

Міністерство освіти і науки України  
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Автоматики і комп'ютеризованих технологій  
(повна назва)

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

## КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА Пояснювальна записка

Другий (магістерський)

(рівень вищої освіти)

Розроблення автоматизованої системи контролю технологічного процесу  
складання VGA-компонентів  
(тема)

Виконав:

студент 2 курсу, групи АУТПм-21-1  
Рибалко Роман Олександрович  
(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 доц. Яшков І.О.  
(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту  
Зав. кафедри КІТАМ

(підпис)

Невлюдов І. Ш.  
(прізвище, ініціали)

2022 р.

# ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ

Факультет Автоматики та комп'ютеризованих технологій  
Кафедра КІТАМ  
Рівень вищої освіти Другий (магістерський)  
Спеціальність 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології  
Тип програми Освітньо-професійна  
Освітня програма Автоматизоване управління технологічними процесами  
(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри \_\_\_\_\_  
(підпис)

«  » \_\_\_\_\_ 20\_ р.

## ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Студентові Рибалку Роману Олександровичу  
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розроблення автоматизованої системи контролю технологічного процесу складання BGA-компонентів

Затверджена наказом по університету від 07.11.2022р. № 1463Ст

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії 22.12.2022

3. Вихідні дані до роботи \_\_\_\_\_

Зображення BGA-компоненту,

комп'ютерний зір,

мова Python,

Індекс структурної подібності

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі \_\_\_\_\_

4.1 Вступ

4.2 Аналіз процесу збирання друкованих плат та BGA-компонентів

4.3 Дослідження та розрахунок параметрів процесу складання BGA-компонентів

4.4 Розроблення автоматизованої системи контролю технологічного процесу складання BGA-компонентів

4.5 Проведення експериментальних досліджень з програмним засобом автоматизованої системи контролю технологічного процесу складання BGA-компонентів

4.6 Висновки

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій \_\_\_\_\_

Слайди у форматі Power Point у кількості 12 слайдів з розширенням .pptx

6. 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   | 22.10.2022                     | виконано |
| 2  | Опрацювання літератури за темою роботи.  | 24.10.2022                     | виконано |
| 3  | Аналіз процесу збирання друкованих плат та BGA-компонентів   | 01.11.2022                     | виконано |
| 4  | Дослідження та розрахунок параметрів процесу складання BGA-компонентів   | 14.11.2022                     | виконано |
| 5  | Розроблення автоматизованої системи контролю технологічного процесу складання BGA-компонентів  | 25.11.2022                     | виконано |
| 6  | Проведення експериментальних досліджень з програмним засобом автоматизованої системи контролю технологічного процесу складання BGA-компонентів | 01.12.2022                     | виконано |
| 7  | Оформлення пояснювальної записки   | 10.12.2022                     | виконано |
| 8  | Оформлення презентації   | 10.12.2022                     | виконано |
| 9  | Подання роботи на рецензію   | 14.12.2022                     | виконано |
| 10 | Подання роботи на підпис зав. Кафедри  | 16.12.2022                     | виконано |
| 11 | Подання кваліфікаційної роботи в ЕК  | 22.12.2022                     | виконано |

Дата видачі завдання 21.10.2022

Студент \_\_\_\_\_  
(підпис)

Рибалко Р.О.  
(прізвище, ініціали)

Керівник роботи \_\_\_\_\_  
(підпис)

доц. Яшков І.О.  
(посада, прізвище, ініціали)

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 82 с., 4 табл., 46 рис., 2 дод., 27 джерел.

PYTHON, ВІЗУАЛЬНИЙ КОНТРОЛЬ, BGA-КОМПОНЕНТИ,  
ДРУКОВАНА ПЛАТА, ТЕХНОЛОГІЯ ПОВЕРХНЕВОГО МОНТАЖУ

Метою цього дослідження є розробка автоматичної системи оптичного контролю технологічного процесу складання BGA-компонентів.

Об'єкт дослідження – процес автоматизованого контролю складання BGA-компонентів.

Предмет дослідження – візуальний метод контролю складання BGA-компонентів.

Методи дослідження – математичної статистики для обробки результатів досліджень, метод структурної подібності для аналізу дефектів BGA-компонентів, метод комп'ютерного зору для створення програмного засобу.

У кваліфікаційній роботі пропонується оптичний метод вимірювання компланарності виводів BGA та пропонується процес перевірки на основі двох зображень, одне з яких є еталонним, інше – з дефектами.

Практична частина реалізована за допомогою програмного засобу, написаного мовою Python та проведено експериментальні дослідження зі знаходження дефектів BGA-компонентів.

## ABSTRACT

Explanatory note: 82 pages, 4 tables, 46 figures, 2 appendices, 27 sources.

PYTHON, VISUAL CONTROL, BGA COMPONENTS, PCB, SURFACE MOUNTING TECHNOLOGY

The purpose of this study is to develop an automatic system for optical control of the technological process of assembling BGA components.

The object of research is the process of automated control of the assembly of BGA components.

The subject of the study is a visual method for controlling the composition of BGA components.

Research methods – mathematical statistics for processing research results, structural similarity method for analyzing defects in BGA components, computer vision method for creating a software tool.

In the qualification work, an optical method for measuring the coplanarity of BGA pins is proposed and a verification process is proposed based on two images, one of which is a reference, the other with defects.

The practical part was implemented using a software tool written in Python, and experimental studies were conducted to find defects in BGA components.

## ЗМІСТ

|   |    |
|---|----|
| Перелік скорочень і термінів .....  | 8  |
| Вступ.....  | 9  |
| 1 Аналіз процесу збирання друкованих плат та BGA-компонентів .....                                    | 11 |
| 1.1 Процес складання друкованої плати .....   | 11 |
| 1.1.1 Перевірка проектування для виробництва та конструкції для складання.....                        | 11 |
| 1.1.2 Виготовлення друкованих плат .....  | 14 |
| 1.1.3 Вхідна перевірка матеріалів .....   | 15 |
| 1.1.6 Пайка оплавленням .....   | 20 |
| 1.1.8 Хвильова пайка.....   | 23 |
| 1.1.9 Ручне паяння.....   | 23 |
| 1.1.10 Фінальна інспекція.....  | 24 |
| 1.2 Технології складання та пакування BGA-компонентів .....   | 27 |
| 1.2.2 Пакування BGA-компонентів .....   | 28 |
| 1.2.3 Метод перевірки BGA .....   | 31 |
| 1.3 Постановка завдання та висновки до розділу 1 .....  | 35 |
| 2 Дослідження та розрахунок параметрів процесу складання BGA-компонентів.....                         | 38 |
| 2.1 Конструкція посадкового місця BGA-кульки.....   | 38 |
| 2.2 Розрахунок висоти паяного з'єднання.....  | 41 |
| 2.3 Розрахунок напруги відшаровування BGA-компонентів .....   | 46 |
| 2.4 Ключові моменти процесу збирання компонентів BGA за технологією поверхневого монтажу.....         | 50 |
| 2.5 Висновки за розділом 2.....   | 52 |
| 3 Розроблення автоматизованої системи контролю технологічного процесу складання BGA-компонентів ..... | 53 |
| 3.1 Розробка блок-схеми алгоритму роботи системи та ідентифікація її модулів .....                    | 53 |

|   |    |
|---|----|
| 3.2 Розробка додатка для автоматизованої системи контролю технологічного процесу складання BGA-компонентів.....                                       | 55 |
| 3.4 Охорона праці.....  | 63 |
| 3.5 Висновки за розділом 3 .....  | 64 |
| 4 Проведення експериментальних досліджень з програмним засобом автоматизованої системи контролю технологічного процесу складання BGA-компонентів..... | 65 |
| 4.1 Висновки до розділу 4 .....   | 78 |
| Висновки .....  | 79 |
| Перелік джерел посилання .....  | 81 |
| Додаток А Текст програми.....   | 84 |
| Додаток Б Демонстраційний матеріал .....  | 88 |

## ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

АОК – автоматизований оптичний контроль;  
ВСТ – внутрішньосхемне тестування;  
ДП – друкована плата;  
ДПД – Діаграма потоку даних;  
ІСП – індекс структурної подібності;  
ККЯ – команда контролю якості;  
КС – конструкції для складання;  
ПВ – проектування для виробництва;  
ПМ – поверхневий монтаж;  
САВК – система автоматичного візуального контролю  
ТПМ – технологія поверхневого монтажу;  
УФ – ультра-фіолет;  
ФТЛ – функціональне тестування ланцюга;  
ЧПП – чотирикутні плоскі пакети;  
ЧПУ – числове програмне управління;  
BGA – ball grid array;  
CBGA – керамічні BGA,  
CCBGA – керамічні колони BGA;  
CSP – чипові корпуси;  
FIFO – першим прийшов – першим вийшов;  
HDI – High-Density Interconnect;  
PBGA – пластикові BGA;  
QFN – Quad Flat No-leads package;  
QFP – квадратний плоский корпус;  
TBGA – стрічкові BGA.

## ВСТУП

Інструкції з перевірки BGA визначаються на основі рекомендацій щодо збирання готових друкованих плат IPC-A-610, а також інших критеріїв, які були визначені між користувачем та установником. Насправді цим критеріям перевірки відповідають різні методи перевірки BGA. Ці методи включають візуальний огляд та рентгенівський контроль.

Існує безліч методів, які становлять методи оптичного контролю BGA. Ці методи включають ендоскопію та візуальний огляд. В ендоскопії використовується призма з оптичним градієнтом, щоб поєднати поперечну область огляду із площиною пластини. Візуальний або оптичний контроль (інспекція) включає візуальне тестування друкованих плат або полягає в аналізі зображень BGA-компонентів.

Усі ознаки відшарування, западини, залишки надлишкового потоку тощо. помітні і є частиною маршруту огляду. Візуальний мікроскоп часто використовується при візуальному огляді, в якому друкована плата нахилена під кутом, щоб можна було бачити той самий тип оцінки, що й ендоскоп. На цьому шляху часто трапляються компоненти, які обмежують корисність цієї спеціальної техніки.

Метою цього дослідження є розробка автоматичної системи оптичного контролю технологічного процесу складання BGA-компонентів. У цій роботі пропонується оптичний метод вимірювання компланарності виводів BGA та пропонується процес перевірки на основі двох зображень, одне з яких є еталонним, інше – з дефектами.

Об'єкт дослідження – процес автоматизованого контролю складання BGA-компонентів.

Предмет дослідження – візуальний метод контролю складання BGA-компонентів.

Методи дослідження –математичної статистики для обробки результатів досліджень, метод структурної подібності для аналізу дефектів BGA-компонентів, метод комп'ютерного зору для створення програмного засобу.

Для вирішення поставленої мети потрібно вирішити наступні завдання:

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

# 1 АНАЛІЗ ПРОЦЕСУ ЗБИРАННЯ ДРУКОВАНИХ ПЛАТ ТА VGA-КОМПОНЕНТІВ

## 1.1 Процес складання друкованої плати

Одним із найважливіших факторів загальної ефективності кожного проекту зі збирання друкованих плат є розуміння саме цього процесу [3].

Кількість кроків, пов'язаних з процесом складання друкованої плати, залежить від конкретного характеру проекту, як показано на блок-схемі нижче (рис. 1.1), і кожен з цих кроків коротко пояснюється в наступних розділах.

Для простоти цієї блок-схеми не показані деякі проміжні етапи; наприклад, кожен етап включає індивідуальну перевірку після завершення.

Заздалегідь ознайомившись із цим процесом, досвідчений інженер може спроектувати свою друковану плату спеціально для швидкого та ефективного процесу складання, зводячи до мінімуму загальну кількість необхідних кроків.

### 1.1.1 Перевірка проектування для виробництва та конструкції для складання

Після того, як виробнича команда отримує замовлення під ключ, їх першим завданням є перевірка дизайну за допомогою ретельного процесу перевірки проектування для виробництва (ПВ) та конструкції для складання (КС). Ці перевірки включають перевірку узгодженості різних проектних документів, відстані між деталями, точності посадкового місця та чіткого маркування орієнтації. Основна мета цієї процедури – максимально знизити ймовірність того, що помилки проектування вплинуть на готовий продукт, що захищає клієнтів від додаткових витрат часу та коштів, пов'язаних із доопрацюванням на рівні плати [4].

Клієнти повинні стежити за електронним листом від виробничої команди протягом перших одного або двох днів після розміщення замовлення.

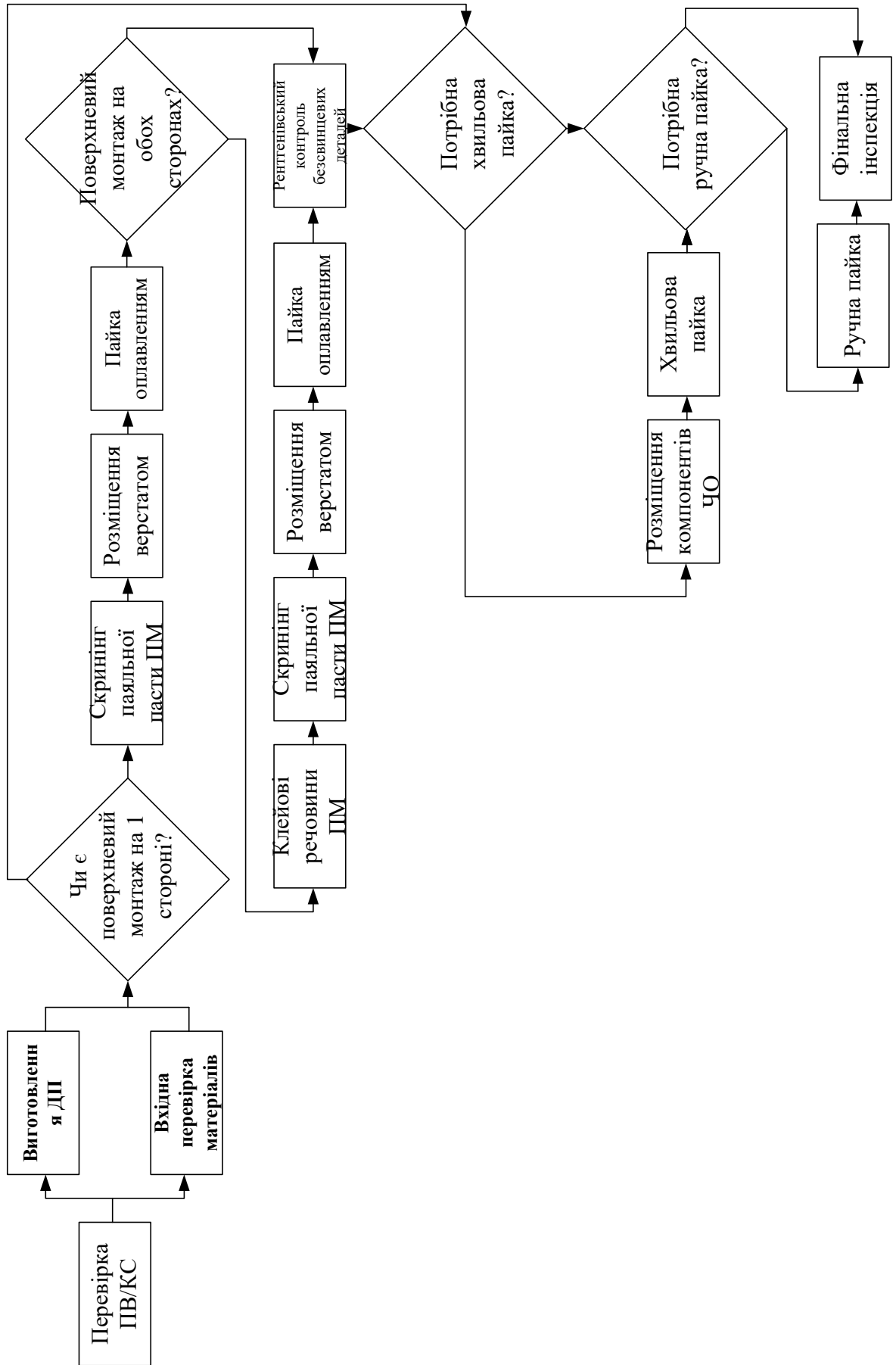


Рисунок 1.1 – Процес складання друкованої плати

Якщо під час цієї початкової перевірки будуть виявлені будь-які проблеми або невідповідності, координатор виробництва для замовлення, що розглядається, зв'яжеться з клієнтом безпосередньо для вирішення. Як правило, докладний звіт буде надіслано для відповіді, а замовлення буде припинено до повного підтвердження, тому важливо відповісти на ці запитання якнайшвидше, щоб уникнути затримок.

ПВ є важливою концепцією для проектів із виготовлення та складання друкованих плат будь-якого масштабу. При обсягах замовлення на рівні виробництва невеликі зміни в конструкції часто можуть заощадити вам значну кількість часу та грошей, а замовлення на прототипи завжди необхідно робити якнайшвидше і точніше, щоб ви могли приступити до тестування. Щоб допомогти клієнтам максимізувати ефективність свого проекту, компанія надає послуги безкоштовної перевірки ПВ під час кожного замовлення друкованої плати.

Використання ПВ залежить від вашого конкретного постачальника послуг друкованих плат, тому компанія рада працювати з клієнтами, починаючи з етапу проектування проекту та закінчуючи виробничим процесом. Щоб допомогти вам у розробці, вона надає вичерпний документ із рекомендаціями щодо ПВ та супровідний документ із рекомендаціями щодо КС [5]. Ці документи включають визначення та пояснення різних допусків, правил, можливостей та процедур тестування для виготовлення та складання друкованих плат. Це допоможе не тільки уникнути потенційно трудомістких роз'яснень під час виробництва, але й бути озброєними всією інформацією, необхідною для проектування спеціально для швидкого виконання робіт чи низької вартості виробництва.

Як тільки замовлення на друковану плату буде відправлено у виробництво, наша команда інженерів із забезпечення якості детально оцінить проект та надасть безкоштовний звіт про перевірку ПВ. Цей звіт часто міститиме запитання або запити на затвердження, які необхідно вирішити до початку виробництва, і часто включає пропозиції щодо покращення

технологічності будь-яких подальших запусків цієї конструкції. Ці перевірки допомагають відповідати високим стандартам якості під час кожного замовлення та постійно покращувати робочі відносини з клієнтами.

ПВ є невід'ємною частиною процесу виробництва друкованих плат. Розробники, які нехтують цим аспектом, з більшою ймовірністю зіткнуться з проблемами під час виробництва, що може призвести до затримки процесу і, зрештою, до додаткових витрат, якщо потрібні зміни.

### 1.1.2 Виготовлення друкованих плат

Після завершення початкової перевірки ПВ та КС, замовлення переходить до етапу виготовлення друкованої плати (ДП). Тут гола друкована плата формується через кілька етапів ламінування матеріалу, свердління та осадження/труїння міді, залежно від вимог до конструкції; трафарет для нанесення паяльної пасти також створюється цьому етапі. Потім на плату наноситься паяльна маска і покриття поверхні, що допомагають у складанні друкованої плати, і, нарешті, поверх всього наноситься шовкографія. Після того, як плати повністю сформовані, проводиться електричне тестування файлу списку кіл клієнта, щоб перевірити 100% відповідність проектним вимогам. Нарешті маршрутизація або V-оцінка визначає профіль кожної окремої друкованої плати у виготовленій панелі, забезпечуючи простоту поділу після завершення складання друкованої плати [6].

Першим кроком є відтворення шаблону системи виробника на захисній масці на шарах друкованої плати з мідної фольги. Подальше травлення видаляє небажану мідь. У шовкотрафаретному друку використовуються стійкі до травлення чорнила для створення захисної маски.

Фотогравірування використовує фотомаску та проявник для вибіркового видалення чутливого до УФ-випромінювання фоторезистивного покриття та, таким чином, створення фоторезистивної маски.

Методи прямої візуалізації іноді використовуються для вимог високої роздільної здатності. Замість фотошаблону можна використовувати лазер. Це

відомо як безмаскова літографія чи пряме зображення. При фрезеруванні друкованих плат використовується дво- чи триосьова система механічного фрезерування для відокремлення мідної фольги від підкладки. Фрезерний верстат для друкованих плат працює аналогічно плотеру, отримуючи команди від основного програмного забезпечення, які керують положенням фрезерної головки по осях  $x$ ,  $y$  (якщо застосовується)  $z$ .

Лазерна резистивна абляція розпилить чорну фарбу на ламінат, плакований міддю, помістить у лазерний плотер з ЧПУ. Лазерний растр сканує друковану плату та видаляє (випаровує) фарбу там, де резист не потрібен.

Лазерне травлення. Мідь можна видалити безпосередньо за допомогою лазера з ЧПУ. Як і описане вище фрезерування друкованих плат, це використовується в основному для прототипування. Вибраний метод залежить від кількості плат, які необхідно бути зроблено та необхідний дозвіл (рис. 1.2).

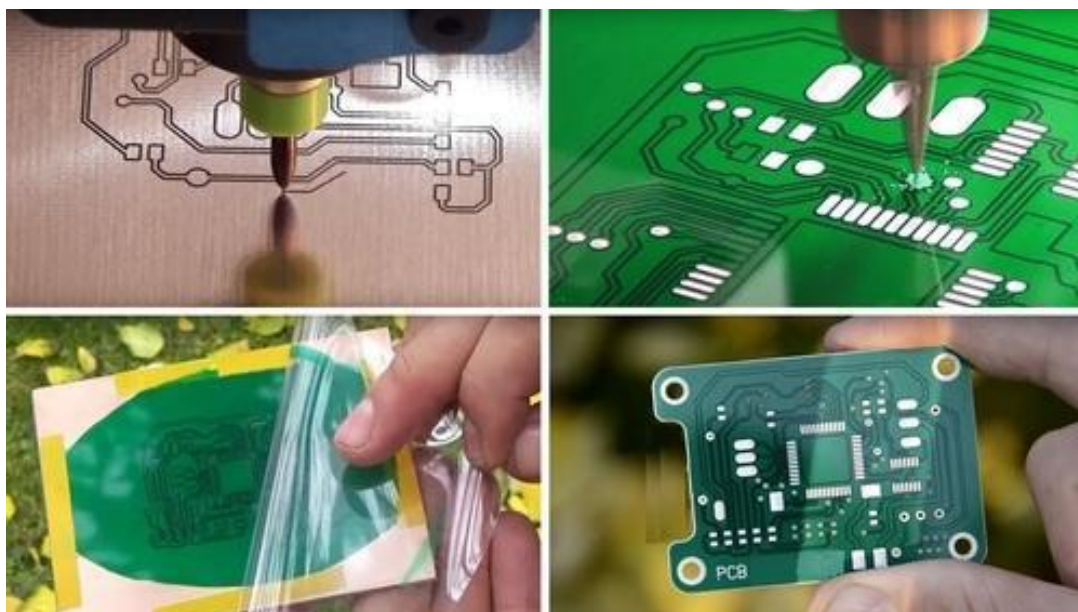


Рисунок 1.2 – Виготовлення ДП [7]

### 1.1.3 Вхідна перевірка матеріалів

Команда із закупівлі деталей працює одночасно з командою виготовлення ДП, щоб гарантувати, що всі монтажні матеріали отримані та готові до використання, як тільки голі друковані плати будуть готові до

збирання. Коли деталі надходять на виробничий об'єкт, команда контролю якості (ККЯ) проводить ретельну перевірку перед складуванням будь-якого конкретного матеріалу чи компонента. Перевірки включають пробні експлуатаційні випробування, а також перевірку коду дати і введення в систему управління матеріалами програмного забезпечення. Складна система управління програмним забезпеченням гарантує суворе дотримання правил першим прийшов – першим вийшов (FIFO) і те, що деталі, що використовуються під час збирання друкованих плат, завжди перебувають у хорошому робочому стані.

Все це гарантує, що всі деталі, що використовуються при складанні друкованих плат, мають найвищу якість, щоб наші клієнти могли бути впевнені у загальному терміні придатності своєї продукції [8].

Процес вхідного контролю на будь-якому виробничому підприємстві спрямований на контроль якості, зниження виробничих витрат, усунення шлюбу та простоїв через неякісну сировину. Прогнозування рівня приймання сировини може регулювати вибір постачальника сировини та покращувати виробничий процес, відфільтровуючи невідповідності (рис. 1.3).



Рисунок 1.3 – Вхідна перевірка матеріалів [9]

#### 1.1.4 Скринінг паяльної пасти поверхневого монтажу

Першим кроком у фактичному процесі збирання друкованої плати є нанесення паяльної пасти на голі друковані плати. Тут трафарет із нержавіючої сталі, створений під час виготовлення друкованої плати, накладається на голу плату, залишаючи відкритими лише контактні майданчики для збирання компонентів для поверхневого монтажу (ПМ). Трафарет утримується на місці за допомогою механічного пристосування, а аплікатор переміщається поверхнею плати, ретельно розподіляючи паяльну пасту по незакритих ділянках. Потім ККЯ проводить ретельну перевірку, щоб переконатися, що припій нанесений тільки на необхідні ділянки і всі контактні майданчики покриті достатньою кількістю пасти. Для двосторонніх плат з ПМ цей процес необхідно виконувати окремо для кожної сторони, як показано на наведеній вище блок-схемі [10].

Припоєм обраний SAC305, який є безсвинцевим сплавом, що містить 96,5% олова, 3% срібла і 0,5% міді, і відповідає директивам RoHS, REACH і JEIDA – використовується пастоподібна версія цього матеріалу для паяння оплавленням та тверді версії для ручного паяння та паяння хвилею припою.

Якість друку паяльної пасти на ДП сильно впливає на надійність та провідність поверхневого монтажу. Ключові елементи ПМ складаються з типів паяльної пасти, які мають бути встановлені на друкованій платі. Безсвинцевий припій краще свинцевого припою через те, що законодавство Європейського Союзу бойкотує використання свинцевого припою.

Це пов'язано з тим, що елементи свинцю можуть викликати серйозне отруєння, що дуже небезпечно споживачам. Однак ця реологія, ймовірно, пояснює більшість дефектів у збиранні для поверхневого монтажу, таких як шунтування на друкованій платі, що може спричинити коротке замикання після встановлення компонентів.

По-друге, тиск і кут нахилу скребка необхідні для досягнення найкращої рівності на товстоплівковому припої. Трафаретний друк необхідний за своєю

функцією для поділу паяльної пасти та друкованої плати для встановлення електропровідності.

Крім того, добавки Ag впливають на реакції при паянні між паяльною пастою SAC і мідними підкладками, коли рідкий припій скидається після тривалої дії. Чим вище вміст Ag, тим товщій шар металевого з'єднання. В іншому випадку вважається, що температура паяльної пасти впливає на друк ПМ. Дуже висока температура паяльної пасти призведе до осідання пасти та утворення валиків припою, в той час як дуже низька температура паяльної пасти може призвести до того, що паяльна паста стане надто густою для отримання гарної роздільної здатності друку. Можливе засмічення отворів трафарету, що призведе до відкритих швів. Як правило, при підвищенні температури міцність на зсув та модуль пружності зменшуються. За результатами експерименту хімічна реакція та коефіцієнт дифузії збільшуються з підвищенням температури. Поганий процес паяння призводить до дефектів на друкованій платі. Наявність дефектів на друкованій платі, таких як опуклість припою, ефект мосту, надгробна плита та погане змочування є поширеними збоями в технології поверхневого монтажу. Ті друковані плати з дефектами найчастіше вибраковуються і з більшою ймовірністю перетворюються на електронні відходи (електронні відходи). Електронні відходи складаються з безлічі компонентів, деякі з яких містять токсичні речовини, які при неправильному поводженні можуть мати несприятливий вплив на здоров'я людини та навколишнє середовище. Для контролю температури ПМ запроваджено систему охолодження. Тому необхідно характеризувати температуру паяльних паст.

#### 1.1.5 Розміщення верстатом

Механізація – це процес заміни та використання різних машин, а також різних технічних засобів, які покликані замінити людську чи тваринну працю. Пневматика – це система приводу, що використовує як рушійну силу тиск повітря. Перевага пневматичної системи в тому, що вона є екологічно

безпечною/чистою (за наявності течі в системі трубопроводів). Електропневматика в основному складається з двох пневматичної та електронної систем управління, управління за допомогою джерела живлення з повітря та джерела електроенергії з відносно невеликою напругою та потужністю. Друкована плата – це об'єкт, що має форму тонкої плати, яка використовується для складання ряду електронних компонентів. Її можна знайти майже у всьому електронному устаткуванні, такому як мобільні телефони, телевізори, автомобілі, мотоцикли і так далі. Є багато речей, на які повинен звернути увагу розробник, щоб спроектувати друковану плату, яка може функціонувати відповідно до заданих специфікацій.

Після того, як паяльна паста нанесена на оголені друковані плати, вони переміщуються на автоматизовані машини (верстати) Pick & Place для фактичного встановлення компонентів на відповідні контактні майданчики. Розміщення деталей на 100% автоматизовано для максимальної точності та ефективності, і для координат компонентів та даних обертання використовується файл Centroid проекту (рис. 1.4). Плати знову перевіряються після встановлення компонентів, щоб переконатися, що всі місця розташовані правильно, перш ніж розпочнеться процес паяння [11].

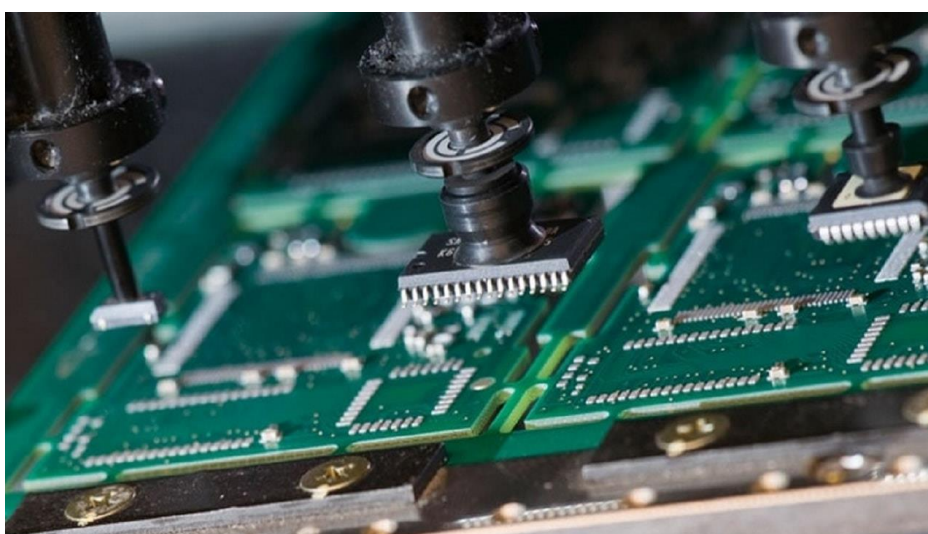


Рисунок 1.4 – Розміщення верстатом [12]

Цей етап може знадобитися виконати кілька разів, залежно від специфіки цього проекту. Для двосторонніх плат ПМ потрібен один етап розміщення зверху і один знизу, а в проектах, що вимагають паяння хвилею припою через велику кількість наскрізних отворів, компоненти зазвичай розміщуються машинним способом.

#### 1.1.6 Пайка оплавленням

Коли деталі надійно закріплені дома за допомогою паяльної пасти під контактними майданчиками, настав час для друкованих плат перейти до етапу паяння оплавленням. На сьогоднішній день це найбільш поширений метод складання друкованих плат у галузі, оскільки він набагато гнучкіший з точки зору вимог до компонування друкованих плат порівняно з пайкою хвилею або ручною пайкою. Більшість може використовувати пайку оплавленням для більшості компонентів на платі, а потім передати в основному зібрані плати нашій висококваліфікованій команді з ручної пайки для останніх декількох роз'ємів.

Для двосторонніх ПМ-проектів плати мають бути оплавлені за один раз для кожної сторони. Під компоненти, які були припаяні в першому прогоні, наноситься спеціальний клей, щоб запобігти їх від'єднанню та падінню з плати при повторному нагріванні їх припою [13].

Основна проблема паяння оплавленням полягає в тому, що компоненти повинні витримувати високі рівні тепла протягом більш тривалого періоду часу, ніж це потрібно для паяння хвилею або ручного паяння. Переважна більшість сучасних компонентів ПМ спроектована з урахуванням цих теплових профілів, але з цієї причини багато компонентів з наскрізними отворами не підходять для паяння оплавленням. Стандартний цикл оплавлення описаний у табл. 1.1.

Таблиця 1.1 – Стандартний цикл оплавлення

| Процес                           | Температура          | Час                                    |
|----------------------------------|----------------------|--|
| Попереднє нагрівання             | до 150 °C            | за 60 секунд                           |
| Замочування                      | від 150 °C до 165 °C | за 120 секунд                          |
| Пікова температура<br>оплавлення | 245 °C               | утримується протягом<br>20 секунд      |
| Охолодження                      | -4 °C                | за секунду до кімнатної<br>температури |

### 1.1.7 Рентгенівський контроль

ДП відіграють вирішальну роль у повсякденних електронних системах, тому якість та гарантія функціональності цих систем становить великий інтерес для уряду та промисловості. Виробництво друкованих плат було значною мірою передано на аутсорсинг для зниження виробничих витрат у порівнянні з проектуванням та тестуванням друкованих плат, які, як і раніше, широко представлені всередині країни. Цей офшоринг виробництва створив сплеск уразливості ланцюжка поставок для потенційних зловмисників, які можуть отримати доступ та атакувати пристрій за допомогою шкідливої модифікації. Поточні методи забезпечення та перевірки обладнання ґрунтуються на електричних та оптичних випробуваннях. Ці тести обмежені виявленням шкідливих модифікацій обладнання, також відомих як апаратні трояни. Для виробництва друкованих плат дедалі частіше використовується автоматизований рентгенівський контроль. Ці перевірки можуть підтвердити функціональність друкованої плати під час виробництва. Такі перевірки зменшують помилки процесу в режимі реального часу, але не можуть виконувати характеристизацію з високою роздільною здатністю на багатошарових повністю зібраних друкованих платах.

Після циклу оплавлення будь-які плати, включаючи BGA, QFN або інші типи корпусів без виводів, відправляються на рентгенівський контроль.

Рентгенівські промені проникають через кремній корпусу і відбиваються від металевих з'єднань під ним, формуючи зображення самих паяних з'єднань, яке можна аналізувати за допомогою передового програмного забезпечення для обробки зображень, аналогічного автоматизованому оптичному контролю (АОК). Елементи з більш високою щільністю в захопленій області створюють темніше результуюче зображення, що дозволяє проводити кількісний аналіз визначення якості паяних з'єднань і порівняння з галузевими стандартами (рис. 1.5).

Рентгенівський контроль не тільки виявляє проблеми у складанні друкованої плати, але й аналіз рентгенівського зображення може допомогти визначити основну причину даного дефекту, наприклад, недостатня кількість паяльної пасти, перекошене розміщення деталей або неправильний профіль оплавлення [14].

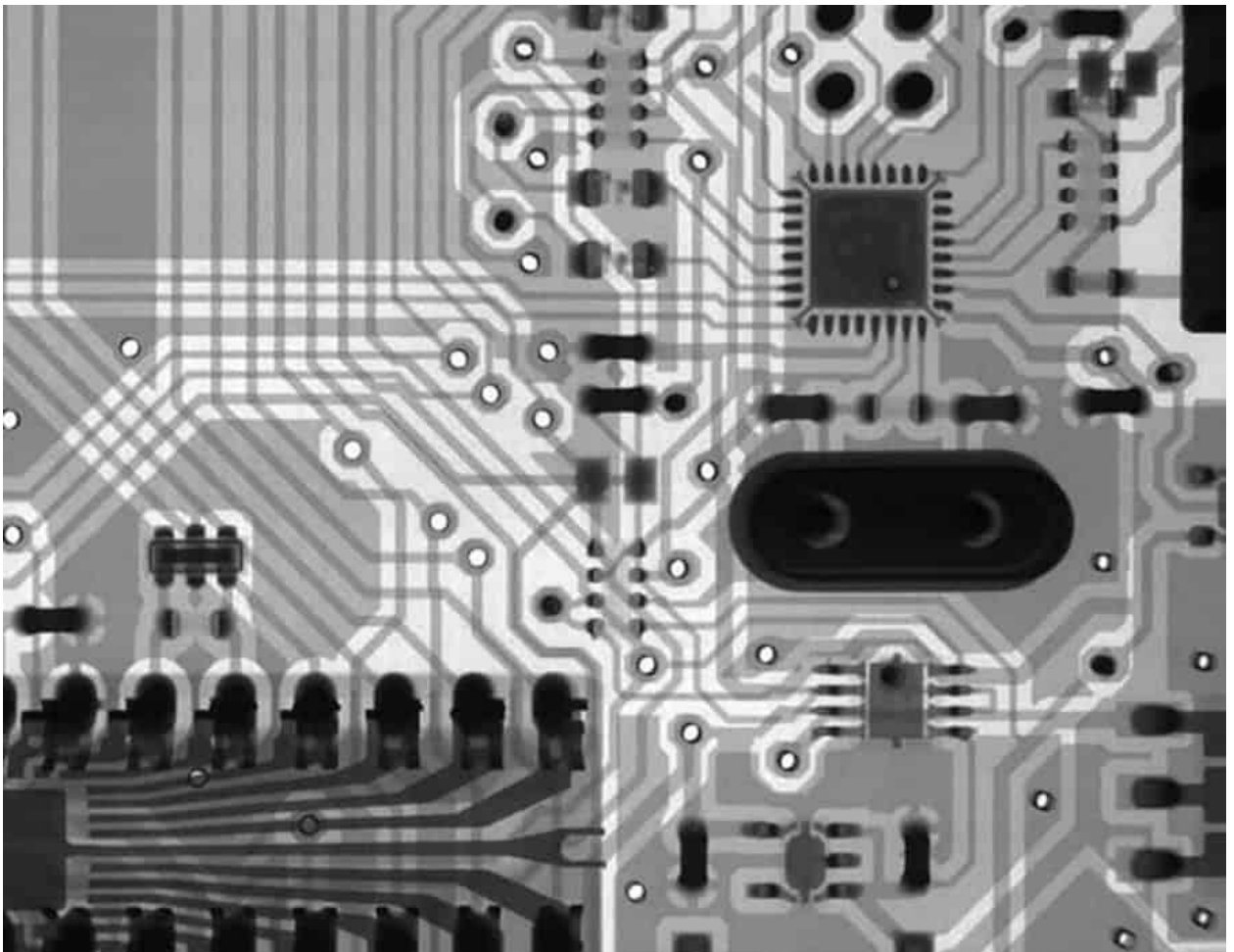


Рисунок 1.5 – Рентгенівський контроль [15]

### 1.1.8 Хвильова пайка

Пайка хвилею припою – це метод складання друкованих плат, при якому плати прямують на конвеєр через хвилю розплавленого припою. Припій з'єднує разом відкриті контактні майданчики і висновки компонентів, водночас відводючи вологу від корпусів компонентів і маскованої припоєм основної частини плати.

В останні роки пайка хвилею припою дещо втратила популярність у галузі збирання друкованих плат, принаймні порівняно з її колишнім поширенням. Зростаюча популярність деталей для поверхневого монтажу і компонування друкованих плат High-Density Interconnect (HDI) робить пайку оплавленням кращим методом для більшості проектів, а ручну пайку можна використовувати для догляду за кількома компонентами, що не підходять для оплавлення. При цьому паяння хвилею припою, безумовно, все ще має місце. Для застарілих плат, що вимагають великої кількості наскрізних отворів, а також для плат, що включають великі роз'єми з дуже великою кількістю контактів, пайка хвилею припою часто залишається найефективнішим методом збирання друкованих плат.

Пайка хвилею припою вимагає більш суворого контролю при проектуванні, ніж пайка оплавленням. Команда інженерів-технологів Bittelle проводить ретельний аналіз конструкції друкованої плати перед будь-якою роботою з паяння хвилею припою та заздалегідь повідомляє клієнта про будь-які можливі складнощі, але це вимагає додаткових часу та витрат у порівнянні з проектом паяння оплавленням [16].

### 1.1.9 Ручне паяння

Ручне паяння зазвичай використовується, коли конструкція друкованої плати включає деякі деталі, які не підходять ні для паяння оплавленням, ні для паяння хвилею. Наприклад, більшість друкованих плат для поверхневого монтажу можуть включати кілька компонентів з наскрізними отворами, і пайка хвилею припою цих декількох частин може зайво збільшити вартість

виробництва. Треба виконувати будь-які вимоги та забезпечують стабільну та надійну якість виготовлення відповідно до стандартів IPC-A-610 Class 3.

Хоча фахівці з ручної пайки наймовірно добре справляються зі своїми завданнями, вони, як і раніше, схильні до певних людських обмежень, які не поширюються на автоматизовані методи збирання. Найбільш поширені обмеження ручного складання перераховані нижче:

- багаторядні конектори (більше 2-х рядів)– не можна спаювати вручну, тому що жало паяльника не пройде між рядами; ці пристрої зазвичай паяються хвилею припою;

- корпуси BGA, QFN та інші безсвинцеві корпуси не можна паяти вручну.

- необхідно ретельно дотримуватись вимог щодо відстані між деталями та відстані між деталями, а навколо будь-яких деталей, що збираються вручну, рекомендується додатковий запас від 5 до 10 мм;

- необхідно суворо дотримуватись вимог до розміру контактного майданчика та отвору, і настійно рекомендується додатковий запас у 10% для відношення контактного майданчика до висновків для поверхневого монтажу деталей, що збираються вручну [17].

#### 1.1.10 Фінальна інспекція

Як зазначалося вище, інспекції (перевірки) проводяться після кожного окремого етапу процесу збирання друкованої плати, щоб краще локалізувати джерело будь-якої помилки. Компанії вважають ці проміжні перевірки необхідними, але недостатніми для повної гарантії найвищої якості виготовлення, що є нашою місією, тому ми завжди проводимо ретельну остаточну перевірку повністю готових плат в кінці процесу.

Ці остаточні перевірки завжди включають візуальний контроль, здійснюваний висококваліфікованою командою із забезпечення якості, і автоматичний оптичний контроль (АОК) для складних або великомасштабних проектів. Також є додаткові послуги, такі як функціональне тестування

ланцюга (ФТЛ) та внутрішньосхемне тестування (ВСТ) на запит клієнта. Більш складні методи тестування ФТЛ та ВСТ вимагатимуть деякого додаткового часу та трудовитрат у залежності від конкретних вимог для даного проекту, але можуть зменшити потребу у складному тестуванні продукту на стороні клієнта [18].

Системи виявлення об'єктів, розроблені на сьогоднішній день, належать до однієї з трьох основних категорій:

- перша категорія складається з систем, заснованих на моделі, тобто модель визначається для об'єкта, що цікавить, і система намагається зіставити цю модель з різними частинами зображення, щоб знайти відповідність;

- другий тип – це методи інваріантності зображення, які ґрунтують зіставлення на наборі взаємозв'язків шаблонів зображення (наприклад, рівнів яскравості), які в ідеалі однозначно визначають об'єкти, що шукаються;

- остаточний набір систем виявлення об'єктів характеризується алгоритмами навчання, що ґрунтуються на прикладах. Ці системи вивчають суттєві риси класу з набору помічених позитивних та негативних прикладів. У різних галузях комп'ютерного зору, включаючи розпізнавання об'єктів, успішно використовувалися методи, засновані на прикладах.

Розумна фабрика заснована на ідеї розумного виробництва або Industry 4.0, яка обіцяє охопити 4-ту промислову революцію. Четверта промислова революція характеризується самосвідомістю та автономією, коли фабрика повинна збирати дані про свої елементи (прийняття рішень (автономія) інтелектуального керування. Існуючі системи оптичного контролю економічні при використанні для контролю модрини, а також вимагають машиночитаних технічних деталей друкованої плати. Дрібні та середні підприємства часто вимагають автоматичного огляду друкованих плат невеликими партіями, а також пов'язаних з ремонтом робіт, які можуть не мати технічного визначення друкованої плати. Пропонована система інтелектуальна, оскільки вона може перевіряти друковані плати виключно на

основі обробки зображення будь-якої іншої інформації і може працювати в будь-якому масштабі.

Модулі перевірки друкованих плат використовуються в процесі збирання друкованих плат для перевірки правильності збирання. Їх також можна використовувати для визначення компонентів схеми для невідомої друкованої плати. Економічно ефективна система автоматичного візуального контролю (САВК) для великомасштабного виробництва та складання на малих та середніх підприємствах. Заміна ручного контролю, який є дорогим та не гарантує високу якість. Неадекватність візуального огляду людиною за низького допуску. Пропонований алгоритм огляду друкованих плат працює на основі методу виявлення об'єктів і може бути легко налаштований для роботи з будь-якою друкованою платою або схемою. Було опубліковано багато робіт з алгоритмів обробки зображень/етапу комп'ютерного зору. САВК, але щодо ми бачимо менше роботи на етапі отримання зображення. Оскільки рішення призначене для малого та середнього бізнесу, рішення з дорогими камерами машинного зору недоступні. Отже, наша увага включає оцінку точності запропонованого алгоритму за різних умов освітлення та різних камер (рис.1.6) [19].



Рисунок 1.6 – Візуальна інспекція ДП [20]

## 1.2 Технології складання та пакування BGA-компонентів

### 1.2.1 Поняття BGA-компонентів

Масив із кульовою сіткою, BGA, використовує підхід до з'єднань, відмінний від того, який використовується для більш традиційних з'єднань для поверхневого монтажу. В інших упаковках, таких як чотирирівне плоске упакування, для з'єднань використовувалися сторони упаковки. Це означало, що був обмежений простір для контактів, які повинні були бути дуже близькими один до одного і зроблені набагато менше, щоб забезпечити необхідний рівень підключення. Ball Grid Array, BGA, використовує нижню сторону корпусу, де є значна площа для з'єднань [21-22].

Кульки розташовані у вигляді сітки (звідси і назва Ball Grid Array) на нижній поверхні утримувача мікросхеми. Крім того, замість контактів для забезпечення з'єднання як метод з'єднання використовуються контактні майданчики з кульками припою. На друкованій платі РСВ, на яку має бути встановлений пристрій BGA, є відповідний набір мідних контактних майданчиків для забезпечення необхідного підключення (рис. 1.7).

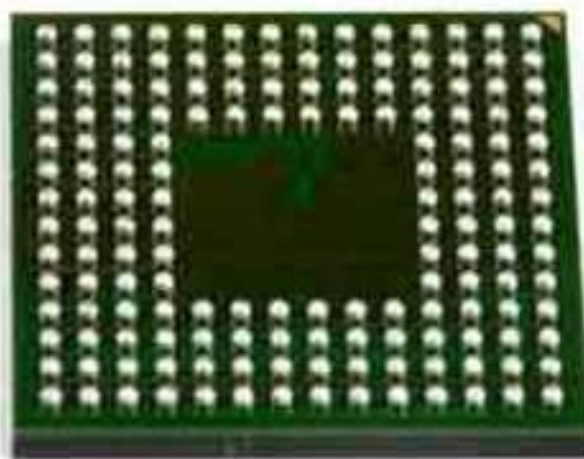


Рисунок 1.7 – Загальний вигляд BGA

Крім покращення можливості підключення, BGA мають інші переваги. Вони забезпечують нижчий тепловий опір між кремнієвим чіпом, ніж

чотириядерні плоскі пристрої. Це дозволяє швидше та ефективніше відводити тепло, що виділяється інтегральною схемою всередині корпусу, із пристрою на друковану плату. Таким чином, пристрої BGA можуть генерувати більше тепла без необхідності спеціальних заходів для охолодження.

### 1.2.2 Пакування BGA-компонентів

Корпус BGA має безліч опуклостей кулястої форми на верхній поверхні або дні трубки. Завдяки цим опуклостям можливе з'єднання між основою та корпусом упаковки.

Дуже велика відстань між кінцями введення/виводу, з яких BGA може містити кінці введення/виводу з великим номером [23].

Надійність більш високої упаковки, дефекти нижнього паяння, а також міцніші з'єднання під паяння.

Ви також знайдете велику відстань у BGA-чіпах між місцями паяння. Це спрощує пайку та юстування завдяки системі посилення юстування.

Копланарність паяння BGA гарантована, оскільки припій автоматично компенсує помилку площинності між друкованою платою та чіпом після плавлення.

Пропонують відмінні електричні та частотні характеристики. Це пов'язано з його низькою взаємною індуктивністю та власною індуктивністю, а також меншими розмірами спайок.

Він може автоматично обробляти натяг та самовирівнювання між паяними сполуками. Це призводить до великого ефекту самоцентрування, що зумовлює високу надійність.

Основний недолік пов'язаний з їх доопрацюванням і перевіркою, які зазвичай важко здійснити.

З постійним розвитком та прогресом електронних технологій електронні продукти починають розвиватися у напрямку легкої ваги, тонкощі, мініатюризації та розширених функцій. Після кількох поколінь оновлень технології упаковки мікросхем призвели до того, що співвідношення між

площею мікросхеми та площею корпусу стало приблизно рівним 1, серед яких BGA (масив кулькових ґрат) став технологією упаковки з високою щільністю, яка перейшла в прагматичну фазу. Як гарантувати надійність якості паяння BGA, як перевірити якість BGA і як виконати доопрацювання BGA з дефектами, настільки важливі для складання ПМ BGA-компонентів, що всі виробники повинні бути повністю обізнані про свої дозволи.

Корпус BGA містить безліч кулькоподібних опуклостей на дні трубки або верхньої поверхні. Завдяки опуклостям досягається взаємозв'язок між корпусом упаковки та основою. Як передова технологія упаковки, BGA відрізняється великим простором для висновків і короткими висновками за рахунок розподільних кінців введення-виведення, які працюють як кулі або стовпці в нижній частині корпусу корпусу.

На основі різних пакувальних матеріалів компоненти BGA можна розділити на PBGA (пластикові BGA), CBGA (керамічні BGA), CCBGA (керамічні колони BGA), TBGA (стрічкові BGA) та CSP (чипові корпуси).

У порівнянні з компонентами QFP (квадратний плоский корпус) компоненти BGA мають такі властивості [23]:

- відстань між кінцями введення/виводу настільки велика, що BGA може підтримувати більшу кількість кінців введення/виводу;
- більш висока надійність упаковки, менше дефектів паяння та міцніші паяні з'єднання;
- мікросхеми BGA мають велику відстань між місцями паяння, тому юстирування та пайка не викликають труднощів завдяки системі посилення юстування;
- копланарність паяння BGA гарантується, оскільки припій автоматично компенсує помилку площинності між чіпом та друкованою платою після розплавлення;
- відмінні електричні характеристики та частотні характеристики завдяки меншим розмірам паяння та низької власної та взаємної індуктивності;

– здатність до автоматичного самовирівнювання та натягу між паяними сполуками призводить до чудового ефекту самоцентрування, забезпечуючи високу надійність;

– їх головний недолік полягає в тому, що їх перевірка та доопрацювання щодо важкоздійсненні.

Діаграма Фішборна, що показує елементи процесу виробництва друкованої плати, що містить компоненти BGA, показано на рис. 1.8.

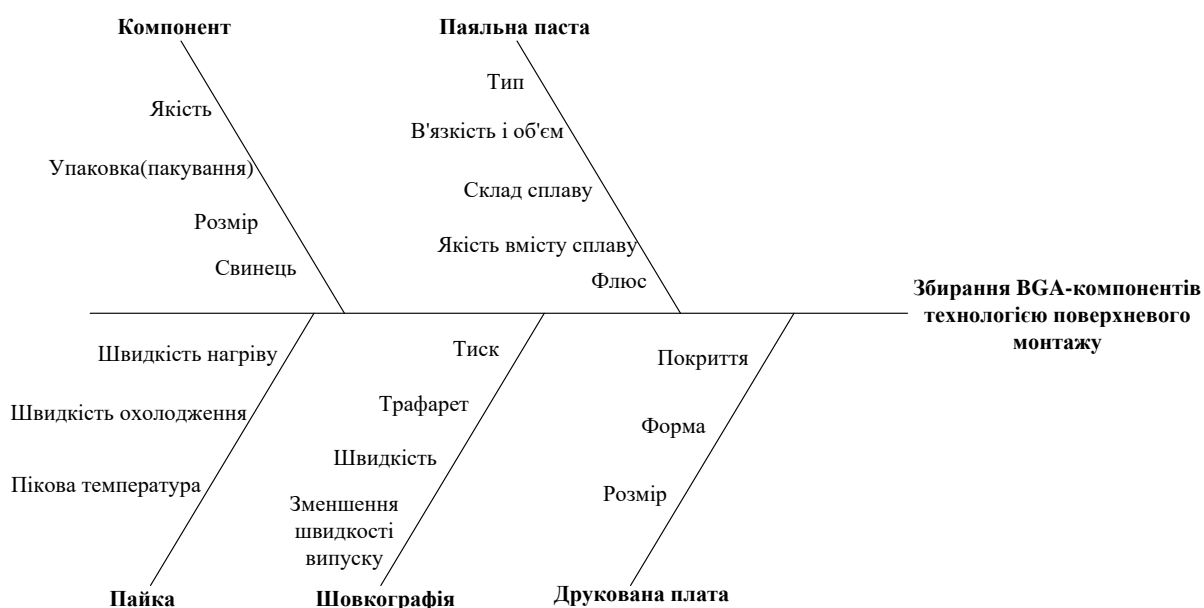


Рисунок 1.8 – Діаграма Фішборна, що показує елементи процесу виробництва друкованої плати, що містить компоненти BGA

Відповідно до неї, ПМ BGA-компонентів тісно пов'язаний з паяльною пастою, компонентами, друкованими платами, шовкографією і пайкою, серед яких елементи паяння є найбільш складними для обробки в процесі паяння оплавленням.

Ключовим елементом, що впливає на паяння оплавленням, є налаштування температурної кривої. Конкретний метод полягає в тому, щоб відкрити отвір у місці деякого майданчика в центрі BGA, який знаходиться на задній стороні друкованої плати, а потім провести зонд терморпарі через отвір у нижній частині друкованої плати, приклеївши його до задньої сторони

майданчика та зафіксувавши. із високотемпературною стрічкою. Потім тестер температурної кривої паяння оплавлення з добре налаштованими параметрами поміщається в піч для паяння оплавлення разом з піддоном і зондом. Після порівняння та аналізу буде отримано оптимальну температурну криву.

Крива температури оплавлення складається з чотирьох фаз: фаза попереднього нагріву, фаза збереження тепла, фаза оплавлення та фаза охолодження. Процес нагрівання та температурна крива повинні призвести до того, що корпус досягне температури оплавлення, а потім повернеться до температури контактного майданчика після того, як кульки припою розплавляться з інтерметалічним з'єднанням, що утворюється з контактним майданчиком. Нерівномірне нагрівання призведе до нерівномірного падіння або нахилу корпусів у бік однієї сторони або кута паяння оплавленням, що призведе до некопланарності та неадекватної пайки.

### 1.2.3 Метод перевірки BGA

Після паяння компоненти BGA можуть мати різні дефекти через компоненти, складальне обладнання, навколишнє середовище та технології паяння. До основних дефектів BGA відносяться неспіввісність, нещільне паяння, обрив ланцюга, холодне паяння, перемички, короткі замикання та порожнини. Крім того, кульки припою BGA можуть мати деякі проблеми, такі як відсутність або падіння, а також нерівні розміри. Коли справа доходить до перевірки BGA, виразно важко судити про якість паяння після паяння, тому що кульки припою знаходяться нижче чіпів. Традиційний візуальний огляд не дозволяє визначити наявність дефектів або порожнин усередині паяних з'єднань. Для чіткої оцінки якості паяних з'єднань необхідно використати професійне контрольне обладнання.

Після того, як компоненти BGA використовуються у ТПМ складанні, методи контролю, на які зазвичай покладаються, включають електричні випробування, сканування кордонів та рентгенівський контроль. Традиційний електричний тест здатний сканувати дефекти обриву ланцюга та короткого

замикання. Технологія граничного сканування, залежно від оглядових портів, розроблених на основі граничного сканування, забезпечує доступ до кожного паяного з'єднання на граничних з'єднувачах, щоб перевірити наявність обривів і коротких замикань на компонентах. Хоча граничне сканування здатне контролювати ширший спектр невидимих паяних з'єднань, ніж електричне випробування, обидва методи перевіряють лише електричні характеристики, не досягаючи контролю якості паяння. Щоб гарантувати та покращити якість виробничого процесу, необхідно покладатися на інші методи контролю якості паяння, особливо на невидимі паяні сполуки. АРК (автоматичний рентгенівський контроль) може ефективно вирішити цю проблему, а також може здійснюватись моніторинг у реальному часі, щоб забезпечити якість та зворотний зв'язок у реальному часі для управління процесом [24].

Оптимальні паяні сполуки BGA повинні бути гладкими, чіткими по кордонах і без порожнеч, а діаметр, об'єм, відтінки сірого та контрастність повинні залишатися однаковими серед усіх паяних сполук з повним вирівнюванням та відсутністю утворення кульок припою. У порівнянні зі стандартами для оптимальних паяних з'єднань BGA, до кваліфікованих паяних з'єднань BGA висуваються нижчі вимоги.

– неспіввісність – пристрій рентгенівського контролю здатний чітко вказати, чи сумісні кульки припою BGA з позиціями контактних майданчиків на друкованій платі. Допускається усунення менше 25%;

– ослаблені паяні сполуки. При паянні BGA не допускаються вільні паяні з'єднання;

– відкриті ланцюги та з'єднання холодного паяння. Коли припій не контактує з відповідним контактним майданчиком або припій погано тече, можуть мати місце обриви ланцюга та з'єднання холодного паяння. Відкриті ланцюги та холодне паяння не допускаються при паянні BGA;

– мости та короткі замикання. Якщо припою занадто багато або він розміщений невідповідним чином, можливе виникнення перемичок та

коротких замикань. Що стосується паяння BGA, то перемички та короткі замикання не допускаються;

– порожнина – питання з порожниною тріхи складне. Рентгенівський інспекційний пристрій здатний виявляти порожнини на збиранні компонентів BGA.

Наступні поради доступні як стандарти судження:

а) причини утворення порожнин:

– перед паянням на кульках для паяння BGA є порожнини, які, можливо, утворюються при виробництві кульок припою або у складі паяльної пасти;

– якщо наскрізні отвори призначені для розміщення під контактним майданчиком, зовнішнє повітря потраплятиме в кульки припою, що плавляться, через отвори з порожнинами, що утворилися після охолодження;

– подушечка має погане покриття або забруднення поверхні подушечки;

– температурна крива паяння оплавленням налаштована неправильно.

б) оптимальний стандарт для порожнин – повітря в порожнинах, можливо, викличе стресовий ефект усадки та розширення. Місце утворення порожнин буде осередком напруг, що, можливо, і є істотною причиною виникнення тріщин напруги. Паяні з'єднання BGA з порожнинами можуть призвести до технічних проблем, таких як вихід із ладу. Відповідно до стандарту, що регламентується стандартами на паяні з'єднання BGA, порожнини на майданчику не повинні бути на 10% більше площі кульки припою, тобто діаметр порожнин не повинен перевищувати 30% діаметра кульки припою.

Хороша пайка – це тільки півсправи. Ніколи не можна гарантувати ідеальне паяне з'єднання, якщо не буде проведено перевірки. Упаковка BGA приховує свої компоненти під корпусом, тому візуальний огляд навряд чи спрацює. Крім того, оптимальна перевірка може зробити паяні з'єднання відкритими тільки з обох боків, що не дасть повного і точного результату

перевірки. У зв'язку з цим паяні сполуки BGA необхідно перевіряти за допомогою рентгенівських пристроїв контролю. Для пристроїв рентгенівського контролю доступні два методи: контроль у світлі, що проходить, і контроль поперечного перерізу, обидва з яких здатні перевіряти перемички між паяними сполуками і неспіввісність. Фактично, обидва методи контролю працюють по-різному з погляду можливостей контролю форми та розміру паяної сполуки BGA.

Рентгенівські промені пропускають усі матеріали з високою щільністю у вертикальному напрямку. Коли доходить до CBGA, кульки припою перешкоджають утворенню евтектичного припою лише на рівні паяльної станції, а евтектичний припій лише на рівні компонентів, зазвичай, покривається кульками припою. Що стосується корпусу PBGA, то зображення припою на паяльній станції, як правило, зупиняється на місці паяння. Внаслідок цього рентгенівський контроль не може правильно визначити дефект недостатньої кількості припою.

Рентгенівський контроль поперечного перерізу дозволяє виявити дефекти паяних сполук та точно визначити форму паяних сполук BGA та критичний розмір поперечного перерізу. Контроль товщини круглого кільця на рівні паяльної станції відображає процедуру оплавлення припою або зміну положення припою на паяльній станції. Перевірка радіусу на рівні паяльної станції вказує на зміни обсягу припою на паяльній станції, що викликано технологією друку паяльної пасти або надто великою кількістю припою оплавленням. Перевірка радіусу кульок припою демонструє компланарність від паяння до паяння або плати до плати.

Мініатюризація та висока продуктивність є важливими тенденціями розвитку електронних продуктів, що призводить до постійного збільшення щільності складання схемних модулів. В результаті мікрокомпоненти з високою щільністю стають різноманітними, а методи їхнього складання також розвиваються. Як і типи компонентів складання з високою щільністю, слід застосовувати різні температури паяння, сумісні з різними вимогами до

упаковки. Якщо під час паяння оплавленням BGA ретельно враховуються основні елементи, надійність компонентів BGA та складання поверхневого монтажу може бути повністю гарантована.

### 1.3 Постановка завдання та висновки до розділу 1

Деякі методи вже були запропоновані для перевірки чипів BGA. Основні методи можуть бути охарактеризовані випромінюваннями, такими як лінійно-структурований лазерний датчик, рентгенівська ламінографія, акустична мікроскопія тощо.

Коли лазер з лінійною структурою проектується на чіп BGA, контур об'єкта, що освітлюється лазерною лінією, відображається на датчику.

По-перше, одна із проблем цього методу полягає в тому, що він має досить точно контролювати переміщення мікросхеми BGA.

По-друге, низька швидкість. Скануюча акустична мікроскопія використовує акустичний імпеданс для отримання зображень внутрішньої структури виробу з високою роздільною здатністю на основі акустичної проникності матеріалів. Однак акустична мікроскопія підходить не для всіх корпусів BGA через наявність повітряних зазорів у чіпі та деяких матеріалах, які можуть сильно послаблювати акустичну хвилю.

Рентгенівська радіографія – ще один неруйнівний метод, який використовується для виявлення дефектів корпусу BGA. Рентгенівська радіографія є потужнішим методом виявлення набагато дрібніших деталей і дефектів упаковки проти двома іншими.

Але це коштує дорожче і потребує досвідчених робітників для експлуатації та обслуговування систем. Оскільки акустичні хвилі та рентгенівські промені є проникаючими випромінюваннями, їх можна використовувати для перевірки сполук BGA під підкладками.

Фактично більшість дефектів корпусних мікросхем BGA також можна виявити за допомогою оптичних підходів.

Метою цього дослідження є розробка автоматичної системи оптичного контролю технологічного процесу складання BGA-компонентів. У цій роботі пропонується оптичний метод вимірювання компланарності виводів BGA та пропонується процес перевірки на основі двох зображень, одне з яких є еталонним, інше – з дефектами.

Об'єкт дослідження – процес автоматизованого контролю складання BGA-компонентів.

Предмет дослідження – візуальний метод контролю складання BGA-компонентів.

Методи дослідження – математичної статистики для обробки результатів досліджень, метод структурної подібності для аналізу дефектів BGA-компонентів, метод комп'ютерного зору для створення програмного засобу.

Для вирішення поставленої мети потрібно вирішити наступні завдання:

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

В майбутньому можна вдосконалити цю систему, використовуючи мікроскоп для отримання зображення у реальному часі та порівняння його з зображенням з бази даних, а також додати використання штучних нейронних мереж для розпізнавання. Для розробки такої системи можна використовувати схему, представлену на рис. 1.9.

Ця система має деякі переваги. Вона набагато дешевша за інші методи. Її швидкість вища, тому що можна перевіряти кілька BGA-компонентів одночасно. Крім того, не потрібно переміщати BGA-компоненти і не потрібні складні пристрої для генерації випромінювання, наприклад такі як рентген, акустичні хвилі. Таким чином, структура системи простіше, ніж інші.

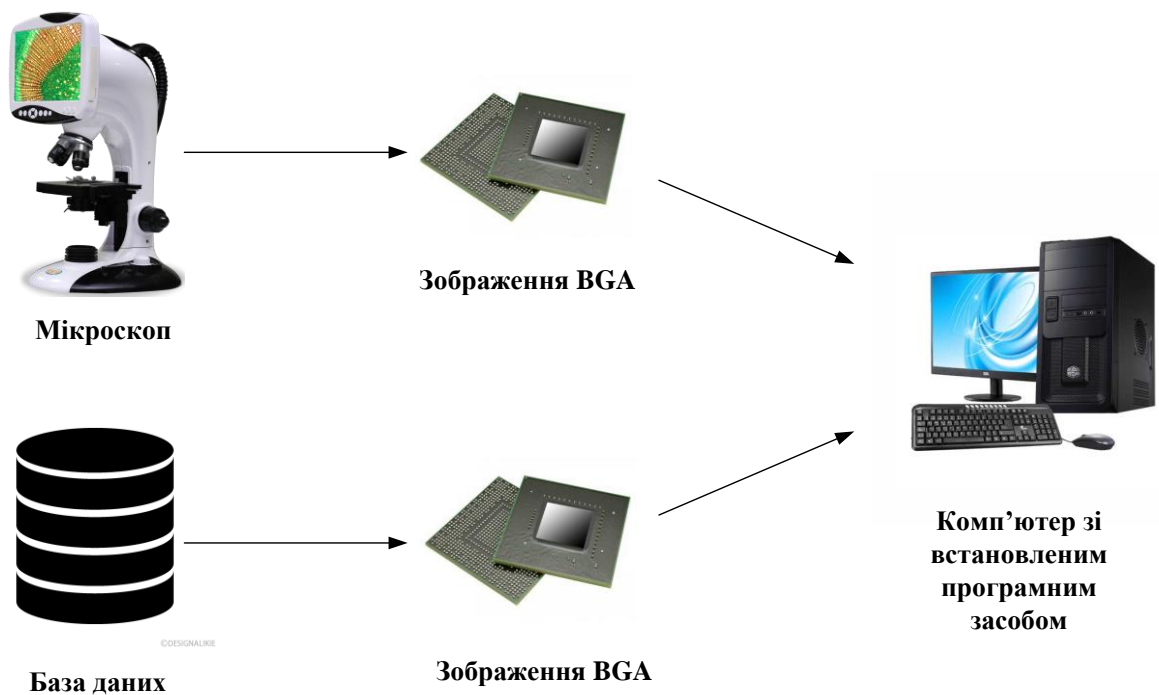


Рисунок 1.9 – Схема системи для візуального контролю BGA-компонентів

## 2 ДОСЛІДЖЕННЯ ТА РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ ПРОЦЕСУ СКЛАДАННЯ BGA-КОМПОНЕНТІВ

### 2.1 Конструкція посадкового місця BGA-кульки

У деяких додатках BGA-корпуси використовуються як спосіб заповнення обох сторін підкладки модуля.

Для BGA-компонента висота зменшується через руйнування кульок та нову форму, яку вони набувають у процесі поверхневого монтажу. Ця руйнація кульки відбувається, незважаючи на нанесення паяльної пасти в процесі поверхневого монтажу.

Конструкція посадкового місця BGA-компоненту, що буде використана у цьому дослідженні, показана на рис. 2.1. Діаметр необробленої кульки відповідав отвору паяльної маски. Кульки прикріплюються за допомогою автоматизованої системи флюс-розміщення-оплавлення-очищення. Отримана висота припою показана рис. 2.2.

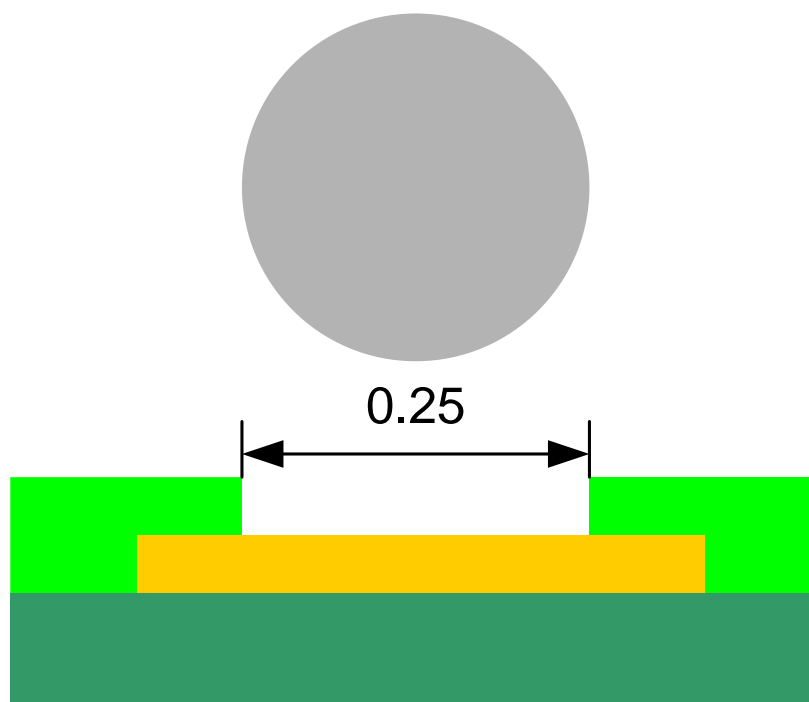


Рисунок 2.1 – Конструкція посадкового місця BGA-кульки

Діаметр паяльної маски становить 0,25 мм, визначена площадка та діаметр необробленої кульки 0,25 мм.

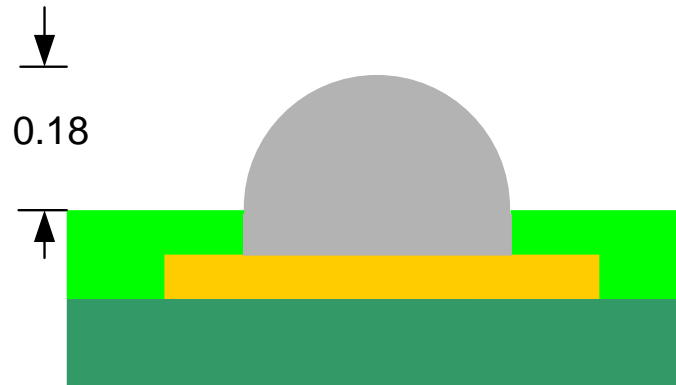


Рисунок 2.2 – Отримана висота припою

Висота пайки 0,180 мм після приєднання кульки.

Конструкція посадкового місця тестової плати для BGA-корпусу показана на рис. 2.3. Використовувалися металеві колодки, які відповідали діаметру отвору паяної маски роз'єму компонента.

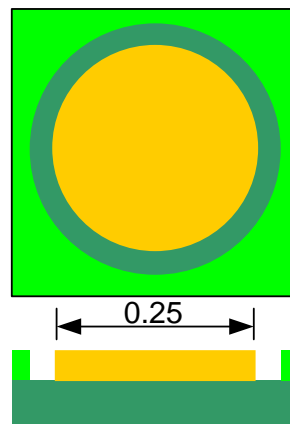


Рисунок 2.3 – Конструкція посадкового місця тестової материнської плати

Для поверхневого монтажу компонентів на материнські плати використовувався стандартний процес друк-розміщення-оформлення. Схему трафаретів наведено в табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – Конструкція трафарету BGA-кульки

| Назва параметру   | Величина параметру |
|-------------------|--------------------|
| Товщина трафарету | 0.060 мм           |
| Діаметр отвору    | 0.250 мм           |

Висота паяного з'єднання (або зазор) визначалася двома способами: поперечний переріз і вимірювання за допомогою z-мікроскопа у всіх чотирьох кутах та в центрі компонента. Для корпусу BGA було охарактеризовано 50 одиниць із 28 партій матеріалу на 13 різних компонентах. Середня висота паяної сполуки становила 0.145 мм, як показано на рис. 2.4.



Рисунок 2.4 – Монтажна висота BGA-кульки 0,145 мм.

Зменшення висоти BGA з поверхневим монтажем становило 0.035 мм, як показано на рис. 2.5. Стандартне відхилення всіх даних вимірювань становило 0.003 мм. Ґрунтуючись на цих результатах, рекомендується, щоб зазначена товщина BGA була на 0,060 мм більша. Цей збільшений допуск по товщині можна використовувати для покращення електричних характеристик за рахунок використання більш високих котушок індуктивності з більш високою добротністю та зменшення зв'язку між провідними з'єднаннями та компонентами за допомогою конформного екрана корпусу.

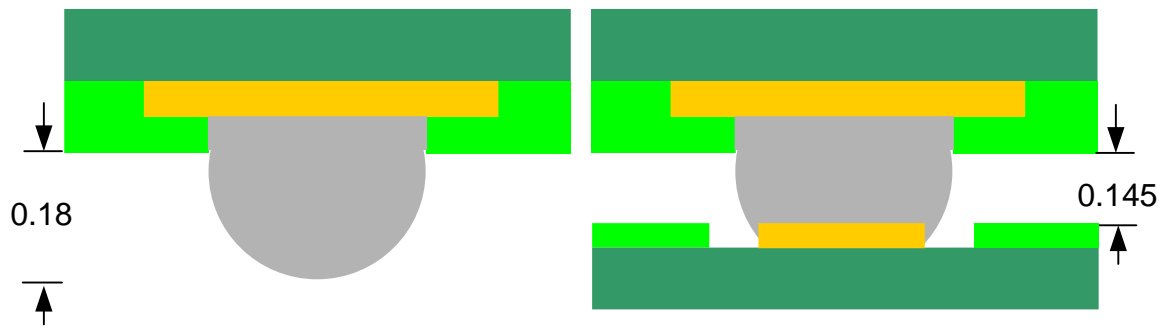


Рисунок 2.5 – Зменшення висоти BGA-кульки на 0,035 мм за допомогою поверхневого монтажу

## 2.2 Розрахунок висоти паяного з'єднання

Кульку припою та висоту паяного з'єднання можна досить точно оцінити за допомогою основних геометричних рівнянь. У більшості випадків вага компонента незначна, а поверхневого натягу припою достатньо, щоб надати з'єднанню зрізану сферичну форму. Отвори паяльної маски та металеві контактні майданчики можуть бути апроксимовані циліндричними формами.

Об'єм циліндра вказаний у наступному рівнянні:

$$V_{\text{цил}} = h\pi r^2 \quad (2.1)$$

де  $h$  – висота циліндру,  $r$  – його радіус.

Об'єм сфери вказаний у наступному рівнянні:

$$V_{\text{сфе}} = \frac{4\pi r^2}{3} \quad (2.2)$$

де  $r$  – його радіус.

Поперечний переріз усіченої сфери представлено на рис. 2.6. Це загальний випадок, коли радіус вгорі не обов'язково дорівнює радіусу внизу.

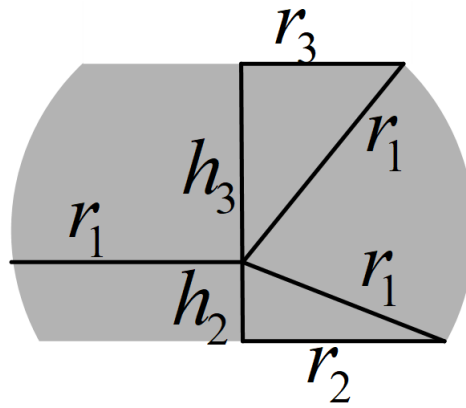


Рисунок 2.6 – Поперечний переріз усіченої сфери

Об'єм усіченої сфери наведено у формулі 2.3.

$$V_{усф} = \frac{h_2\pi(4h_2^2 + 6r_2^2)}{6} + \frac{h_3\pi(4h_3^2 + 6r_3^2)}{6} \quad (2.3)$$

де  $h_2, h_3, r_2, r_3$  представлені на рис. 2.6.

Залежно від конструкції посадкового місця, що використовується на компоненті та материнській платі, можна отримати ряд можливих форм сполук, що є комбінацією циліндрів і усічених сфер, як показано на рис. 2.7.



Рисунок 2.7 – Поперечний переріз різних форм паяного з'єднання BGA-кульки

Правило збереження об'єму наведено у формулі 2.4. Типові припущення такі: об'єм металу паяльної пасти становить 50% від об'єму апертури трафарету, у паяному з'єднанні є мінімальні порожнечі.

$$V_{\text{необр.кульки}} + V_{\text{паяльна паста металева}} = V_{\text{паяного з'єднання}} \quad (2.4)$$

Ліва сторона формули 2.4 представляє об'єм припою до поверхневого монтажу, а права сторона – об'єм після. Щоб розрахувати висоту паяного з'єднання після поверхневого монтажу, формула 2.2 замінюється на об'єм необробленої кульки припою, а формула 2.1 x 50% об'єму металу паяльної пасти. Для правої частини формули 2.4, можна почати з формули 2.3 для усіченої сфери, а потім додає або віднімає об'єм у верхній та нижній частині суглоба, використовуючи формулу 2.1 для обліку конструкції посадкового місця на компоненті та материнській платі.

Наприклад, якщо у нас є друга форма з'єднання на рис. 2.7 (посадкове місце корпусу, що визначається паяльною маскою, посадкове місце материнської плати, що визначається металом), то результуючі рівняння для розв'язання було б таким:

$$V_{\text{сф(необ.куль)}} + 0.5V_{\text{цил(товщ.траф)}} = V_{\text{усф}} + V_{\text{цил(упаков)}} - V_{\text{цил(мат.плати)}} \quad (2.5)$$

$$\frac{4\pi r_{\text{необ.куль}}^3}{3} + 0.5h_{\text{товщ.траф}} \cdot \pi r_{\text{товщ.траф}}^2 = \frac{h_2\pi(4h_2^2 + 6r_{\text{мат.плати}}^2)}{6} + \frac{h_3\pi(4h_3^2 + 6r_{\text{упаков}}^2)}{6} + h_{\text{упаков}}\pi r_{\text{упаков}}^2 - h_{\text{мат.плати}}\pi r_{\text{мат.плати}}^2 \quad (2.6)$$

де  $r_{\text{необ.куль}}$  – радіус необробленої кульки,  $h_{\text{товщ.траф}}$  – товщина трафарету,  $r_{\text{товщ.траф}}$  – радіус отвору трафарету,  $h_{\text{мат.плати}}$  та  $r_{\text{мат.плати}}$  – радіус та висота майданчика (посадкового місця) материнської плати відповідно,  $h_{\text{упаков}}$  та  $r_{\text{упаков}}$  – це товщина паяльної маски упаковки та радіус відкриття паяльної маски відповідно.

Всі змінні формули 2.6 відомі, крім  $h_2$  і  $h_3$ . Оскільки  $r_{\text{мат.плати}}$  та  $r_{\text{упаков}}$  відомі, ми можемо вивести рівняння, що зв'язує  $h_2$  і  $h_3$ , використовуючи геометрію, показану на рис. 2.6:

$$r_{\text{мат.плати}}^2 + h_2^2 = r_1^2 = r_{\text{упаков}}^2 + h_3^2 \quad (2.7)$$

$$h_2^2 = r_{\text{упаков}}^2 + h_3^2 - r_{\text{мат.плати}}^2 \quad (2.8)$$

Формула 2.8 може бути підставлена до формули 2.6, щоб отримати формулу для однієї невідомої  $h_3$ :

$$\frac{4\pi r_{\text{необ.куль}}^3}{3} + 0.5h_{\text{товц.траф.}} \pi r_{\text{товц.траф.}}^2 = \frac{(r_{\text{упаков}}^2 + h_3^2 - r_{\text{мат.плати}}^2) \pi (4(r_{\text{упаков}}^2 + h_3^2 - r_{\text{мат.плати}}^2) + 6r_{\text{мат.плати}}^2)}{6} + \frac{h_3 \pi (4h_3^2 + 6r_{\text{упаков}}^2)}{6} + h_{\text{упаков}} \pi r_{\text{упаков}}^2 - h_{\text{мат.плати}} \pi r_{\text{мат.плати}}^2 \quad (2.9)$$

Формулу 2.9 можна вирішити ітераційним способом, збільшуючи значення  $h_3$  доти, доки ліва сторона не стане рівною правою. Знаючи  $h_3$ ,  $h_2$  можна визначити за формулою 2.8, а  $r_1$  можна визначити за формулою 2.7. Висота паяння (або зазор) дорівнює  $h_3 + h_2$ .

Висота паяного з'єднання BGA була розрахована для базового випадку та кількох варіантів, як показано в табл. 2.2. Видно, що базовий випадок добре узгоджується з результатами вимірювань, показаними на рис. 2.5 відповідно до типових виробничих допусків. Були розраховані результуючі зміни висоти паяної сполуки та руйнування кульки. При додаванні варіацій із використанням методу квадрата кореня сума варіацій у руйнуванні кулі під час поверхневого монтажу очікується +/- 0,012 мм. Це приблизно +/- 4 стандартних відхилення у вимірних даних руйнування кульки.

Таблиця 2.2 – Розрахункова висота паяного з'єднання

| Діаметр<br>кульки | Отвір<br>паяльної<br>маски | Товщина<br>паяльної<br>маски | Діаметр<br>контактного<br>майданчика<br>материнської<br>плати | Товщина<br>контактного<br>майданчика<br>материнської<br>плати | Отвір<br>трафарету<br>паяльної<br>пасти | Товщина<br>трафарету<br>паяльної<br>пасти | Монтажна<br>висота<br>паяльної<br>маски до<br>материнської<br>плати | Початкова<br>висота<br>паяльної<br>маски<br>припою<br>від кульки<br>до<br>корпусу | Руйнування<br>кульки для<br>поверхневого<br>монтажу | Зміна |
|-------------------|----------------------------|------------------------------|---|---|---|---|---|---|---|-------|
| мм.               | мм.                        | мм.                          | мм.   | мм.   | мм.                                     | мм.                                       | мм.   | мм.   | мм.   | мм.   |
| 0.250             | 0.250                      | 0.015                        | 0.250   | 0.018   | 0.250                                   | 0.075                                     | 0.144   | 0.180   | 0.036   |       |
| 0.240             | 0.250                      | 0.015                        | 0.250   | 0.018   | 0.250                                   | 0.075                                     | 0.134   | 0.167   | 0.033   |       |
| 0.260             | 0.250                      | 0.015                        | 0.250   | 0.018   | 0.250                                   | 0.075                                     | 0.154   | 0.193   | 0.039   | 0.003 |
| 0.250             | 0.225                      | 0.015                        | 0.250   | 0.018   | 0.250                                   | 0.075                                     | 0.155   | 0.193   | 0.038   |       |
| 0.250             | 0.275                      | 0.015                        | 0.250   | 0.018   | 0.250                                   | 0.075                                     | 0.134   | 0.166   | 0.032   | 0.003 |
| 0.250             | 0.250                      | 0.010                        | 0.250   | 0.018   | 0.250                                   | 0.075                                     | 0.146   | 0.183   | 0.037   |       |
| 0.250             | 0.250                      | 0.020                        | 0.250   | 0.018   | 0.250                                   | 0.075                                     | 0.142   | 0.176   | 0.034   | 0.001 |
| 0.250             | 0.250                      | 0.015                        | 0.225   | 0.018   | 0.250                                   | 0.075                                     | 0.152   | 0.180   | 0.028   |       |
| 0.250             | 0.250                      | 0.015                        | 0.275   | 0.018   | 0.250                                   | 0.075                                     | 0.137   | 0.180   | 0.043   | 0.007 |
| 0.250             | 0.250                      | 0.015                        | 0.250   | 0.025   | 0.250                                   | 0.075                                     | 0.141   | 0.180   | 0.039   |       |
| 0.250             | 0.250                      | 0.015                        | 0.250   | 0.011   | 0.250                                   | 0.075                                     | 0.147   | 0.180   | 0.033   | 0.003 |
| 0.250             | 0.250                      | 0.015                        | 0.250   | 0.018   | 0.225                                   | 0.075                                     | 0.140   | 0.180   | 0.040   |       |
| 0.250             | 0.250                      | 0.015                        | 0.250   | 0.018   | 0.275                                   | 0.075                                     | 0.148   | 0.180   | 0.032   | 0.004 |
| 0.250             | 0.250                      | 0.015                        | 0.250   | 0.018   | 0.250                                   | 0.100                                     | 0.150   | 0.180   | 0.030   |       |
| 0.250             | 0.250                      | 0.015                        | 0.250   | 0.018   | 0.250                                   | 0.050                                     | 0.137   | 0.180   | 0.043   | 0.006 |

### 2.3 Розрахунок напруги відшаровування BGA-компонентів

У сучасних технологіях упаковки BGA припої використовуються для кріплення корпусів для поверхневого монтажу до друкованих плат (ДП). У той час як надійність у конструкціях з перевернутими кристалами була значно підвищена завдяки впровадженню епоксидних герметиків (нижніх заливок), системи BGA залишаються вузьким місцем надійності у сучасній розробці електронних корпусів. Вони зазнають теплового навантаження, викликаного невідповідністю теплового розширення (стиснення) різнорідних матеріалів у конструкції, коли система (на рівні плати) піддається зміні температури та/або через температурні градієнти. Припої, навіть безсвинцеві, характеризуються малими напругами плинності, і тому периферійні з'єднання корпусу, де теплове навантаження найбільше, часто відчувають непружні деформації.

Розглянемо подовжену спаяну біматеріальну збірку другого рівня міжз'єднань (корпус до плати або керамічної підкладки) (рис. 2.8).

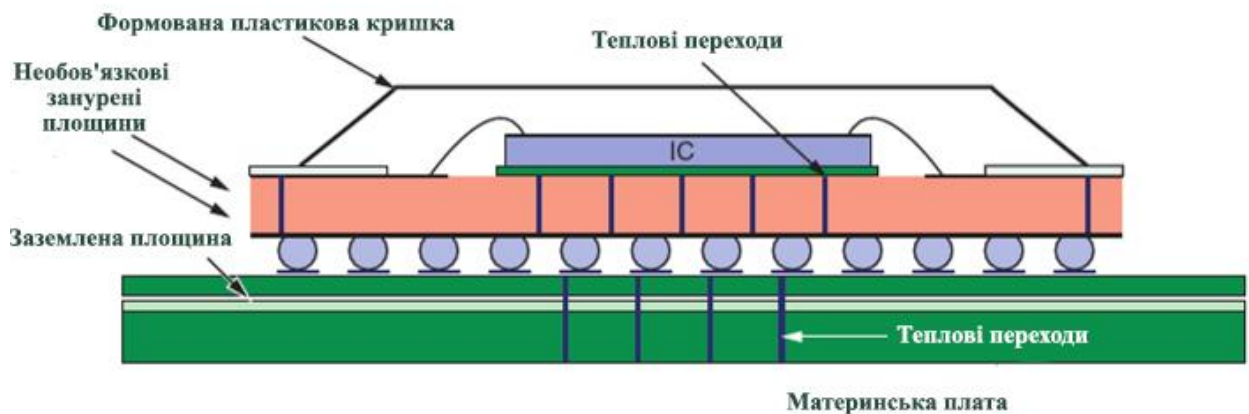


Рисунок 2.8 – Пакет BGA

Для нього проведемо розрахунки напруги відшаровування BGA-компонентів. Вхідні дані записані у табл. 2.3.

Таблиця 2.3 – Вхідні дані для розрахунків

| Структурний елемент              | Упаковка             | Друкована плата     | Припій (96.5% Ag, 3.5% Sn) |
|----------------------------------|----------------------|---------------------|----------------------------|
| Номер елемента                   | 1                    | 2                   | 0                          |
| Ефективний модуль Юнга, кг/мн    | 8775.5               | 2321.4              | 1939.0                     |
| Коефіцієнт Пуассона              | 0.30                 | 0.30                | 0.30                       |
| Модуль зсуву, кг/мм <sup>2</sup> | 3367.3               | 892.7               | 1958.8                     |
| КТР, I / °C                      | $6.5 \times 10^{-6}$ | $15 \times 10^{-6}$ | -                          |
| Товщина, мм                      | 2.0                  | 1.5                 | 0.2                        |

Розрахункова межа текучості матеріалу припою при зсуві  $\tau = 1.5306 \text{ кг} / \text{мм}^2$ .

Температура паяння  $158^\circ\text{C}$ .

Передбачувана зміна температури при  $\Delta t = 130^\circ\text{C}$  Довжина половини упаковки  $l = 15 \text{ мм}$ .

Обчислемо дані. Осьова та міжфазна податливості:

$$\lambda_1 = \frac{1 - \nu_1}{E_1 h_1} \quad (2.10)$$

$$\lambda_2 = \frac{1 - \nu_2}{E_2 h_2} \quad (2.11)$$

Підставивши дані отримаємо:

$$\lambda_1 = \frac{1-0.3}{8775.5 \times 2.0} = 3.9884 \times 10^{-5} \text{ мм / кг}$$

$$\lambda_2 = \frac{1-0.3}{2321.4 \times 1.5} = 20.1028 \times 10^{-5} \text{ мм / кг}$$

Тоді загальна осьова податливість дорівнює:

$$\lambda = \lambda_1 + \lambda_2 = 24.0912 \times 10^{-5} \text{ мм / кг}$$

Розрахуємо міжфазну податливість за формулами:

$$k_1 = \frac{h_1}{3G_1} \quad (2.12)$$

$$k_2 = \frac{h_2}{3G_2} \quad (2.13)$$

$$k_0 = \frac{h_0}{G_0} \quad (2.14)$$

Підставивши значення отримаємо:

$$k_1 = \frac{2.0}{3 \times 3367.3} = 19.7983 \times 10^{-5} \text{ мм}^3 / \text{кг}$$

$$k_2 = \frac{1.5}{3 \times 892.7} = 56.0100 \times 10^{-5} \text{ мм}^3 / \text{кг}$$

$$k_0 = \frac{0.2}{1958.8} = 10.2103 \times 10^{-5} \text{ мм}^3 / \text{кг}$$

Тоді загальна міжфазна податливість дорівнює:

$$k = k_1 + k_2 + k_0 = 86.0186 \times 10^{-5} \text{ мм}^3 / \text{кг}$$

Параметр  $K$  міжфазного напруження зсуву визначається за формулою:

$$K = \sqrt{\frac{\lambda}{k}} = \sqrt{\frac{24.0912 \times 10^{-5}}{86.0186 \times 10^{-5}}} = 0.5292 \text{ мм}^{-1}$$

Максимальна пружна міжфазна напруга зсуву, якщо склеювальний матеріал поводитья пружно за будь-якого рівня навантаження, становить:

$$\tau_{\max}^{\infty} = K \frac{\Delta\alpha\Delta t}{\lambda} \quad (2.15)$$

Підставивши значення отримаємо:

$$\tau_{\max}^{\infty} = 0.5292 \frac{8.5 \times 10^{-6} \times 130}{24.0912 \times 10^{-5}} = 2.4273 \text{ кгс / мм}^2$$

Цей результат показує, що ніякі пружні деформації не можуть виникнути, якщо межа плинності матеріалу припою дорівнює або перевищує передбачене значення пружної напруги.

Це значення можна знизити, використовуючи корпуси та друковані плати з найкращою відповідністю тепловому розширенню, використовуючи більш тонкі корпуси та друковані плати, а також використовуючи друковані плати з нижчими модулями Юнга. Для матеріалів, що розглядаються,

відношення  $\frac{\tau_{\gamma}}{\tau_{\max}^{\infty}}$  дорівнює 0,6306, так що  $\frac{l_0}{l} = 0.075$  тобто близько 7,5%

довжини інтерфейсу зазнають непружних деформацій, і саме для цих з'єднань слід проводити прогнози терміну служби.

## 2.4 Ключові моменти процесу збирання компонентів BGA за технологією поверхневого монтажу

По-перше – це попередня обробка. Хоча деякі компоненти в BGA-корпусах не такі чутливі до вологи, всі компоненти рекомендується запікати при температурі 125°C, так як при низькотемпературному запіканні не спостерігалось негативного впливу. Це також працює для друкованих плат без компонентів, готових до збирання за технологією поверхневого монтажу (ТПМ). Адже спочатку можна усунути вологу, зменшивши дефекти кульок припою та покращивши паяння.

По-друге, друк паяльної пасти – цей момент легко реалізувати на компонентах BGA з кроком більше 0.8 мм та компонентах у вигляді чотирикутного плоского пакету з кроком 0.5 мм. Однак, іноді може виникнути проблема, пов'язана з тим, що олово необхідно компенсувати вручну, оскільки на деякі кульки припою не завдано достатньо паяльної пасти, що призводить до зміщення пайки або виникнення коротких замикань.

Тим не менш, я не думаю, що паяльна паста легше друкується на компонентах BGA з кроком 0.8 мм, ніж на чотирикутних плоских пакетах (ЧПП) з кроком 0.5 мм. Я вважаю, що багато інженерів знали про різницю між горизонтальним і вертикальним друком на ЧПП з кроком 0.5 мм, яку можна пояснити з точки зору механіки. Таким чином, деякі принтери можуть забезпечувати функцію друкування під кутом 45°. Ґрунтуючись на думці, що друк відіграє суттєву роль у збірці ТПМ, пропонується приділити їй достатньо уваги.

По-третє, розміщення та монтаж. З практичного досвіду складання, оскільки фізичні характеристики компонентів BGA забезпечують високу технологічність, вони легше монтуються, ніж компоненти ЧПП з кроком 0.5 мм. Однак основна проблема, з якою нам доводиться стикатися в процесі складання ТПМ, полягає в тому, що вібрація зазвичай виникає на компонентах, коли використовується великогабаритна насадка з гумовим

кільцем для розміщення компонентів на друкованій платі розміром більше 30 мм. На підставі аналізу можна припустити, що це відбувається в результаті надто високого тиску всередині сопла через надмірну міцність кріплення і може бути усунуто шляхом узгоджених доробок.

В-четверте, пайка оплавленням гарячим повітрям є неінтуїтивним процесом у процесі складання ТПМ або може бути визначена як спеціальна технологія. Хоча компоненти BGA мають еквівалентну криву часу та температури паяння зі стандартною кривою, вона відрізняється від більшості традиційних ТПМ з погляду паяння оплавленням.

Паяні з'єднання компонентів BGA знаходяться під компонентами між корпусом компонента і друкованою платою, що визначає те, що компоненти BGA набагато більше схильні до впливу паяння, ніж традиційні ТПМ, оскільки висновки останніх розміщені на периферії корпусу компонента.

Принаймні вони піддаються прямому впливу гарячого повітря. Розрахунок теплового опору та практика показують, що кульки припою у центральній частині корпусу BGA-компонента страждають від термічної затримки, повільного підвищення температури та низької максимальної температури.

В-п'яте, інспекція – через фізичну структуру BGA-компонентів візуальний огляд не відповідає вимогам до огляду прихованих паяних сполук BGA-компонентів, тому для виявлення дефектів паяння, таких як порожнечі, короткі замикання, кульки припою, що бракують, отвори для повітря тощо потрібно рентгенівський контроль з послідуєчим візуальним контролем для остаточної інспекції, що буде використовуватись у наступних розділах. Єдиним недоліком рентгенологічного дослідження є висока вартість.

В-шосте, переробка – поряд із широким спектром застосування компонентів BGA, а також популярністю електронних продуктів для персональних телекомунікацій, доробка BGA стає все більш важливою. Однак, порівняно з компонентами ЧПП, компоненти BGA більше не можна використовувати після їх демонтажу з друкованої плати.

Тепер, коли технологія упаковки BGA стала основною у складанні ТПМ, рівень її технологічної складності не можна ігнорувати, і ключові моменти, згадані в цій статті, повинні бути ретельно та правильно проаналізовані з раціональним вирішенням проблем. При виборі контрактного виробника або збирача електроніки слід підбирати професійну виробничу лінію разом із повноцінними складальними можливостями та складальним обладнанням.

## 2.5 Висновки за розділом 2

В ході написання другого розділу було проведено наступне дослідження:

- розроблено конструкцію посадкового місця BGA-кульки;
- проведено розрахунок висоти паяного з'єднання;
- розраховано висоту припою при складанні BGA-компонентів;
- проведено розрахунок напруги відшаровування BGA-компонентів.

Висота BGA зменшується на 0.035 мм після поверхневого монтажу.

Вказана товщина BGA при постачанні повинна становити 0.060 мм. Цей збільшений допуск по товщині можна використовувати для покращення електричних характеристик за рахунок використання високих котушок індуктивності з більш високою добротністю та зменшення зв'язку між провідними з'єднаннями та компонентами за допомогою конформного екрана корпусу.

Також можна зробити висновок що ніякі пружні деформації не можуть виникнути, якщо межа плинності матеріалу припою дорівнює або перевищує передбачене значення пружної напруги.

Було виділено ключові моменти процесу збирання компонентів BGA за технологією поверхневого монтажу і виявлено, що для автоматизації процесу потрібно після рентгенологічного дослідження використовувати візуальний контроль BGA-компонентів для остаточної інспекції.

## 3 РОЗРОБЛЕННЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ СКЛАДАННЯ VGA-КОМПОНЕНТІВ

3.1 Розробка блок-схеми алгоритму роботи системи та ідентифікація її модулів

Загальне представлення роботи системи є дуже важливим для подальшої роботи над автоматизованою системою взагалі.

Блок-схема алгоритму роботи системи представлена на рис. 3.1.

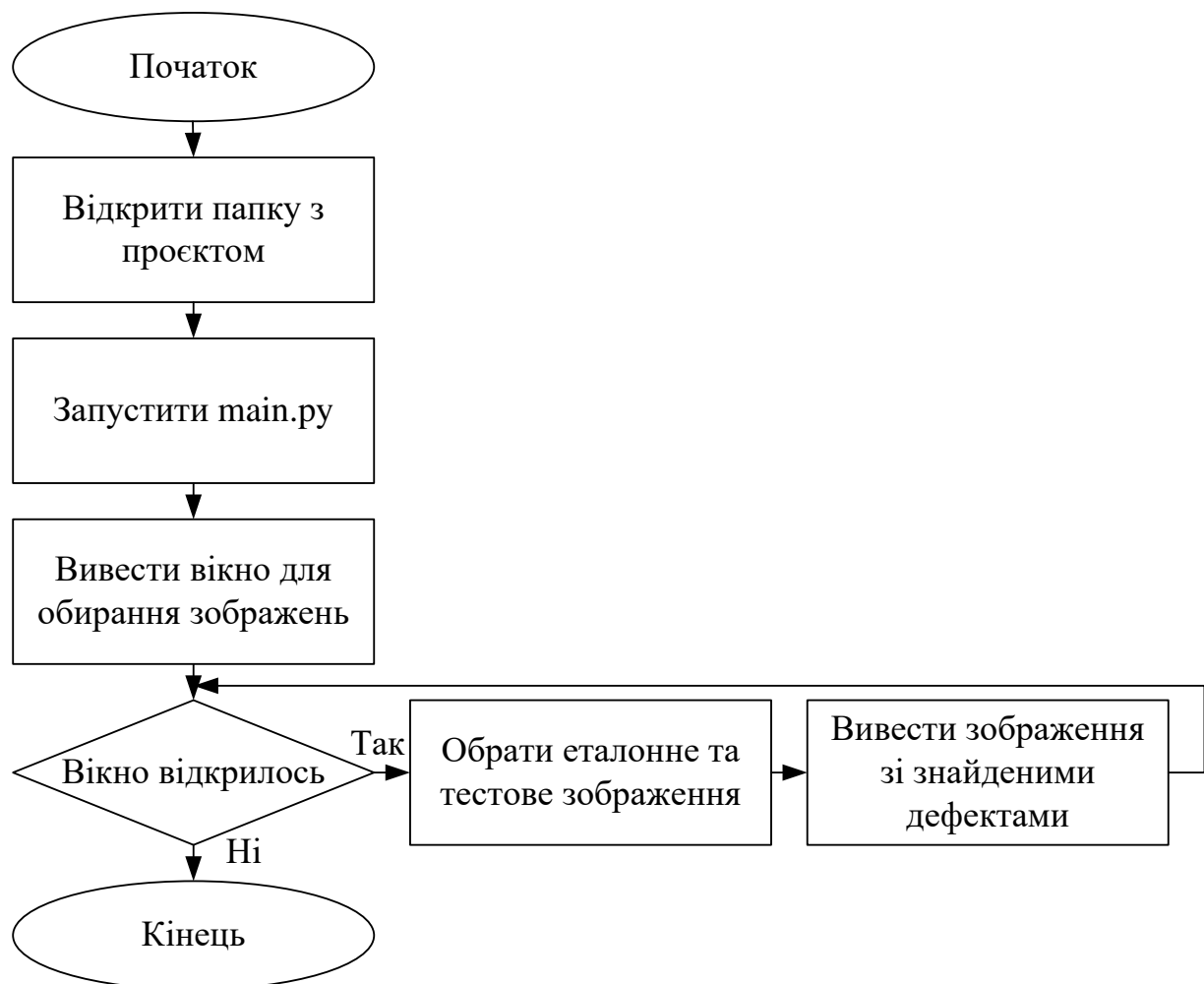


Рисунок 3.1 – Блок-схема алгоритму роботи системи

Далі потрібно провести ідентифікацію усіх модулів, що будуть використані для розроблення автоматизованої системи (рис. 3.2).



Рисунок 3.2 – Ідентифікація усіх модулів системи

### 3.2 Розробка додатка для автоматизованої системи контролю технологічного процесу складання BGA-компонентів

Спочатку підключаємо необхідні бібліотеки:

```
import cv2
import numpy
import imutils
from easygui import *
from tkinter import filedialog as fd
from skimage.metrics import structural_similarity
```

У даному випадку у якості бібліотек використано наступні:

- cv2 – бібліотека комп'ютерного зору OpenCV;
- numpy – основний пакет для наукових обчислень на Python. Це бібліотека Python, яка надає об'єкт багатовимірному масиву, різні похідні об'єкти (такі як замасковані масиви та матриці), а також набір процедур для швидких операцій над масивами, включаючи математичні, логічні, маніпуляції формою, сортування, вибір, введення/виведення, дискретне перетворення Фур'є, базова лінійна алгебра, основні статистичні операції, випадкове моделювання та багато іншого;
- imutils – низка зручних функцій для полегшення базових функцій обробки зображень, таких як переклад, обертання, зміна розміру, скелетонізація, відображення зображень Matplotlib, сортування контурів, визначення країв тощо за допомогою OpenCV і Python 2.7 і Python 3;
- easygui – модуль для дуже простого, дуже легкого графічного програмування на Python. EasyGUI відрізняється від інших генераторів GUI тим, що EasyGUI НЕ керується подіями. Замість цього всі взаємодії GUI викликаються простими викликами функцій. EasyGui надає простий у

використанні інтерфейс для простої графічної взаємодії з користувачем. Це не вимагає від програміста знання про tkinter, фрейми, віджети, зворотні виклики чи лямбда-функції;

- tkinter – стандартний інтерфейс Python до інструментарію інтерфейсу Tcl/Tk. I Tk, і tkinter доступні на більшості платформ Unix, включаючи macOS, а також у системах Windows;

- skimage – це набір алгоритмів для обробки зображень. Функція `structural_similarity` – структурна подібність спрямована на усунення цього недоліку шляхом врахування текстур.

У програмному засобі створено для зручності функцію `func()`, що забезпечуватиме основні морфологічні операції з програмним додатком.

Її функціонал можна робити на певні кроки, що будуть описані нижче.

Крок 1. Функція приймає два зображення як вхідні дані: одне є еталонним, ідеальним зображенням друкованої плати або VGA-компоненту без дефектів для поформули, а інше є зображенням, яке потрібно протестувати.

Для цього спочатку в термінал виводиться текстова інформація про те, яке зображення повинно бути завантажено у додаток:

```
print("Виберіть еталонне зображення").
```

або:

```
print("Виберіть тестове зображення").
```

Кожен з зображень буде завантажуватись у відповідну змінну – `path1a` та `path1b` за допомогою файлового діалогового вікна для відкриття файлу з певним іменем:

```
path1a = fd.askopenfilename()
```

```
path1b = fd.askopenfilename().
```

Далі відбувається читання цих файлів за допомогою функції бібліотеки комп'ютерного зору OpenCV – `imread`:

```
imageA = cv2.imread(path1a)
imageB = cv2.imread(path1b).
```

Крок 2. Обидва зображення масштабуються, а потім перетворюються на зображення у відтінках сірого:

```
imageA = cv2.resize(imageA,(600,600),interpolation=cv2.INTER_LINEAR)
imageB = cv2.resize(imageB,(600,600),interpolation=cv2.INTER_LINEAR)
grayA = cv2.cvtColor(imageA, cv2.COLOR_BGR2GRAY)
grayB = cv2.cvtColor(imageB, cv2.COLOR_BGR2GRAY).
```

В якості розміру зображення було вибрано параметри 600 на 600 пікселів з інтерполяцією. Параметр інтерполяції встановлює один із кількох можливих методів інтерполяції: `cv.INTER_LINEAR` – білінійна інтерполяція (зміна масштабу), основна ідея якої полягає в тому, що проводиться лінійна інтерполяція по одній осі, а потім по іншій осі.

Крок 3. Індекс структурної подібності (ІСП) обчислюється шляхом поформули обох зображень у відтінках сірого. Якщо ІСП дорівнює 1, це означає, що обидва зображення однакові. І якщо ІСП дорівнює 0, це означає, що для відповідного тестового зображення вибрано неправильне еталонне зображення. Отже, ІСП завжди має бути між 0 і 1 ( $0 < \text{SSIM} < 1$ ). Після чого результати ІСП виводяться у термінал:

```
(score, diff) = structural_similarity(grayA, grayB, full=True)
diff = (diff*255).astype("uint8")
print("Індекс структурної подібності: {}".format(score)).
```

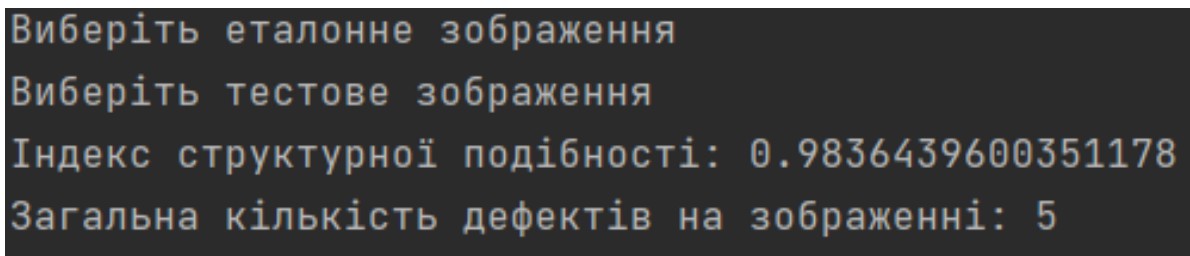
Крок 4. Наступним кроком є встановлення порогового значення тестового зображення та перетворення його на еквівалентне бінарне зображення:

```
thresh = cv2.threshold(diff, 0, 255, cv2.THRESH_BINARY_INV |
cv2.THRESH_OTSU)[1].
```

Крок 5. Потім знаходяться контури або безперервна піксельна область, яка відрізняється від навколишнього середовища, від бінарного зображення:

```
cnts = cv2.findContours(thresh.copy(), cv2.RETR_EXTERNAL,
cv2.CHAIN_APPROX_SIMPLE)
cnts = imutils.grab_contours(cnts).
```

Результати виконання цих операцій представлено на рис. 3.3.



```
Виберіть еталонне зображення
Виберіть тестове зображення
Індекс структурної подібності: 0.9836439600351178
Загальна кількість дефектів на зображенні: 5
```

Рисунок 3.3 – Результати виконання операцій

Крок 6. Тепер різні морфологічні операції застосовуються до тестового зображення, щоб обробляти зображення на основі його форми, форми та структури. Це робиться для видалення шумів і текстур із бінарного зображення, оскільки воно може містити різні недоліки. Використовуються такі різні морфологічні операції:

- dilation – розширення: для розширення вихідного зображення;
- erosion – ерозія, розмивання: щоб зменшити вихідне зображення;

- gradient – градієнт: щоб зрозуміти різницю між ерозією та розширенням;
- opening – розкриття: для виконання ерозії з подальшим розширенням;
- closing – закриття: для виконання розширення з наступною ерозією.

Приклади цих морфологічних операцій представлено нижче:

```
dilation = cv2.dilate(thresh,kernel,iterations = 1)
```

```
erosion = cv2.erode(thresh,kernel,iterations = 1)
```

```
gradient = cv2.morphologyEx(thresh, cv2.MORPH_GRADIENT, kernel)
```

```
opening = cv2.morphologyEx(thresh, cv2.MORPH_OPEN, kernel)
```

```
closing = cv2.morphologyEx(thresh, cv2.MORPH_CLOSE, kernel).
```

У якості ядра для цих операцій використано наступне:

```
kernel = numpy.ones((5, 5), numpy.uint8).
```

Крок 7. Обводимо контури після знаходження порогової функції та виводимо текстову інформацію в термінал про кількість знайдених дефектів:

```
p = 0
for c in cnts:
    p=p+1
    (x, y, w, h) = cv2.boundingRect(c)
    cv2.rectangle(imageB, (x, y), (x+w, y+h), (0, 0, 255), 1)
print("Загальна кількість дефектів на зображенні:", p).
```

Далі виводимо кількість виявлених дефектів у назву вікна:

```
cv2.imshow("KILKIST' VYYAVLENIH DEFEKTIV = {}".format(p),
imageB).
```

Інтерфейс має вигляд звичайного вікна і буде реалізовано у нескінченному циклі while:

```
while 1:
    msg="ВИЯВЛЕННЯ ДЕФЕКТІВ ДРУКОВАНОЇ ПЛАТИ"
    choices = ["Знайти дефекти","Вихід"]
    reply = buttonbox(msg, choices=choices)
    if reply ==choices[0]:
        func()
    if reply ==choices[1]:
        print("Дякую за увагу!")
        quit().
```

У своєму складі цей цикл має наступні елементи:

- msg – повідомлення у вікні;
- choices – словник з вибором дій;
- reply – змінна, що відповідає за дії, які обирає користувач. У випадку обирання першого варіанту Знайти дефекти запускається розроблена функція func(), у іншому – відбувається вихід з циклу на програми.

### 3.3 Діаграми потоку функцій і моделювання потоку даних

Діаграма потоку даних усіх функцій програмного засобу і їх взаємодію між собою представлено на рис. 3.4.

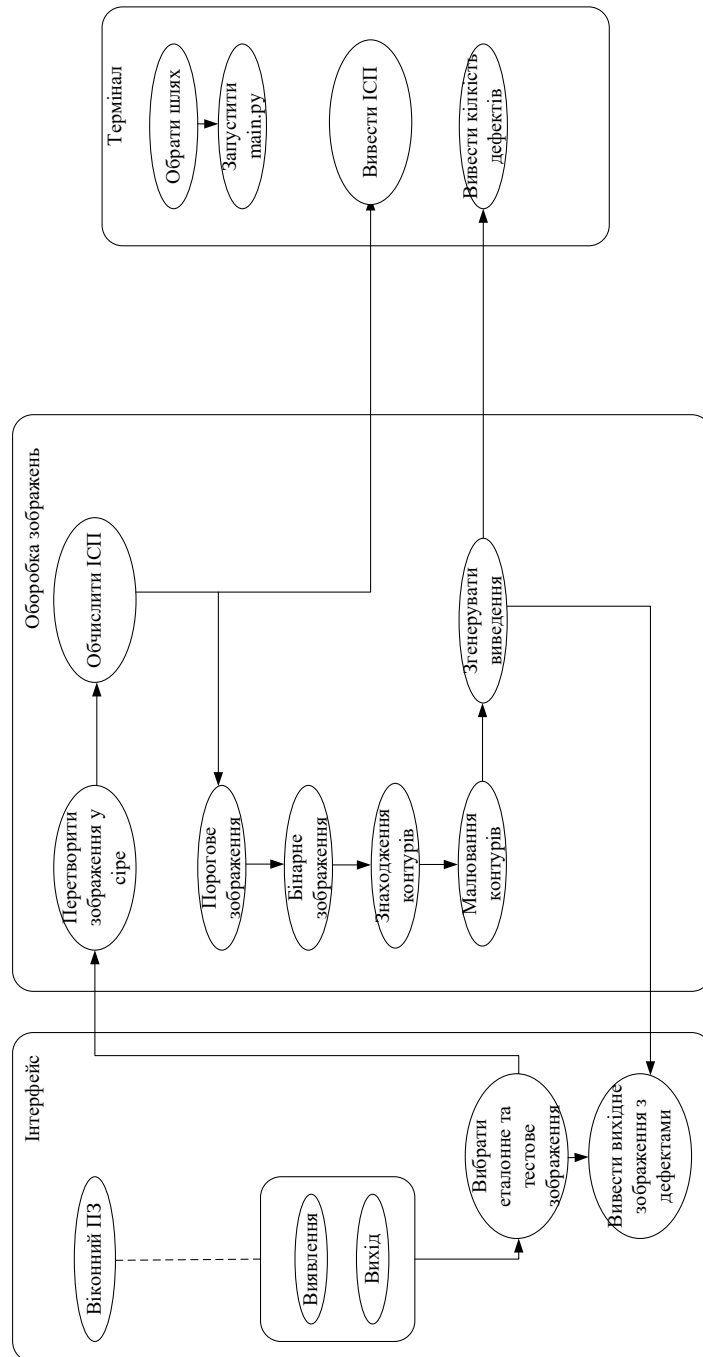


Рисунок 3.4 – Діаграма потоку даних функцій

Модель потоку даних рівня для системи представлено на рис. 3.5.

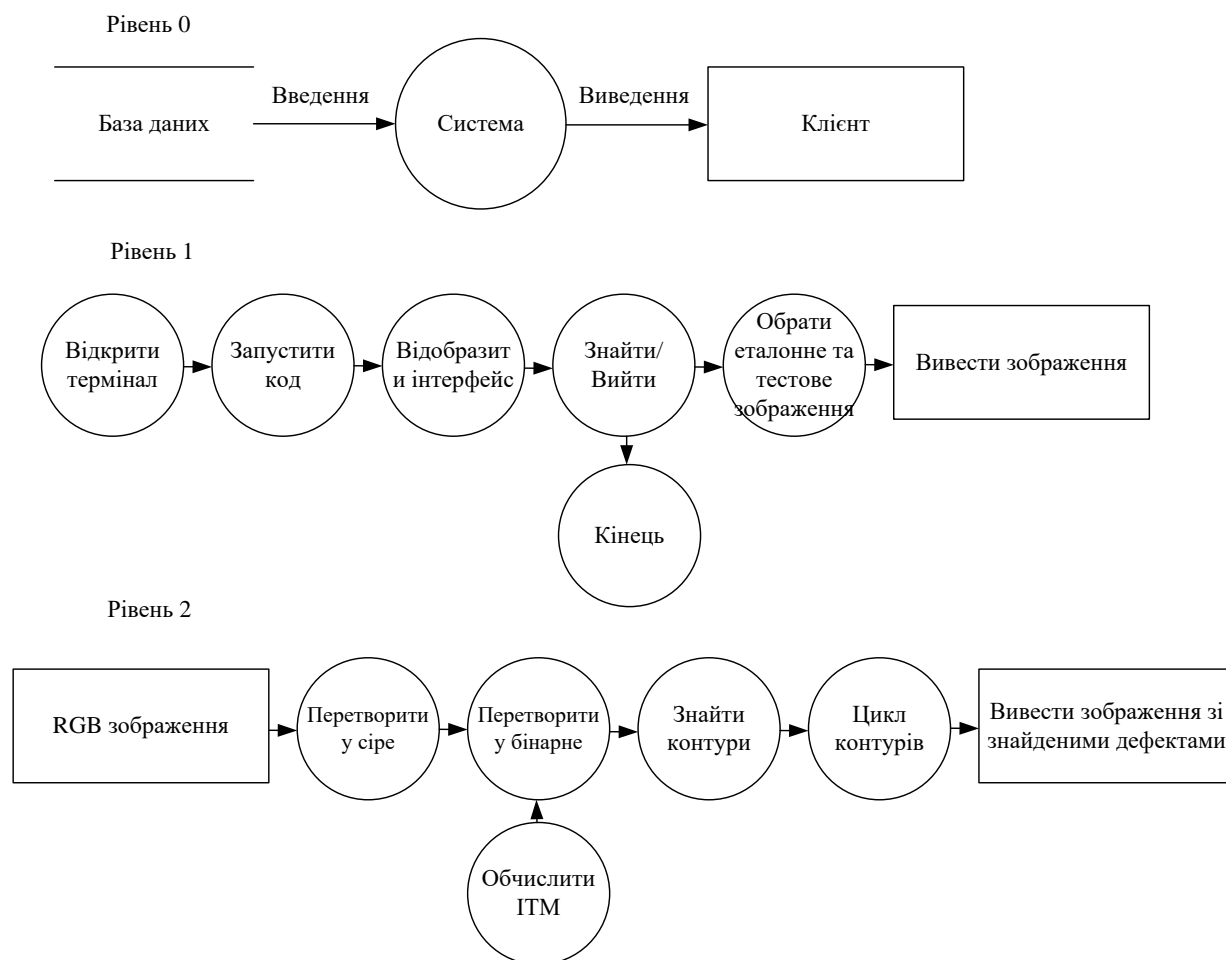


Рисунок 3.5 – Модель потоку даних рівня для системи

Діаграма потоку даних (ДПД) – це традиційне візуальне подання інформаційних потоків у системі. Вона показує, як дані входять та виходять із системи, що змінює інформацію та де дані зберігаються.

Мета – показати обсяг та межі системи в цілому. Її можна використовувати як засіб зв'язку між системним аналітиком і будь-якою особою, яка бере участь у замовленні, що виступає як відправна точка для перепроєктування системи.

### 3.4 Охорона праці

Будь-які контакти з розплавленими металами та активними хімічними речовинами можуть бути потенційною загрозою, та представляти реальну небезпеку отримання опіків та проблем сітківки очей.

До того ж випари, що виділяються в процесі пайки, можуть завдати шкоди легеням, і як наслідок, всьому організму.

Саме тому техніка безпеки в процесі пайки будь-яким способом та в будь-яких умовах (вдома або на виробництві) є одним з найважливіших питань, яким повинна приділятися найпильніша увага.

В процесі пайки припою та флюсів слюсар повинен користуватися тяжкозапальним одягом та темними окулярами, що оберігають очі від дії променевої енергії та бризок металу з солями.

Необхідно, щоб приміщення, в якому проводиться плавлення припою та флюсів, мало хорошу вентиляцію та постійно провітрювалось.

Для уникнення вибухів при виконанні паяльних робіт забороняється використовувати в процесі пайки елементів, що знаходяться під тиском, а також ємностей з-під легкозаймистих матеріалів без попередньої обробки [26].

Механічну вентиляцію необхідно передбачати: а) якщо метеорологічні умови та чистота повітря не можуть бути забезпечені вентиляцією з природною вентиляцією; для приміщень та зон без природного провітрювання.

Допускається проектувати змішану вентиляцію з частковим застосуванням систем природної вентиляції (ежекційну систему вентиляції і використання стато-динамічних дефлекторів як систем природної і комбінованої вентиляції) для подачі або видалення повітря.

Природну вентиляцію для виробничих приміщень слід розраховувати: на різницю густини зовнішнього та внутрішнього повітря при розрахункових параметрах перехідного періоду року для всіх опалюваних приміщень, а для приміщень з надлишками теплоти – за розрахунковими параметрами теплого

періоду року; на дію вітру при швидкості 1 м/с у теплий період року – для приміщень без надлишків теплоти.

Повітряне душення зовнішнім повітрям постійних робочих місць слід передбачати: у разі опромінення променистим тепловим потоком зі щільністю більше 140 Вт/м<sup>2</sup>; для забезпечення концентрації шкідливих речовин у повітрі робочої зони при відкритих технологічних процесах, які супроводжуються виділенням шкідливих речовин, і неможливістю улаштування укриття або місцевої витяжної вентиляції.

Аварійну вентиляцію для приміщень, в яких можливе раптове надходження великої кількості шкідливих або горючих газів, пари або аерозолів, слід передбачати відповідно до вимог технологічної частини проекту, враховуючи неможливість одночасної аварії технологічного та вентиляційного обладнання.

### 3.5 Висновки за розділом 3

В результаті написання 3 розділу було створено програмний засіб для автоматизованої системи контролю технологічного процесу складання BGA-компонентів, а саме виявлення дефектів при їх створенні та складанні. Результати експериментальних досліджень з розробленим додатком будуть представлені у розділі 4.

Проведена робота забезпечує більш просте та багатообіцяюче середовище, яке можуть використовувати як висококваліфіковані, так і низькокваліфіковані робітники, які практично не мають знань у галузі виявлення дефектів друкованих плат та BGA-компонентів. Крім того, програмний засіб забезпечує дуже зручне використання та обслуговування, а також високу точність виявлення дефектів. Таким чином, зведення до мінімуму людських та машинних помилок та внесення цінного позитивного внеску у створення відмінних ринкових продуктів.

## **4 ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ З ПРОГРАМНИМ ЗАСОБОМ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ СКЛАДАННЯ BGA-КОМПОНЕНТІВ**

### 4.1 Експериментальні дослідження

Через складність BGA у процесі паяння може виникнути безліч потенційних дефектів. Деякі проблеми, які можуть виникнути, включають [27]:

- неспіввісність – виникає, коли друкована плата та BGA зміщуються під час оплавлення та з'єднуються у неправильних точках. Це одна з найпоширеніших проблем, що виникають під час складання BGA;

- нерівномірна висота зазору – BGA встановлюється поверх друкованих плат, а неправильне паяння може призвести до встановлення BGA під кривим кутом на поверхні друкованої плати. Ця асиметрична висота зазору може поставити під загрозу безпеку з'єднань;

- відсутні кульки – якщо кульки відсутні в BGA, коли вона прикріплена до друкованої плати, у збірці можуть бути відсутні важливі точки з'єднання;

- контактні майданчики, що не змочуються – у деяких випадках оплавлена паяльна паста може неправильно змочувати контактний майданчик. Це може бути пов'язане з неповним оплавленням або залишками припою попередніх етапів виробничого процесу;

- перемички – виникають, коли між відкладеннями пасти залишається надлишок паяльної пасти. Мости між точками з'єднання часто призводять до коротких замикань\$

- часткове оплавлення – у деяких випадках оплавлення може повністю покривати плату. Це часто відбувається через недостатнє оплавлення припою, людський фактор або механічні несправності;

– попкорн – відбувається, коли кульки зливаються під час паяння. Це звичайна проблема для BGA і, як і мости, призводить до коротких замикань.

– розімкнуті ланцюги – виникають, коли припій не змочує контактний майданчик друкованої плати і потрапляє на кульки припою та на поверхню компонента. У той час, як електрична перевірка може визначити це як проблему на платі, вона не може визначити причину проблеми;

– порожнеча – виникає, коли потік зупиняється, не доходячи до паяної сполуки. Це проста проблема розбірних компонентів BGA.

У якості еталонного зображення було обрано зображення BGA-компоненту на рис. 4.1.

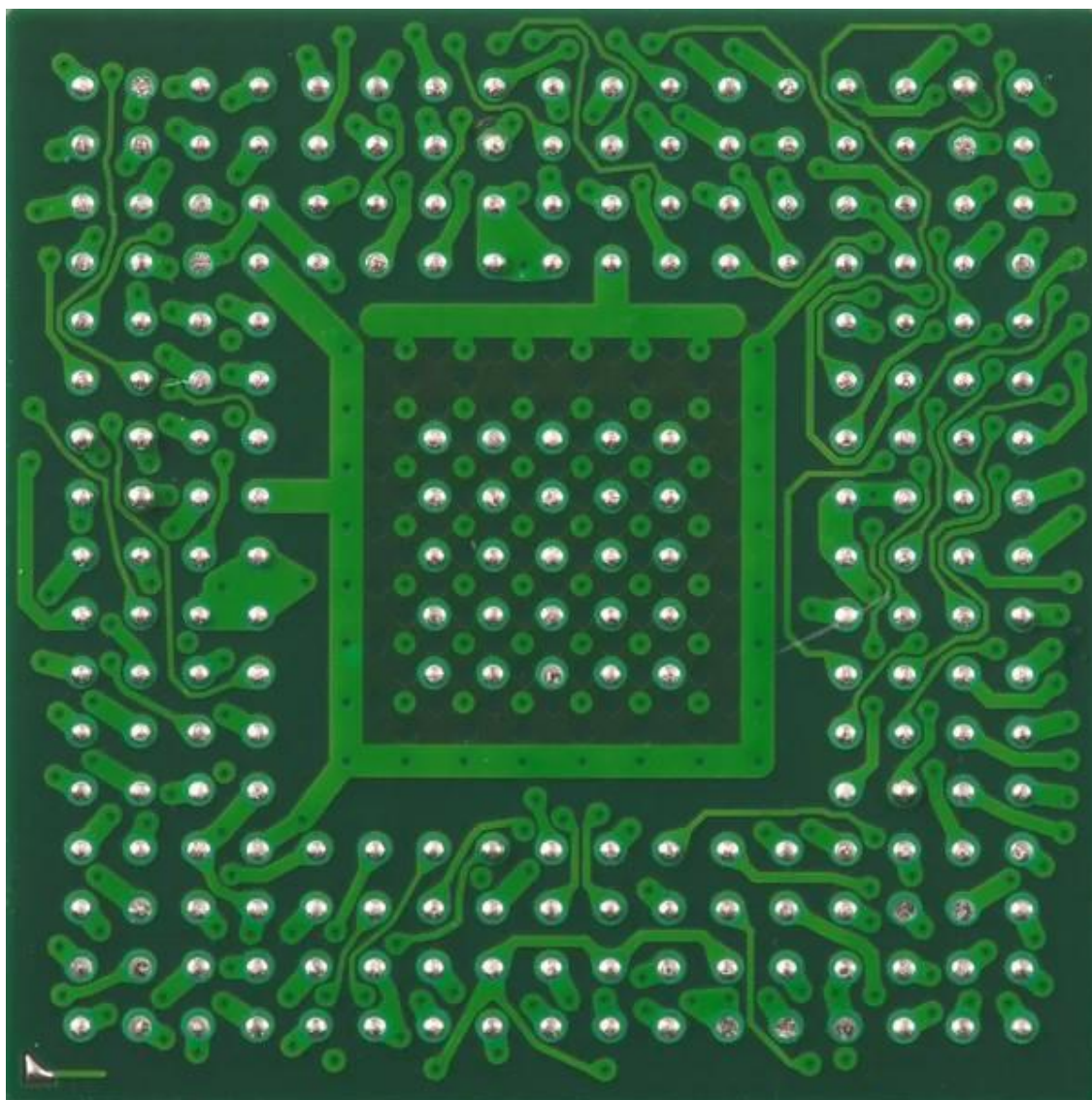


Рисунок 4.1 – Еталонний BGA-компонент

При знаходженні дефектів на двох однакових зображеннях, отримано наступні результати (рис. 4.2-4.3).



Рисунок 4.2 – Кількість виявлених дефектів на зображенні

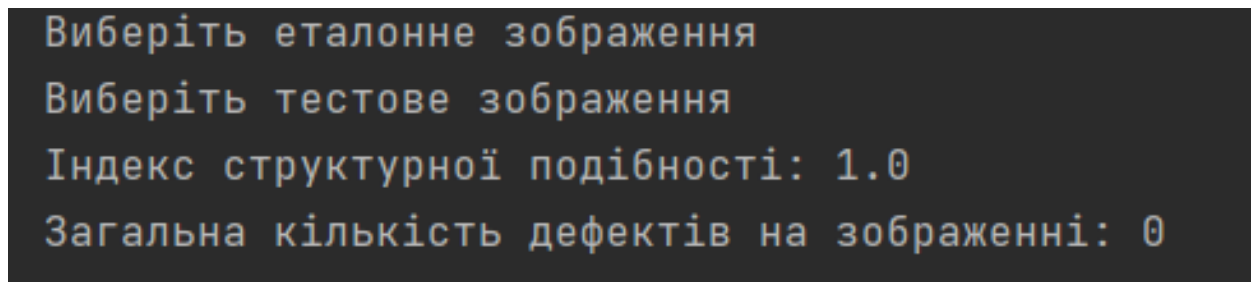


Рисунок 4.3 – Результати виявлення дефектів та розрахунок ІСП у терміналі

Проведемо експерименти з певними видами дефектів, що представлені раніше.

Перший з них є неспіввісність. Для цього дефекту було отримано наступні параметри у терміналі (рис. 4.4).

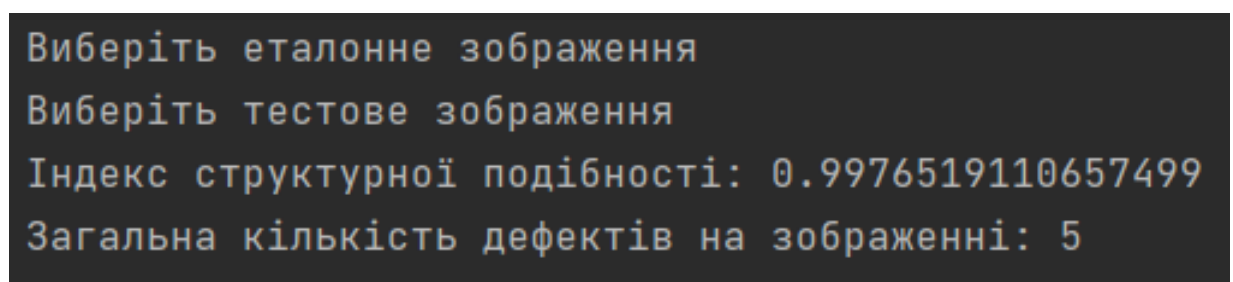


Рисунок 4.4 – Результати виявлення дефектів та розрахунок ІСП у терміналі для неспіввісності

Також отримано зображення з виявленими дефектами та їх виділенням на рис. 4.5.

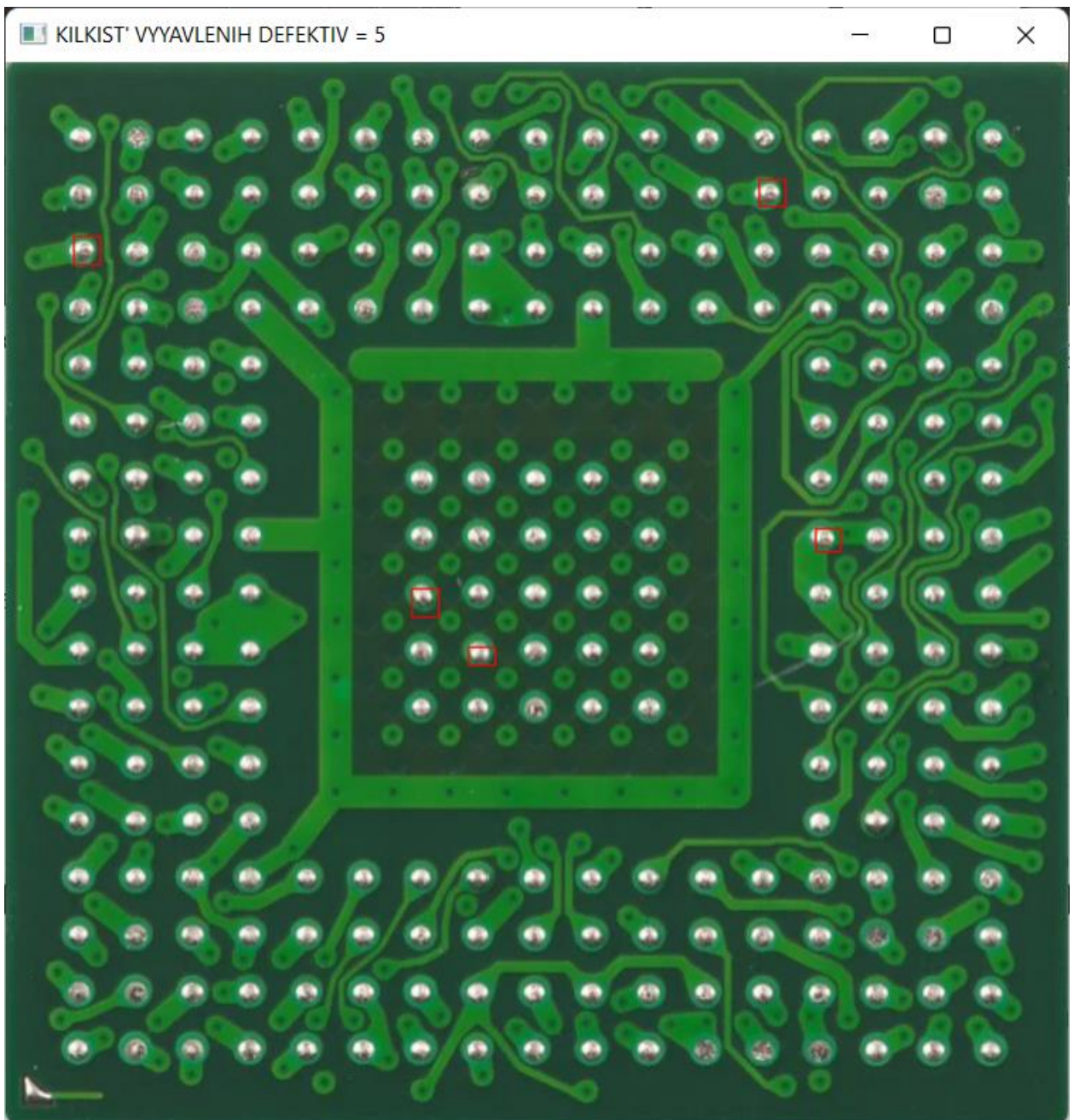


Рисунок 4.5 – Зображення з виявленими дефектами неспіввісності

Наступним дефектом є нерівномірна висота зазору. Для цього типу дефекту було отримано наступні параметри у терміналі (рис. 4.6).

Також отримано зображення з виявленими дефектами та їх виділенням на рис. 4.7.

```
Виберіть еталонне зображення  
Виберіть тестове зображення  
Індекс структурної подібності: 0.995365128198612  
Загальна кількість дефектів на зображенні: 12
```

Рисунок 4.6 – Результати виявлення дефектів та розрахунок ІСП у терміналі для нерівномірної висоти зазору

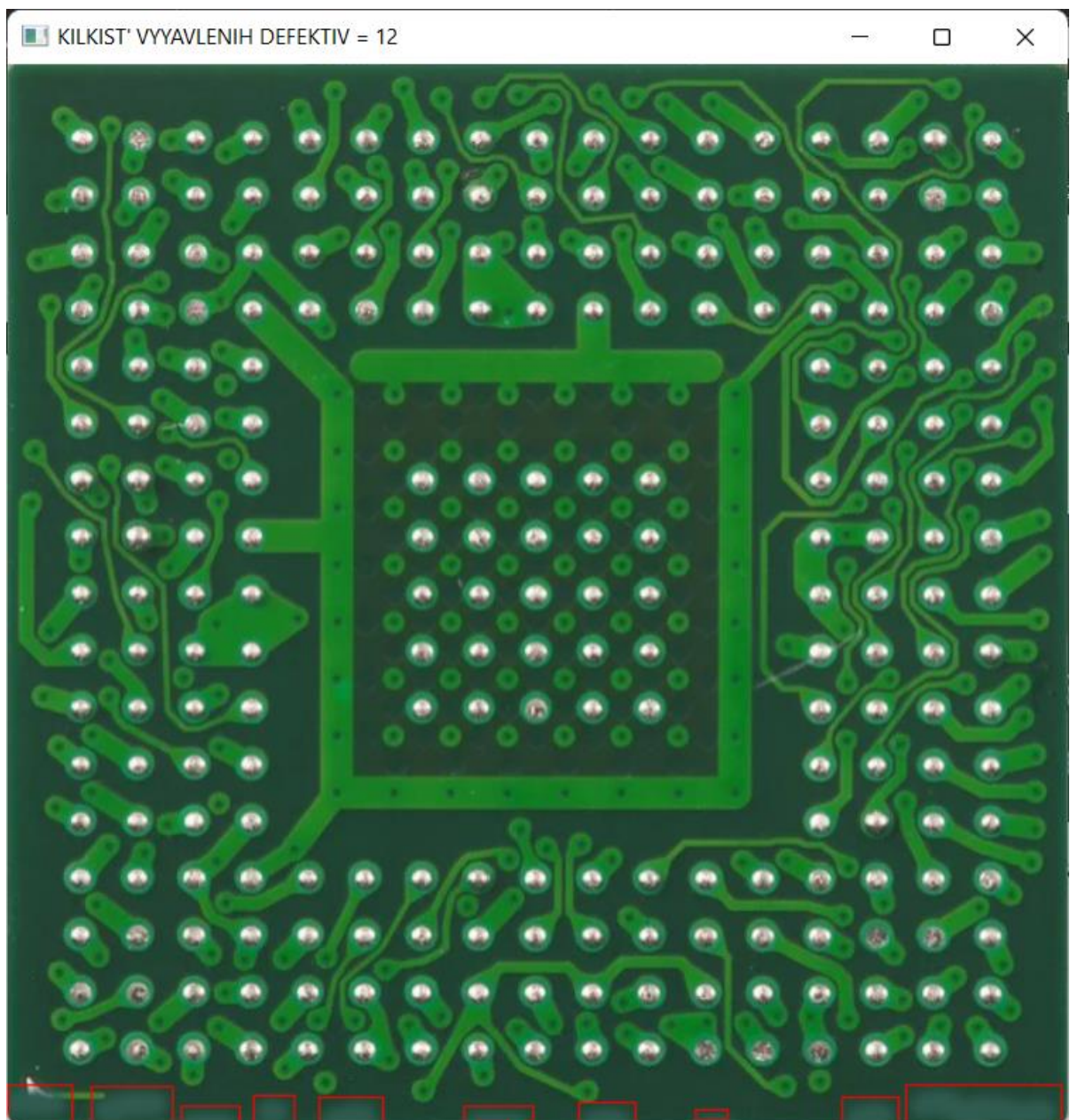


Рисунок 4.7 – Зображення з виявленими дефектами для нерівномірної висоти зазору

Наступним видом дефектів є відсутні кульки. Для цього типу дефекту було отримано наступні параметри у терміналі (рис. 4.8). Також отримано зображення з виявленими дефектами та їх виділенням на рис. 4.9.

```
Виберіть еталонне зображення  
Виберіть тестове зображення  
Індекс структурної подібності: 0.9942267612479467  
Загальна кількість дефектів на зображенні: 9
```

Рисунок 4.8 – Результати виявлення дефектів та розрахунок ІСП у терміналі для відсутніх кульок

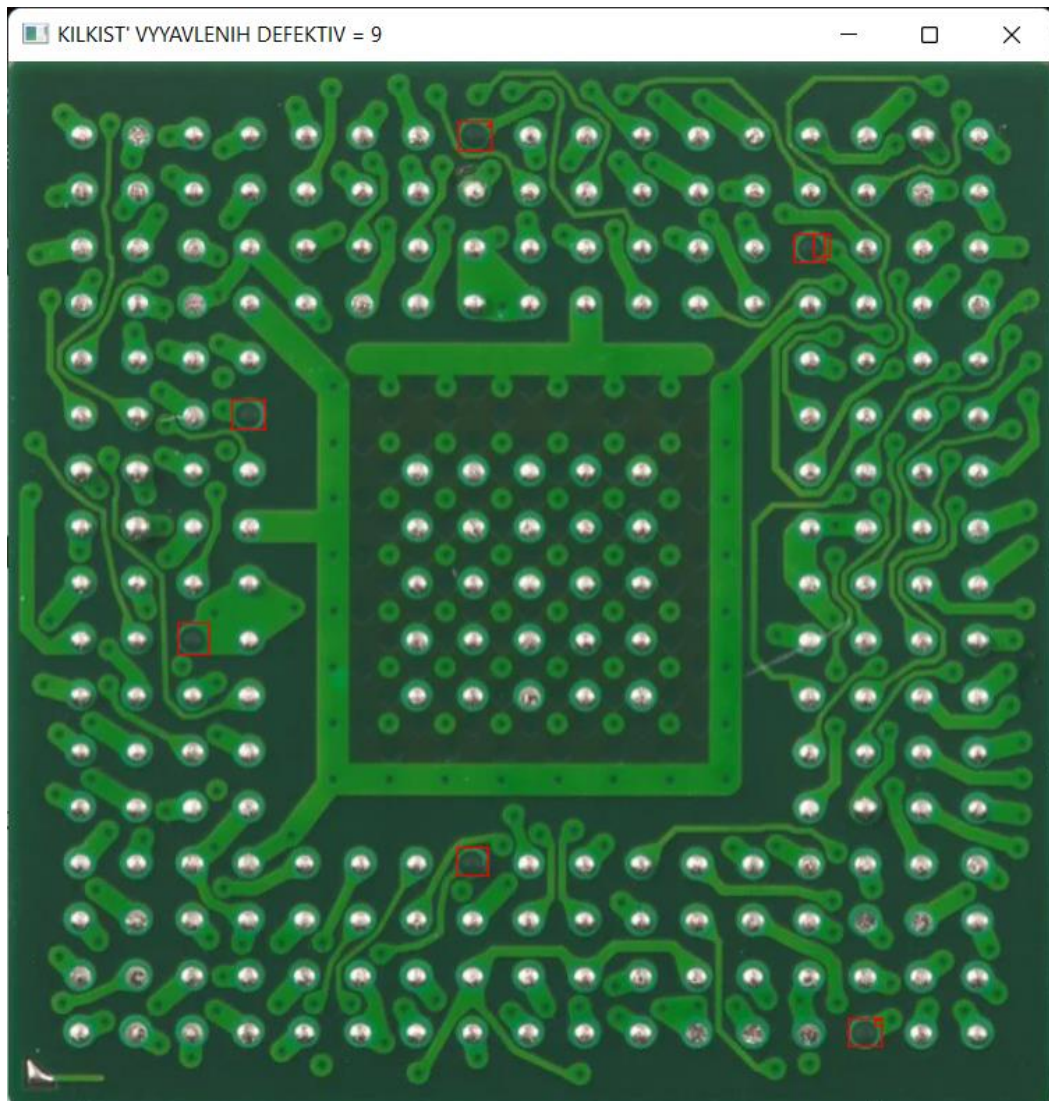


Рисунок 4.9 – Зображення з виявленими дефектами для відсутніх кульок

Видом дефектів є контактні майданчики, що не змочуються. Для цього типу дефекту було отримано наступні параметри у терміналі (рис. 4.10). Також отримано зображення з виявленими дефектами та їх виділенням на рис. 4.11.

```
Виберіть еталонне зображення  
Виберіть тестове зображення  
Індекс структурної подібності: 0.9969180611909638  
Загальна кількість дефектів на зображенні: 7
```

Рисунок 4.10 – Результати виявлення дефектів та розрахунок ІСП у терміналі для контактних майданчиків, що не змочуються

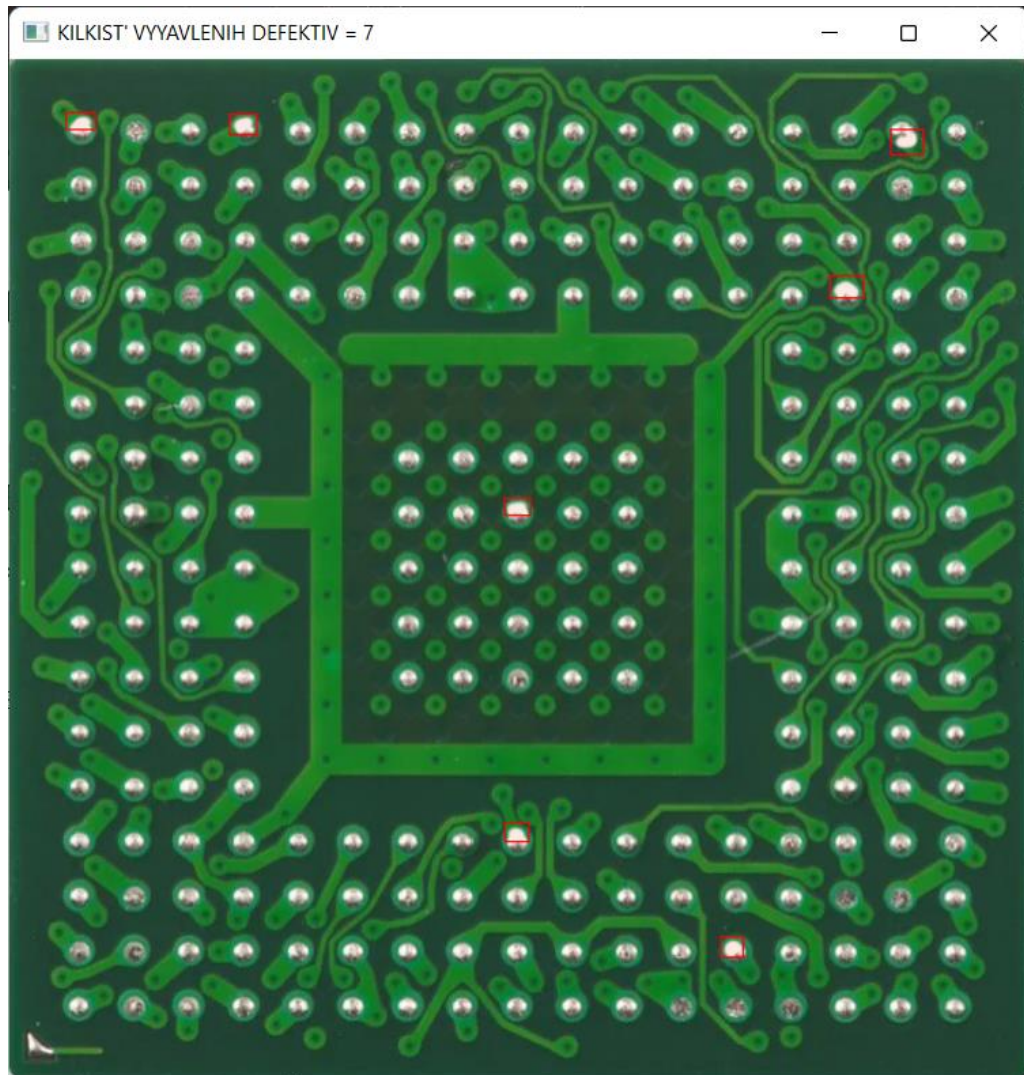
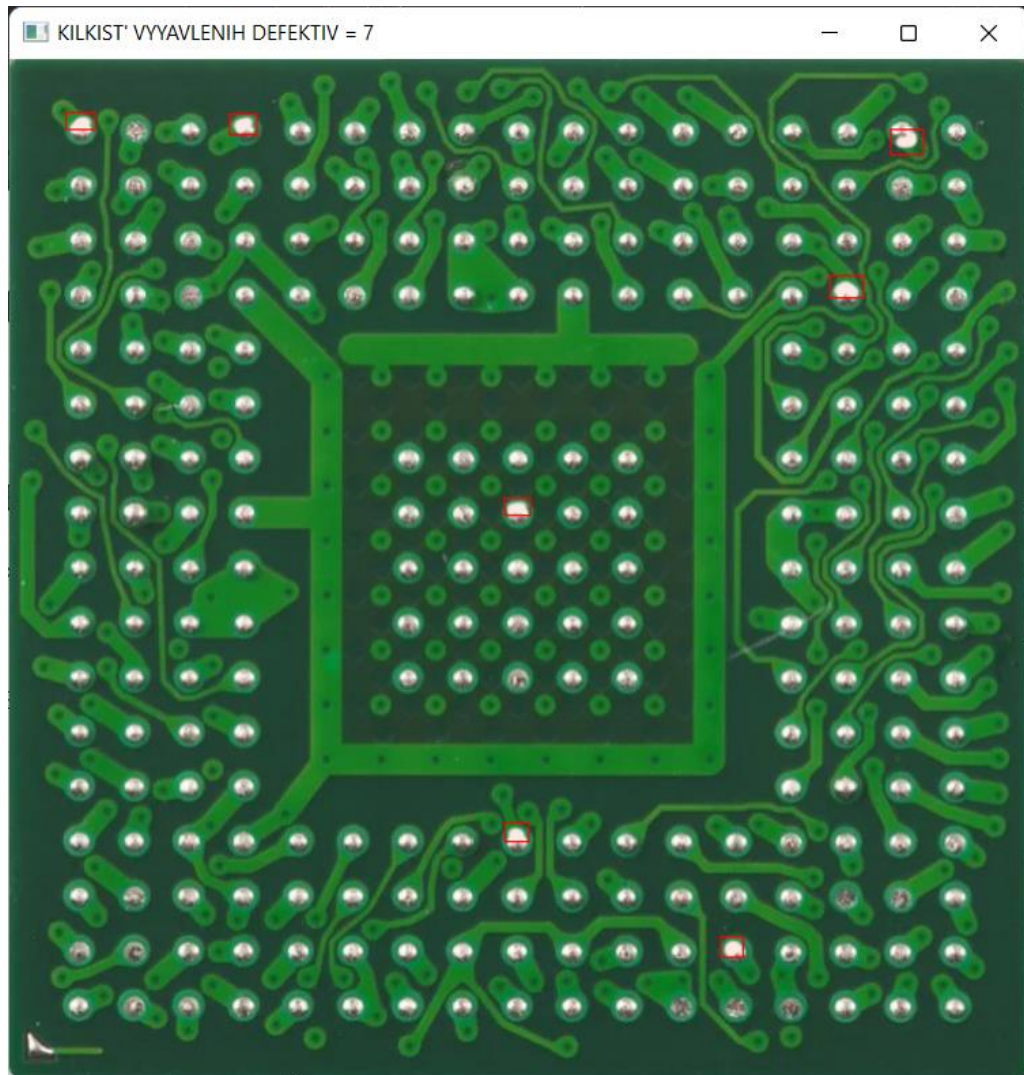


Рисунок 4.11 – Зображення з виявленими дефектами для контактних майданчиків, що не змочуються

Ще одним видом дефектів є перемички. Для цього типу дефекту було отримано наступні параметри у терміналі (рис. 4.12). Також отримано зображення з виявленими дефектами та їх виділенням на рис. 4.13.

```
Виберіть еталонне зображення  
Виберіть тестове зображення  
Індекс структурної подібності: 0.9975216732092389  
Загальна кількість дефектів на зображенні: 5
```

Рисунок 4.12 – Результати виявлення дефектів та розрахунок ІСПІ у терміналі для перемичок

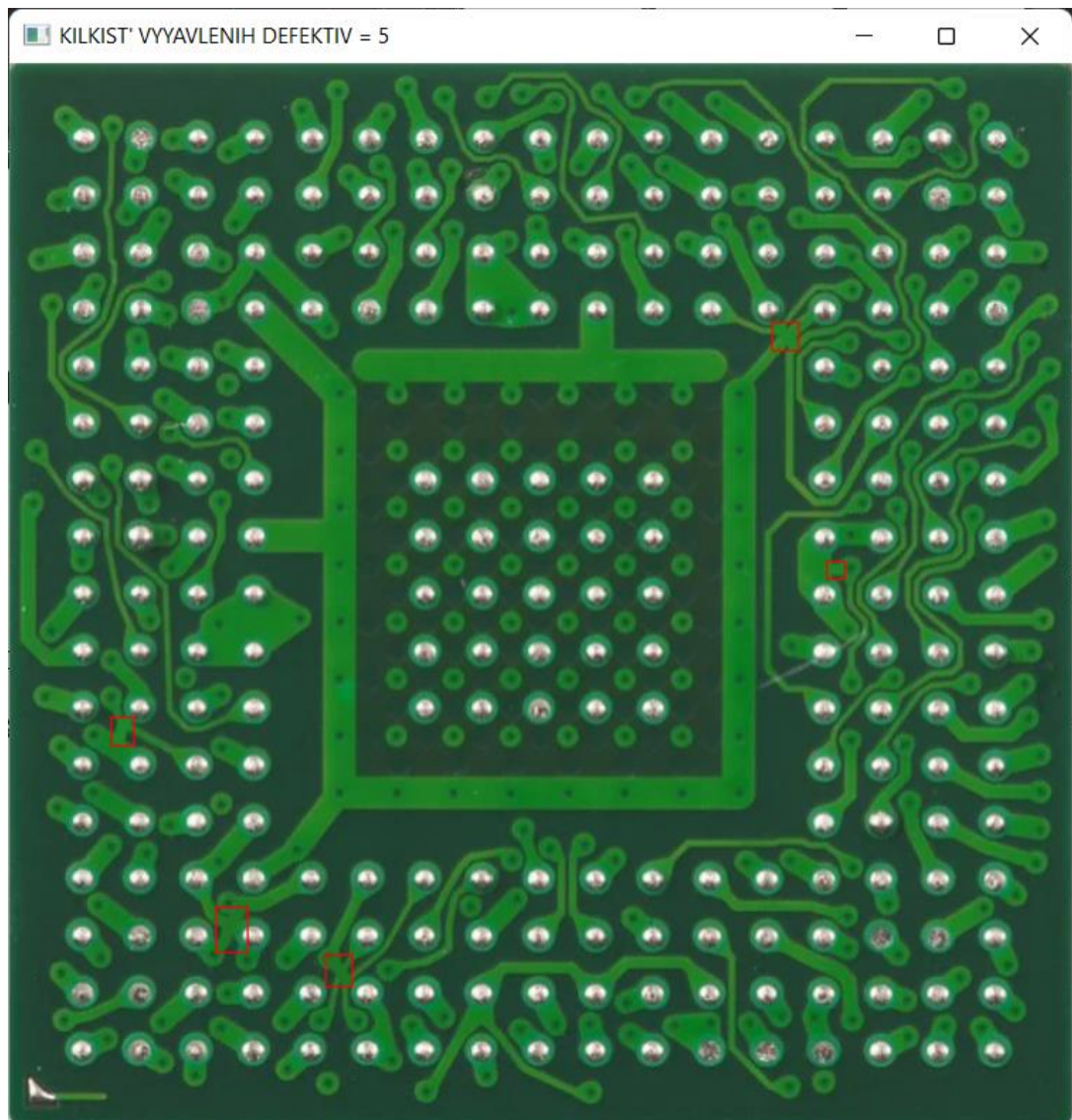


Рисунок 4.13 – Зображення з виявленими дефектами для перемичок

Наступним видом дефектів є часткове оплавлення. Для цього типу дефекту було отримано наступні параметри у терміналі (рис. 4.14). Також отримано зображення з виявленими дефектами та їх виділенням на рис. 4.15.

```
Виберіть еталонне зображення  
Виберіть тестове зображення  
Індекс структурної подібності: 0.9980847273044547  
Загальна кількість дефектів на зображенні: 4
```

Рисунок 4.14 – Результати виявлення дефектів та розрахунок ІСП у терміналі  
для часткового оплавлення

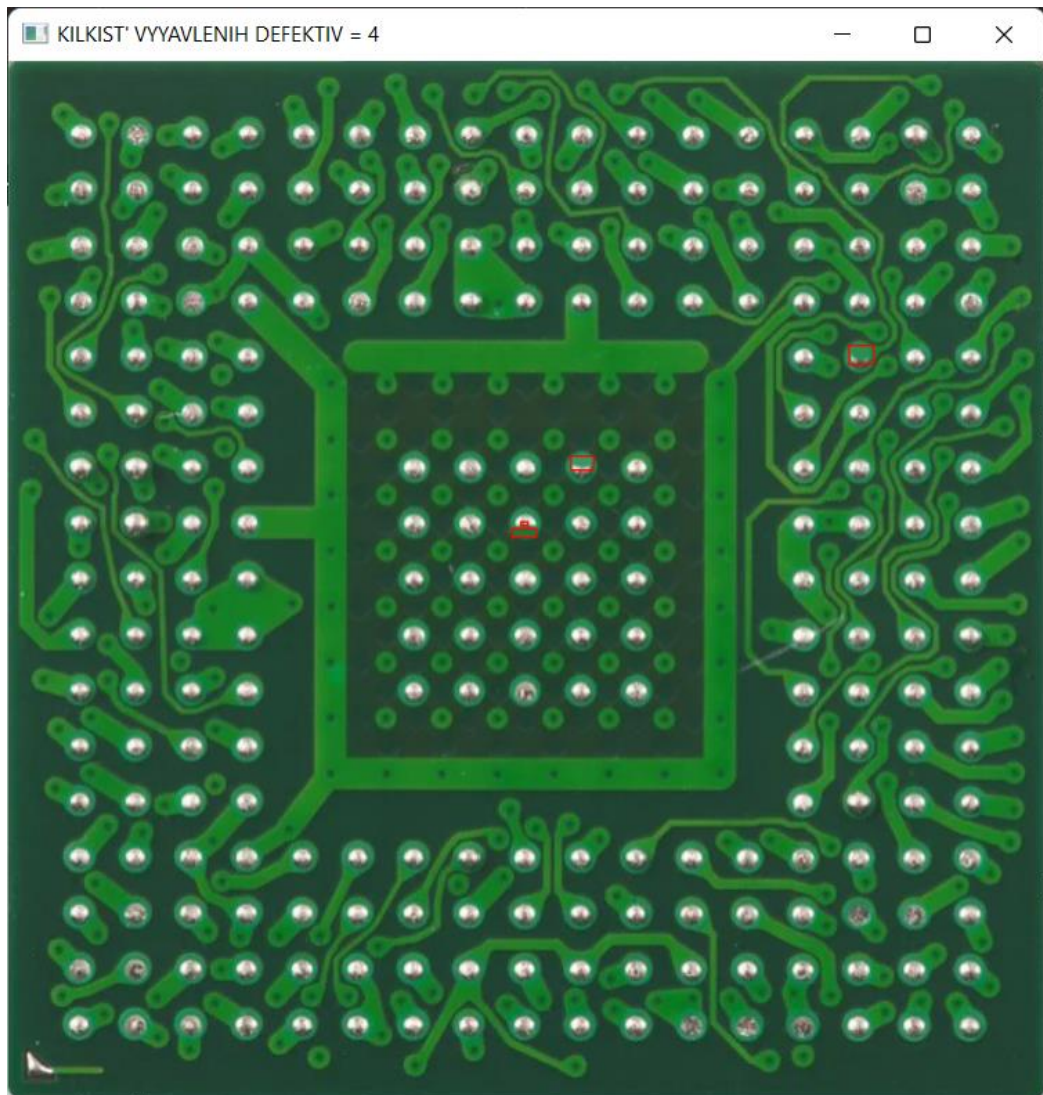


Рисунок 4.15 – Зображення з виявленими дефектами для часткового  
оплавлення

Також видом дефектів є попкорн. Для цього типу дефекту було отримано наступні параметри у терміналі (рис. 4.16). Також отримано зображення з виявленими дефектами та їх виділенням на рис. 4.17.

```
Виберіть еталонне зображення  
Виберіть тестове зображення  
Індекс структурної подібності: 0.9977079024788765  
Загальна кількість дефектів на зображенні: 2
```

Рисунок 4.16 – Результати виявлення дефектів та розрахунок ІСП у терміналі для попкорну

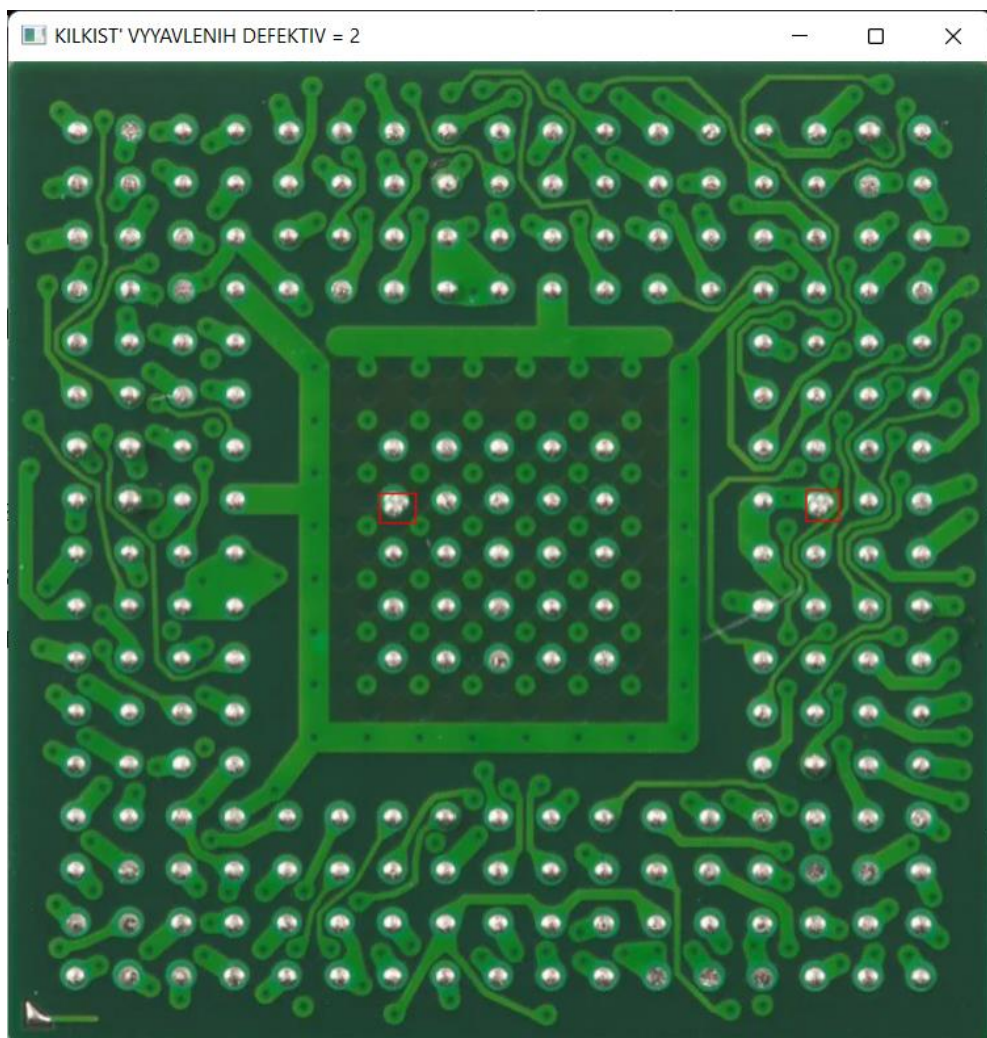


Рисунок 4.17 – Зображення з виявленими дефектами для попкорну

Ще одним з видів дефектів є розімкнуті ланцюги. Для цього типу дефекту було отримано наступні параметри у терміналі (рис. 4.18). Також отримано зображення з виявленими дефектами та їх виділенням на рис. 4.19.

```
Виберіть еталонне зображення  
Виберіть тестове зображення  
Індекс структурної подібності: 0.9977059460440619  
Загальна кількість дефектів на зображенні: 5
```

Рисунок 4.18 – Результати виявлення дефектів та розрахунок ІСП у терміналі для розімкнутих ланцюгів

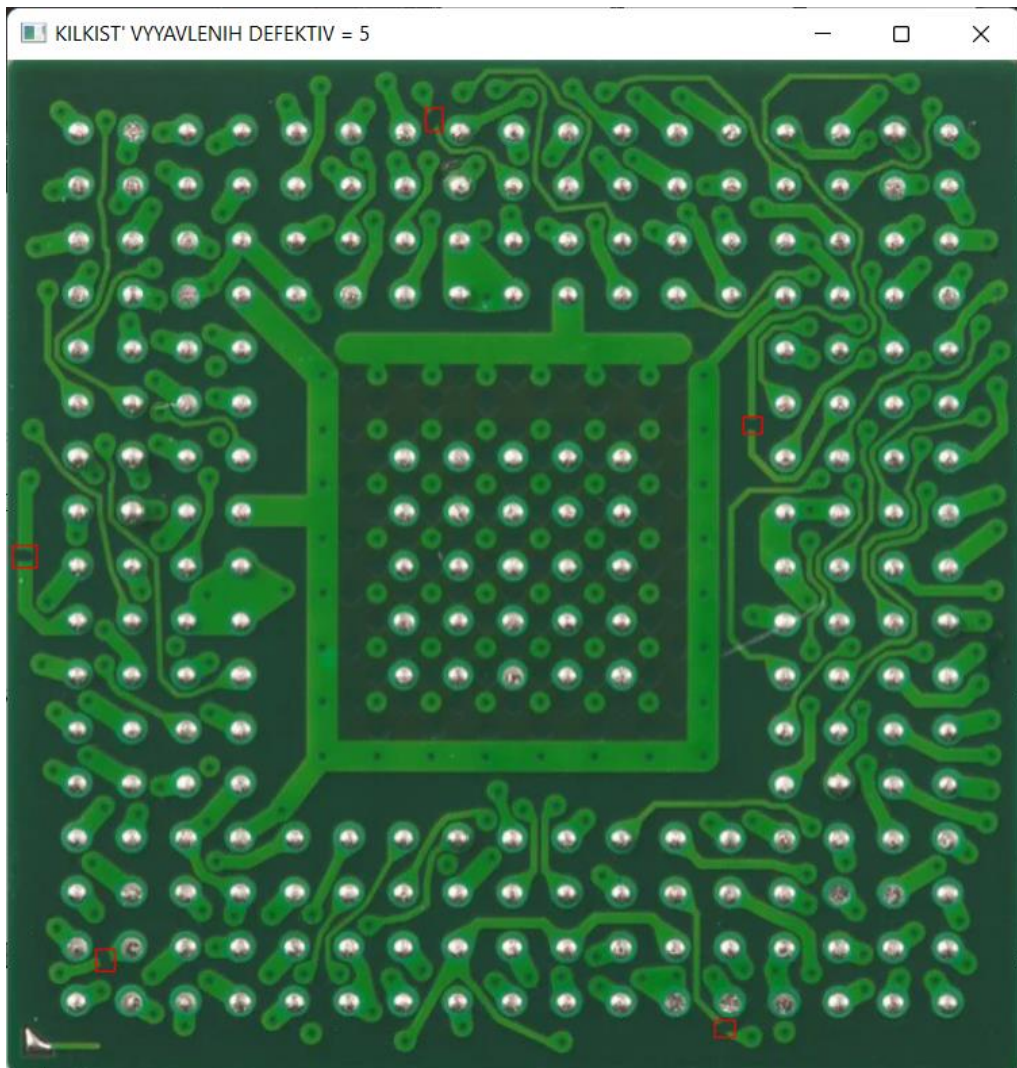


Рисунок 4.19 – Зображення з виявленими дефектами для розімкнутих ланцюгів

Останнім з видів дефектів є порожнеча. Для цього типу дефекту було отримано наступні параметри у терміналі (рис. 4.20). Також отримано зображення з виявленими дефектами та їх виділенням на рис. 4.21.

```
Виберіть еталонне зображення  
Виберіть тестове зображення  
Індекс структурної подібності: 0.9938617109457656  
Загальна кількість дефектів на зображенні: 3
```

Рисунок 4.20 – Результати виявлення дефектів та розрахунок ІСП у терміналі для порожнечі

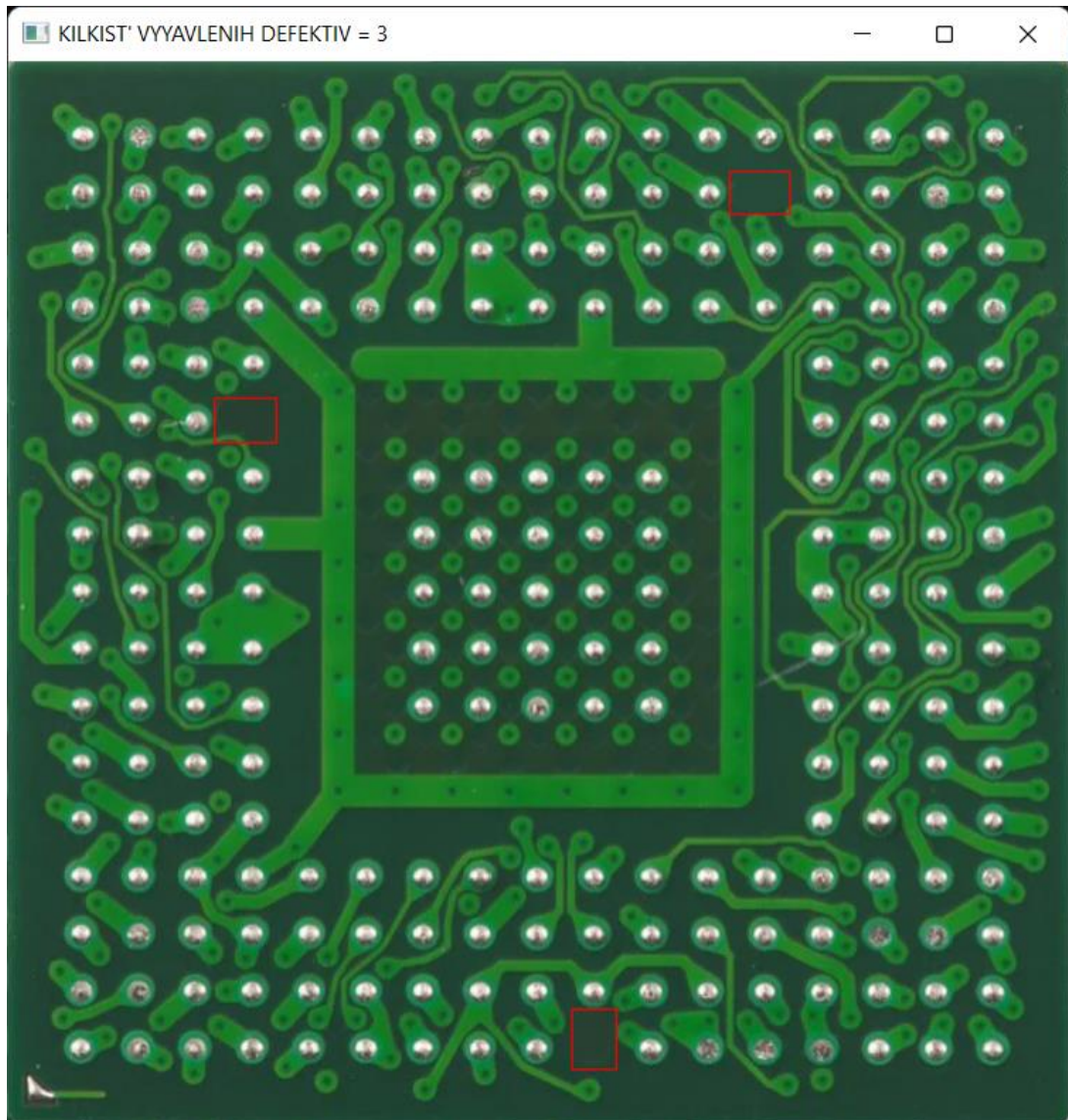


Рисунок 4.21 – Зображення з виявленими дефектами для порожнечі

Також було перевірено, коли розбіжність у BGA-компонентах є досить високою. Для цього було завантажено зображення з великою кількістю дефектів різного типу (рис. 4.22), було отримано ІСП (рис. 4.23), а також зображення з виявленими дефектами (рис. 4.24).

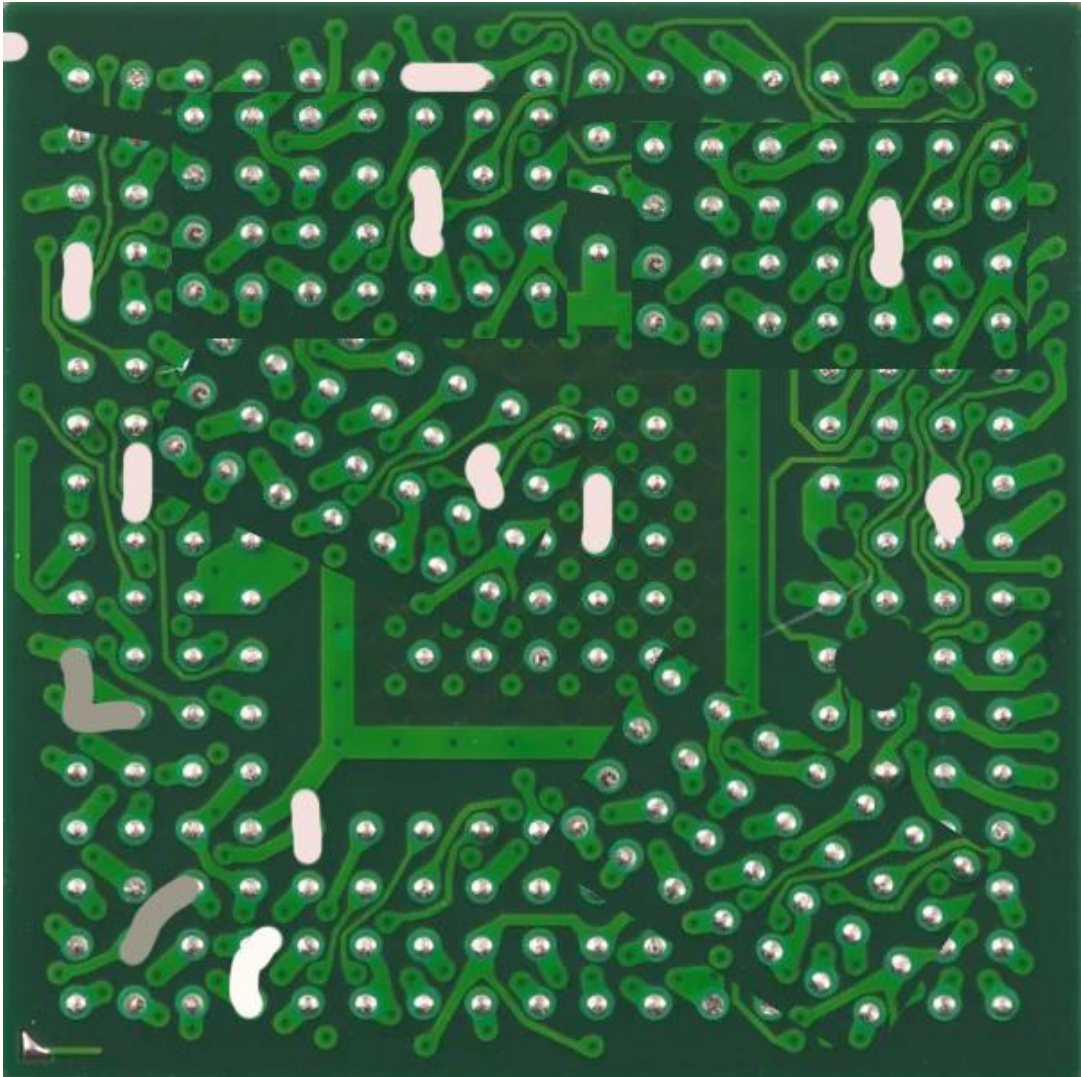


Рисунок 4.22 – Зображення з великою кількістю дефектів

```
Виберіть еталонне зображення  
Виберіть тестове зображення  
Індекс структурної подібності: 0.693638370088826  
Загальна кількість дефектів на зображенні: 17
```

Рисунок 4.23 – Результати виявлення великої кількості дефектів та розрахунок ІСП у терміналі



Рисунок 4.24 – Зображення з виявленою великою кількістю дефектів

### 4.3 Висновки до розділу 4

В ході виконання 4 розділу було проведено експериментальні дослідження з розробленим програмним засобом з різними типами дефектів BGA-компонентів. При індексі структурної подібності нижче ніж 0.98 (98% подібності) потрібно відносити такі BGA-компоненти до неякісних і не допускати їх виробництво.

## ВИСНОВКИ

В ході написання пояснювальної записки було проведено наступне дослідження:

- розроблено конструкцію посадкового місця BGA-кульки;
- проведено розрахунок висоти паяного з'єднання;
- розраховано висоту припою при складанні BGA-компонентів;
- проведено розрахунок напруги відшаровування BGA-компонентів.

Також можна зробити висновок що ніякі пружні деформації не можуть виникнути, якщо межа плинності матеріалу припою дорівнює або перевищує передбачене значення пружної напруги.

Було виділено ключові моменти процесу збирання компонентів BGA за технологією поверхневого монтажу і виявлено, що для автоматизації процесу потрібно після рентгенологічного дослідження використовувати візуальний контроль BGA-компонентів для остаточної інспекції.

В результаті написання 3 розділу було створено програмний засіб для автоматизованої системи контролю технологічного процесу складання BGA-компонентів, а саме виявлення дефектів при їх створенні та складанні.

Проведена робота забезпечує більш просте та багатообіцяюче середовище, яке можуть використовувати як висококваліфіковані, так і низькокваліфіковані робітники, які практично не мають знань у галузі виявлення дефектів друкованих плат та BGA-компонентів. Крім того, програмний засіб забезпечує дуже зручне використання та обслуговування, а також високу точність виявлення дефектів. Таким чином, зведення до мінімуму людських та машинних помилок та внесення цінного позитивного внеску у створення відмінних ринкових продуктів.

В ході виконання 4 розділу було проведено експериментальні дослідження з розробленим програмним засобом з різними типами дефектів BGA-компонентів. При індексі структурної подібності нижче ніж 0.98 (98%

подібності) потрібно відносити такі BGA-компоненти до неякісних і не допускати їх виробництво.

Фактично більшість дефектів корпусних мікросхем BGA також можна виявити за допомогою оптичних підходів.

Також було вирішено наступні завдання:

- проведено аналіз процесу збирання друкованих плат та BGA-компонентів;

- проведено дослідження та розрахунок параметрів процесу складання BGA-компонентів;

- розроблено автоматизовану систему контролю технологічного процесу складання BGA-компонентів;

- проведено експериментальні дослідження з програмним засобом автоматизованої системи контролю технологічного процесу складання BGA-компонентів;

- розглянуто питання охорони праці.

В майбутньому можна вдосконалити цю систему, використовуючи мікроскоп для отримання зображення у реальному часі та порівняння його з зображенням з бази даних, а також додати використання штучних нейронних мереж для розпізнавання.

## 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. Безкорвайний, 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. PCB Assembly Process [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.7pcb.com/PCB-Assembly-Process>

4. Formentini Giovanni Design for manufacturing and assembly methods in the product development process of mechanical products: a systematic literature review / Giovanni Formentini, Núria Boix Rodríguez, Claudio Favi // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2022, pp 4307-4334.

5. Favi, Claudio Design for Manufacturing and Assembly: A Method for Rules Classification / Claudio Favi, Marco Mandolini, Federico Campi, Paolo Cicconi, Roberto Raffaeli, Michele Germani // Proceedings of the International Joint Conference on Mechanics, Design Engineering & Advanced Manufacturing, 2020 pp. 354-359.

6. Faraj Karrar S. Printed Circuit Board Manufacturing / Karrar S. Faraj, Fadi Marouki // Al-Israa University College, 2020, 9 p.

7. PCB Manufacturing (Fabrication) [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.indiamart.com/proddetail/pcb-manufacturing-fabrication-19411925188.html>.

8. Mani, Annapoorni. Markov Decision Process approach in the estimation of raw material quality in incoming inspection process / . Annapoorni Mani, Shahrman Abu Bakar, Pranesh Krishnan, Sazali Yaacob // Journal of Physics: Conference Series, 2021, 8 p.

9. Incoming Inspection of Finished PCB [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://www.allpcb.com/incoming\\_inspect\\_finished\\_pcb.html](https://www.allpcb.com/incoming_inspect_finished_pcb.html).

10. Mansor, Nur Effect of Temperature on Solder Paste During Surface Mount Technology Printing / Nur Mansor, Aziz Abdul, Sharizal Mohd, та ін. // Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences, 2020, 99-107.

11. Purwanto, R. Optimization of printed circuit board components placement / R. Purwanto, Sulistyono, E. Mandayatma // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2021, 4 p.

12. Component placement process [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.surfacemountprocess.com/component-placement-process.html>.

13. Rasbudin Jaya I The effect of multiple reflow on intermetallic layer of Sn-4.0AgCu/Cu by using microwave and reflow soldering / Jaya I Rasbudin, M.A. Rabiatul, Saliza Azlina Osman // IOP Conference Series Materials Science and Engineering, 2017, 6 p.

14. Roberts, Alexandra. An Overview of 3D X-ray Reconstruction Algorithms for PCB Inspection / Alexandra Roberts, John True, Nathan Jessurun, Navid Asadizanjani / International Symposium for Testing and Failure Analysis, 2020, 5 p.

15. How PCB X-ray inspection influences quality control in PCB manufacturing [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://hillmancurtis.com/pcb-x-ray-inspectionю>

16. Abdul Aziz. Influence of printed circuit board thickness in wave soldering. Scientia Iranica / Aziz Abdul, Sharizal Mohd, M.Z. Abdullah та ін. // Scientia Iranica 24(6), 2017, 13 p.

17. Lau, John Soldering Processes / John Lau, Ning-Cheng Lee // Assembly and Reliability of Lead-Free Solder Joints, 2020, pp.137-216.

18. Asadizanjani, Navid. Physical Inspection of Printed Circuit Boards / Navid Asadizanjani, Mir Rahman, Mark Tehranipoor // Physical Assurance, 2021 pp.67-99.

19. Mukhopadhyay, Abhishek. PCB Inspection in the Context of Smart Manufacturing / Mukhopadhyay, Abhishek & L R D, Murthy & Arora, Manish & Chakrabarti, Amaresh & Mukherjee, Imon & Biswas, Pradipta. // Proceedings of ICoRD Volume 1, 2019 pp 655-663.

20. PCB assembly inspection and testing procedures overview [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://rushpcb.com/pcb-assembly-inspection-and-testing-procedures-overview/>

21. Nevlyudov, I. Design of multiprobe devices for electronic components with ball leads testing / I. Nevlyudov, I. Zharikova, V. Palagin, E. Razumov-Frizyuk, *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*, 2016, pp. 15-20.

22. Ball Grid Array, BGA [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [https://www.electronics-notes.com/articles/electronic\\_components/surface-mount-technology-smd-smt/ball-grid-array-bga.php](https://www.electronics-notes.com/articles/electronic_components/surface-mount-technology-smd-smt/ball-grid-array-bga.php).

23. What is the assembly process of the BGA surface mount technology? [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://hillmancurtis.com/bga-assembly>.

24. Akdeniz, Ceren Detection of BGA solder defects from X-ray images using deep neural network / Ceren Akdeniz, Zümray Dokur, Tamer Ölmez // *Turkish journal of electrical engineering & computer sciences*, vol. 28, 2021, pp. 2020-2029.

25. Huang Chien-Yi. Developing a Machine Vision Inspection System for Electronics Failure Analysis / Chien-Yi Huang, Jyun-Hong Hong // *IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology PP (99)*, 2019, pp. 1912-1925.

26. Інструкція з охорони праці при проведенні паяльних робіт [Електронний ресурс] / Режим доступу: [http://kyrator.com.ua/index.php?option=com\\_content&view=article&id=924:nstrukcja-pri-provedenn-payalnih-robt&catid=38&Itemid=148](http://kyrator.com.ua/index.php?option=com_content&view=article&id=924:nstrukcja-pri-provedenn-payalnih-robt&catid=38&Itemid=148).

27. Ball grid array inspection techniques [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.mclpcb.com/blog/ball-grid-array-inspection>.