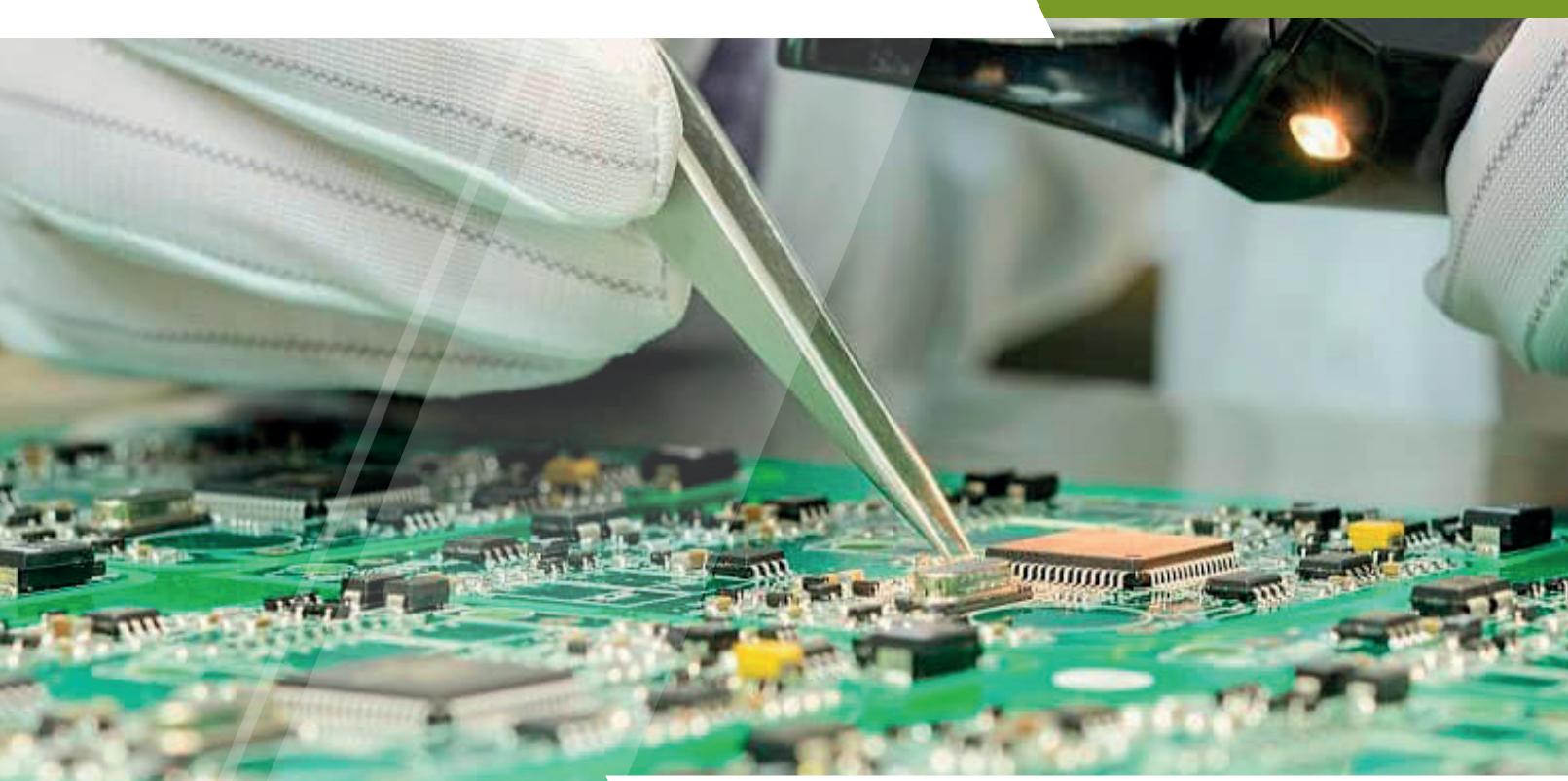


**4 (20) | РАДИОЭЛЕКТРОННАЯ ОТРАСЛЬ:
2025 | ПРОБЛЕМЫ И ИХ РЕШЕНИЯ**



НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

**РАЗРАБОТКА, ПРОИЗВОДСТВО, ИСПЫТАНИЯ
СТАНДАРТИЗАЦИЯ, СЕРТИФИКАЦИЯ, МЕТРОЛОГИЯ**



УДК 658.56; 621.3

ОБЗОР И АНАЛИЗ МЕТОДОВ АВТОМАТИЧЕСКОГО ОПТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ
КАЧЕСТВА ИЗДЕЛИЙ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ

REVIEW AND ANALYSIS OF METHODS FOR AUTOMATIC OPTICAL QUALITY CONTROL
OF ELECTRONIC PRODUCTS

Дормидошина Д.А., заместитель генерального директора, эксперт по стандартизации,
АО «ЦКБ «Дейтон», +7 (925) 104-77-96, dormidoshina@deyton.ru,
Рубцов Ю.В., генеральный директор, эксперт по стандартизации,
АО «ЦКБ «Дейтон», +7 (926) 009-37-00, rubtsov@deyton.ru

Dormidoshina D.A. Deputy General Director, Standardization Expert,
JSC CKB Deiton, +7 (925) 104-77-96, dormidoshina@deyton.ru,
Rubtsov Yu.V., General Director, Standardization Expert, JSC CKB Deiton,
+7 (926) 009-37-00, rubtsov@deyton.ru

Аннотация: электронная промышленность является одной из самых быстроразвивающихся, инновационных и наиболее конкурентоспособных отраслей. С целью обеспечения высоких требований к изделиям электронной компонентной базы, система контроля качества должна быть на высоком уровне. Автоматический оптический контроль является одним из неразрушающих методов, используемых в системах контроля качества продукции. Этот метод считается надежным и может заменить инспекторов-людей, оценка качества которых субъективна и не всегда соответствует истинному положению дел.

Система автоматизированного оптического контроля состоит из аппаратных и программных средств. Датчики изображения и подсветки в составе аппаратной части отвечают за получение изображения, в то время как программная часть выполняет извлечение особенностей полученных изображений и их классификацию на наличие дефектов на поверхности изделий. С помощью сортировочного механизма можно отделить бракованную продукцию от годной.

В данной статье представлен всесторонний обзор результатов исследований, разработки и применения систем автоматизированного оптического контроля качества электронной компонентной базы, используемой в радиоэлектронной аппаратуре. Рассмотрены дефекты изделий.

Алгоритмы контроля, используемые для обнаружения дефектов, обсуждаются с точки зрения обработки изображений, извлечения признаков и использования инструментов классификации. Статья завершается выделением современных тенденций и возможных будущих направлений исследований.

Annotation: the electronics industry is one of the fastest growing, most innovative and most competitive industries. In order to ensure high requirements for electronic component base products, the quality control system must be at a high level. Automatic optical testing is one of the non-destructive methods used in product quality control systems. This method is considered reliable and can replace human inspectors, whose quality assessment is subjective and does not always correspond to the true state of affairs. The automated optical testing system consists of hardware and software. Image and backlight sensors in the hardware are responsible for obtaining images, while the software extracts features of the obtained images and classifies them for defects on the surface of products. Using a sorting mechanism, it is possible to separate defective products from good ones. This article presents a comprehensive review of the results of research, development and application of automated optical quality control systems for electronic component base used in electronic equipment. Product defects are considered. The control algorithms used to detect defects are discussed in terms of image processing, feature extraction and the use of classification tools. The article concludes by highlighting current trends and possible future directions for research.

Ключевые слова: автоматический оптический контроль, алгоритмы классификации, электронная компонентная база, извлечение признаков, обработка изображений, камера изображения, машинное обучение, компьютерное зрение.

Keywords: automatic optical inspection, classification algorithms, electronic component base, feature extraction, image processing, image camera, machine learning, computer vision.

Научная специальность: 2.2.9. Проектирование и технология приборостроения и радиоэлектронной аппаратуры.

Введение

Несвоевременно обнаруженные дефекты увеличивают затраты и ухудшают производственные процессы [1]. Своевременное и точное обнаружение дефектов помогает предприятиям обеспечивать стабильность, поддерживать конкурентное преимущество [2]. В настоящее время используется несколько методов контроля качества, таких как ультразвуковая инспекция, система электромагнитного контроля, испытание с проникающим красителем, термография, рентгеновская инспекция, тестирование электрических цепей, оптическая инспекция. Они помогают оценить качество продукции с целью достижения 100 % годности. Большинство из этих методов считаются неразрушающими, каждый из которых имеет свои преимущества и недостатки:

1. Система ультразвукового контроля.

Состоит из нескольких функциональных блоков – таких как генератор импульсов, приемник, передатчик и устройство визуального контроля. Ультразвуковой контроль использует электрическое напряжение, создаваемое генератором импульсов, для активации передатчика. Передатчик генерирует звуковые сигналы на частотах, выходящих за пределы человеческого слуха (более 20 кГц), для оценки некоторых свойств проверяемого изделия путем анализа переданных или принятых сигналов, обнаруженных приемником [3]. Обладает высокой скоростью сканирования, хорошим разрешением и способностью обнаружения дефектов. Подходит для использования в испытательных условиях и на сборочной линии, где один и тот же типономинал изделия испытывается многократно [4]. Для проведения работ необходимо выровнять сигналы, которые относятся к материалам разной толщины. Для точного сканирования детали требуется высокая квалификация. Существует необходимость изготовления тестового образца для обеспечения точного тестирования.

2. Система электромагнитного контроля.

Конструкция состоит из магнитной катушки, которая индуцирует магнитное поле, и электромагнитных датчиков. Взаимодействие между подвергаемым магнитным полем и проверяемым компонентом индуцирует вихревой ток, который измеряется с помощью электромагнитных датчиков [5, 6]. Система электромагнитного контроля обладает высокой чувствительностью к проводимости материалов изделия. Простая и удобная в реализации. Проверка может быть реализована без прямого физического контакта между датчиком и проверяемым компонентом. Полученный электрический сигнал низкий; таким образом, требуются чувствительные и точные электромагнитные датчики, и в целом измерительные приборы для улучшения отношения сигнал/шум. Скорость сканирования должна быть увеличена при инспекции изделий с большой площадью (например, печатные платы). Инспекция ограничена проводящими



Дормидошина Д.А. Ю.В. Рубцов

ми материалами (ферромагнитными или неферромагнитными) [7, 8].

3. Инспекция проникающими красителями.

Цветная жидкая пенетрантная (вещество со специальным химическим составом, используемое при проведении капиллярного метода неразрушающего контроля) жидкость наносится на проверяемую поверхность для обнаружения дефектов. Для выделения дефектных элементов на проверяемой поверхности используется источник света. Подходит для выявления дефектов поверхности, таких как трещины. Считается простым и недорогим методом. «Пенетрантная» относится к капиллярному методу неразрушающего контроля, в котором используется специальное вещество (пенетрант), проникающее в открытые дефекты на поверхности изделия для их выявления. Этот метод был предметом исследований до 90-х годов, но никаких дальнейших значительных разработок не было опубликовано с тех пор. Капиллярность и вязкость жидкости, используемой для проверки, могут влиять на точность этого метода [9]. Требует вмешательства человека-инспектора.

4. Термография.

Тепловой датчик используется для измерения инфракрасного излучения от проверяемого компонента и преобразования потока излучения в температуру. Распределение температуры может быть затем проиллюстрировано в виде тепловых изображений. Подходит для поверхностных и внутренних инспекций, а также для обнаружения пустот и трещин. Тепловой шум может повлиять на точность результатов. Возможность обнаружения внутренних дефектов ограничена определенным диапазоном контроля. Могут возникнуть проблемы с перегревом [10].

5. Система рентгеновского контроля.

Состоит из трех компонентов: источника рентгеновского излучения (трубки), детектора рентгеновского излучения и приспособления для удержания и контроля положения проверяемого изделия. Передача рентгеновского излучения источником через изделие, приемник получает переданную энергию. По переданной энергии можно оценить внутреннее состояние проверяемого изделия. Подходит для поверхностных и внутренних инспекций, а также для обнаружения пустот и трещин. Методы могут быть разрушительными, нарушить функциональность изделия. Низкое разрешение на микроуровневом кон-

троле. Длительное время обработки [10].

6. Тестирования электрических цепей с помощью зондов.

Метод широко используется для контроля полупроводниковых структур путем создания временного электрического контакта между испытательным оборудованием и каждым отдельным контактом на кристалле в составе пластины или раздельно для определения состояния кристалла (дефектный или не дефектный). Основные компоненты системы тестирования цепей зондов включают зонды, зондовые карты, зондовые станции и измерительное оборудование.

вание. Является самым простым и прямым методом тестирования кристаллов. Считается разрушающим испытанием. Могут возникнуть ошибки зондирования, которые приводят к тому, что исправные кристаллы становятся дефектными [11].

7. Оптическая инспекция.

Позволяет обнаруживать поверхностные изъяны и дефекты в соответствии со зрительным восприятием человека. Выполняется с использованием ручного осмотра, микроскопов и автоматической оптической инспекции (далее – АОИ). Структурная схема типовой АОИ показана на рис. 1.

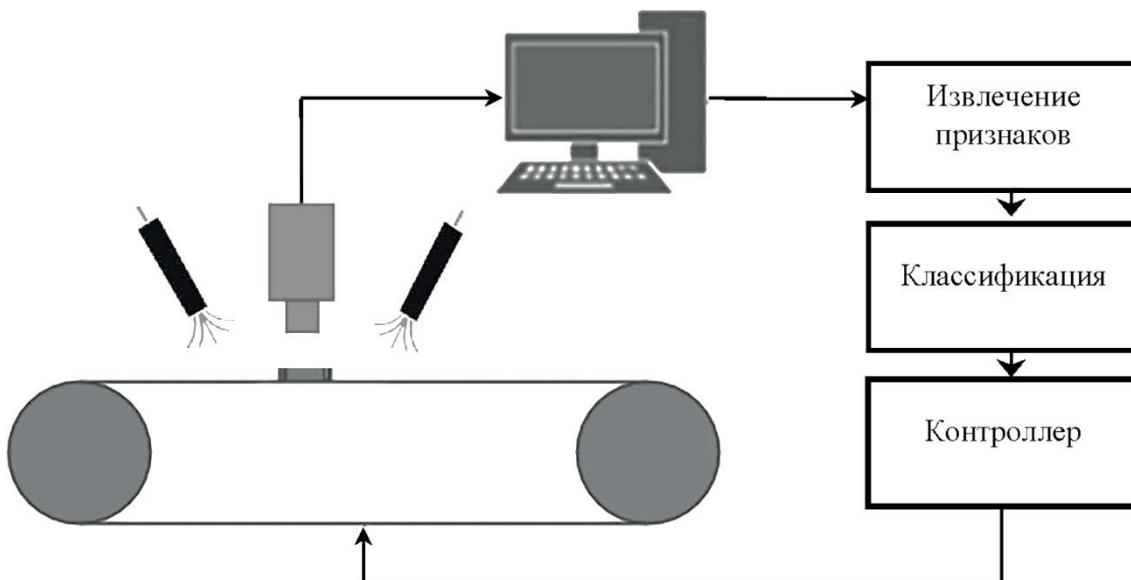


Рис.1. Структурная схема типовой АОИ

В АОИ собранные изображения проходят некоторые этапы улучшения (предобработки) перед применением. Затем используются методы извлечения и выбора признаков для сегментации дефектных областей и обнаружения важных дефектных характеристик. Следующий этап заключается в предоставлении обработанной информации алгоритму классификации, как показано на рис. 1.

Для завершения цикла АОИ некоторые исследователи и разработчики рассмотрели возможность создания механизма сортировки для разделения продуктов на различные категории качества (например, брак или дефект, не являющийся браком, годные), как показано на рис.1. Для этого используется контроллер, который отправляет команду (в соответствии с решением, полученным от алгоритма инспекции) системе сортировки, состоящей из манипуляторов отбора, или конвейерной ленты.

Среди рассмотренных методов АОИ является одной из самых распространенных процедур, используемых в промышленности [3]. Однако, неэффективен для внутренних дефектов. Ручной оптический контроль считается дорогостоящим и может вызывать усталость у инспектора-человека и допущение ошибок. АОИ – это оптимально используемый тип

среди всех решений к контролю качества. Считается бесконтактным и неразрушающим. Обнаруживает поверхностные дефекты и изъяны. АОИ может сэкономить время и повысить точность обнаружения.

1 Общая характеристика оптических методов контроля качества изделий электронной техники

Оптические методы контроля качества изделий электронной техники (далее – ИЭТ) можно подразделить на ручные (проводимые человеком-инспектором) и АОИ, которая выполняется с использованием компьютерного зрения (далее – КЗ). Эффективное объединение технологий захвата и обработки изображений в последние годы вызвали значительные изменения в АОИ по сравнению с ручной оптической инспекцией для мониторинга качества и неразрушающего контроля [3]. Автоматизация процесса мониторинга и контроля качества приведет к значительным приростам производительности в будущем. Стоит отметить, что ручная оптическая инспекция увеличивает время проверки и снижает точность. Авторы в [12, 13] также показали, что человеческое зрение снижается из-за скучной и бесконечной рутинной работы.

С другой стороны, современные устройства захвата изображения способны обнаруживать ми-

кродефекты и признаки с низкой интенсивностью и контрастом, которые даже самые опытные специалисты-инспекторы не могут обнаружить. Недавние исследования также показали, что люди не могут справиться с определением цветовых дефектов, так как цвет является психологическим восприятием, даже если он вызван физическим излучением.

Автоматизированные системы захвата данных с помощью КЗ проложили путь для масштабных наблюдений, помогая собирать статистически значимую информацию для методов анализа и обеспечения качества. Чен и Харлоу [13] в своей работе привели шесть причин производительности и эффективности для использования АОИ вместо ручной инспекции:

1. освобождение людей от скучной и рутинной работы;
2. экономия затрат на человеческий труд;
3. выполнение инспекции в неблагоприятной среде (производственные процессы изготовления ИЭТ могут быть шумными и токсичными);
4. снижение потребности в высококвалифицированных специалистах-инспекторах;
5. анализ статистики обнаружения дефектов и ведение записей для управления и принятия решений;
6. совмещение высокоскоростного производства ИЭТ с высокоскоростной инспекцией.

В дополнение к этому можно отметить расширение масштаба, объема, применения и технологий, которые предоставляют глубину, широту и множественные перспективы.

Алгоритмы АОИ были значительно улучшены за счет интеграции с методами машинного обучения (МО), что значительно повысило результаты и скорость процесса обнаружения [14, 15]. Тимм и Барт в [16] предложили, что алгоритм АОИ должен удовлетворять двум основным требованиям:

1. 100 % уровень обнаружения;
2. минимальный уровень ложных срабатываний.

Сверточные нейронные сети (далее – СНС) одни из распространенных алгоритмов МО, используемых в последнее время для целей инспекции [17]. Это связано с тем, что СНС специально предназначены для работы с изображениями. Более того, им не требуется выделение признаков или предобработка изображений. Таким образом, процессы предобработки и выделения признаков встроены в скрытые слои СНС.

Технологии АОИ в настоящее время используются во многих областях для инспекции, таких как пищевая промышленность [18], текстиль [19], строительство [17], металлы [20] и медицинские приложения [21].

Цель данного исследования заключается в том, чтобы рассмотреть и критически оценить результаты

исследований, посвященные системам АОИ и алгоритмам для обнаружения дефектов в электронной промышленности за последние два десятилетия. Стоит отметить, что эта обзорная статья предназначена для того, чтобы выделить текущие тенденции АОИ в электронной промышленности и помочь исследователям получить общее представление о современных разработках в этой области.

2 Применение автоматизированной оптической инспекции в электронной промышленности

Электроника является одной из наиболее быстро развивающихся, инновационных и конкурентоспособных отраслей [22]. Последние пять лет характеризовались ростом на развивающихся рынках и внедрением новых продуктов, что привело к тому, что больше людей стали покупать потребительскую электронику. Глобальная индустрия потребительской электроники по данным [23] в 2024 году оценивается в 1.214,11 млрд долларов США. Прогнозируется, что к 2030 году объем этого рынка достигнет 1.782,60 млрд долларов США, а среднегодовой темп роста (CAGR) в период с 2025 по 2030 год составит 6,6 %. Производство электроники включает в себя множество производственных процессов, от автоматизированных сборочных линий до испытаний и окончательной ручной сборки [24]. Размеры электронных продуктов становятся больше для домашних дисплейных устройств, таких как ЖК-телевизоры. Или размеры продуктов резко сокращаются для портативных или носимых устройств, таких как смартфоны и умные часы, в результате чего потребность в системе АОИ для различных размеров электронных продуктов не была исключением [25].

На самом деле проблемы, с которыми сталкивается электронная промышленность, гораздо более серьезны по сравнению с другими, поскольку ИЭТ и производственные планы быстро развиваются и имеют, как правило, короткие жизненные циклы [26]. Эти проблемы требуют изменения параметров этапов жизненного цикла изделий. Все эти изменения (независимо от того, являются ли они краткосрочными или долгосрочными) приводят к наличию брака в продукции и поэтому обеспечение качества и улучшение процессов являются очень важными в электронной промышленности.

Согласно исследованию Се и др. в [27], в электронной производственной отрасли дефект – это состояние, которое может быть недостаточным для обеспечения функциональности конечного продукта. Настоящие исследования установили, что АОИ в электронной промышленности широко используется в следующих направлениях:

1. применяемые материалы;
2. элементы ИЭТ, в том числе выводные рамки, корпуса;
3. полупроводниковые пластины, кристаллы,

- микросхемы и полупроводниковые приборы, резисторы, конденсаторы и другие изделия электронной компонентной базы (далее – ЭКБ);
4. печатные платы (далее – ПП), узлы и блоки радиоэлектронной аппаратуры (далее – РЭА).

В некоторых исследованиях рассматривалась АОИ для некоторых других изделий, применяемых в радиоэлектронике (крепеж и пр.).

Наибольшая концентрация исследований, рассмотренных в этой работе, была проведена в Тайване с процентом 41,84 %, за ним следует материковый Китай с 22,7 %, затем Южная Корея с 12,8 %. Это не вызывает удивления, так как, согласно отчету, в [28], большая часть мировых поставок ЭКБ производится в Азии. Более того, Азия теперь является основным конечным рынком для многих товаров электроники. Например, в 2018 году 40 % всех персональных компьютеров, проданных по всему миру, были проданы только в Китае. Согласно тому же отчету, экспорт электроники только из Тайваня составляет 45 % от общего объема экспорта страны, в то время как Китай и Южная Корея составляют по 35 % каждый. Средний показатель для общего экспорта электроники в Азии составляет 30 %.

Таким образом, объемы ИЭТ растут, за ними растут требования и номенклатура дефектов, которая нуждается в проведении АОИ.

3 Эволюция дефектов и результаты исследований по их обнаружению

В этом разделе оценивается историческая эволюция процесса перехода и перевода видимых дефектов, выявленных датчиками, в данные для автоматического извлечения признаков дефектов ИЭТ, классификации и оценки АОИ.

3.1. Дефекты светодиодов

Самыми массовыми в применении в настоящее время стали светодиоды (LED – Light-Emitting Diode). Соответственно, обеспечение их качества в части АОИ стали объектом внимания многих исследователей и производителей [29, 30]. LED используются в различных устройствах, включая мобильные телефоны, осветительное оборудование, автомобильные аксессуары и панели разных размеров [31]. В зависимости от применения число типов LED растет. Размеры LED уменьшаются, что увеличивает трудности их проверки [32]. В основном существуют два типа проверки: электрическая и оптическая инспекция.

Электрическая инспекция обеспечивает правильную работу, но поскольку обширный стресс-тест не может быть применен ко всем LED, дефекты, которые могут вызвать неисправность через некоторое время, не могут быть точно обнаружены [16]. Поэтому многие исследователи проводили исследования для обнаружения различных дефектов LED с использованием методов АОИ.

Фадзил и Вэнг в [33] были одними из первых исследователей, которые рассматривали дефекты LED с использованием АОИ. Результаты их исследований позволяли проверить поверхностные дефекты на корпусе LED, такие как загрязнение, царапины, пузыри и размытые дефекты. Дефекты такого рода нарушают внешний вид изделий, а также их функциональность и безопасность [34]. Они показали, что каждый тип дефекта имеет специальные характеристики, что позволяет эффективно обнаруживать их с помощью изображения.

Например, дефекты загрязнения (которые вызваны загрязненными формами или пылью) появляются как черные области внутри корпуса и легко различимы на равномерном фоне. С другой стороны, дефекты пузырьков (которые являются результатом неправильного контроля процесса отверждения) выглядят как маленькие черные круги или как небольшие кольца. Другие типы дефектов, вызванные различными отклонениями в процессе производства, проявляются в виде группы царапин.

Пернг и др. в [35] проводили исследование дефектов LED, возникающих в процессах корпусирования. Примеры этих дефектов включают обнаружения отсутствующих элементов, неправильную ориентацию и обратную полярность. Эти дефекты можно идентифицировать с помощью АОИ, преобразовав полученное изображение образца LED в бинарное изображение и изучив количество пикселей сегментированных областей, представляющих интересующие места на изображении.

Куо и др. в [36] проводили исследования для обнаружения инородных частиц в LED. Результаты исследований явились существенным шагом в направлениях развития АОИ.

Бюрген и др. в [37] проанализировали оптические свойства LED, проецируя их свет на экран и анализируя изображение полученной проекции. Оптические свойства, изученные в этой статье, включали интенсивность, средний цвет, цветовые вариации, угол обзора и смещение оптической оси. Для проведения исследования они соединяли последовательно два LED; один из них был эталонным (без дефектов), а другой – для испытаний, чтобы пропустить один и тот же электрический ток для обоих. Отраженный свет от обоих LED с экрана фиксировался датчиками изображения для дальнейшего анализа. Оптические свойства эталонного LED сравнивались с тем, что для тестирования. Один недостаток этого метода заключается в том, что в процессе тестирования свойства эталонного LED могут изменяться со временем и поэтому тестирование может быть ненадежным.

Другие исследователи рассматривали внутренние дефекты LED в областях кристаллов, где такие дефекты считаются трудными для обнаружения и требуют специального оборудования, такого как сканирующий электронный микроскоп.

Чанг и др. в [38] предложили АОИ для обнаружения дефектных кристаллов в четырехэлементной подложке, такая подложка состоит из более чем 8000 кристаллов, а физическая площадь кристаллов составляла около 200 мкм на 200 мкм. Изображение кристаллов делили на три области: область светового излучения, электрод и фон. Инспекция областей кристаллов проводилась геометрически и эвристически. В геометрической инспекции оценивались размеры кристаллов, ширина, высота, радиус электрода и центр электрода в зависимости от интенсивности излучения. В эвристической инспекции оценивались аномальные области на изображении, такие как пустые пиксели в области светового излучения.

Тимм и Барт в [39] следовали тому же пути в исследовании дефектов кристаллов в силовых LED. Они сосредоточили свое внимание на электроде кристалла и окружающей его области, где могут возникать дефекты разрывов и эрозии. Дефекты эрозии и разрывов приводят к критическим сбоям LED. Поскольку электроды представляют собой круговые области, были изучены радиально закодированные характеристики для поиска пиксельных интенсивностей, которые могут указывать на наличие дефекта. Кроме того, сложность этих дефектов, низкий контраст и сильный шум изображения делают решение достаточно сложным.

Лин в [34] исследовал дефекты от капель воды, возникающие из-за пара, образующегося в процессе производства. Как и в случае с дефектами корпусирования, такие виды дефектов ухудшают функциональность и безопасность. Процесс обнаружения дефекта от капель воды не является простым, так как капли воды имеют полупрозрачный вид и низкий контраст по отношению к поверхности кристалла. Более того, капли воды могут пересекаться с различными текстурами фона, что дополнительно усложняет обнаружение дефектов. Поэтому полученные изображения для этих дефектов были преобразованы в частотную область для извлечения характеристик дефектов.

Куо и др. в [40] рассматривали несколько дефектов LED, таких как царапины на светящейся зоне. Эти дефекты были проанализированы геометрически путем оценки площади и периметрических мер сегментированных областей, полученных из изображений.

Куо и др. в [41] исследовали дефекты LED в двух областях: области электрода и световой области, которые напрямую влияют на световую эффективность. Исследуемые дефекты в области электрода – это загрязнение, отсутствие элементов. В аналогичном исследовании Лин и др. в [42] изучали линии дефектов и царапины двух разных типов кристаллов.

Чжун и др. в [43] исследовали поликристаллические и фрагментарные дефекты кристаллов. Поликристаллические дефекты относятся к кристаллам LED, которые содержат часть другого кристалла

и, следовательно, больше обычных. Фрагментарные дефекты относятся к кристаллам, у которых отсутствует часть, и они меньше обычных кристаллов. Поликристаллические и фрагментарные кристаллы в основном вызваны неправильной резкой их при разделении. Полученные изображения этих дефектов были сегментированы на области. Интенсивности пикселей и геометрические характеристики анализировались на основании минимального охватывающего прямоугольника каждого фрагмента для извлечения дефектных характеристик.

Таким образом, вышеупомянутые результаты исследований можно обобщить и отнести к следующей АОИ дефектов:

1. на куполе корпуса LED, такие как загрязнения, царапины, а также в виде пятен [33];
2. микродефекты, занимающие 0,3 % от общей площади поверхности на прозрачном корпусе LED [44];
3. дефекты в изогнутых светодиодных линзах, на внешних поверхностях линз LED [38];
4. отсутствующий элемент, неправильная ориентация, перепутана полярность, дефекты поверхности [29, 35];
5. наличие посторонних частиц [36];
6. несоответствие параметров интенсивности, изменение цвета и расхождение оптической оси [37, 45];
7. геометрические дефекты кристалла и в области электрода [38, 46];
8. пустые точки в светоизлучающей области [34, 47];
9. дефекты кристаллов на пластине [48];
10. дефекты разрыва и эрозии в области электродов [39];
11. дефекты кристалла, в том числе: фрагментарные сколы, царапины, в том числе, и на контактных площадках [44];
12. дефекты кристалла, несоответствия параметрам интенсивности освещения [31];
13. поликристаллические и фрагментарные дефекты [43];
14. загрязнения, дефекты, не связанные с зондом [41].
15. линейные дефекты [42].

3.2 Дефекты полупроводниковых пластин

Прогресс в технологии и дизайне полупроводниковых приборов стал движущей силой успешного развития ИЭТ [49]. Большинство ЭКБ изготавливается с использованием полупроводниковых пластин [50]. Они состоят из кристаллов. Поэтому процесс изготовления является сложным, долгим и дорогим, включает в себя сотни химических этапов, которые должны проходить в чистой комнате, таких как окисление, фотолитография, травление, ионная имплантация и металлизация, и требует мониторинга большого количества ключевых параметров процес-

са [51, 52]. После процесса изготовления полупроводниковых пластин производится АОИ для каждого изготовленного кристалла. Для визуализации дефектных кристаллов на полупроводниковой пластине создается карта (далее – КПП). Она позволяет сравнить дефекты кристаллов с соседними и определить, сколько кристаллов визуально имеют дефекты, используя изображение карты [53]. КПП также называются картами бинов кристаллов, когда кристаллы представлены в бинарной форме, где дефектные кристаллы имеют логическое значение 1, а годные – логическое значение 0.

Обычно встречается три типа дефектов кристаллов: случайные дефекты, систематические дефекты и смешанные дефекты. Случайные дефекты возникают из-за случайных факторов производственной среды, таких как частицы в чистой комнате; они могут быть случайным образом разбросаны по всей поверхности кристалла. Такие дефекты являются долгосрочными и дорогими для исправления. С другой стороны, систематические дефекты обычно возникают из-за определяемой причины, такой как человеческая ошибка, частицы от оборудования или химическое загрязнение [54, 55]. Систематические дефекты обычно следуют определенному шаблону, например:

1. центральный шаблон с дефектами, сосредоточенными в центре КПП, обычно возникает при наличии ошибок химико-механической обработки;
2. шаблон кольца появляется вдоль края кристалла, когда происходит несоответствие между слоями; большинство дефектных кристаллов расположены вдоль края пластины и охватывает более четырех пятых ее периметра;
3. шаблон царапин (также известный как линейный шаблон), вызван агломерированными частицами, где большинство дефектных кристаллов на кристалле образуют линию, и длина линии составляет пять или более кристаллов;
4. шаблон выстрела вызван проблемой, когда одновременно тестируются несколько кристаллов для сокращения затрат на тестирование;
5. шаблон зоны в определенном месте на кристалле вызван неравномерной очисткой, где большинство дефектных кристаллов на кристалле имеют произвольную форму, а расстояние между центром кристалла и центром региона составляет более четырех кристаллов;
6. шаблон шахматной доски, генерируется из-за несоответствия маски во время литографического процесса.

Смешанные дефекты состоят из случайных дефектов и систематических дефектов на одной карте. Большинство КПП относятся к этому типу. Поэтому

важно отделять случайные и систематические дефекты на КПП, поскольку это может выявить проблемы. Поэтому важно обнаруживать и классифицировать эти дефекты, чтобы идентифицировать их причины и принимать соответствующие меры для повышения качества и выхода [51, 54, 56, 57].

После изготовления кристаллов на полупроводниковой пластине дефектные кристаллы могут быть обнаружены опытным инспектором. Однако, поскольку этот процесс может быть дорогостоящим и трудоемким, многие исследователи оценивали качество кристаллов с использованием АОИ [58]. Большинство АОИ, используемых в полупроводниковых пластинах, не требуют создания системы захвата изображения (например, камеры изображения и установки освещения). КПП создается на основе сканирования зондом. Однако некоторые исследования все же рассматривают создание системы захвата изображения для целей инспекции полупроводниковых пластин. Дефекты по результатам исследований обобщены и проанализированы согласно вышеописанной классификации:

1. кольцо, царапина, зона [59];
2. кольцо, царапина, случайные и новые дефекты [60];
3. систематические и случайные дефекты [61];
4. кольцо, царапина [62];
5. центральный, кольцо, царапины, случайные [63, 64];
6. множественные зоны, множественные царапины, смешанный узор кольца и зоны и смешанный узор кольца и царапины [65, 66];
7. царапины, деформации и локальные сбои [67, 68];
8. шахматная доска, кольцо, правый нижний край, составные и случайные дефекты [54];
9. кольцо, повторяющиеся и смешанные дефекты [69];
10. царапины, центр и край [70];
11. четверть кольца, вверх и влево, четверть кольца, вверх и вправо, краевые эффекты, кольцевые эффекты, полукольцо, вверх [71];
12. кольцо, полукольцо, выстрел и полукольцо [72];
13. криволинейные, кольцевые [73-78];
14. линейные и круговые дефекты [79];
15. центральный, полукольцо [80, 81];
16. случайный, кольцевой [82];
17. выстрел, кольцо, центральный [56];
18. центральный, кольцо [57, 49];
19. несколько шаблонов, включая кольцевые, шахматные и пять радиальных зон [83];
20. случайные, систематические и смешанные дефекты [84].

3.3 Дефекты монтажа изделий электронной техники на печатных платах

В последние годы требования к размещению ИЭТ

на ПП с более высокой плотностью возросли [85]. ИЭТ собираются на автоматических сборочных линиях, которые применяются в производстве массовых РЭА, таких как телевизоры, мобильные телефоны, цифровые камеры и т. д. Основные этапы монтажа следующие: нанесение паяльной пасты на ПП, размещение ИЭТ на ПП в правильных позициях и помещением ПП в печь для пайки ИЭТ [86]. В процессах такого производства могут возникать различные дефекты на этапах пайки и размещения ИЭТ.

Например, на этапе размещения могут возникать случаи отсутствующих, неправильных или дублированных ИЭТ. Что касается возможных дефектов пайки, большинство из них происходит после этапа повторной пайки, такие как дефекты пайки интегральных схем (далее – ИС) (псевдосоединение, избыток припоя, недостаток припоя, смещение припоя и мостиковые дефекты) и дефекты других ИЭТ (боковое, приподнятые компоненты, псевдосоединение, избыток припоя, недостаток припоя, смещение) [87].

Эти дефекты могут серьезно повлиять на функциональность узла РЭА. Например, отсутствие пайки или недостаточная пайка могут вызвать разомкнутое соединение, и, таким образом, общая функциональность цепи будет нарушена. Избыточная пайка может привести к мостикам с другими точками пайки, что может вызвать короткое замыкание. Псевдопайка считается сложным дефектом для обнаружения. Этот дефект возникает, когда места пайки кажутся соединенными. Однако, фактически соединения нет, что может привести к разомкнутому контакту. Псевдосоединение образуется, когда недостаточно тепла применяется для полного расплавления припоя.

Электрические тесты и ручная инспекции все еще используются; однако введение технологии поверхностного монтажа (SMT – Surface Mount Technology) в процесс сборки на ПП увеличивает вероятность возникновения ранее упомянутых дефектов и подчеркивает необходимость системы АОИ. На самом деле было доказано, что около 80 % дефектов при ручной инспекции пропускаются [88]. Поэтому многие исследователи изучали различные типы дефектов монтажа на ПП с использованием методов АОИ. Следовательно, АОИ для ПП была одной из начальных тем.

Чин и др. в [89] могут считаться одними из первых исследователей, использующих АОИ на ПП. Большинство опубликованных результатов исследований описывают дефекты монтажа ИЭТ на ПП с использованием АОИ, рассматривали паянные соединения и размещение ИЭТ с использованием SMT.

Имеются исследования, рассматривающие АОИ маркировки ИЭТ. При этом неправильная маркировка или положение при монтаже приведут к неправильному размещению ИЭТ на ПП [90].

Инспекция должна выявлять ошибки печати маркировки, такие как неразборчивые символы, отсут-

ствующие символы и перевернутая печать, которые часто происходят из-за неисправности оборудования [91, 92]. Типичная промышленная версия АОИ должна проверять около 7 тысяч ИЭТ в час, что подтверждает необходимость системы АОИ для выполнения задачи инспекции [91].

Когда большинство исследователей сосредоточились на инспекции паяных соединений SMT, Фонсека и др. в [93] исследовали паяные соединения технологии установки через отверстия (THT – Through-Hole Technology). Когда выводы изделий ЭКБ вставляются в сквозные отверстия в ПП и припаиваются к контактным площадкам на обратной или лицевой стороне. Паяные соединения в ТНТ имеют сильно отражающие металлические поверхности и, следовательно, являются очень сложным объектом для типичных АОИ [94].

Фонсека и др. провели четыре исследования для изучения дефектов пайки ТНТ. Три из этих исследований [95, 96] были сосредоточены на извлечении признаков и создании цветовых моделей для обнаружения площадок и паяных соединений. В то время как четвертое исследование [97] было продолжением, которое сосредоточилось на автоматической классификации качества пайки для мостиков, пустот в области сверления, пустот в области площадки и избыточной пайки на паяном соединении. По результатам их исследований, инспекция паяных соединений ТНТ должна проводиться в течение 6 секунд, чтобы соответствовать требованиям производства. Однако АОИ требует 8 секунд, что может повлиять на возможность быть реализованной в задаче АОИ при производстве ИЭТ.

Соединительные контакты, расположенные на краю ПП, которые позволяют подключать соседние ПП, были одной из проблем АОИ в исследованиях. Они могут быть изготовлены из золота в сочетании с никелем или медными материалами. Как и все другие части ПП, золотые соединительные контакты подвержены различным дефектам.

Цзян и др. в [98] рассмотрели 4 типа дефектов золотых соединительных контактов: потёртости, загрязнение оловом, оголённый никель и дефекты нанесения покрытия.

Цзян и др. в [99] исследовали покрытие оловом золотые соединительные контакты для АОИ. Цай и др. в [100] учитывали такие дефекты, как микропоры, оголение меди, а также заусенцы и шероховатости на поверхностях таких контактов ПП.

Подобным образом многие исследования рассматривали дефекты проводов ПП – это медные провода на ПП, которые отвечают за прохождение электрического тока. Ибрагим и Аль-Аттас в [101] провели одно из исследований, в котором рассмотрели эти типы дефектов. В своём исследовании они разделили дефекты, возникающие в этой области на две категории: функциональные и оптические дефекты.

Функциональные дефекты серьезно повреждают ПП, что означает, что ПП не функционирует должным образом. Визуальные дефекты не влияют на функциональность ПП в краткосрочной перспективе.

Однако в долгосрочной перспективе ПП не будет работать эффективно, так как неправильная форма ее дорожек может привести к потенциальным дефектам. В этом исследовании были рассмотрены четырнадцать типов функциональных и визуальных дефектов: отказ, короткое замыкание, малое отверстие, отверстие неправильного размера, разомкнутая цепь, малое расстояние, ложная медь, отсутствующий проводник, отсутствующее отверстие,

Подобно ПП, ИС в шариковых корпусах (BGA – Ball Grid Arrays) являются видом SMT, используемым в РЭА для монтажа ИС. Шарики ИС называются паяными, которые расположены в корпусе в сетчатом узоре. Корпуса BGA обычно размещаются на подобной сеточной структуре медных площадок на ПП. В отличие от традиционного метода монтажа, BGA использует нижнюю поверхность, а не периметр ИС для соединения. Таким образом, BGA предоставляет возможность увеличить количество контактов, сократить средние длины выводов и улучшить высокоскоростные характеристики. Однако поскольку размер паяных шариков уменьшается, а расстояние между паяными шариками сокращается, существует более высокая потребность в АОИ для размещения компонентов [102]. Поэтому многие исследователи рассмотрели возможность инспекции возникающих дефектов, которые могут возникнуть в процессе производства и размещения BGA. Ниже представлены обобщения результатов исследований, которые использовали систему АОИ для обнаружения дефектов в зависимости от элементов ПП и типов дефектов:

1. отсутствует припой [103-109];
2. недостаточный слой припоя [88, 104-118];
3. избыток припоя [88, 93, 103-116];
4. перемычки [103, 105, 106, 109, 117, 118];
5. дефекты паяльной пасты [119, 120, 121];
6. отсутствующее изделие на ПП [86, 122, 123, 124-126];
7. не то изделие [117, 118, 122, 125];
8. смещенное или повернутое изделие [103, 105, 106, 117, 118, 124, 125];
9. изделие при монтаже приподнято, неправильное размещение ИЭТ в вертикальной плоскости [103, 105, 109, 117, 118, 125];
10. неправильное размещение ИЭТ в горизонтальной плоскости [127-131];
11. дефекты поверхности ИС [132];
12. дефекты ИЭТ в части проверки общего качества перед монтажом на ПП [25, 86, 133];
13. дефекты сквозных отверстий [134, 135];
14. следы технологических процессов [101, 136-138];
15. дефекты маркировки [90-92, 126];

16. микродефекты [27, 138];
17. ошибки травления [139];
18. дефекты клея [126];
19. выравнивание флюсовой резки и проверка положения ПП [25, 140];
20. общие дефекты ПП [133, 141-143];
21. дефекты монтажа BGA [85, 102, 133, 144-152].

3.4 Другие дефекты

В предыдущих разделах рассматривались и обобщены результаты исследований по наиболее распространенным компонентам, подлежащим АОИ. Однако другие исследователи изучили определенные дефекты ЭКБ, которые не были широко исследованы.

Например, Ко и др. в [153] проверили четыре типа дефектов в модуле камеры на основе комплементарной металлооксидной полупроводниковой технологии (CMOS – Complementary Metal-Oxide-Semiconductor), именуемые черным и белым дефектом, тусклым дефектом, цветным дефектом и линиями дефектов. Их метод достиг общей точности инспекции 99,6 %. Однако для каждого типа инспектируемого дефекта они выбрали разные алгоритмы инспекции, что снижает эффективность их метода в обработке новых дефектов и увеличивают сложность и временные затраты. Более того, частицы в диапазоне 2-3 пикселя не были точно обнаружены.

Инфракрасный фильтр в CMOS в зарядосвязанных устройствах (CCD – Charge-Coupled Device) камер также является одним из исследованных компонентов в исследованиях. Инфракрасный фильтр предназначен для отражения или блокировки среднеинфракрасных длин волн, пропуская видимый свет. Он применяется во всех видах цветных камер и видеодевайсов, чтобы предотвратить проникновение инфракрасного света на чувствительный элемент изображения с целью запечатлеть изображения как можно ближе к тем, которые воспринимает человеческий глаз. Дефекты в этой части могут повлиять на качество изображения через феномен хроматической aberrации и избыточных объектов в изображении. Поэтому Лю и Ю в [154] предложили систему АОИ для исследования трех типов распространенных поверхностных дефектов в инфракрасном фильтре: пятно, царапина и трещина на краю. Пятно возникает из-за пыли в воздухе или контакта с грязными объектами. Процесс очистки и тестирования изображения с применением инфракрасного фильтра привел к выявлению царапин на поверхности в результате контакта с острыми предметами, такими как пинцеты.

Лин в [155, 156] рассматривали инспекцию дефектов «рябь» в поверхностном барьере слое чипов керамических конденсаторов. Существуют трудности в автоматической инспекции дефектов «рябь» из-за их полупрозрачного и неструктурированного внешнего вида, постепенных изменений уровня их интенсивности и низкой контрастности интенсивности между их поверхностями и грубой внешней ча-

стью чипа. Чтобы преодолеть эти трудности, образец изображения необходимо преобразовать в частотную область, чтобы захватить особенности дефектов.

Сун и др. в [157] рассматривали инспекцию четырех типов дефектов термопредохранителей – также известных как терморазмыкатели, которые являются значимыми компонентами в РЭА. Они предотвращают перегревание или перегрузку цепей. Хотя предохранители в целом позволяют прохождение тока, они могут разомкнуться, чтобы отключить питание от РЭА в качестве меры безопасности. Четыре проверенных дефекта в исследованиях являются дефектами на краях, черной точкой, малой головкой и обломками. Дефект на краях проявляется как зазубрина в области внешнего кольца корпуса предохранителя, он в основном возникает из-за использования неправильного материала для контактов. Этот дефект очень трудно обнаружить человеку-инспектору даже с помощью микроскопа. Дефект черной точки в основном вызван наличием посторонних материалов (например, грязи или пыли) во время сборки термопредохранителей. Дефекты малой головки возникают, когда во время процесса штамповки выводов не обеспечивается достаточная сила, что приводит к уменьшению диаметра головки термопредохранителя. Дефекты обломков возникают из-за откола стенки корпуса во время процесса гальванопластики.

Таким образом, обобщены различные дефекты ИЭТ, исследованные с помощью АОИ:

1. дефект черного и белого, дефект затуманивания, дефект цвета и дефекты линий в процессе производства модуля компактной камеры CMOS [153];
2. шесть основных дефектов сенсоров камер: сплошная белая точка, серые точки, ореол из белых пятен, дефект полосы, дефект люминесцентного излучения и сплошные белые пятна [158, 159];
3. дефекты, обнаруженные с помощью инфракрасного фильтра: такие как пятна, царапины и трещины на краю сенсора видеокамеры [154];
4. поверхностные дефекты в микромногослойных несферических линзовых модулях CMOS, такие как яркие пятна, темные пятна, царапины, инородные материалы и отверстия [154];
5. дефекты компактных камер, такие как пятна, светлые точки, царапины, ямки [160];
6. дефекты ряби в сколах поверхностного барьера слоя керамических конденсаторов [155, 156];
7. мелкие поверхностные дефекты в сколах поверхностного барьера слоя пассивных электронных компонентов [161];
8. поверхностные дефекты пленочных конденсаторов [162];
9. дефекты заусенцев, бликовых точек, малень-

ких головок и флагжков термопредохранителей [162];

10. наличие пятен на паяных соединениях [163-164].

Заключение

АОИ является важным шагом для минимизации дефектов продукции в различных отраслях и считается одним из самых простых и широко используемых подходов к обеспечению качества. Область АОИ обширна, поскольку охватывает широкий спектр тем, начиная от аппаратных решений для захвата изображений и заканчивая алгоритмами инспекции и принятия решений. По этой причине исследовательские возможности в этой области широко открыты и имеют потенциал для улучшения в ближайшем будущем.

Многие производители электроники интегрируют системы АОИ в свои производственные процессы, чтобы избежать дополнительных затрат на человеческих инспекторов и возможных ошибок. Большинство из этих производителей расположено в Азии.

В этом исследовании мы рассмотрели и проанализировали более 160 статей, которые описывают результаты исследований, в которых использованы системы АОИ для исследования различных дефектов в ИЭТ. В ходе нашего поиска соответствующих статей для обзора мы обнаружили, что системы АОИ широко используются в трех основных приложениях: дефектоскопия светодиодов, полупроводниковых пластин, ПП. Для каждого проверяемого компонента рассматривались различные типы дефектов. Дефекты полупроводниковых пластин обычно проверяются в соответствии с их отличительными дефектами. Дефекты пайки обычно проявляются в ПП. С помощью АОИ в LED исследуется большее разнообразие дефектов. Также в этом обзоре были рассмотрены другие различные ИЭТ, такие как модули камер изображения, тепловые предохранители и пассивные электронные компоненты.

АОИ по-прежнему сталкиваются с некоторыми ограничениями, требующими дальнейших улучшений. Например, чаще всего они ограничены в инспекции поверхностных дефектов. Кроме того, углы обзора для проверяемых компонентов обычно фиксированы на определенных углах, что может привести к пропуску некоторых частей.

Среди исследуемых ИЭТ нет корпусов для ЭКБ, которые играют существенную роль в защите элементов ЭКБ от внешних воздействий, связи с внешними цепями, монтаже ЭКБ на основания. Корпус для ЭКБ является сложным изделием и обеспечение его качества играет важную роль в функционировании ЭКБ. Данные изделия являются предметом исследований авторов статьи и создания соответствующих АОИ.

Литература

1. Mohammad Abidur Rahman, Md Farhan Shahrior, Kamran Iqbal, Ali Abushaiba «Enabling Intelligent Industrial Automation. A Review of Machine Learning Applications with Digital Twin and Edge AI Integration. Engineering Industrial and Manufacturing Engineering», 2025. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.preprints.org/manuscript/202506.2041/v1> (дата обращения: 07.06.2025).
2. Sasan Farhadi, Samuele Tatullo, Francesco Ferriani «Comparative analysis of ensemble learning techniques for enhanced fatigue life prediction». Scientific Reports volume 15, Article number, 2025. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.preprints.org/manuscript/202506.2041/v1> (дата обращения: 05.06.2025).
3. Shuping Wang, Shuai Chen, Haitao Wang, Xianming Yang «Internal defect detection model based on laser ultrasonic signal decomposition and deep learning». Measurement, Volume 242, id.116194, 2025. [Электронный ресурс]. URL: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2025Meas..24216194W/abstract> (дата обращения: 06.06.2025).
4. Boris I, Kseniia Barashok, Jaesun Lee «Machine learning techniques in ultrasonics-based defect detection and material characterization: A comprehensive review». Advances in Mechanical Engineering, 2025. [Электронный ресурс]. URL: <https://doi.org/10.1177/16878132251347> (дата обращения: 06.06.2025).
5. Sudip Saha, Saurabh Vidhate. Eddy Current Testing Market Analysis – Size, Share, and Forecast 2025 to 2035. Reports Eddy Current Testing Market, 2025. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.futuremarketinsights.com/reports/eddy-current-testing-market> (дата обращения: 06.06.2025).
6. Дормидошина Д.А., Евстифеев Ю.А., Рубцов Ю.В., Графов И.С., Старостин С.П. «Разработка и внедрение АПАК для поиска дефектов изделий микроэлектроники с помощью искусственного интеллекта - Часть 5. Обнаружение дефектов микросварки в контактах элементов ЭКБ с помощью электромагнитных устройств» // Электронные компоненты – 2025 - № 5. С. 6-15.
7. Salaheddine Harzallah, Benhadda Nabil «Non-destructive testing by eddy current sensor for crack orientation detection using HHO optimizer by differential probe». 2024. [Электронный ресурс]. URL: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.136550> (дата обращения: 05.06.2025).
8. Sarah Lee «Eddy Current Testing: A Comprehensive Guide. Unlocking the Secrets of Material Failure Analysis with Eddy Current Testing Techniques». Number Analytics, 2025. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.numberanalytics.com/blog/ultimate-guide-to-eddy-current-testing> (дата обращения: 06.06.2025).
9. Qiang Wu, Kang Dong, Xunpeng Qin, Zeqi Hu, Xiaochen Xiong «Magnetic particle inspection: Status, advances, and challenges - Demands for automatic non-destructive testing». NDT & E International. Volume 143, 2024. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0963869523002451> (дата обращения: 07.06.2025).
10. P.Aryan, S.Sampath and H.Sohn «An overview of non-destructive testing methods for integrated circuit packaging inspection,» Sensors, vol. 18, no. 7, p. 1981, Jun. 2018.
11. S.-C. Horng, F.-Y. Yang and S.-S. Lin «Applying PSO and OCBA to minimize the overkills and re-probes in wafer probe testing», IEEE Trans. Semicond. Manuf., vol. 25, no. 3, pp. 531–540, Aug. 2012.
12. M.-J.-J. Wang and C.-L. Huang «Evaluating the eye fatigue problem in wafer inspection», IEEE Trans. Semicond. Manuf., vol. 17, no. 3, pp. 444–447, Aug. 2004.
13. R.T. Chin and C.A. Harlow «Automated visual inspection: A survey», IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell., vol. PAMI-4, no. 6, pp. 557–573, Nov. 1982.
14. J.Chen and X.Ran, «Deep learning with edge computing: A review» Proc. IEEE, vol. 107, no. 8, pp. 1655–1674, Aug. 2019.
15. R. Huang, J. Gu, X. Sun, Y. Hou and S. Uddin «A rapid recognition method for electronic components based on the improved YOLO-V3 network» Electronics, vol. 8, no. 8, p. 825, 2019.
16. F. Timm and E. Barth «Novelty detection for the inspection of light-emitting diodes» Expert Syst. Appl., vol. 39, no. 3, pp. 3413–3422, 2012.
17. Y.-J. Cha, W. Choi and O. Büyüköztürk «Deep learning-based crack damage detection using convolutional neural networks» Comput.-Aided Civil Infrastruct. Eng., vol. 32, no. 5, pp. 361–378, May 2017.
18. T. Brosnan and D.-W. Sun «Improving quality inspection of food products by computer vision - A review» J. Food Eng., vol. 61, no. 1, pp. 3–16, Jan. 2004.
19. A. Kumar «Neural network based detection of local textile defects» Pattern Recognit., vol. 36, no. 7, pp. 1645–1659, Jul. 2003.
20. Z. Xue-Wu, D. Yan-Qiong, L. Yan-Yun, S. Ai-Ye and L. Rui-Yu «A vision inspection system for the surface defects of strongly reflected metal based on multi-class SVM» Expert Syst. Appl., vol. 38, no. 5, pp. 5930–5939, May 2011.
21. J. Ker, L. Wang, J. Rao and T. Lim «Deep learning applications in medical image analysis», IEEE Access, vol. 6, pp. 9375–9379, 2017.
22. S. Lv, H. Kim, B. Zheng and H. Jin «A review of data mining with big data towards its applications in the electronics industry» Appl. Sci., vol. 8, no. 4, pp. 1–34, 2018.

23. «Consumer Electronics Market Size, Share, & Trends Analysis Report By Sales Channel (Online, Offline), By Product (Smartphones, Tablets, Desktops, Laptops/Notebooks, Digital Cameras), By Region, And Segment Forecasts, 2025 – 2030». Grand View Research 2018-2030, 180 p.
24. M. Liukkonen, E. Havia and Y. Hiltunen «Computational intelligence in mass soldering of electronics - A survey» *Expert Syst. Appl.*, vol. 39, no. 10, pp. 9928–9937, Aug. 2012.
25. D.-M. Tsai and Y.-C. Hsieh «Machine vision-based positioning and inspection using expectation–maximization technique», *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 66, no. 11, pp. 2858–2868, Nov. 2017.
26. S. Gebus and K. Leiviskä «Knowledge acquisition for decision support systems on an electronic assembly line» *Expert Syst. Appl.*, vol. 36, no. 1, pp. 93–101, Jan. 2009.
27. Y. Xie, Y. Ye, J. Zhang, L. Liu and L. Liu «A physics-based defects model and inspection algorithm for automatic visual inspection» *Opt. Lasers Eng.*, vol. 52, pp. 218–223, Jan. 2014.
28. R. Carnell, N. Mapa, I. Pang and P. Sakpal «Asia and the global tech slump: The chips are down» ING, Amsterdam, The Netherlands, Tech. Rep., 2019. [Электронный ресурс]. URL: <https://think.ing.com/reports/asia-and-the-global-tech-slump-the-chips-are-down> (дата обращения: 05.06.2025).
29. D.-B. Perng, H.-W. Liu and S.-H. Chen «A vision-based LED defect auto-recognition system» *Nondestruct. Test. Eval.*, vol. 29, no. 4, pp. 315–331, Oct. 2014.
30. «Energy Savings Potential of Solid-State Lighting in General Illumination Applications», U.S. Dept. Energy, Washington, DC, USA, 2012.
31. C.-C. Hsu and M.-S. Chen «Intelligent maintenance prediction system for LED wafer testing machine» *J. Intell. Manuf.*, vol. 27, no. 2, pp. 335–342, Apr. 2016.
32. Y.-S. Chiu and H.-D. Lin «An innovative blemish detection system for curved LED lenses» *Expert Syst. Appl.*, vol. 40, no. 2, pp. 471–479, Feb. 2013.
33. M.H.A. Fadzil and C.J. Weng, «LED cosmetic flaw vision inspection system» *Pattern Anal. Appl.*, vol. 1, no. 1, pp. 62–70, Mar. 1998.
34. H.-D. Lin «Automated defect inspection of light-emitting diode chips using neural network and statistical approaches» *Expert Syst. Appl.*, vol. 36, no. 1, pp. 219–226, Jan. 2009.
35. D.-B. Perng, H.-W. Liu and C.-C. Chang «Automated SMD LED inspection using machine vision» *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 57, nos. 9–12, pp. 1065–1077, Dec. 2011.
36. C.-F.-J. Kuo, T.-Y. Fang, C.-L. Lee and H.-C. Wu «Automated optical inspection system for surface mount device light emitting diodes» *J. Intell. Manuf.*, vol. 30, no. 2, pp. 641–655, Feb. 2019.
37. M. Bürmel, F. Pernuš and B. Likar «Automated optical quality inspection of light emitting diodes» *Meas. Sci. Technol.*, vol. 17, no. 6, pp. 1372–1378, Jun. 2006.
38. C.-Y. Chang, C.-H. Li, S.-Y. Lin and M. Jeng «Application of two hop- field neural networks for automatic four-element LED inspection», *IEEE Trans. Syst., Man, Cybern. C, Appl. Rev.*, vol. 39, no. 3, pp. 352–365, May 2009.
39. F. Timm and E. Barth «Novelty detection for the inspection of light-emitting diodes» *Expert Syst. Appl.*, vol. 39, no. 3, pp. 3413–3422, 2012.
40. C.-F.-J. Kuo, C.-T.-M. Hsu, Z.-X. Liu and H.-C. Wu «Automatic inspection system of LED chip using two-stages back-propagation neural network» *J. Intell. Manuf.*, vol. 25, no. 6, pp. 1235–1243, Dec. 2014.
41. C.-F.-J. Kuo, C.-P. Tung and W.-H. Weng «Applying the support vector machine with optimal parameter design into an automatic inspection system for classifying micro-defects on surfaces of light-emitting diode chips» *J. Intell. Manuf.*, vol. 30, no. 2, pp. 727–741, Feb. 2019.
42. H. Lin, B. Li, X. Wang, Y. Shu and S. Niu «Automated defect inspection of LED chip using deep convolutional neural network» *J. Intell. Manuf.*, vol. 30, no. 6, pp. 2525–2534, Aug. 2019.
43. F. Zhong, S. He and B. Li «Blob analyzation-based template matching algorithm for LED chip localization» *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 93, nos. 1–4, pp. 55–63, Oct. 2017.
44. H.-D. Lin and S. W. Chiu «Flaw detection of domed surfaces in LED packages by machine vision system» *Expert Syst. Appl.*, vol. 38, no. 12, pp. 15208–15216, Nov. 2011.
45. R.-F. Fung, C.-Y. Yang and C.-T. Lai «Graphic supervisory control of an automatic optical inspection for LED properties» *Measurement*, vol. 44, no. 8, pp. 1349–1360, Oct. 2011.
46. C.-Y. Chang, C.-H. Li, Y.-C. Chang and M. Jeng «Wafer defect inspection by neural analysis of region features» *J. Intell. Manuf.*, vol. 22, no. 6, pp. 953–964, Dec. 2011.
47. H.-D. Lin, G.C. Lin, C.Y. Chung and W.T. Lin «Wavelet-based neural network and statistical approaches applied to automated visual inspection of LED chips» *J. Sci. Ind. Res.*, vol. 67, no. 6, pp. 412–420, 2008.
48. D.-M. Tsai, I.-Y. Chiang and Y.-H. Tsai «A shift-tolerant dissimilarity measure for surface defect detection», *IEEE Trans. Ind. Informat.*, vol. 8, no. 1, pp. 128–137, Feb. 2012.
49. M.P.-L. Ooi, H.K. Sok, Y.C. Kuang, S. Demidenko and C. Chan «Defect cluster recognition system for fabricated semiconductor wafers» *Eng. Appl. Artif. Intell.*, vol. 26, no. 3, pp. 1029–1043, Mar. 2013.

50. V. Perminov, V. Putrolaynen, M. Belyaev, E. Pasko and K. Balashkov «Automated image analysis for evaluation of wafer backside chipping» *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 99, nos. 5–8, pp. 2015–2023, Nov. 2018.
51. J. Kim, Y. Lee and H. Kim «Detection and clustering of mixed-type defect patterns in wafer bin maps» *IIE Trans.*, vol. 50, no. 2, pp. 99–111, Feb. 2018.
52. C.H. Jin, H.J. Na, M. Piao, G. Pok and K.H. Ryu «A novel DBSCAN - based defect pattern detection and classification framework for wafer bin map», *IEEE Trans. Semicond. Manuf.*, vol. 32, no. 3, pp. 286–292, Aug. 2019.
53. F. Adly, P.D. Yoo, S. Muhamadat, Y. Al-Hammadi, U. Lee and M. Ismail «Randomized general regression network for identification of defect patterns in semiconductor wafer maps», *IEEE Trans. Semicond. Manuf.*, vol. 28, no. 2, pp. 145–152, May 2015.
54. S.-C. Hsu and C.-F. Chien «Hybrid data mining approach for pattern extraction from wafer bin map to improve yield in semiconductor manufacturing» *Int. J. Prod. Econ.*, vol. 107, no. 1, pp. 88–103, May 2007.
55. M. Saqlain, B. Jargalsaikhan and J.Y. Lee «A voting ensemble classifier for wafer map defect patterns identification in semiconductor manufacturing», *IEEE Trans. Semicond. Manuf.*, vol. 32, no. 2, pp. 171–182, May 2019.
56. C.-W. Chang, T.-M. Chao, J.-T. Horng, C.-F. Lu and R.-H. Yeh «Development pattern recognition model for the classification of circuit probe wafer maps on semiconductors», *IEEE Trans. Compon., Packag., Manuf. Technol.*, vol. 2, no. 12, pp. 2089–2097, Dec. 2012.
57. M.P.-L. Ooi, E.K.J. Joo, Y.C. Kuang, S. Demidenko, L. Kleeman and C.W.K. Chan «Getting more from the semiconductor test: Data mining with defect-cluster extraction», *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 60, no. 10, pp. 3300–3317, Oct. 2011.
58. J. Yu and X. Lu «Wafer map defect detection and recognition using joint local and nonlocal linear discriminant analysis», *IEEE Trans. Semicond. Manuf.*, vol. 29, no. 1, pp. 33–43, Feb. 2016.
59. H.-W. Hsieh and F.-L. Chen «Recognition of defect spatial patterns in semiconductor fabrication» *Int. J. Prod. Res.*, vol. 42, no. 19, pp. 4153–4172, Oct. 2004.
60. F.-L. Chen and S.-F. Liu «A neural-network approach to recognize defect spatial pattern in semiconductor fabrication», *IEEE Trans. Semicond. Manuf.*, vol. 13, no. 3, pp. 366–373, Aug. 2000.
61. S.F. Liu, F.L. Chen and W.B. Lu «Wafer bin map recognition using a neural network approach» *Int. J. Prod. Res.*, vol. 40, no. 10, pp. 2207–2223, Jan. 2002.
62. F.D. Palma, G.D. Nicolao, G. Miraglia, E. Pasquinetti and F. Piccinini «Unsupervised spatial pattern classification of electrical-wafer-sorting maps in semiconductor manufacturing» *Pattern Recognit. Lett.*, vol. 26, no. 12, pp. 1857–1865, Sep. 2005.
63. C.-H. Wang, S.-J. Wang and W.-D. Lee «Automatic identification of spatial defect patterns for semiconductor manufacturing» *Int. J. Prod. Res.*, vol. 44, no. 23, pp. 5169–5185, Dec. 2006.
64. C.-H. Wang «Recognition of semiconductor defect patterns using spatial filtering and spectral clustering» *Expert Syst. Appl.*, vol. 34, no. 3, pp. 1914–1923, Apr. 2008.
65. C.-H. Wang, W. Kuo and H. Bensmail «Detection and classification of defect patterns on semiconductor wafers» *IIE Trans.*, vol. 38, no. 12, pp. 1059–1068, Dec. 2006.
66. C.-H. Wang «Separation of composite defect patterns on wafer bin map using support vector clustering» *Expert Syst. Appl.*, vol. 36, no. 2, pp. 2554–2561, Mar. 2009.
67. C.-J. Huang «Clustered defect detection of high quality chips using self-supervised multilayer perceptron» *Expert Syst. Appl.*, vol. 33, no. 4, pp. 996–1003, Nov. 2007.
68. C.-J. Huang, Y.-J. Chen, C.-F. Wu and Y.-A. Huang «Application of neural networks and genetic algorithms to the screening for high quality chips» *Appl. Soft Comput.*, vol. 9, no. 2, pp. 824–832, Mar. 2009.
69. Y.-S. Jeong, S.-J. Kim and M. K. Jeong «Automatic identification of defect patterns in semiconductor wafer maps using spatial correlogram and dynamic time warping», *IEEE Trans. Semicond. Manuf.*, vol. 21, no. 4, pp. 625–637, Nov. 2008.
70. K.P. White, B. Kundu and C.M. Mastrangelo «Classification of defect clusters on semiconductor wafers via the Hough transformation», *IEEE Trans. Semicond. Manuf.*, vol. 21, no. 2, pp. 272–277, May 2008.
71. T.-S. Li and C.-L. Huang «Defect spatial pattern recognition using a hybrid SOM–SVM approach in semiconductor manufacturing» *Expert Syst. Appl.*, vol. 36, no. 1, pp. 374–385, Jan. 2009.
72. J. Chen, C.-J. Hsu and C.-C. Chen «A self-growing hidden Markov tree for wafer map inspection» *J. Process Control*, vol. 19, no. 2, pp. 261–271, Feb. 2009.
73. J.Y. Hwang and W. Kuo «Model-based clustering for integrated circuit yield enhancement» *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 178, no. 1, pp. 143–153, Apr. 2007.
74. T. Yuan and W. Kuo «A model-based clustering approach to the recognition of the spatial defect patterns produced during semiconductor fabrication» *IIE Trans.*, vol. 40, no. 2, pp. 93–101, Nov. 2007.
75. T. Yuan and W. Kuo «Spatial defect pattern recognition on semiconductor wafers using model-based clustering and Bayesian inference» *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 190, no. 1, pp. 228–240, Oct. 2008.

76. T. Yuan, S.J. Bae and J.I. Park «Bayesian spatial defect pattern recognition in semiconductor fabrication using support vector clustering» *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 51, nos. 5–8, pp. 671–683, Nov. 2010. - 80
77. T. Czimermann, G. Ciuti, M. Milazzo, M. Chiurazzi, S. Roccella, C.M. Oddo and P. Dario «Visual-based defect detection and classification approaches for industrial applications - A survey» *Sensors*, vol. 20, no. 5, pp. 1–25, 2020.
78. T. Yuan, W. Kuo and S. J. Bae «Detection of spatial defect patterns generated in semiconductor fabrication processes», *IEEE Trans. Semicond. Manuf.*, vol. 24, no. 3, pp. 392–403, Aug. 2011.
79. Q. Zhou, L. Zeng and S. Zhou «Statistical detection of defect patterns using Hough transform», *IEEE Trans. Semicond. Manuf.*, vol. 23, no. 3, pp. 370–380, Aug. 2010.
80. J.-S. Lin «Constructing a yield model for integrated circuits based on a novel fuzzy variable of clustered defect pattern» *Expert Syst. Appl.*, vol. 39, no. 3, pp. 2856–2864, Feb. 2012.
81. L.-C. Chao and L.-I. Tong «Wafer defect pattern recognition by multi-class support vector machines by using a novel defect cluster index» *Expert Syst. Appl.*, vol. 36, no. 6, pp. 10158–10167, Aug. 2009.
82. G. Choi, S.-H. Kim, C. Ha and S.J. Bae «Multi-step ART1 algorithm for recognition of defect patterns on semiconductor wafers» *Int. J. Prod. Res.*, vol. 50, no. 12, pp. 3274–3287, Jun. 2012.
83. C.-F. Chien, S.-C. Hsu and Y.-J. Chen «A system for online detection and classification of wafer bin map defect patterns for manufacturing intelligence» *Int. J. Prod. Res.*, vol. 51, no. 8, pp. 2324–2338, Apr. 2013.
84. C.-W. Liu and C.-F. Chien «An intelligent system for wafer bin map defect diagnosis: An empirical study for semiconductor manufacturing» *Eng. Appl. Artif. Intell.*, vol. 26, nos. 5–6, pp. 1479–1486, May 2013.
85. H. Gao, W. Jin, X. Yang and O. Kaynak «A line-based-clustering approach for ball grid array component inspection in surface-mount technology», *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 64, no. 4, pp. 3030–3038, Apr. 2017.
86. M.H. Annaby, Y.M. Fouad and M.A. Rushdi «Improved normalized cross-correlation for defect detection in printed-circuit boards», *IEEE Trans. Semicond. Manuf.*, vol. 32, no. 2, pp. 199–211, May 2019.
87. W. Dai, A. Mujeeb, M. Erdt and A. Sourin «Soldering defect detection in automatic optical inspection» *Adv. Eng. Informat.*, vol. 43, Jan. 2020, Art. no. 101004.
88. G. Acciani, G. Brunetti and G. Fornarelli «Application of neural networks in optical inspection and classification of solder joints in surface mount technology», *IEEE Trans. Ind. Informat.*, vol. 2, no. 3, pp. 200–209, Aug. 2006.
89. R.T. Chin, C.A. Harlow and S. J. Dwyer III «Automatic visual inspection of printed circuit boards» *Proc. SPIE*, vol. 155, pp. 199–213, Jan. 1979.
90. B.C. Jiang, S.-L. Tasi and C.-C. Wang «Machine vision-based gray relational theory applied to IC marking inspection», *IEEE Trans. Semicond. Manuf.*, vol. 15, no. 4, pp. 531–539, Nov. 2002.
91. R. Nagarajan, S. Yaacob, P. Pandian, M. Karthigayan, S.H. Amin and M. Khalid «A real time marking inspection scheme for semiconductor industries» *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 34, nos. 9–10, pp. 926–932, Sep. 2007.
92. F.-H. Hsu and C.-A. Shen «The design and implementation of an embedded real-time automated IC marking inspection system», *IEEE Trans. Semicond. Manuf.*, vol. 32, no. 1, pp. 112–120, Feb. 2019.
93. C.L.S.C. Fonseka and J.A.K.S. Jayasinghe «Implementation of an automatic optical inspection system for solder quality classification of THT solder joints», *IEEE Trans. Compon., Packag., Manuf. Technol.*, vol. 9, no. 2, pp. 353–366, Feb. 2019.
94. J. Richter and J. Schambach «Three-dimensional THT solder joint reconstruction for inline inspection systems» *Proc. SPIE*, Sep. 2019, p. 25, Sep. 2019.
95. C.L.S.C. Fonseka and J.A.K.S. Jayasinghe «Color model analysis for solder pad segmentation on printed circuit boards» *Int. J. Sci. Res. Publications*, vol. 6, no. 11, pp. 212–225, 2016.
96. S. Fonseka and J.A.K.S. Jayasinghe «Feature extraction and template matching algorithms classification for PCB fiducial verification» *J. Achievements Mater. Manuf. Eng.*, vol. 1, no. 86, pp. 14–32, Jan. 2018.
97. J. Yu «Enhanced stacked denoising autoencoder-based feature learning for recognition of wafer map defects», *IEEE Trans. Semicond. Manuf.*, vol. 32, no. 4, pp. 613–624, Nov. 2019.
98. B.C. Jiang, C.C. Wang and P.L. Chen «Logistic regression tree applied to classify PCB golden finger defects» *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 24, nos. 7–8, pp. 496–502, Oct. 2004.
99. B.C. Jiang and Y.M.W.C.C. Wang «Bootstrap sampling technique applied to the PCB golden fingers defect classification study» *Int. J. Prod. Res.*, vol. 39, no. 10, pp. 2215–2230, Jan. 2001.
100. D.-M. Tsai and B.-T. Lin «Defect detection of gold-plated surfaces on PCBs using entropy measures» *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 20, no. 6, pp. 420–428, Sep. 2002.
101. Z. Ibrahim and S. A. Rahman Al-Attas «Wavelet-based printed circuit board inspection algorithm» *Integr. Comput.-Aided Eng.*, vol. 12, no. 2, pp. 201–213, Apr. 2005.

102. L. Bai, X. Yang and H. Gao «A novel coarse–fine method for ball grid array component positioning and defect inspection», *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 65, no. 6, pp. 5023–5031, Jun. 2018.
103. J.-D. Song, Y.-G. Kim and T.-H. Park «SMT defect classification by feature extraction region optimization and machine learning» *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 101, nos. 5–8, pp. 1303–1313, Apr. 2019.
104. B.C. Jiang, C.C. Wang and Y.N. Hsu «Machine vision and background remover-based approach for PCB solder joints inspection» *Int. J. Prod. Res.*, vol. 45, no. 2, pp. 451–464, Jan. 2007.
105. X. Hongwei, Z. Xianmin, K. Yongcong and O. Gaofei «Solder joint inspection method for chip component using improved AdaBoost and decision tree», *IEEE Trans. Compon., Packag., Manuf. Technol.*, vol. 1, no. 12, pp. 2018–2027, Dec. 2011.
106. F. Wu and X. Zhang «Feature-extraction-based inspection algorithm for IC solder joints», *IEEE Trans. Compon., Packag., Manuf. Technol.*, vol. 1, no. 5, pp. 689–694, May 2011.
107. N.S.S. Mar, P.K.D.V. Yarlagadda and C. Fookes «Design and development of automatic visual inspection system for PCB manufacturing» *Robot. Comput.-Integr. Manuf.*, vol. 27, no. 5, pp. 949–962, Oct. 2011.
108. W.-Y. Wu, C.-W. Hung and W.-B. Yu «The development of automated solder bump inspection using machine vision techniques» *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 69, nos. 1–4, pp. 509–523, Oct. 2013.
109. F. Wu and X. Zhang «An inspection and classification method for chip solder joints using color grads and Boolean rules» *Robot. Comput.-Integr. Manuf.*, vol. 30, no. 5, pp. 517–526, Oct. 2014.
110. K.W. Ko and H. S. Cho «Solder joints inspection using a neural network and fuzzy rule-based classification method», *IEEE Trans. Electron. Packag. Manuf.*, vol. 23, no. 2, pp. 93–103, Apr. 2000.
111. G. Acciani, G. Brunetti and G. Fornarelli «A multiple neural network system to classify solder joints on integrated circuits» *Int. J. Comput. Intell. Res.*, vol. 2, no. 4, pp. 337–348, 2006.
112. A. Giaquinto, G. Fornarelli, G. Brunetti and G. Acciani «A neurofuzzy method for the evaluation of soldering global quality index», *IEEE Trans. Ind. Informat.*, vol. 5, no. 1, pp. 56–66, Feb. 2009.
113. G. Acciani, G. Fornarelli and A. Giaquinto «A fuzzy method for global quality index evaluation of solder joints in surface mount technology», *IEEE Trans. Ind. Informat.*, vol. 7, no. 1, pp. 115–124, Feb. 2011.
114. S.-N. Chiu and M.-H. Perng «Reflection-area-based feature descriptor for solder joint inspection» *Mach. Vis. Appl.*, vol. 18, no. 2, pp. 95–106, Mar. 2007.
115. T.Y. Ong, Z. Samad and M.M. Ratnam «Solder joint inspection with multi-angle imaging and an artificial neural network» *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 38, nos. 5–6, pp. 455–462, Aug. 2008.
116. N.S.S. Mar, C. Fookes and P.K. Yarlagadda «Design of automatic vision-based inspection system for solder joint segmentation» *J. Achievements Mater. Manuf. Eng.*, vol. 34, no. 2, pp. 145–151, 2009.
117. H. Wu, X. Zhang, H. Xie, Y. Kuang and G. Ouyang «Classification of solder joint using feature selection based on Bayes and support vector machine», *IEEE Trans. Compon., Packag., Manuf. Technol.*, vol. 3, no. 3, pp. 516–522, Mar. 2013.
118. W. Hao, Z. Xianmin, K. Yongcong, O. Gaofei and X. Hongwei «Solder joint inspection based on neural network combined with genetic algorithm» *Optik*, vol. 124, no. 20, pp. 4110–4116, Oct. 2013.
119. C. Benedek, O. Krammer, M. Janoczki and L. Jakab «Solder paste scooping detection by multilevel visual inspection of printed circuit boards», *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 60, no. 6, pp. 2318–2331, Jun. 2013.
120. T.-W. Hui and G. K.-H. Pang «Solder paste inspection using region-based defect detection» *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 42, nos. 7–8, pp. 725–734, Jun. 2009.
121. J. Jiang, J. Cheng and D. Tao «Color biological features-based solder paste defects detection and classification on printed circuit boards», *IEEE Trans. Compon., Packag., Manuf. Technol.*, vol. 2, no. 9, pp. 1536–1544, Sep. 2012.
122. K. Taha, K. Salah and P. D. Yoo «Clustering the dominant defective patterns in semiconductor wafer maps», *IEEE Trans. Semicond. Manuf.*, vol. 31, no. 1, pp. 156–165, Feb. 2018.
123. R. Wang and N. Chen «Wafer map defect pattern recognition using rotation-invariant features», *IEEE Trans. Semicond. Manuf.*, vol. 32, no. 4, pp. 596–604, Nov. 2019.
124. A.J. Crispin and V. Rankov «Automated inspection of PCB components using a genetic algorithm template-matching approach» *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 35, nos. 3–4, pp. 293–300, Dec. 2007.
125. H.-J. Cho and T.-H. Park «Wavelet transform based image template matching for automatic component inspection» *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 50, nos. 9–12, pp. 1033–1039, Oct. 2010.
126. A.-A.-I.M. Hassanin, F.E.A.El-Samie and G.M.El Banby «A real - time approach for automatic defect detection from PCBs based on SURF features and morphological operations» *Multimedia Tools Appl.*, vol. 78, no. 24, pp. 34437–34457, Dec. 2019.
127. M.E. Zervakis, S.K. Goumas and G.A. Rovithakis «A Bayesian framework for multilead SMD post-placement quality inspection», *IEEE Trans. Syst. Man, Cybern. B, Cybern.*, vol. 34, no. 1, pp. 440–453, Feb. 2004.
128. S.K. Goumas, I.N. Dimou and M.E. Zervakis «Combination of multiple classifiers for post-placement quality inspection of components: A comparative study» *Inf. Fusion*, vol. 11, no. 2, pp. 149–162, Apr. 2010.

129. C.-H. Wu, D.-Z. Wang, A. Ip, D.-W. Wang, C.-Y. Chan and H.-F. Wang «A particle swarm optimization approach for components placement inspection on printed circuit boards» *J. Intell. Manuf.*, vol. 20, no. 5, pp. 535–549, Oct. 2009.
130. N. Dong, C.-H. Wu, W.-H. Ip, Z.-Q. Chen and K.-L. Yung «Chaotic species based particle swarm optimization algorithms and its application in PCB components detection» *Expert Syst. Appl.*, vol. 39, no. 16, pp. 12501–12511, Nov. 2012.
131. L. Bai, X. Yang and H. Gao «Corner point-based coarse–fine method for surface-mount component positioning», *IEEE Trans. Ind. Informat.*, vol. 14, no. 3, pp. 877–886, Mar. 2018.
132. S.-H. Chen and D.-B. Perng «Automatic optical inspection system for IC molding surface» *J. Intell. Manuf.*, vol. 27, no. 5, pp. 915–926, Oct. 2016.
133. C.-C. Wang, B.C. Jiang, J.-Y. Lin and C.-C. Chu «Machine vision-based defect detection in IC images using the partial information correlation coefficient», *IEEE Trans. Semicond. Manuf.*, vol. 26, no. 3, pp. 378–384, Aug. 2013.
134. G. Duan, H. Wang, Z. Liu and Y.-W. Chen «A machine learning-based framework for automatic visual inspection of microdrill bits in PCB production», *IEEE Trans. Syst., Man, Cybern. C, Appl. Rev.*, vol. 42, no. 6, pp. 1679–1689, Nov. 2012.
135. G. Duan, H. Wang, Z. Liu, J. Tan and Y.-W. Chen «Automatic optical phase identification of micro-drill bits based on improved ASM and bag of shape segment in PCB production» *Mach. Vis. Appl.*, vol. 25, no. 6, pp. 1411–1422, Aug. 2014.
136. H. Rau and C.-H. Wu «Automatic optical inspection for detecting defects on printed circuit board inner layers» *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 25, nos. 9–10, pp. 940–946, May 2005.
137. P.-C. Chang, L.-Y. Chen and C.-Y. Fan «A case-based evolutionary model for defect classification of printed circuit board images» *J. Intell. Manuf.*, vol. 19, no. 2, pp. 203–214, Apr. 2008.
138. C.-T. Liao, W.-H. Lee and S.-H. Lai «A flexible PCB inspection system based on statistical learning» *J. Signal Process. Syst.*, vol. 67, no. 3, pp. 279–290, Jun. 2012.
139. E. Yuk, S. Park, C.-S. Park and J.-G. Baek «Feature-learning-based printed circuit board inspection via speeded-up robust features and random forest» *Appl. Sci.*, vol. 8, no. 6, p. 932, Jun. 2018.
140. S.-F. Chuang, W.-T. Chang, C.-C. Lin and Y.-S. Tarng «Misalignment inspection of multilayer PCBs with an automated X-ray machine vision system» *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 51, nos. 9–12, pp. 995–1008, Dec. 2010.
141. D.-M. Tsai and R.-H. Yang «An eigenvalue-based similarity measure and its application in defect detection» *Image Vis. Comput.*, vol. 23, no. 12, pp. 1094–1101, Nov. 2005.
142. V.H. Gaidhane, Y.V. Hote and V. Singh «An efficient similarity measure approach for PCB surface defect detection» *Pattern Anal. Appl.*, vol. 21, no. 1, pp. 277–289, Feb. 2018.
143. D.-M. Tsai and C.-K. Huang «Defect detection in electronic surfaces using template-based Fourier image reconstruction», *IEEE Trans. Compon., Packag., Manuf. Technol.*, vol. 9, no. 1, pp. 163–172, Jan. 2019.
144. C.-S. Lin and L. W. Lue «An image system for fast positioning and accuracy inspection of ball grid array boards» *Microelectron. Rel.*, vol. 41, no. 1, pp. 119–128, Jan. 2001.
145. C.-C. Chu, B.C. Jiang and C.-C. Wang «Modified gamma correction method to enhance ball grid array image for surface defect inspection» *Int. J. Prod. Res.*, vol. 46, no. 8, pp. 2165–2178, Apr. 2008.
146. Y.-C. Chiou, C.-S. Lin and B.-C. Chiou «The feature extraction and analysis of flaw detection and classification in BGA gold-plating areas» *Expert Syst. Appl.*, vol. 35, no. 4, pp. 1771–1779, Nov. 2008.
147. A.F. Said, B.L. Bennett, L.J. Karam and J.S. Pettinato «Automated detection and classification of non-wet solder joints», *IEEE Trans. Autom. Sci. Eng.*, vol. 8, no. 1, pp. 67–80, Jan. 2011.
148. A.F. Said, B.L. Bennett, L.J. Karam, A. Siah, K. Goodman and J.S. Pettinato «Automated void detection in solder balls in the presence of vias and other artifacts», *IEEE Trans. Compon., Packag., Manuf. Technol.*, vol. 2, no. 11, pp. 1890–1901, Nov. 2012.
149. J. Li, B.L. Bennett, L.J. Karam and J.S. Pettinato «Stereo vision based automated solder ball height and substrate coplanarity inspection», *IEEE Trans. Autom. Sci. Eng.*, vol. 13, no. 2, pp. 757–771, Apr. 2016.
150. W. Jin, W. Lin, X. Yang and H. Gao «Reference-free path-walking method for ball grid array inspection in surface mounting machines», *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 64, no. 8, pp. 6310–6318, Aug. 2017.
151. M. van Veenhuizen «Void detection in solder bumps with deep learning» *Microelectron. Rel.*, pp. 88–90, pp. 315–320, Sep. 2018.
152. X. Lu, Z. He, L. Su, M. Fan, F. Liu, G. Liao and T. Shi «Detection of micro solder balls using active thermography technology and K-means algorithm», *IEEE Trans. Ind. Informat.*, vol. 14, no. 12, pp. 5620–5628, Dec. 2018.
153. K.W. Ko, D.H. Kim, M.Y. Kim and J.H. Kim «An automatic optical inspection system for inspection of CMOS compact camera module assembly» *Int. J. Precis. Eng. Manuf.*, vol. 10, no. 5, pp. 67–72, Dec. 2009.
154. Y. Liu and F. Yu «Automatic inspection system of surface defects on optical IR-CUT filter based on machine vision» *Opt. Lasers Eng.*, vol. 55, pp. 243–257, Apr. 2014.

155. H.-D. Lin «Computer-aided visual inspection of surface defects in ceramic capacitor chips» *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 189, nos. 1–3, pp. 19–25, Jul. 2007.
156. H.-D. Lin «Automated visual inspection of ripple defects using wavelet characteristic based multivariate statistical approach» *Image Vis. Comput.*, vol. 25, no. 11, pp. 1785–1801, Nov. 2007.
157. T.-H. Sun, F.-C. Tien, F.-C. Tien and R.-J. Kuo «Automated thermal fuse inspection using machine vision and artificial neural networks» *J. Intell. Manuf.*, vol. 27, no. 3, pp. 639–651, Jun. 2016.
158. Y.-J. Chen, T.-H. Lin, K.-H. Chang and C.-F. Chien «Feature extraction for defect classification and yield enhancement in color filter and microlens manufacturing: An empirical study» *J. Ind. Prod. Eng.*, vol. 30, no. 8, pp. 510–517, Dec. 2013.
159. Y.-J. Chen, C.-Y. Fan and K.-H. Chang «Manufacturing intelligence for reducing false alarm of defect classification by integrating similarity matching approach in CMOS image sensor manufacturing» *Comput. Ind. Eng.*, vol. 99, pp. 465–473, Sep. 2016.
160. C.-F. J. Kuo, W.-C. Lo, Y.-R. Huang, H.-Y. Tsai, C.-L. Lee and H.-C. Wu «Automated defect inspection sys- tem for CMOS image sensor with micro multi-layer non-spherical lens module» *J. Manuf. Syst.*, vol. 45, pp. 248–259, Oct. 2017.
161. H.-D. Lin «Tiny surface defect inspection of electronic passive components using discrete cosine transform decomposition and cumulative sum techniques» *Image Vis. Comput.*, vol. 26, no. 5, pp. 603–621, May 2008.
162. Y. Yang, Z.-J. Zha, M. Gao and Z. He «A robust vision inspection system for detecting surface defects of film capacitors» *Signal Process.*, vol. 124, pp. 54–62, Jul. 2016.
163. N. Cai, J. Lin, Q. Ye, H. Wang, S. Weng and B.W.-K. Ling «A new IC solder joint inspection method for an automatic optical inspection system based on an improved visual background extraction algorithm», *IEEE Trans. Compon., Packag., Manuf. Technol.*, vol. 6, no. 1, pp. 161–172, Jan. 2016.
164. N. Cai, Y. Zhou, Q. Ye, G. Liu, H. Wang and X. Chen «IC solder joint inspection via robust principle component analysis», *IEEE Trans. Compon., Packag., Manuf. Technol.*, vol. 7, no. 2, pp. 300–309, Feb. 2017.

УДК 006, УДК 621.3

ОРГАНИЗАЦИЯ И ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ МОДЕРНИЗАЦИИ, МОДИФИКАЦИИ И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ИЗДЕЛИЙ ЭЛЕКТРОННОЙ КОМПОНЕНТНОЙ БАЗЫ

ORGANIZATION AND PROCEDURE FOR MODERNIZATION, MODIFICATION AND IMPROVEMENT OF ELECTRONIC COMPONENT PRODUCTS

Афанасьев А.С., к. т. н., доцент, Конча М.И., Болдырев М.А.,
+7 (495) 586-17-21 (доб.1356), bulgakov56@yandex.ru

Afanasyev A.S., Candidate of technical Sciences, Koncha M.I., Boldyrev M.A.,
+7 (495) 586-17-21 (ex.1356), bulgakov56@yandex.ru

Аннотация: в статье рассматривается вопрос организации работ по модернизации, модификации и совершенствованию изделий электронной компонентной базы на этапе их серийного производства. Предлагается новый подход к организации модификации базового изделия электронной компонентной базы с целью разрешения противоречий в отношении сущности «типовых испытаний» и установления единого понятийного аппарата в рассматриваемой предметной области, раскрывающего сущность процессов (работ) преобразования изделий электронной компонентной базы: модернизации, модификации и совершенствования.

Annotation: the article discusses the organization of work on modernization, modification, and improvement of electronic component base products at the stage of their mass production. It proposes a new approach to the organization of modification of a basic electronic component base product in order to resolve contradictions regarding the essence of “typical tests” and establish a unified conceptual framework in the subject area under consideration, which reveals the essence of the processes (works) of ECB product transformation: modernization, modification, and improvement.

Ключевые слова: электронная компонентная база (ЭКБ), базовое изделие, модернизация, модификация, совершенствование, типономинал, организационно-технический документ.

Keywords: electronic component base (ECB), basic product, modernization, modification, improvement, type-nominal, organizational and technical document.

Научная специальность: 2.2.2. Электронная компонентная база микро- и наноэлектроники, квантовых устройств. 2.5.22. Управление качеством продукции. Стандартизация. Организация производства.