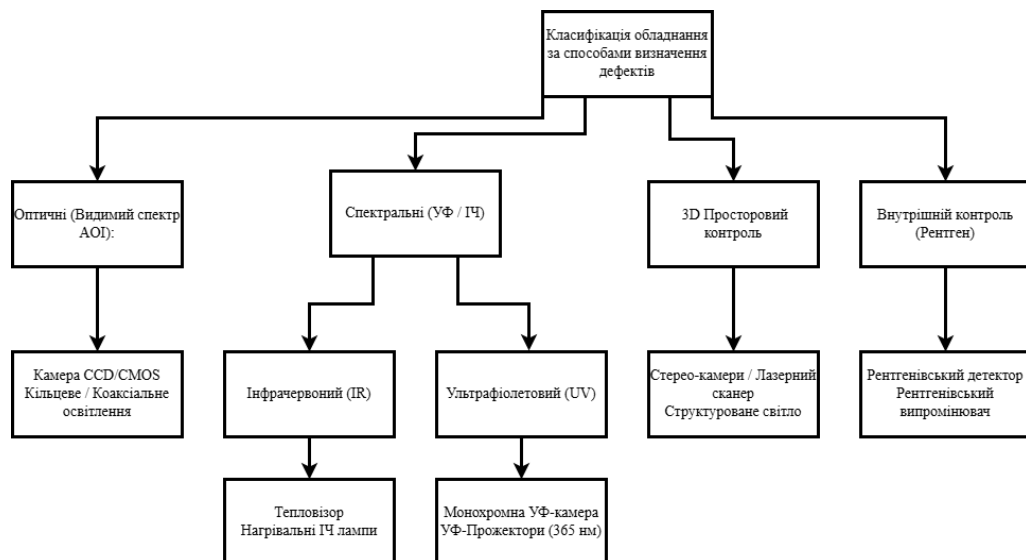


Рисунок 2.7 - Класифікація обладнання за способами визначення дефектів.

Рентгенівські промені (АХІ) Застосовуються для перевірки прихованих паяних з'єднань, наприклад, під BGA-компонентами.

Ультразвуковий контроль (SAT) Використовується для виявлення внутрішніх дефектів, таких як розшарування.

Використання ультрафіолетового (УФ) світла дає змогу виявляти дефекти паяльної маски, які часто є непомітними за умов стандартного освітлення. Під впливом УФ-світла, ушкоджені ділянки маски або приховані тріщини стають більш контрастними завдяки процесу флуоресценції матеріалів.

Флуоресценція матеріалів – це процес, при якому речовина (флуорофор - флуоресцентна хімічна сполука, що має властивість повторно випромінювати світло за наявності світлового збудника, зазвичай ультрафіолету.) може поглинає певні види випромінювання, після чого швидко випускати його у вигляді світла з іншою, зазвичай меншою енергією та більшою довжиною хвилі. Це випромінення є доволі короткочасним, від пікосекунд до мілісекунд, і припиняється майже одразу після припинення зовнішнього збудження.

Застосування інфрачервоного (ІЧ) світла дозволяє "бачити" крізь певні компоненти та матеріали, що є дуже корисним для інспекції дефектів в прихованих паяних з'єднаннях, наприклад, під BGA-компонентами. Крім того, ІЧ-аналіз допомагає виявляти внутрішні дефекти і пошкодження текстоліту та провідних доріжок.

Застосування теплового сенсора дає можливість для виявлення термічних дефектів, які зазвичай спричиняються внаслідок коротких замикань, обривів або надмірного опору. Включення тепловізора до системи дозволяє візуалізувати тепло, яке виділяється при подачі напруги, і виявити аномальні місця нагріву, які вказують на несправності.

Слід зазначити, що різниця між тепловізором та інфрачервоним освітленням в процесі виявлення дефектів є фундаментальною та дуже суттєвою. Хоча обидва підходи використовують інфрачервоний діапазон, вони працюють за різними принципами та виявляють різні типи аномалій.

Принцип роботи тепловізора (Thermal Imager / LWIR Camera). Кожен об'єкт з температурою вище абсолютного нуля випромінює інфрачервону енергію (емісію). Тепловізор зчитує емісію та накладає її на видиме зображення, показуючи різницю температур на поверхні об'єкта. Тепловізор працює в діапазоні далекого інфрачервоного світла (LWIR, від 8 до 14 мкм), в якому випромінювати енергію починають тіла з температурою вище абсолютного нуля (-273.15 C°). В такому діапазоні працюють високочутливі тепловізори, які використовують в приборах ночного зору. Як правило під час інспекції за допомогою тепловізора використовується активний метод, коли плата підключається до джерела живлення і тепловізор фіксує, ділянки які виділяють тепло та їх температуру. Такий метод дає змогу виявляти наступні групи дефектів:

Активні електричні дефекти: Короткі замикання, обриви (якщо через них йде струм), підвищений опір, перевантаження компонентів, холодну пайку, що призводять до нагріву.

Дефекти, що змінюють теплопровідність: Розшарування, порожнини, які можуть впливати на ефективність тепловідведення від компонентів, що призводить до їх локального перегріву.

Дефекти самих компонентів: Зовсім непрацюючі або перегріті компоненти.

Візуалізація під тепловізором полягає в тому, що зазвичай зображення розфарбовані певною палітрою кольорів (палітри "веселка", "залізо", "відтінки сірого" тощо), в цих палітрах кожен колір відповідає своєму виділеному температурному діапазону (Приклади на Рисунку 2.8).

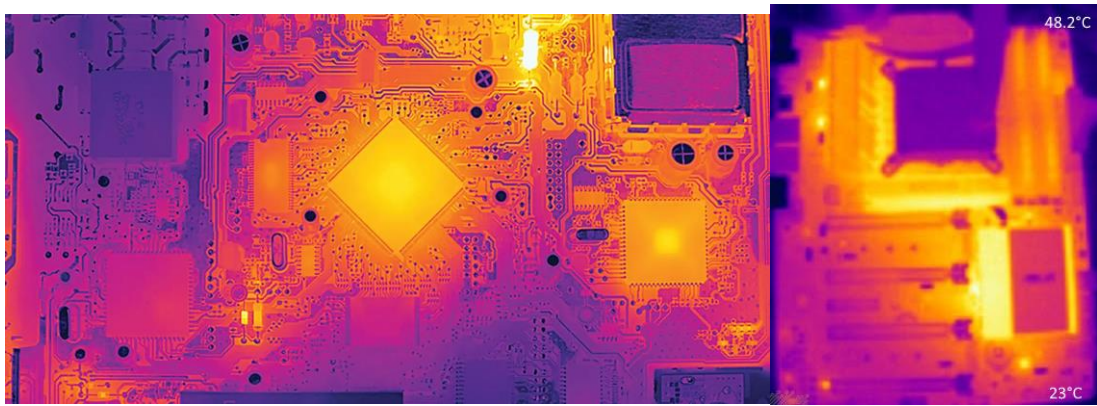


Рисунок 2.8 - Приклади зображення плат під тепловізором

Принцип інспектування в інфрачервоному спектрі (Infrared Illumination + IR-sensitive Camera / NIR Camera). Тут використовується джерело інфрачервоного світла (як ліхтарик, але з випроміненням в ІЧ-діпазоні) та спеціальна камера, що чутлива до світла в цьому діапазоні. Камера працює в діапазоні ближнього інфрачервоного світла (NIR, 700-1100 нм) та фіксує відбиті ІЧ-промені. Можна використовувати різні методи інспекції, наприклад Пасивний (освітлення та зйомка) та активний (просвічування). Інспектування в цьому діапазоні дозволяє виявляти наступні групи дефектів:

- Структурні дефекти під поверхнею. Деякі матеріали (наприклад, кремній, пластик, певні смоли та інші) є непрозорими у видимому світлі, але стають напівпрозорими в діапазоні NIR. Це дозволяє "просвічувати" певні компоненти або шари друкованої плати.

- Дефекти прихованих з'єднань. З'являється можливість бачити паяні з'єднання під непрозорими корпусами компонентів (хоч це дуже умовно і залежить від специфіки матеріалів корпусу).

- Дефекти матеріалів. Тріщини, які можуть бути невидимі у видимому світлі, можуть по-іншому відбивати або поглинати NIR-світло.

Взагалі інфрачервоне освітлення невидиме людському оку і об'єкти освітлені ним для нас нічим не відрізняються від звичайних. Проте за потреби можна програмно візуалізувати температурну мапу та накласти її на фото. Так як камера фіксує інтенсивність відбитого світла, то з азвичай такі

зображення є монохромними (в відтінках сірого), однак за бажання кольори можна змінити. (Приклади на Рисунку 2.9).

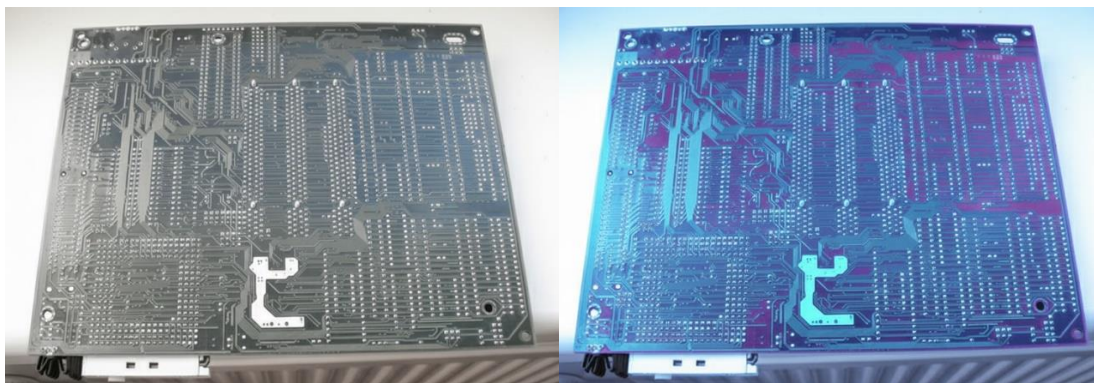


Рисунок 2.9 - Приклади візуалізації монохромного та кольорового зображення плати під інфрачервоним освітленням

Таблиця 2.2 - Ключові відмінності в процесі виявлення дефектів

Характеристика	Тепловізор (LWIR)	ІЧ-освітлення (NIR)
Що фіксує	Теплове випромінювання (власне тепло)	Відбите інфрачервоне світло
Діапазон	Далекій ІЧ (8-14 мкм)	Ближній ІЧ (700-1100 нм)
Тип інформації	Температура / тепловий розподіл	Структура / напівпрозорість матеріалів
Основні дефекти	Електричні (КЗ, обриви, опір), теплові	Приховані структурні, дефекти матеріалів
Метод інспекції	Активний (плата під напругою)	Пасивний (освітленням) / активний (просвічування)
Візуалізація	Псевдокольори (температурні карти)	Монохромні (відтінки сірого)

Отже тепловізор — це інструмент для термічної діагностики, він фіксує ділянки, в яких об'єкти виділяють тепло. ІЧ-освітлення з ІЧ-камерою в свою чергу використовують, як інструмент для візуалізації структур, що приховані або мають особливі властивості відбиття/пропускання в NIR-діапазоні.

Обидва методи є взаємодоповнюючими і можуть виявляти дефекти, які інший метод пропустив би. Тому, як раніше і було зазначено, використання в мультисенсорній системі обох цих методів діагностики, значно підвищить її ефективність.

3. ПРОЄКТУВАННЯ ТА РОЗРОБКА МУЛЬТИСЕНСОРНОЇ СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ ЯКОСТІ

3.1. Вибір та обґрунтування технологій

Вибір технологій для розробки мультисенсорної автоматизованої системи контролю якості є одним з ключових етапів, від якого залежать точність, надійність та ефективність кінцевої системи. Для досягнення поставлених цілей — створення універсальної та точної системи, здатної виявляти різноманітні дефекти друкованих плат (PCB) — вибір пав на комбінований підхід, що використовує мультисенсорний аналіз за допомогою комп'ютерного зору.

Обґрунтування такого вибору полягає в наступному:

Комп'ютерний зір - це технологія, яка дозволяє автоматизувати процес візуального аналізу продукції на предмет дефектів, без участі у цьому людей, це підвищує об'єктивність та швидкість інспекції. Алгоритми комп'ютерного зору дають змогу не лише виявляти наявність або відсутність компонентів, але й точно вимірювати їхні геометричні параметри та ідентифікувати дефекти на основі форми, кольору, текстури та патернів.

Для створення моделі комп'ютерного зору, за основу було взято покращену версію відкритої моделі машинного навчання Ultralytics YOLO. Ця модель відрізняється своєю архітектурою, яка дозволяє їй проводити виявлення об'єктів, сегментацію екземплярів, класифікацію та оцінку пози за один прохід нейронної мережі. Такий підхід дає змогу забезпечити високу швидкість обробки в реальному часі, а можливість використовувати зручний та уніфікований Python-інтерфейс, особливо в останніх версіях робить її дуже зручною та ефективною для швидкого розгортання та навчання власних моделей. Це інструмент, який дозволяє швидко створювати рішення для аналізу візуальних даних на основі штучного інтелекту. Загальна базова схема моделей створених за допомогою YOLO має наступний вигляд (Рисунок 3.1).

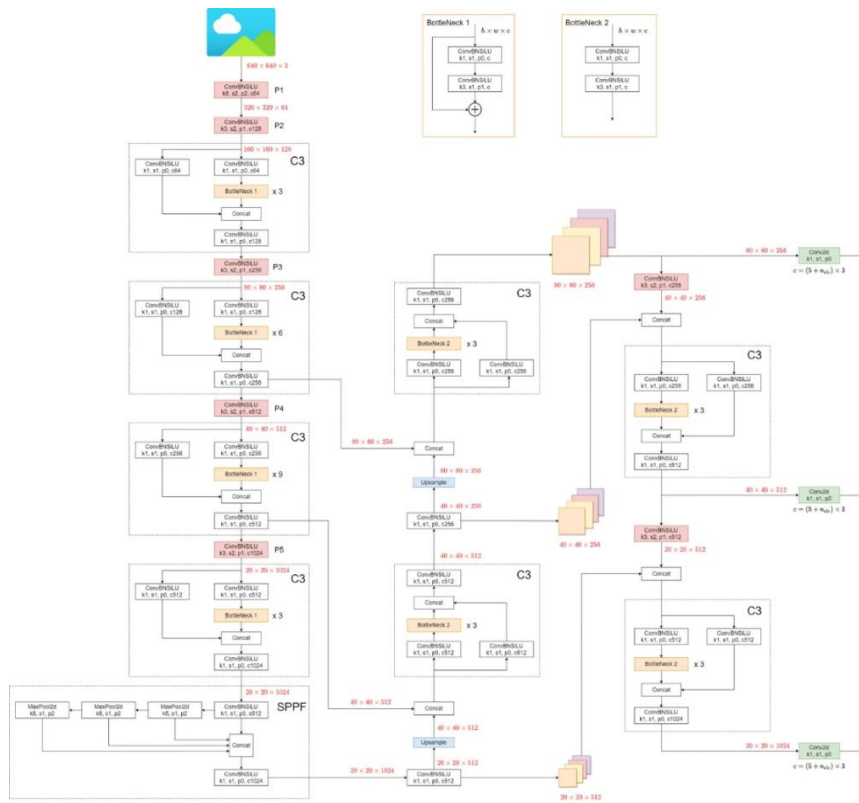


Рисунок 3.1 - Загальна базова схема моделей YOLO

Мультисенсорний аналіз - це процес застосування декількох сенсорів, що працюють у різних спектральних діапазонах (видимий, інфрачервоний, ультрафіолетовий та тепловізор), дозволяє отримати комплексну інформацію про досліджувані об'єкти, яку неможливо отримати за допомогою лише звичайної камери. Наприклад, інфрачервона камера може використовуватися для виявлення аномалій у температурному просторі, що зазвичай вказує на присутність проблем з пайкою або компонентами, тоді як за допомогою ультрафіолетового світла можна виявити забруднення, які є невидимими в умовах звичайного освітлення.

Цей синергетичний підхід значно підвищує надійність системи та є ключовою науковою новизною в цій роботі.

3.2. Опис апаратної частини (Hardware)

Апаратна частина системи має бути спроектована певним чином, для забезпечення надійної роботи всіх сенсорів та ефективної обробки даних.

Вона має складатися з таких основних компонентів, Як комп'ютерне обладнання та сенсорний блок.

Комп'ютерне обладнання. Потужний ПК або робоча станція, оснащена високопродуктивним процесором (CPU), достатнім обсягом оперативної пам'яті (RAM) та, що найважливіше, потужним графічним процесором (GPU). Наявність GPU є критично важливою в прискоренні обчислень, пов'язаних з алгоритмами глибокого навчання, оскільки вона дозволяє паралельно обробляти великі обсяги даних.

Сенсорний блок. Це серце апаратної частини, що складається з, камери видимого спектра, камери з спеціалізованою ультрафіолетовою оптикою та тепловізійної камери.

Камера видимого спектра CMOS/CCD (діапазон видимого світла 400–700 нм). Використовується для загальної інспекції поверхні плат та ідентифікації наявності чи відсутності компонентів на ній, допомагає виявляти фізичні дефекти та порушення форми. Сучасні камери чутливі, як до видимого світла, так і до ближнього інфрачервоного діапазону (NIR, до 1100 нм), що дає можливість використовувати їх для інспекції як при видимому так і інфрачервоному спектрах освітлення, для цього треба, зняти або відсунути з неї ІЧ-фільтр (IR-cut filter), він блокує інфрачервоне випромінення яке потрібне для діагностики прихованих дефектів.

З-поміж промислових фото сенсорів для видимого спектру, одним з кращих рішень на ринку сьогодні, є Basler racer 2 (Рисунок 3.2), топова модифікація (r2L16384-60cc) має наступні характеристики (Таблиця 3.1) та відповідає правовим стандартам та вимогам, таким як: CE (incl. RoHS), CoaXPress 2.0, FCC, GenICam, KC, RoHS, UKCA. Це доволі широкий перелік ключових стандартів та вимог, яким мають відповідати вироби на кшталт різноманітних камер та сенсорів, для того щоб цілком законно використовувати їх у реальних промислових умовах, на виробничих лініях, не порушуючи регуляторних, екологічних стандартів, експортного контролю та галузевих стандартів передачі даних різних країн.



Рисунок 3.2 - Промисловий фотосенсор Basler racer 2

Таблиця 3.1 - Технічні характеристики Basler racer 2

Характеристика	Значення
Сенсор	CMOS / Basler
Роздільна здатність	16384 px
Розмір пікселя	3.5 x 3.5 мкм
Розмір сенсора	60 мм (довжина)
Макс. лінійна частота	60 кГц (60 000 ліній/сек)
Глибина кольору	8 / 10 / 12 біт
Інтерфейс	Camera Link HS
Тип сканування	Лінійний (Line Scan)

Ультрафіолетова камера (УФ-діапазон від 200 до 400 нм). Використовується для виявлення флюсу, бруду та інших забруднень, які починають блискіти під УФ-випромінюванням. Камера для інспекції в цьому діапазоні освітлення вимагає спеціалізованих компонентів, тому що більшість звичайних лінз та захисне скло для камер, як правило блокують УФ-спектр випромінювання. Окрім цього, самі сенсори часто є недостатньо чутливими у цьому діапазоні. Проте є деякі моделі непромислових камер (а саме з кварцовими лінзами), які охоплюють певний спектр УФ-світла.

Для інспекції друкованих плат в ультрафіолетовому спектрі освітлення, з-поміж промислових сенсорів, дуже гарним варіантом буде Teledyne Nano-10GigE-M8200 (Рисунок 3.3), з можливістю застосування спеціальної УФ-оптики. Топова модифікація (G6-GM31-M8205) має наступні характеристики (Таблиця 3.2 та відповідає правовим стандартам та вимогам, таким як: CE, FCC, KCC, GigE Vision v2.0, RoHS. The ECCN for this product is: EAR099.



Рисунок 3.3 - Промисловий фотосенсор Teledyne Nano-10GigE-M8200

Таблиця 3.2 - Технічні характеристики Teledyne Nano-10GigE-M8200

Характеристика	Значення
Роздільна здатність	8192 x 8192 (67.1 МП)
Тип сенсора	CMOS (Teledyne e2v Emerald 67M)
Спектр	Монохромний (Mono)
Розмір пікселя	2.5 мкм
Макс. кадрова частота	13.8 FPS
Динамічний діапазон (ДД)	66 дБ
Шум зчитування	4.5 e- (електрони)
Оптичний фільтр	Відсутній (None)
Інтерфейс	10 GigE (10 Гбіт/с)
Тип затвора	Глобальний (Global shutter)

Тепловізійна камера (Тепловізор - працює в діапазоні далекого інфрачервоного світла LWIR, 8–14 мкм). Використовується для аналізу теплових аномалій, які можуть свідчити про некоректну пайку або несправні компоненти що можуть генерувати надмірне тепло, яке легко можна виявити за допомогою цього сенсора. Це зовсім окремий пристрій, сенсор якого суттєво відрізняється за фізичними характеристиками від CMOS/CCD-

сенсорів у звичних камерах для видимого спектра, тому замінити його звичайною камерою неможливо. Навідмінно від інфрачервоної камери, яка фіксує відбите світло, він фіксує саме теплове випромінювання.

Для детекції теплових дефектів на друкованих платах дуже добре підходять тепловізійні камери від компанії FLIR Systems. Одним з кращих найкращих варіантів є сенсор FLIR T1020 (Рисунок 3.4), який має наступні характеристики (Таблиця 3.3).



Рисунок 3.4 - Промислова тепловізійна камера FLIR T1020

Таблиця 3.3 - Технічні характеристики FLIR T1020

Характеристика	Значення
Роздільна здатність детектора	1024x768 пікселів
Термічна чутливість (NETD)	< 20 мК (< 0.02 °C)
Високоточна оптика	Підтримка преміальних, високоякісних лінз FLIR OSX™ .
Інтерфейс та функціонал	Швидкі інтерфейси, висока точність вимірювання (до 1°C або 1%, функція UltraMax (покращення роздільної здатності).

Вимоги до камер за спектрами

З опису сенсорного блоку стає зрозумілим те, що для якісної роботи в усіх чотирьох режимах, не вийде використовувати лиш одну камеру та просто змінювати на ній об'єктиви. Оскільки кожен спектральний діапазон вимагає різних фізичних параметрів та чутливості сенсорів, в ідеалі потрібно три різні камери.

Рекомендована конфігурація

Рекомендована конфігурація сенсорного блоку для досягнення кращої якості та результативності системи, зображена на (таблиці 3.4).

Таблиця 3.4 - Рекомендована конфігурація сенсорного блоку

Діапазон	Вимога	Рішення (Мінімум)
Видиме освітлення (400–700 нм) + ІЧ-освітлення (до 1100 нм)	1 (для структурних дефектів)	Одна промислова камера (з можливістю зняття ІЧ-фільтра).
Ультрафіолетове освітлення (200-400 нм)	1 (для дефектів маски)	Для максимальної якості окрема УФ-камера
Тепловий (LWIR 8–14 мкм)	1 (для теплових аномалій та електричних дефектів)	Окрема тепловізійна камера (тепловізор).

Система освітлення

Спеціалізована система освітлення не менш важлива, ніж самі камери. Її конструкція передбачає джерела світла з різним спектром випромінювання (видиме, УФ, ІЧ), що дає змогу виділяти різні типи дефектів. Особливу увагу треба приділити забезпеченню рівномірного освітлення по всій площі друкованої плати, аби мінімізувати появу тіней та відблисків. Це забезпечить стабільну якість зображень і мінімізує можливість хибних спрацьовувань алгоритмами детекції. Для максимально рівномірного освітлення та мінімізації тіней і бликів слід використовувати кільцевий, коаксіальний та купольний типи освітлення. Ось кілька прикладів засобів освітлення, які добре підійдуть для наших задач в реальних виробничих умовах.

У видимому спектрі дуже гарно себе проявлять лінійки HPR, HPD2 та LFV3-G від компанії CCS Inc. Для кругового освітлення модель HPR-400SW (Рисунок 3.5) з характеристиками (Таблиця 3.5), для коаксіального LFV3-G-100X200SW (Рисунок 3.6) з характеристиками (Таблиця 3.6) та для купольного HPD2-400SW (Рисунок 3.7) з характеристиками (Таблиця 3.7).



Рисунок 3.5 - Лампа кільцевого освітлення HPR-400SW

Таблиця 3.5 - Технічні характеристики HPR-400SW

Характеристика	Параметр	Значення/Тип
Тип освітлення	Кільцеве (Ring Light)	HPR (High Power Ring)
Колір / Довжина хвилі	Білий (White)	SW (Short Wavelength White)
Потужність	Інтенсивність	Висока
Керування	Режим роботи	Постійний / Стробоскопічний



Рисунок 3.6 - Лампа коаксіального освітлення LFV3-G-100X200SW

Таблиця 3.6 - Технічні характеристики LFV3-G-100X200SW

Характеристика	Параметр	Значення/Тип
Тип освітлення	Низькокутне / Плоске	LFV3 (Flat/Low Angle)
Колір / Довжина хвилі	Зелений (Green)	G
Розміри (Active Area)	Довжина x Ширина	100 x 200 мм
Застосування	Фонове підсвічування (Back Light)	Так



Рисунок 3.7 - Лампа купольного освітлення HPD2-400SW

Таблиця 3.7 - Технічні характеристики HPD2-400SW

Характеристика	Параметр	Значення/Тип
Тип освітлення	Купольне (Dome Light)	HPD2 (High Power Dome)
Колір / Довжина хвилі	УФ (UV)	365 – 405 нм
Керування	Регулювання інтенсивності	Точне, зовнішнє
УФ-потужність	Висока інтенсивність	Висока

Для інфрачервоного освітлення в нашому випадку можна використати промислову інфрачервону підсвітку EFFI-MBL (Рисунок 3.8) від компанії Effilux, Який має гарні характеристики (Таблиця 3.8) для використання в нашій системі.



Рисунок 3.8 - інфрачервона підсвітка EFFI-MBL

Таблиця 3.8 - Технічні характеристики EFFI-MBL

Характеристика	Типовий діапазон / Параметр
Тип освітлення	Лінійний / Прямокутний (Bar Light)
Колір / Довжина хвилі	Білий (SW), Червоний (R), Зелений (G), ІЧ (IR), УФ (UV)
Робоча відстань (WD)	50 – 300 мм
Режим роботи	Постійний / Стробоскопічний
Оптична система	Вбудовані лінзи / Дифузор
Вимоги до контролера	Зовнішній контролер
Тепловідведення	Алюмінієвий корпус

Для освітлення в ультрафіолетовому діапазоні ми можемо використати EFFI-SPOT (Рисунок 3.9) з наступними характеристиками (Таблиця 3.9), він використовується для інспекції невеликих ділянок, проте освітлює їх сильніше, що допомагає краще проявляти дефекти підвищуючи контраст флуоресценції.



Рисунок 3.9 - Промисловий LED прожектор EFFI-MBL

Таблиця 3.9 - Технічні характеристики EFFI-SPOT

Характеристика	Типовий діапазон / Параметр
Тип освітлення	Лінійний / Прямокутний (Bar Light)
Колір / Довжина хвилі	Білий (SW), Червоний (R), Зелений (G), ІЧ (IR), УФ (UV)
Робоча відстань (WD)	50 – 300 мм
Режим роботи	Постійний / Стробоскопічний (Strobe)
Оптична система	Вбудовані лінзи / Дифузор
Вимоги до контролера	Зовнішній контролер
Тепловідведення	Алюмінієвий корпус (радіатор)

3.3. Розрахунок ключових параметрів системи

Щоб впевнитися в ефективності системи, треба розрахувати та обґрунтувати її ключові параметри.

Роздільна здатність - цей параметр визначає найменший розмір деталей, які система може коректно розпізнавати та відрізняти. Вимірюється в мікронах на піксель (мкм/пікс) та розраховується за формулою:

$$\text{Роздільна здатність} = \frac{\text{Роздільна здатність (пікселі)}}{\text{Поле зору}} \times 100$$

Для виявлення таких типових дефектів, як наприклад холодна пайка або пошкодження контактів, роздільна здатність камер повинна знаходитися у діапазоні 10-20 мкм/пікс. Така роздільна здатність забезпечить можливість чітко бачити найдрібніші деталі та аномалії на поверхнях друкованих плат.

Приклад розрахунку

Уявімо що розмір друкованої плати, яка інспектується, становить 150 × 150 мм (це поле зору), і ми хочемо досягти роздільної здатності 10 мкм/пікс, в такому випадку необхідний розмір сенсора камери у пікселях має розраховуватися наступним чином:

$$\text{Розмір сенсора (пікселі)} = \frac{150 \text{ (мм)}}{10 \left(\frac{\text{мкм}}{\text{пікс}} \right)} \times 1000 = 15000 \text{ пікселів}$$

Це означає, що для досягнення максимально детальної картинки для аналізу, камера повинна мати горизонтальну роздільну здатність мінімум 15000 пікселів. Стандартні камери з роздільними здатностями 4К (3840 x 2160) або 8К (7680 x 4320) є недостатніми, тому для таких задачі треба використовувати промислові камери з високою роздільною здатністю, наприклад, 12К або 16К, або використовувати систему яка буде переміщувати камери для того щоб зімати плати по частинах.

Швидкість інспекції - це параметр, який напряму залежить від частоти кадрів камери та швидкості обробки зображень. Для того щоб інтегрувати подібну систему в реальне виробництво, її швидкість має бути достатньою для того щоб не стати вузьким місцем у виробничому процесі. Враховуючи,

що інспекція однієї плати має займати не більше кількох секунд, загальна швидкість обробки даних є критичним фактором.

Вибір об'єктива полягає в тому, що параметри об'єктива (фокусна відстань, робоча відстань, поле зору) мають обиратися, виходячи з необхідної роздільної здатності.

Поле зору (Field of View, FOV) - це область, яку камера може охопити за раз.

Робоча відстань (Working Distance, WD) це відстань між лінзою об'єктива та об'єктом інспекції.

Ці параметри взаємопов'язані і розраховуються для кожного об'єктива.

3.4. Опис програмної частини (Software)

Програмна частина системи є одним з ключових компонентом, який відповідає за управління апаратними засобами, виконує обробку даних та реалізує інтерфейс для взаємодії з користувачем. Розроблений програмний комплекс реалізує алгоритми, описані у розділі 3, та забезпечує ефективний і зручний інтерфейс для проведення інспекцій.

Алгоритми обробки зображень у видимому спектрі.

Програмний алгоритм обробки зображень є основою системи. Його можна поділити на кілька ключових етапів (Рисунок 3.10)

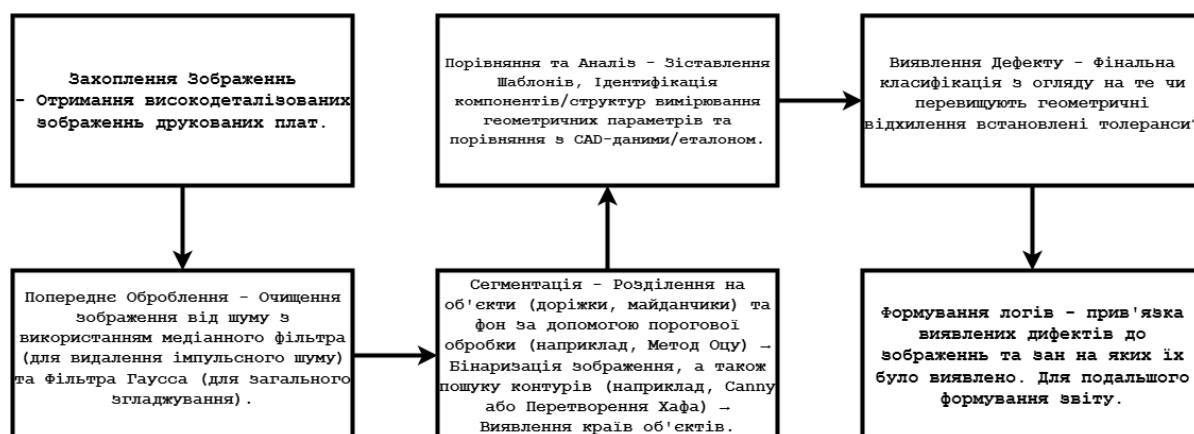


Рисунок 3.10 - Алгоритми обробки зображень у видимому спектрі

Алгоритми аналізу даних в УФ та ІЧ-спектрах.

Аналіз даних, отриманих за допомогою УФ- та ІЧ-сенсорів, вимагає іншого підходу, оскільки дефекти які виявляються в цих діапазонах суттєво відрізняються за своїм характером та видимістю від тих, які проявляються у звичайному видимому спекті.

При зйомці в УФ-спектрі, дефекти паяльної маски, тріщини або забруднення стають видимими завдяки явищам флуоресценції. Алгоритм аналізує зміни в інтенсивності пікселів. Ділянки з підвищеною яскравістю вказують на пошкодження маски, це дозволяє локалізувати їх автоматично.

В ІЧ-діапазоні деякі матеріали стають ніби прозорими, тому аналіз зображень зроблених при такому освітленні дає можливість «побачити» внутрішні структури. За допомогою методу контрастного аналізу або спеціально розроблених алгоритмів можна виявляти дефекти, такі як внутрішні тріщини та пошкодження паяних з'єднань під компонентами.

Алгоритми роботи основної та другорядної програми.

Алгоритм роботи програми (Рисунок 3.11) будується за допомогою кількох ключових частин: ініціалізація та налаштування, головний цикл управління інтерфейсом користувача (GUI) та два основних варіанти обробки — пакетна інспекція (Для тестування моделей) і моніторинг у реальному часі (Для реальних інспекцій).

Також я написав програму за допомогою якої, можна створювати, налаштовувати та тренувати моделі комп'ютерного зору на своїх наборах даних з потрібними параметрами (Рисунок 3.12). Така можливість є доволі важливою для максимальної оптимізації системи під умови виробництва.

Також обидві ці програми користуються бібліотекою TensorFlow за допомогою якої мають можливість використовувати потужності графічних прискорювачів, для підвищення швидкості виконання поставлених задач.

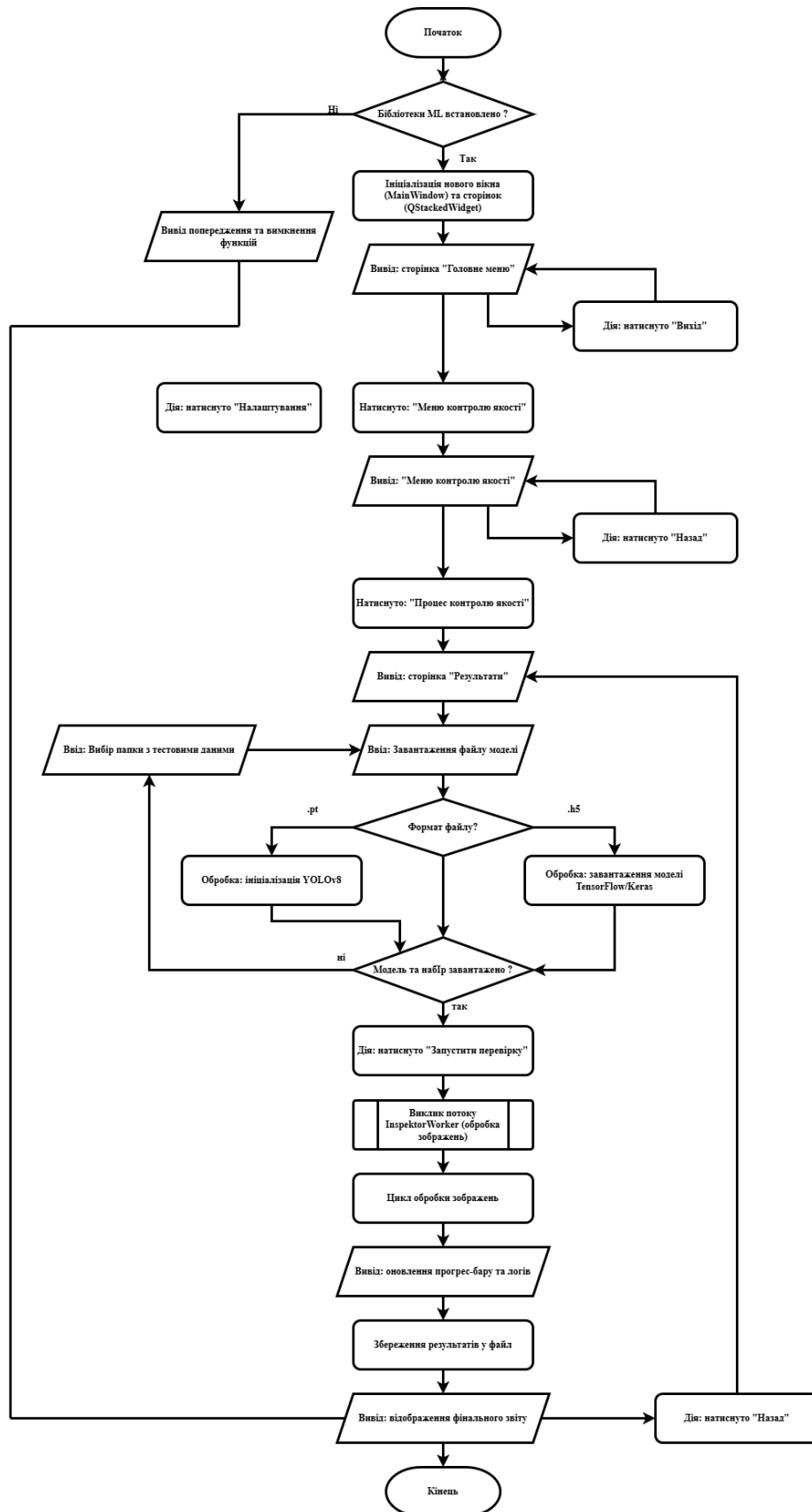


Рисунок 3.11 – Алгоритм роботи основної програми

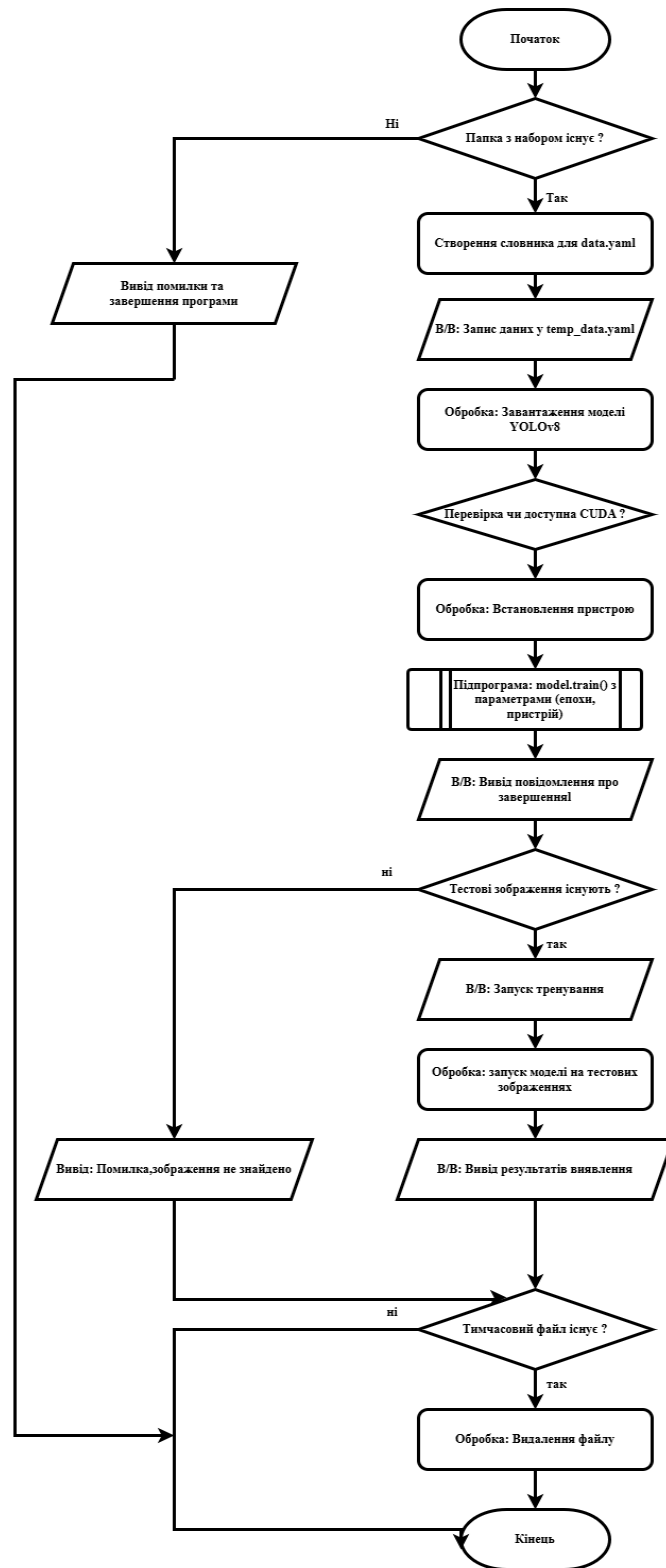


Рисунок 3.12 – Алгоритм роботи програми для тренування моделі

Алгоритм роботи мультисенсорної системи в цілому

Алгоритм роботи системи складається (Рисунок 3.13) з трьох ключових етапів: збір даних, обробка та аналіз даних та звітність.

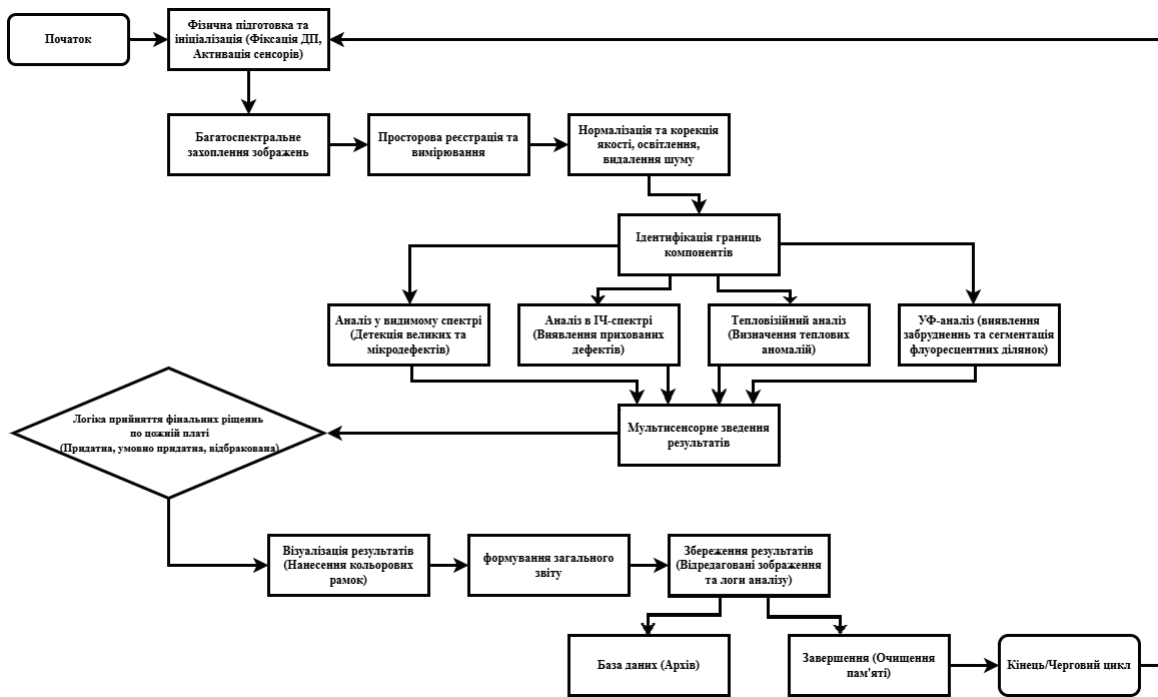


Рисунок 3.13 – Алгоритм роботи системи вцілому

Цей комплексний алгоритм забезпечує високу точність та автоматизацію процесу контролю якості, що робить його ефективним інструментом для сучасного виробництва.

4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА АПРОБАЦІЯ

4.1 Опис експериментального стенду та підготовчі роботи

Для того щоб дослідити роботу системи було використано ноутбук, потужностей якого вистачає для поставленої задачі. Сам пристрій має наступні важливі для нас характеристики:

- Процесор – Intel core i7 12700h що побудований на базі архітектури гібридних ядер Alder Lake, і має наступну їх конфігурацію:
 - Потужні ядра/потоки – 6/12 з максимальною частотою в 4.7 ГГц
 - Енергоефективні ядра/потоки – 8/8 з максимальною частотою 3.5 ГГц

- Загальна кількість потоків 20 та обсяг L3 кешу 24 Мб
- Відеокарта – Nvidia RTX 3070 Laptop, оснащена 8 Гб відеопам'яті типу GDDR6 та має виділений теплопакет в розмірі 150 Вт
- ОЗП – 32 Гб типу DDR5 з частотою 4800 МТ/с

Тестові зразки. Для тренування моделі на фото в звичайних умовах був сформований набір тестових зображень, який включав близько 10 000 фото друкованих плат та їх фрагментів. Серед них були:

- еталонні плати, визнані ідеальними після ручного контролю.
- плати з імітованими або реальними дефектами різних типів (коротке замикання, обрив, "холодна пайка", "місток", дефекти паяльної маски, тощо).

Для тестових тренувальних зразків під спектральні сенсори було знайдено три тестові вибірки в різних спектрах освітлення, кожна з яких включала близько 100 зображень друкованих плат. Серед них було:

30 - 40 еталонних плат, визнаних ідеальними після ручного контролю.

Приблизно 70 плат з імітованими або реальними дефектами різних типів (коротке замикання, обрив, "холодна пайка", "місток", дефекти паяльної маски, тощо).

4.2. Методика проведення експериментів

Для дослідження було сформовано набір зображень з близько 100 материнських плат різного стану, які я зробив у локальному сервісному центрі свого міста в різних умовах освітлення, тобто в сумі зображень плат вийшло 300. Умови були не зовсім, як на реальному виробництві, проте я зробив все можливе для того щоб приблизити їх до таких. Всі фото було зроблено з дотриманням чітких алгоритмів, які дозволили порівняти ефективність різних методів в максимально схожих умовах. Для того щоб перевірити працездатність системи цього достатньо.

Для створення фотографій було використано фотокамеру “Canon EOS 250D (kit 18-55)” (Рисунок 4.1) з роздільною здатністю в межах 3.72 мкм/піксель.



Рисунок 4.1 - Фотокамера Canon EOS 250D (kit 18-55)

Для інспекції в умовах звичайного освітлення було використано LED лампи (Рисунок 4.2) з потужністю 100 Вт, 4 довгих вгорі з кожної сторони та 1 звичайна зверху посередині.



Рисунок 4.2 – LED лампи

Для інспекції в умовах інфрачервоного освітлення було використано звичайні інфрачервоні лампи (Рисунок 4.3) потужністю 100 Вт, також 5 штук, 4 по боках та 1 по центру. Також була використанна змінна лінза для об’єктиву в якій відсутній фільтр інфрачервоного світла.



Рисунок 4.3 – інфрачервона лампа

Для тепловізійної інспекції, було використано промисловий тепловізор UNIT UTI260A (Рисунок 4.4).



Рисунок 4.4 – Тепловізор UNIT UTI260A

Для інспекції в ультрафіолетовому спектрі освітлення, було використано ту ж саму камеру що і для видимого спектра, але з використанням спеціальної прозорої оптики (Рисунок 4.5), оскільки це єдине доступне не промислове рішення для тестування системи.



Рисунок 4.5 – Змінна прозора оптика

4. 3. Аналіз та обговорення отриманих результатів

Порівняльний аналіз виявлення дефектів.

Короткі замикання. У звичному видимому спектрі відсоток виявлення коротких замикань склав близько 85%. В свою чергу тепловізор дав змогу підвищити цей показник до 98% виявлення дефектів даного типу, оскільки аномальний нагрів є найточнішою ознакою.

Дефекти пайки ("містки", "холодна пайка"). У звичносу спектрі відсоток виявлення даного типу дефектів складав 90%. Додавання УФ-аналізу покращило цей показник до 95%, оскільки деякі дефекти маски ставали видимими.

ІЧ-спектр дозволив виявити близько 70% імітованих дефектів, які були б невидимі в інших спектрах (наприклад, часткові обриви доріжок під компонентами).

УФ-спектр дозволив виявити близько 80% дефектів пов'язаних з якість речовин та матеріалів, таких як (метали, сплави, флюс, тощо).

Ефективність комплексного підходу.

Комплексний аналіз показав загальну точність виявлення дефектів на рівні 99%, що значно перевищує показники при застосуванні кожного методу окремо. Цей результат підтверджує, що інтеграція різних спектрів дає синергічний ефект.

Система на тестовому пристрої продемонструвала швидкодію в межах до 2 секунди на повний мультисенсорний аналіз однієї плати, що є набагато швидшим за ручний контроль (5-10 хвилин) та близько за часом роботи з промисловими системами.

Отримані результати підтверджують, що запропонована мультисенсорна архітектура є доволі ефективним та перспективним рішенням для покращення автоматизації контролю якості. Це дає змогу виявляти ширший спектр дефектів з більш високою точністю і швидкістю, що зводить кількість виробничого браку до мінімуму.

Для оцінки ефективності системи використовуються метрики, які базуються на матриці помилок.

Точність - це загальний відсоток правильно ідентифікованих зразків.

Точність виявлення - це відсоток правильно виявлених дефектів серед усіх ідентифікованих. Високе значення цього параметру свідчить про те що система рідко припускається помилок при встановленні типів дефектів.

Точність виявлення розраховується за наступною формулою

$$P_{\text{accuracy}} = \frac{P_{\text{correct}}}{P_{\text{correct}} + P_{\text{miss}} + P_{\text{false_alarm}}}$$

Повнота виявлення - це відсоткове співвідношення кількості виявлених дефектів від загальної кількості дефектів. Високе значення цього параметру свідчить про те, що система не пропускає дефекти.

$$P_{\text{recall}} = \frac{P_{\text{correct}}}{P_{\text{correct}} + P_{\text{miss}}}$$

F1-міра - це середнє гармонійне між точністю виявлення та повнотою виявлення. Використовується для оцінки загальної ефективності системи.

$$F1 = 2 \cdot \frac{P_{\text{accuracy}} \cdot P_{\text{recall}}}{P_{\text{accuracy}} + P_{\text{recall}}}$$

5 ВПРОВАДЖЕННЯ СИСТЕМИ В ЕКСПЛУАТАЦІЮ

5.1. Послідовність дій для повного впровадження системи в експлуатацію.

В цьому розділі описано послідовність дій, які необхідні для переведення розробленої системи контролю якості друкованих плат з етапу розробки в режим повноцінної виробничої експлуатації. Цей процес передбачає встановлення, налаштування та тестування апаратних та програмних комплексів в умовах виробничої лінії.

Підготовка до інсталяції та монтаж обладнання. На цьому етапі виконується фізичне встановлення компонентів системи на ділянках виробничих конвеєрів, де буде відбуватися контроль якості ДП (Таблиця 5.1).

Таблиця 5.1 - Підготовка до інсталяції та монтаж обладнання

Етап	Зміст робіт	Вимоги
Вибір місця інсталяції	Визначення точного місця на конвеєрі, де плата буде зупинятися (або рухатися з контрольованою швидкістю) для інспекції.	Мінімізація зовнішніх вібрацій, стабільна температура, захист від пилу.
Монтаж базової платформи	Встановлення жорсткого каркасу або штатива для фіксації сенсорів та освітлення.	Геометрична стабільність: мінімальний допуск на відхилення осей камер та площини ДП.
Встановлення сенсорів	Монтаж камер (FLIR A-Series/T-Series, Teledyne DALSA Genie Nano) на фіксованій робочій відстані (Working Distance, WD) згідно з розрахунками FOV.	Точне позиціонування оптики (макролінз) для забезпечення необхідної просторової роздільної здатності ($\leq 25 \text{ мкм}$).
Встановлення освітлення	Фіксація модулів освітлення CCS/Effilux/SVL (Ring Light, UV Bar, IR Emitter) з оптимізацією кута падіння світла.	Забезпечення керованого освітлення для кожного спектру (Visible, UV, IR) без взаємного впливу.

Налаштування програмного забезпечення та комунікацій. Після фізичного монтажу системи, проводиться забезпечення високошвидкісного обміну даними та налаштування програмного комплексу (Таблиця 5.2).

Таблиця 5.2 - Налаштування програмного забезпечення та комунікацій

Етап	Зміст робіт	Вимоги
Інсталяція ПЗ	Встановлення операційної системи, драйверів обладнання (GigE Vision SDK, FLIR Atlas SDK, драйвери контролерів освітлення).	Сумісність усіх компонентів ПЗ, наявність ліцензій на промислові SDK.
Мережева конфігурація	Налаштування високошвидкісного інтерфейсу 10 GigE для камери Teledyne DALSA та конфігурація протоколів (наприклад, GigE Vision) для передачі поточкових даних.	Виділений мережевий інтерфейс з підтримкою 10 Gbps, мінімізація затримок (Latency).
Система керування	Встановлення розробленого програмного забезпечення (AOI Application), що включає модулі: 1) Збору даних; 2) Обробки (YOLO/CNN, IR-аналіз, UV-аналіз); 3) Fusion-модуль .	Забезпечення синхронізації (Triggering) між конвеєром, освітленням та сенсорами.

Огляд програмної частини системи. Тут буде зображено інтерфейс головної програми та всіх її сторінок.

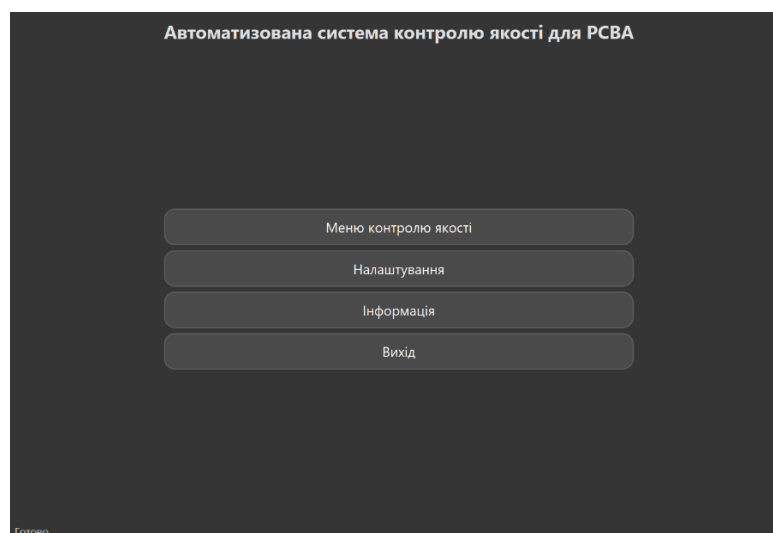


Рисунок 5.1 - Головна сторінка програми

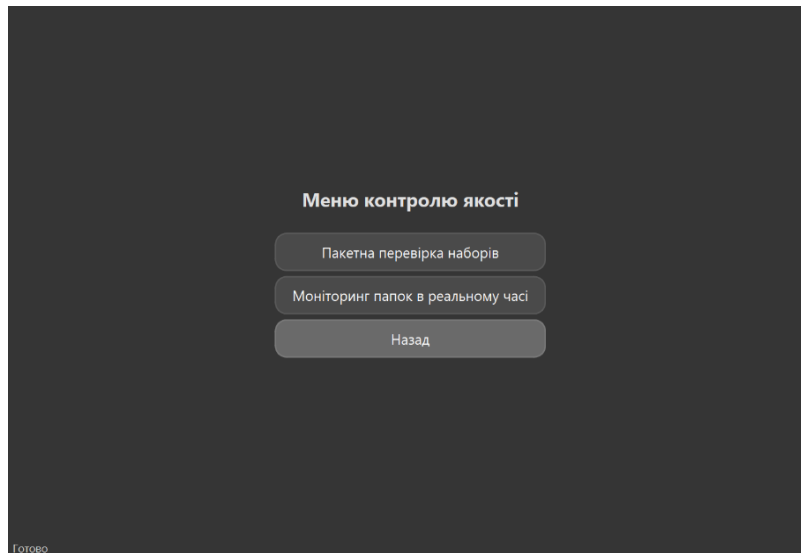


Рисунок 5.2 - Сторінка 'Меню контролю якості'

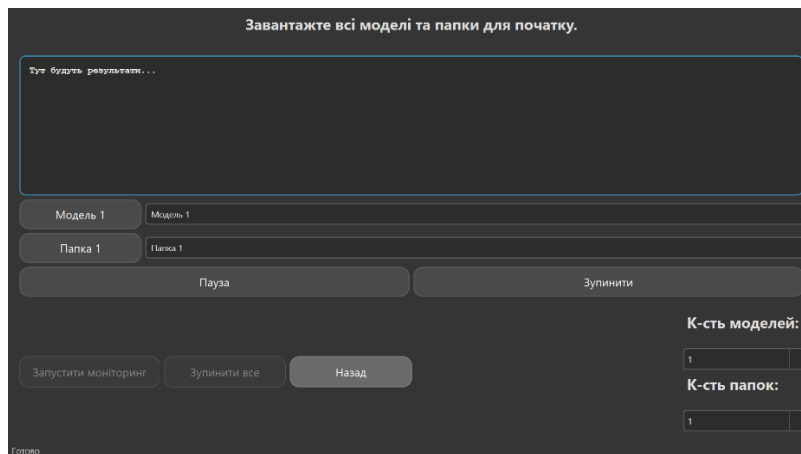


Рисунок 5.3 - Сторінка 'Моніторинг папок в реальному часі'

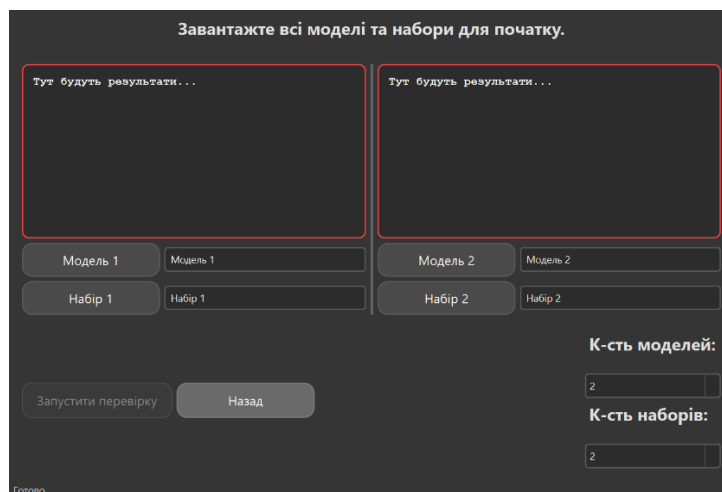


Рисунок 5.4 - Сторінка 'Пакетна перевірка наборів'

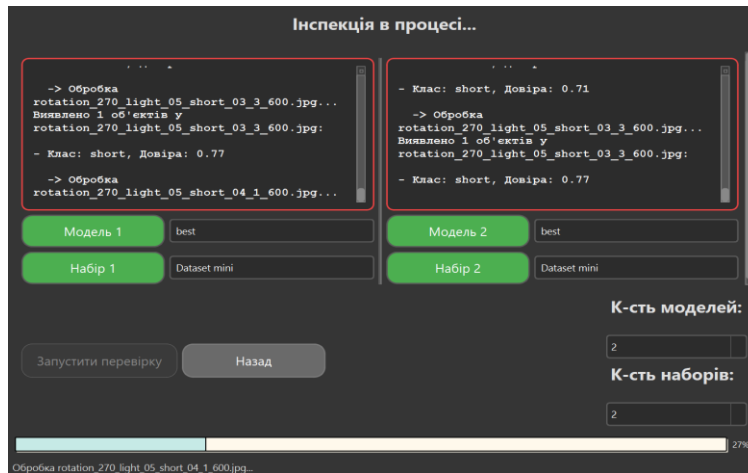


Рисунок 5.5 - Приклад процесу інспекції двох наборів двома моделями та приклад логів і вигляду вікна

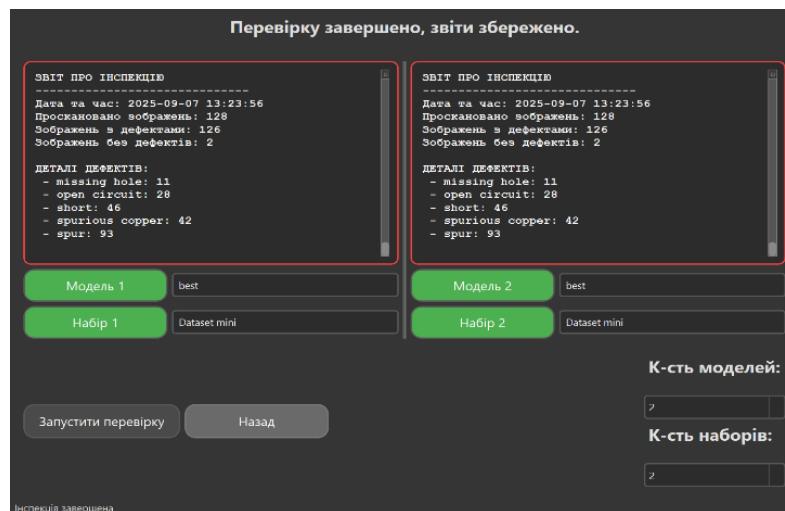


Рисунок 5.6 - Приклад виводу результатів процесу інспекції двох наборів двома моделями

Калібрування та валідація сенсорів. Цей етап є критично важливим для мультисенсорної системи, оскільки забезпечує узгодженість даних з різних спектрів (Таблиця 5.3).

Таблиця 5.3 - Калібрування та валідація сенсорів

Етап	Зміст робіт	Метод/Засіб
Геометрична калібрування	Визначення взаємного розташування всіх камер та корекція оптичних спотворень.	Використання високоточної калібрувальної мішені (checkerboard або dot pattern) та алгоритмів калібрування (наприклад, метод Ченга або OpenCV).
Фотометричне калібрування	Налаштування яскравості освітлення (CCS/SVL) та витримки/коефіцієнта підсилення (Gain) камер (Visible, UV) для отримання оптимального контрасту дефектів.	Використання еталонних зразків ДП з відомими дефектами.
Термічна калібрування	Перевірка точності вимірювання температури тепловізором (FLIR) за допомогою чорного тіла (Black Body) або точних термодатчиків.	Налаштування параметрів випромінювальної здатності (Emissivity) для матеріалів ДП та компонентів.
Просторова реєстрація (Fusion Alignment)	Створення трансформаційної матриці для точного накладання (реєстрації) зображень з усіх трьох сенсорів (Видимий, ІЧ, УФ).	Алгоритми пошуку спільних контрольних точок (Feature Matching) для узгодження координат YOLO, IR, UV.

Навчання та тестування моделі. Впровадження алгоритмів машинного навчання, відповідальних за фінальне рішення (Таблиця 5.4).

Таблиця 5.4 - Навчання та тестування моделі

Етап	Зміст робіт	Результат
Збір навчальної вибірки	Збір та анування великої кількості зображень з усіх трьох спектрів (Visible, IR, UV) для ДП з відомими дефектами та без них.	База даних, необхідна для навчання нейромережі або алгоритму Fusion.
Навчання моделі Fusion	Тренування алгоритму K9: Мультисенсорне Зведення Результатів для прийняття єдиного діагностичного висновку.	Отримання оптимізованої моделі класифікації, здатної мінімізувати хибнопозитивні (False Positives) та хибнонегативні (False Negatives) спрацювання.
Валідація та оцінка якості	Оцінка моделі за ключовими метриками (Accuracy, Precision, Recall, F1-Score) на незалежній тестовій вибірці.	Підтвердження, що точність системи відповідає або перевищує вимоги технічного завдання.

Дослідна експлуатація та приймальні випробування. Фінальний етап, під час якого система інтегрується у виробничий процес під контролем. Дослідна експлуатація (Pilot Run): Система працює паралельно з існуючим методом контролю (якщо він є) протягом встановленого періоду (наприклад, 1–2 тижні). Усі виявлені дефекти перевіряються експертами. Реєстрація невідповідностей: Фіксація усіх помилок та їх корекція шляхом доналаштування параметрів чутливості (порогів спрацювання) або доопрацювання моделі Fusion. Приймальні випробування: Офіційна перевірка системи заздалегідь узгодженим протоколом випробувань. Система вважається прийнятою в експлуатацію, якщо вона підтверджує: Швидкість: Відповідність циклу інспекції (наприклад, час інспекції однієї плати не перевищує 5 секунд). Точність: Підтверджена точність класифікації (наприклад, > 99.5%) на виробничих зразках. Складання акту: Затвердження та підписання Акту про введення системи в промислову експлуатацію.

6 ШЛЯХИ МОДЕРНІЗАЦІЇ СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ

6.1 Розширення функціоналу системи виявлення дефектів

Інтеграція з CAD/CAM системами. У сучасній індустрії виробництва, системи контролю якості інтегруються з системами автоматизованого проєктування та виробництва. Модернізація системи може включати можливість завантаження CAD-файлів (наприклад, Gerber-файлів) для автоматичного порівняння зображень плати з її цифровим двійником. Це дозволить виявляти не тільки дефекти, але й відхилення від проектних розмірів, що значно покращить точність інспекції.

Використання 3D-технологій. Розробка на базі 2D-зображень має певні обмеження. Одним з варіантів модернізації, може бути додавання 3D-сканування (наприклад, за допомогою лазерних триангуляційних датчиків або методів структурованого освітлення). Таким чином можна буде вимірювати висоту компонентів і паяних з'єднань, що критично важливо при виявленні дефектів пайки, як наприклад недостатня кількість припою або зміщення компонентів.

Покращення автономності та взаємодії.

Розробка модулю для інтерфейсу користувача (UI). Розроблена система може бути доповнена зручним та інтуїтивно зрозумілим модулем до основного інтерфейсу, який дозволить Працівникам цеху отримувати опис стані кожної плати та її дефектів на льоту, щоб одразу відсортовувати браковані плати на ремонт чи на розбір в залежності від їх дефектів ремонтпридатності.

Інтеграція з роботизованою системою. Подальшим етапом може стати інтеграція системи контролю якості з роботизованим маніпулятором. Це дозволить автоматизувати процес сортування проінспектованих плат на якісні, несправні ремонтпридатні та не ремонтпридатні. Це дасть змогу скоротити витрати на робочих, оскільки такий підхід перетворить систему з діагностичної в повністю автономну.

Хмарна аналітика та машинне навчання. Перенесення обробки та обчислення даних у хмарні середовища може дати змогу використовувати набагато потужніші обчислювальні ресурси для аналізу та навчання нейронних мереж на великих обсягах даних. Це також створить можливості для віддаленого моніторингу та діагностики. І хоча такі хмарні середовища зазвичай є доволі стабільними та стійкими до змін зовнішнього середовища, все ж слід розуміти що можливі такі випадки коли можна втратити свої дані (наприклад звіти інспекцій, натреновані моделі, готові тестові та тренувальні набори тощо), такими випадками можуть стати наприклад великі стихійні лиха чи сильні електромагнітні імпульси як при ядерних вибухах які теоретично можуть відбутися саме там де знаходяться датацентри та обчислювальні машини таких хмарних середовищ. Тому слід періодично копіювати такі дані на окремий внутрішній датацентр свого підприємства для запобігання небажаних втрат інформації.

Розширення спектральних можливостей.

Гіперспектральний аналіз. Замість кількох окремих спектральних діапазонів, можна використовувати гіперспектральну камеру, яка знімає зображення у сотнях вузьких спектральних смуг. Це дасть змогу отримувати унікальну "спектральну сигнатуру" кожного матеріалу та виявляти навіть найменші хімічні забруднення або пошкодження.

6.2 Можливість самопокращення

Потенціал безперервного вдосконалення. З врахуванням цілей для яких створюються такі системи, стає зрозуміло що дані кожної інспекції (звіти та зображення) можна зберігати і використовувати для додаткового навчання старих моделей, або ж створення нових, таким чином кожного разу об'єм даних для навчання буде зростати, а отже і точність виявлення дефектів та їхня кількість також можуть суттєво підвищуватися з часом. Також якщо налагодити дуже детальне логування інспекцій, вихідні логи цілком можна буде використовувати для того щоб періодично через певні проміжки часу

підбивати статистику стану та ефективності всієї системи вцілому для подальшого покращення її апаратної частини по мірі необхідності. Мається на увазі, що за допомогою статистики можна буде легко відстежити вузькі місця та недоліки в процесі роботи, наприклад, якщо в статистиці буде замалий відсоток впевненості моделі в правоті своїх результатів відносно якоїсь із категорій зображень – це може вказувати на те що якості фото може не вистачати для більш точної інспекції, це може бути спричинено невідповідною оптикою, недостатніми параметрами самого сенсора, або ж це може вказувати на те що сенсор виходить з ладу і в його починаються перебої.

Якщо ж проблема виявиться не в камері, то вона може полягати у проблемах із освітленням, наприклад адні, або декілька ламп певного спектру могли вийти з ладу чим спричинили появу тіні, що і могло посприяти погіршенню якості зображення. Якщо ж після детальної перевірки обладнання проблем з ним не було виявлено то скоріш за все, це означає, що проблема полягає в самій моделі і вона потребує донавчання або перенавчання і перетестування для покращення результативності в цільовому спектрі зображень. Хоч така статистика і не вказуватиме на всі проблеми конкретно, проте вона суттєво знизить коло для їх точного пошуку. Також окрім виявлення проблем у роботі системи діагностики, підхід з логуванням та підбиванням статистики дозволить вчасно виявляти проблеми на самому виробництві. Наприклад, якщо в статистиці буде виявлена помітно більша кількість дефектів певного типу (Наприклад: Нерівномірно нанесена маска, забагато припою, обриви доріжок, погано відмитий флюс, погана якість пайки, тощо;) – це може вказати на проблеми в апаратурі чи компонентах використаних в процсі збірки (Наприклад: Неякісний припой та/або флюс, або ж замала чи зavelика їхня кількість, проблеми з рівномірністю прогріву плат на паяльних станках, зашвидке чи дуже повільне нагрівання та охолодження припою – яке може бути спричинено невідповідною температурою приміщення, вологістю чи навіть наявністю протягів, тощо;).

Таким чином статистика дає змогу певною мірою покращити швидкість виявлення та виправлення подібних проблем, а також зменшує шанси того що якісь із них можуть бути відносно довго не помічені, а отже не виправлені вчасно.

6.3 Підсумок та аналіз статистики за допомогою Агентів чи систем штучного інтелекту

Підсумок та аналіз статистики за допомогою Агентів чи систем штучного інтелекту. З урахуванням можливостей сучасних моделей штучного інтелекту, виходячи з минулого пункту 5.4, а саме з його частини про підсумок статистики на основі логів, можна також оптимізувати весь цей процес, використовуючи платформу автоматизації робочих процесів на кшталт n8n створити сценарій за яким штучний інтелект сам буде аналізувати лог файли і за певною структурою яку можна налаштувати вручну за допомогою .json файлу буде сам підбивати статистику, яку в подальшому він також сам може проаналізувати і за допомогою короткої вижимки, вказати працівникам тех підтримки на аномальні відхилення які скоріш за все вказують на якийсь недолік чи поломку у виробничому обладнанні чи використаних компонентах

ВИСНОВКИ

В даній магістерській роботі були розглянуті існуючі методи для покращення ефективності автоматизованих систем контролю якості друкованих плат за допомогою комп'ютерного зору, нові способи представлення візуальних даних, та їх подальшого аналізу для виявлення дефектів.

Проаналізовано шляхи модернізації мультисенсорної системи контролю якості друкованих плат та методи покращення її ефективності у загальному виробничому процесі. Детально розглянуто принципи роботи подібних систем і обґрунтовано можливість їх використання у реальній промисловості.

Теоретично досліджено і розроблено покращений варіант системи контролю якості друкованих плат.

Перелічено напрямки модернізації, що демонструють значний потенціал для розвитку розробленої системи. Інтеграція 3D-технологій, роботизація та використання хмарних сервісів дозволять перетворити її в повноцінний інструмент для автоматизованого управління якістю на виробничому підприємстві, що відповідає вимогам концепції Індустрії 4.0. Це дозволяє: підвищити надійність та точність систем контролю якості; спростити процес їх розробки та експлуатації; зробити їх гнучкими та доступними для подальшого вдосконалення.

Розглянуто заходи з охорони праці.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Бішоп К. М. Pattern Recognition and Machine Learning. - Springer, 2006. 738 с.
2. Редмон Дж. [та ін.]. You Only Look Once: Unified, Real-Time Object Detection. CVPR, 2016. сс. 779-788. Наукова робота по фундаментальних принципах роботи з YOLO.
3. Рен С., Хе К., Гіршик Р., Сунь Дж. Faster R-CNN: Towards Real-Time Object Detection with Region Proposal Networks. Advances in Neural Information Processing Systems (NIPS), 2015, сс. 91–99.
4. Хе К., Гкіюксарі Г., Доллар П., Гіршик Р. Mask R-CNN. Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV), 2017, сс. 2961–2969.
5. Лін Т. Й., Доллар П., Гіршик Р., Хе К., Лі З., Білонгі С. Feature Pyramid Networks for Object Detection. Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2017, сс. 936–944.
6. Симосян К., Зіссерман А. Very Deep Convolutional Networks for Large-Scale Image Recognition. International Conference on Learning Representations (ICLR), 2015. 14 с.
7. Хуан Г., Лю З., ван дер Маатен Л., Вайнбергер К. К. Densely Connected Convolutional Networks. Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2017, сс. 4700–4708.
8. Досовіцький А. [та ін.]. An Image is Worth 16x16 Words: Transformers for Image Recognition at Scale. International Conference on Learning Representations (ICLR), 2021. 22 с.
9. Дуда Р. О., Харт П. Е., Сторк Д. Г. Pattern Classification. 2nd Edition. New York: Wiley-Interscience, 2001. 738 с.
10. Гонсалес Р. К., Вудс Р. Е. Digital Image Processing. 4th ed. Pearson, 2018. 1168 с.

11. Соломон К., Брекон Т. Fundamentals of Digital Image Processing: A Practical Approach. Chichester: Wiley, 2011. 360 с.
12. Батчелор Б. Г., Вілан П. Ф. Intelligent Vision Systems for Industry. London: Springer, 1997. 484 с.
13. Горовіц П., Хілл В. The Art of Electronics. 3rd Edition. Cambridge: Cambridge University Press, 2015. 1220 с.
14. Седра А. С., Сміт К. С. Microelectronic Circuits. 8th Edition. New York: Oxford University Press, 2020. 1408 с.
15. Бойлестада Р. Л., Нашельський Л. Electronic Devices and Circuit Theory. 11th Edition. London: Pearson, 2013. 960 с.
16. Туммала Р. Р. Fundamentals of Microsystems Packaging. New York: McGraw-Hill Education, 2001. 1136 с.
17. Кумбс К. Ф. (Editor) Coombs' Printed Circuits Handbook. 7th Edition. New York: McGraw-Hill Education, 2019. 1360 с.
18. Якименко Г.Я. Технологія виробництва друкованих плат: Навч. посібник, - Харків: НТУ «ХП», 2001. – 152с.
19. Дефекти пайки. [Електронний ресурс]. - Режим доступу:<https://www.sunzontech.com/various-soldering-defects-in-smt-pcb-production-sunzontech> (дата звернення: 2025 рік).
20. Комп'ютерний зір. [Електронний ресурс]. - Режим доступу: https://uk.wikipedia.org/wiki/Комп%27ютерний_зір (дата звернення: 2025 рік).
21. Штучний інтелект. [Електронний ресурс]. - Режим доступу: https://uk.wikipedia.org/wiki/Штучний_інтелект (дата звернення: 2025 рік).
22. Ультрафіолетове випромінювання. [Електронний ресурс]. - Режим доступу: https://uk.wikipedia.org/wiki/Ультрафіолетове_випромінювання (дата звернення: 2025 рік).
23. Інфрачервоне випромінювання. [Електронний ресурс]. - Режим доступу: https://uk.wikipedia.org/wiki/Інфрачервоне_випромінювання (дата звернення: 2025 рік).

24. Теплобачення. [Електронний ресурс]. - Режим доступу: <https://uk.wikipedia.org/wiki/Теплобачення> (дата звернення: 2025 рік).
25. Технологія травлення. [Електронний ресурс]. - Режим доступу: [https://uk.wikipedia.org/wiki/Травлення_ \(технологія\)](https://uk.wikipedia.org/wiki/Травлення_(технологія)) (дата звернення: 2025 рік).
26. Змочування. [Електронний ресурс]. - Режим доступу: <https://uk.wikipedia.org/wiki/Змочування> (дата звернення: 2025 рік).
27. Поверхневий монтаж. [Електронний ресурс]. - Режим доступу: https://uk.wikipedia.org/wiki/Поверхневий_монтаж (дата звернення: 2025 рік).
28. Машинний зір. [Електронний ресурс]. - Режим доступу: https://uk.wikipedia.org/wiki/Машинний_зір (дата звернення: 2025 рік).
29. Рентгенівське випромінювання. [Електронний ресурс]. - Режим доступу: https://uk.wikipedia.org/wiki/Рентгенівське_випромінювання (дата звернення: 2025 рік).
30. АСТПВ. [Електронний ресурс]. - Режим доступу: https://uk.wikipedia.org/wiki/Автоматизована_система_технологічної_підготовки_виробництва (дата звернення: 2025 рік).
31. Хмарні обчислення. [Електронний ресурс]. - Режим доступу: https://uk.wikipedia.org/wiki/Хмарні_обчислення (дата звернення: 2025 рік).
32. OpenCV Documentation. [Електронний ресурс]. - Режим доступу: <https://opencv.org> (дата звернення: 2025 рік).
33. TensorFlow/Keras Documentation. [Електронний ресурс]. - Режим доступу: <https://www.tensorflow.org> (дата звернення: 2025 рік).
34. Ultralytics YOLO Documentation. [Електронний ресурс]. - Режим доступу: <https://docs.ultralytics.com> (дата звернення: 2025 рік).
35. Python Documentation. [Електронний ресурс]. - Режим доступу: <https://docs.python.org> (дата звернення: 2025 рік).
36. QT6 for Python Documentation. [Електронний ресурс]. - Режим доступу: <https://doc.qt.io/qtforpython-6> (дата звернення: 2025 рік).

37. Omron загальні відомості. [Електронний ресурс]. - Режим доступу: <https://en.wikipedia.org/wiki/Omron> (дата звернення: 2025 рік).
38. Koh Yong загальні відомості. [Електронний ресурс]. - Режим доступу: <https://kohyoung.com/en> (дата звернення: 2025 рік).
39. MIRTEC загальні відомості. [Електронний ресурс]. - Режим доступу: <https://www.mirtec.com> (дата звернення: 2025 рік).
40. FLIR Systems. [Електронний ресурс]. - Режим доступу: <https://www.flir.com> (дата звернення: 2025 рік).
41. Basler AG. [Електронний ресурс]. - Режим доступу: <https://www.baslerweb.com> (дата звернення: 2025 рік).
42. NVIDIA. [Електронний ресурс]. - Режим доступу: <https://developer.nvidia.com> (дата звернення: 2025 рік).
43. Omron. [Електронний ресурс]. - Режим доступу: <https://www.omron.com/global/en> (дата звернення: 2025 рік).
44. Robotics & Automation News. [Електронний ресурс]. - Режим доступу: <https://roboticsandautomationnews.com> (дата звернення: 2025 рік).
45. Computer Vision Online. [Електронний ресурс]. - Режим доступу: <https://computervisiononline.com> (дата звернення: 2025 рік).
46. Mettler-Toledo Safeline. [Електронний ресурс]. - Режим доступу: <https://www.mt.com> (дата звернення: 2025 рік).
47. Nordson SONOSCAN. [Електронний ресурс]. - Режим доступу: <https://www.nordson.com> (дата звернення: 2025 рік).
48. Проєктування друкованих плат. [Електронний ресурс]. - Режим доступу: https://www.sea.com.ua/ua/service/proektirovanie-pecatnyh-plat/?srsltid=AfmBOoo8Mok6EdUyoPkISQH_dClQJ9MBy5E0dpiCrdzSIR8VVDqRUC11 (дата звернення: 2025).
49. CCS Inc. [Електронний ресурс]. - Режим доступу: <https://www.ccs-grp.com> (дата звернення: 2025).
50. Effilux. [Електронний ресурс]. - Режим доступу: <https://effilux.com> (дата звернення: 2025).

51. Жидецький В. Ц. Основи охорони праці : підруч. : Афіша, 2004. 250 с.
52. Босов Є. П., Жесан Р. В., Каліч В. М., Голик О. П., Зубенко В. О. Охорона праці при проектуванні систем автоматизації виробництва : навч. посіб. 2-е вид., перероб. і доп. Кропивницький : ЦНТУ, 2022. 208 с.
53. Жидецький В. Ц., Джигирей В. С., Сторожук В. М., Туряб Л. В., Лико Х. І. Практикум з охорони праці. Львів : Афіша, 2000. 352 с.
54. Конституція України. Київ : Андронум, 2020. 60 с.
55. Про охорону праці. : Закон України. [Електронний ресурс]. - Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/main/2694-12#Text> (дата звернення: 18.10.2025).
56. Про використання ядерної енергії та радіаційну безпеку : Закон України. [Електронний ресурс]. - Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/39/95-%D0%B2%D1%80> (дата звернення 23.10.2025).
57. Основи законодавства України про охорону здоров'я : Закон України. [Електронний ресурс]. - Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2801-12#Text> (дата звернення 02.11.2025).
58. Про систему громадського здоров'я : Закон України. [Електронний ресурс]. - Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2573-20#n840> (дата звернення 02.11.2025).
59. Про загальнообов'язкове державне соціальне страхування : Закон України. [Електронний ресурс]. - Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1105-14> (дата звернення 10.11.2025).
60. Кодекс цивільного захисту України. [Електронний ресурс]. - Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/main/5403-17#Text> (дата звернення: 03.11.2025).
61. Кодекс законів про працю України. [Електронний ресурс]. - Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/main/322-08#Text> (дата

звернення: 19.10.2025).

62. Правила улаштування електроустановок : вид. офіц. Київ : Міненерговугілля України, 2017. 617 с.

63. Про затвердження Правил охорони праці під час виробництва друкованих плат : наказ Міненерговугілля України від 23 жовт. 2013 р. № 772. [Електронний ресурс]. - Режим доступу: <http://zakon4.rada.gov.ua/laws/show/z1912-13> (дата звернення: 01.11.2025).

64. Охорона праці при виготовленні друкованих плат. *Studme* : [Електронний ресурс]. - Режим доступу: http://studme.com.ua/1221060514407/bzhd/bezopasnost_proizvodstva_pечатnyh_plat.htm (дата звернення: 01.11.2025).

65.SVL Company. [Електронний ресурс]. - Режим доступу: <https://svl.ua/> (дата звернення: 2025).