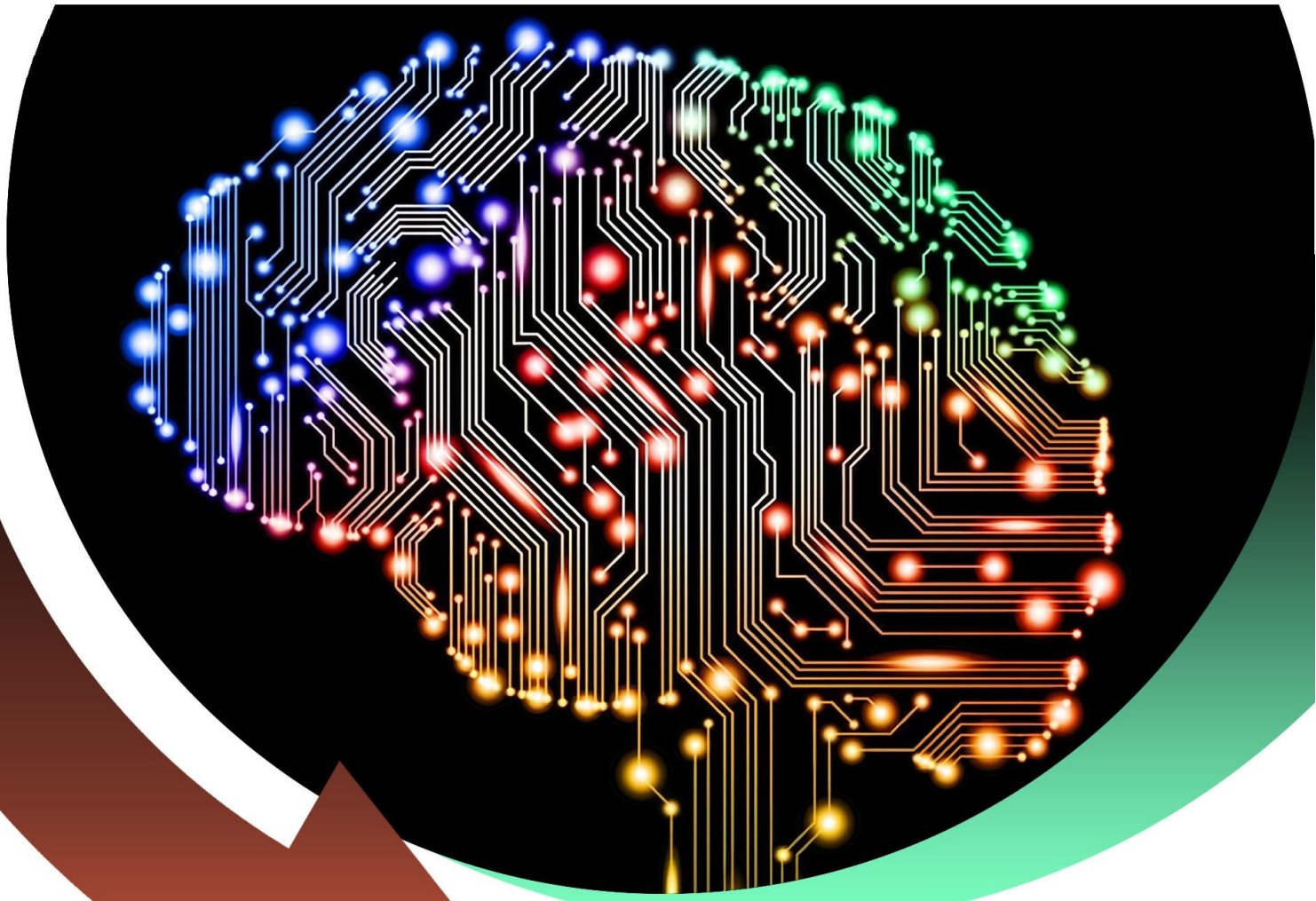
ISSN 2949-2041

ВЕКТОР НАУЧНОЙ МЫСЛИ

11(28) НОЯБРЬ 2025



НАУЧНАЯ ЭЛЕКТРОННАЯ БИБЛИОТЕКА
LIBRARY.RU

МЕЖДУНАРОДНЫЙ ИНСТИТУТ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
ИМ. ЛОМОНОСОВА

№ 11(28) Ноябрь 2025

ВЕКТОР НАУЧНОЙ МЫСЛИ

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

ПЕРИОДИЧЕСКОЕ ИЗДАНИЕ

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
2025

ВЕКТОР НАУЧНОЙ МЫСЛИ

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

Выходит 1 раз в месяц

№ 11(28) Ноябрь 2025

ISSN 2949-2041
DOI 10.58351/2949-2041.2025.28.11.001

ISSN 2949-2041
9 772949 204009 >

В26 Вектор научной мысли: научный журнал. - №11(28). СПб., Изд. МИПИ им. Ломоносова, Ноябрь 2025. - 482 с.

Международный электронный научный журнал, публикует результаты фундаментальных, поисковых и прикладных исследований. Миссия журнала – поддержание и развитие единого российского исследовательского пространства в научной сфере.

Рецензируемое издание. Коэффициент уровня издания - К. Рекомендовано к печати Ученым советом МИПИ им. Ломоносова. Зарегистрировано в Российской книжной палате за № 2949-2041.

Редакционная коллегия журнала
Главный редактор журнала - Романов П.И.,
члены редколлегии: Викторенкова С.В., Павлов Л.А., Эльзессер Ю.Ф., Игнатьева М.Ю., Богданов А.В., Горбачева Т.И., Грязнов С. Е., Гусева Н.Г., Зеленецкий Н. М., Илюшин В.А., Королев В.А., Лысов А.В., Павлова А. Н., Печенкин А. С., Поздеева Н. С., Розова Т. Н., Романова Е.П., Романова О. И., Санкин Л.А., Соловьев В.Д., Сошников В.Д., Ставцева О.И.

Учредитель:

МЕЖДУНАРОДНЫЙ ИНСТИТУТ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ им.ЛОМОНОСОВА
Санкт-Петербург

Адрес: 197348, г.Санкт-Петербург, Коломяжский пр., Бизнес-центр Норд Хауз
Электронная почта редакции:
info@vektornm.ru
Контакты издателя и типографии:
тел. (952) 2216070
info@vektornm.ru
сайт: vektornm.ru

Сайт журнала:
https://vektornm.ru/

Текущий номер журнала:
https://vektornm.ru/page_nomer/
Подать статью в журнал:
https://vektornm.ru/#anketa
Архив журнала:
https://vektornm.ru/page_arhiv/

Выпускные данные:
Подписано к изданию с оригинал-макета 05.11.2025. Формат издания: 210x297мм (А4). Гарнитура Time New Roman. Усл.печ.л. 61,1. Объем данных 12 Мб. Заказ 202511(28). Сверстано в типографии Международного института перспективных исследований им. Ломоносова

© МИПИ им.Ломоносова

Дормидошина Дарья Андреевна,
Технический директор, АО «ЦКБ «Дейтон»
Dormidoshina Daria A., Technical Director
JSC «CDO «Deyton»

Рубцов Юрий Васильевич,
Генеральный директор, АО «ЦКБ «Дейтон»
Rubtsov Yuriy V., General Director
JSC «CDO «Deyton»

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ТЕНДЕНЦИИ В ОПТИЧЕСКОМ ОБНАРУЖЕНИИ ДЕФЕКТОВ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ ИЗДЕЛИЙ В 2025 ГОДУ
TECHNOLOGY TRENDS IN OPTICAL DEFECT DETECTION OF ELECTRONIC PRODUCTS IN 2025

Аннотация. В статье рассматриваются ключевые технологические тенденции в области автоматизированного оптического контроля электронных изделий в 2025 году. Основное внимание уделяется внедрению систем с искусственным интеллектом для повышения точности обнаружения дефектов. Анализируются три основных подхода: классификация, обнаружение с локализацией и семантическая сегментация дефектов. Подчёркивается значительное снижение ложных срабатываний и экономический эффект от внедрения таких систем. Статья также описывает будущие направления развития, включая периферийные вычисления и прогностическую аналитику.

Abstract. This article examines key technology trends in automated optical inspection of electronic products in 2025. It focuses on the implementation of artificial intelligence-based systems to improve defect detection accuracy. Three main approaches are analyzed: classification, detection with localization, and semantic segmentation of defects. The significant reduction in false positives and the economic impact of implementing such systems are highlighted. The article also discusses future development directions, including edge computing and predictive analytics.

Ключевые слова: Изделия электронной техники, оптическое обнаружение дефектов, обеспечение качества продукции

Keywords: Electronic products, optical defect detection, product quality assurance

Введение

Обнаружение дефектов в производстве 2025 года изменилось незаметно, но существенно. То, что раньше представляло собой фиксированный набор правил, теперь стало динамичным процессом, определяемым данными, скоростью и точностью. Проверяются ли полупроводниковые пластины, разделённые кристаллы, элементы конденсаторов, резисторов, понимание того, как на самом деле обнаруживаются (и пропускаются) дефекты – ключ к принятию более обоснованных решений.

Система контроля дефектов оптических компонентов – это передовое автоматизированное решение, использующее визуализацию высокого разрешения и сложные алгоритмы для обнаружения микроскопических дефектов. Эти системы используют такие методы, как компьютерное зрение (КЗ), и распознавание образов, для выявления дефектов, включая царапины, включения, неровности покрытия и геометрические отклонения, с субмикронной точностью. Эта технология играет решающую роль в отрасли, требующей строгого контроля качества, такой как производство изделий электронной техники (ИЭТ).

Стремительное развитие мировой электронной промышленности создаёт беспрецедентный спрос на системы контроля дефектов. Производителям требуется нанометровая точность элементов, используемых в литографии, метрологии и других критически важных процессах, – потребность, которую можно удовлетворить только с помощью передовых технологий контроля. Рынок полупроводникового оборудования в

последние годы рос с совокупным среднегодовым темпом роста более 12% [1], что напрямую стимулирует внедрение сложных решений для контроля. По мере того, как производители микросхем переходят на более мелкие технологические узлы (менее 5 нм), традиционные методы контроля становятся неэффективными, что обуславливает необходимость использования передовых систем оптического контроля, способных обнаруживать дефекты субнанометрового размера.

Разработка и изготовление ИЭТ остаётся доминирующим, новые возможности в производстве создают новые возможности для роста. Ведущие производители инвестируют в решения для контроля дефектов на базе искусственного интеллекта (ИИ) и ожидается, что автоматизация в обеспечении качества ИЭТ займёт значительную долю рынка благодаря своей высокой производительности и стабильности в промышленных условиях.

Изменения в стратегии обнаружения дефектов с помощью системы автоматизированного обнаружения дефектов с искусственным интеллектом

Определяются три взаимодополняющих метода к автоматизированному обнаружению дефектов (АПАК) с помощью ИИ: классификация дефектов для скорости обнаружения, определение дефектов и причин их возникновения, сегментация для получения высокой точности.

Для различных типов ИЭТ используются различные стратегии АПАК. Реализация включает пять этапов: выбор пилотной версии, подготовка данных, обучение, развертывание и масштабирование. Современные АПАК достигают точности обнаружения 98% против 50% ложноположительных срабатываний в устаревших системах.

Устаревшие системы визуального контроля не были разработаны для современной сложности производства. По мере роста числа технологических операций изготовления ИЭТ и увеличения вариативности оборудования, контроль наличия дефектов на основе правил (те, которые полагаются на шаблоны и фиксированные пороговые значения) с трудом справляются с этой задачей [4]. Точка невозврата для устаревших систем: до 50% ложноположительных результатов, специалисты тратят время на проверку годных ИЭТ.

Жёсткость процессов изготовления ИЭТ: каждая новая итерация (доработка или воспроизводство) требует изменения всей технологическое цепочки. Невосприимчивость к едва заметным дефектам: микротрещины, аномалии зернистости или дефекты на ранней стадии часто остаются незамеченными. На производстве каждый необнаруженный дефект может привести к большому числу бракованных ИЭТ. Ложные срабатывания тоже обходятся недёшево – они снижают доверие к инструментам проверки и задерживают получение данных о выходе продукции.

АПАК с ИИ обучаются на реальных данных, а не на жёстко запрограммированных шаблонах. Качество реальных данных постоянно совершенствуется благодаря обратной связи с оператором (активное обучение). КЗ интегрируется с существующими системами камер и обработки изображения. Сокращается число ложных срабатываний, АПАК с ИИ работает на скорости технологических линий, даже при сложных проверках.

АПАК с ИИ не является монолитным – разные контексты контроля требуют разных архитектур системы контроля. Выбор правильного подхода зависит от производственных потребностей, сложности ИЭТ, изменчивости дефектов и ожиданий производительности:

1) Простая классификация дефектов – двоичное решение. Она применима в условиях, где решения принимаются быстро, а требования к контролю носят двусторонний характер – «годен/не годен». Она работает путем присвоения каждому изображению метки или набора меток без необходимости пространственной локализации дефекта. Эта стратегия часто используется на высокопроизводительных линиях, где каждая деталь либо соответствует базовым визуальным критериям, либо нет. Хотя она не предоставляет данные о местоположении, она чрезвычайно эффективна и масштабируема, что делает ее идеальной для серийного производства с ограниченным разнообразием геометрии ИЭТ и дефектов.

Распространенные области применения простой классификации дефектов: проверка качества микросварки выводов конденсаторов [2], наличие сторонних частиц в применяемых

для изготовления ИЭТ порошковых материалах [3]. Возможности: обнаружение нескольких дефектов – микробрызги стекла на поверхности металлостеклянных корпусов и пятна побежалости на площадке для монтажа кристалла. Фильтрация: «прошёл/не прошёл» на основе порогового значения. Используется, когда скорость критически важна и точное местоположение дефекта или измерения не требуются.

2) Обнаружение дефектов и точное определение проблем их возникновения. Обнаружение дефектов определяет класс и их местоположение с помощью ограничивающих пределов. Это обеспечивает приемлемый баланс точности и контекстной детализации, и делает его подходящим для ситуаций, когда необходимо знать, что неисправно и где произошло допущение дефектов. На практике такое обнаружение дефектов используется, когда результаты обнаружения должны быть использованы для определения профилактических мероприятий. Например, результаты обнаружения дефектов на полупроводниковых пластинах [5] отмечают наличие дефектов и показывают причины. Этот метод также хорошо работает на среднескоростных линиях, где допустима некоторая задержка или, когда инструкции по обнаружению и классификации должны быть точными. Области применения: перемычки паяных соединений при сборке печатных плат; контроль сварных швов крышки корпусов микросхемы на этапах герметизации; несоосность выводов корпусов микросхем. Возможности: ограничивающие рамки определяют, что и где находится; позволяют принимать решения о ремонте оборудования на последующих этапах. Используется, когда дефекты необходимо выявлять и устранять, а не просто фиксировать. Необходим баланс скорости и точности обнаружения дефектов.

3) Сегментация: анализ изображения с точностью до пикселя. Сегментация присваивает каждому пикселю изображения класс – наличие или отсутствие дефекта. Этот метод является наиболее точным и позволяет измерять площадь, объём и степень покрытия поверхности. Он особенно эффективен в АПАК, где форма или степень дефекта имеют реальные последствия, например, микротрещины. Поскольку сегментация требует больших вычислительных ресурсов, она часто используется на более медленных этапах контроля или на производственных линиях с высокой добавленной стоимостью, где точность измерений напрямую влияет на выход готовой продукции или соблюдение нормативных требований.

Результаты могут быть использованы для создания масок в режиме реального времени, оценок качества или даже прогнозных индикаторов проблем на предыдущих этапах технологического процесса. Области применения: контроль качества покрытия (например, золотое покрытие для многовыводных рамок микросхем), проверка однородности поверхности, контроль подповерхностных дефектов на полупроводниковых пластинах. Возможности: обрабатывает точные контуры дефектов, измеряет размеры и степень покрытия поверхности. Применение: когда важна геометрия дефекта (например, длина трещины, размер пятна). Используется также для метрологических испытаний и точного подсчёта.

Внедрение и окупаемость инвестиций

Начало определяется наиболее проблемными процессами инспекции: где часто происходит пропуск дефектов, где ложноположительные результаты слишком велики, а трудозатраты на инспекцию высоки, большая серийность ИЭТ. Пилотный проект должен предоставить реальную возможность продемонстрировать измеримые результаты в течение 6–8 недель.

Большинство производителей начинают с того, что у них есть. Для машинного обучения необходим набор данных изображений с маркировкой (порядка 20–40 изображений на вид дефектов). Используются имеющиеся изображения дефектов. Используются знания и опыт специалистов для получения достоверных данных.

Благодаря пользовательскому интерфейсу специалисты могут быстро аннотировать, обучать и валидировать модели на предприятии. Затем эти модели сравниваются с имеющей базой данных с использованием подобранных образцов. Валидация на раннем этапе фокусируется на точности обнаружения, частоте ложноположительных результатов и скорости обработки. Точность однородности партии может достигать 99%.

АПАК с обученной модель разворачивается на производственной линии локально или через безопасное облако. Интеграция с TQM (Total Quality Management, управление качеством, менеджмент-стратегия, ориентированная на непрерывное улучшение качества во всех процессах организации, с вовлечением каждого работника), MES (Manufacturing Execution System, система управления производственными процессами) [6], технологическим менеджментом [7], гарантирует, что данные о дефектах будут использоваться в мониторинге качества и процессах анализе выхода продукции, и с помощью обратной связи влиять на устранение дефектов. АПАК совершенствуется во времени благодаря сбору отзывов от специалистов в процессах активного обучения.

По мере повышения уровня доверия, экономического эффекта, АПАК масштабируется на аналогичные линии или объекты. Переобучение модели обучения требует незначительных усилий. Можно отслеживать производительность на панелях мониторинга, таких как частота ложных срабатываний, тенденции классификации дефектов и сокращение времени цикла. Специалисты проходят обучение, чтобы адаптировать рабочие процессы к аналитике ИИ.

Измерение успеха и окупаемости инвестиций измеряется в первую очередь точностью обнаружения. Опыт внедрения о сопровождения АПАК в 2025 году показывает повышение точности обнаружения выше 97%, включая сложные или редкие типы дефектов. Это особенно важно электронике, где микроаномалии могут привести к макроэкономическим сбоям.

В 2025 году прослеживается снижение количества ложноположительных срабатываний АПАК. Устаревшие системы контроля качества могут ошибочно классифицировать до половины всех дефектов. Благодаря ИИ уровень ложноположительных срабатываний снижается примерно до 4–10%, что значительно сокращает объем ручной инспекции и повышает надежность обнаружения.

Благодаря сокращению количества ложных срабатываний и автоматизации классификации производители ИЭТ значительно экономят на выпуске ИЭТ. В том числе это означает, что меньше специалистов заняты выполнением повторяющихся задач контроля качества, и больше времени уделяется оптимизации процесса.

Повышение выхода годных ИЭТ на 1% поворачивается сотнями миллионов рублей ежегодной экономии, для предприятий с большим объёмом серийного выпуска. Этот эффект достигается за счёт выявления дефектов, снижающих выход годных ИЭТ, на ранних стадиях производства и сокращения количества брака, приводящего к модернизации или замене оборудования.

Срок окупаемости АПАК составляет 12–18 месяцев. Это включает в себя экономию за счёт сокращения трудозатрат, повышения выхода годных изделий, ускорения наращивания производства и уменьшения количества дефектов на последующих этапах. Окупаемость инвестиций может быть измерена с первого месяца эксплуатации АПАК.

Однородность партии гарантируется с точностью более 99%.

Будущее контроля качества на основе искусственного интеллекта

Обнаружение дефектов с помощью ИИ – не конечная цель, а основа для следующего поколения интеллектуального производства.

Тенденции, определяющие будущее, показаны на рисунке 1:

1) периферийные вычисления. Вывод на основе периферийных вычислений приближает модель ИИ к производственной линии, снижая задержку и требования к пропускной способности.

Это обеспечивает реагирование в режиме реального времени, что крайне важно для высокоскоростных инспекций. Благодаря обновлению, модели по защищенным протоколам периферийные устройства остаются в актуальном состоянии, сохраняя при этом операционную независимость. Это особенно полезно в регулируемых средах, чувствительных к данным, где загрузка в облако ограничена;

2) результат – более быстрое обнаружение, более быстрое принятие решений и лучший контроль процесса без ущерба для целостности данных;

3) прогностическая аналитика качества. Более детальные данные о дефектах позволяют сопоставлять визуальные дефекты с изменениями на предыдущих этапах процесса.

Информация, генерируемая ИИ, может указывать на совпадение определенного кластера дефектов с температурным дрейфом, несоосностью элементов (например, выводов, или выводных площадок) или износом оборудования. Со временем это приводит к появлению предиктивных (прогнозирующих, предсказывающих, основанных на прогнозах) оповещений, а не только к обнаружению дефектов.

Например, обнаруженная тенденция в несовпадении слоев на полупроводниковых пластинах позволяет заблаговременно скорректировать параметры травления. В этом и заключается сила преобразования карт дефектов в статистические модели, которые не просто позволяют видеть дефект, но и определяют его причину;

4) оптимизация выхода годных изделий в замкнутом цикле. Когда данные о дефектах поступают в системы TQM и MES, предприятия получают архитектуру контроля качества в замкнутом цикле. Дефекты отмечаются и привязываются к технологическим процессам, производительности оборудования и действиям специалистов. Со временем эти связи обеспечивают автоматическую корректировку технологических процессов, обеспечивая непрерывную их оптимизацию.

5) интеллектуальный контроль становится интеллектуальным процессом. По мере того, как модели распознают, какие дефекты коррелируют с проблемами на последующих этапах, они позволяют внедрять улучшения на предыдущих этапах, прежде чем произойдет снижение выхода годных изделий.

6) автоматизация. Ручной контроль, сопровождающийся неточностями и человеческим фактором, уже недостаточен для удовлетворения потребностей современного производства. Производители быстро переходят на АПАК для обеспечения надежных автоматизированных процессов контроля.

Рисунок 1 – Тенденции, определяющие будущее

Часто задаваемые вопросы в 2025 году

Как ИИ обрабатывает новые или ранее не обнаруженные дефекты? АПАК используют методы активного обучения и обнаружения аномалий для адаптации к неизвестным условиям. Если дефект не соответствует ни одному обученному классу, система помечает его как аномальный, (на рисунке 2 показан отбраковщик ИЭТ с выделением аномальных) что позволяет инспекторам-технологам проанализировать его и переклассифицировать. Эти помеченные данные затем можно использовать для повторного обучения модели и постоянного расширения области её применения.

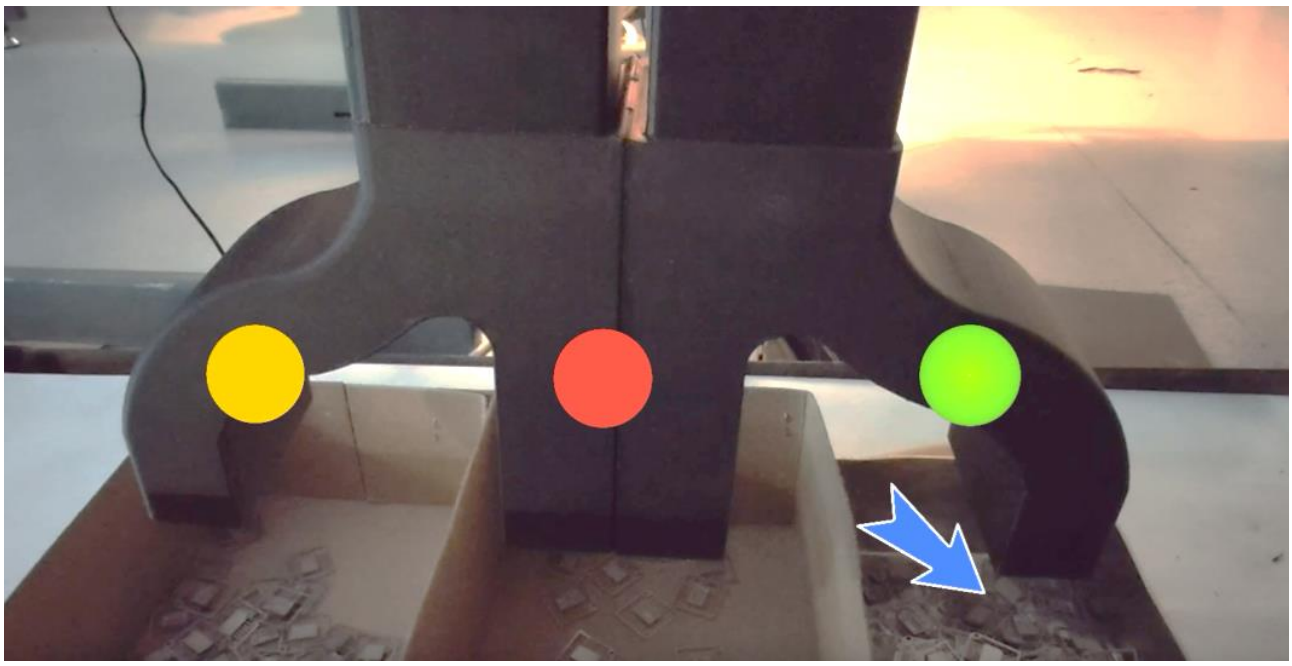


Рисунок 2 – Отбраковщик АПАК с выделением ИЭТ
с аномальными дефектами (желтым кружочком)

Соответствуют АПАК отраслевым нормам, таким как ГОСТ, ГОСТ Р, СТО, GMP или ISO? Да. Обнаружение дефектов с использованием АПАК можно настроить для соответствия строгим стандартам качества для различных типов ИЭТ. Например, протоколы контроля можно экспортировать в форматах, готовых к аудиту, с сохранением прослеживаемости, а системы можно валидировать так же, как и традиционные инструменты, только с более высокой точностью и меньшей субъективностью. GMP – Good Manufacturing Practice, международный стандарт, устанавливающий правила и требования для производства различных видов продукции. Его основная цель – обеспечить высокое качество и безопасность продукции на всех этапах: от выбора сырья до контроля готового продукта, что помогает предотвратить производство некачественных и опасных товаров. Это назначение GMP соответствует предназначению АПАК.

Заключение

Обнаружение дефектов в производстве ИЭТ – это гораздо больше, чем просто выявление неисправностей. Речь идёт о понимании того, что нужно исправить, насколько быстро это можно сделать и насколько ценно это улучшение. Традиционные системы контроля качества были созданы для более медленной эпохи, когда не требовалось принятия решений за доли секунды или 99%-ной точности при обнаружении дефектов микронного масштаба.

ИИ меняет это. Благодаря интеллектуальной классификации, точному обнаружению объектов и сегментации на уровне пикселей мы получаем чёткость там, где это наиболее важно – на производственной линии, в режиме реального времени, для каждого изделия.

Заинтересованы ли предприятия в сокращении ложных срабатываний, экономии времени, затраченного на ручной контроль или увеличении выхода годной продукции, имеет решающее значение.

Применение АПАК на практике демонстрируется на сайте АО «ЦКБ «Дейтон», раздел «Роботы» по адресу: https://deyton.ru/robot.html. Показано: как работает АПАК: быстро, точно и с учётом особенностей производственных процессов и требований к ИЭТ.

Таким образом, в 2025 году АПАК применяется для обнаружения дефектов:

– полупроводниковых пластин: сегментация, выявляет проблемы с наноструктурой и царапинами;

– кристаллов, обеспечивает сортировку, точность обнаружения дефектов выше 99,9%, снижает количество ложных срабатываний на 50% и более;

– для корпусов ИЭТ, выводных рамок, микросхем: выявляет несоосность, дефекты площадок под кристаллы, разварки выводов, дефекты герметизации, соединения микросварки, наличие пустот и прожогов, проблемы с покрытиями (апельсиновая корка, питтинг и пр);

– для узлов и блоков радиоэлектронной аппаратуры: снижает затраты на устранение дефектов при применении на входном, межоперационном и выходном контроле;

– для готовой продукции радиоэлектроники: проверяет форму, цвет, покрытие и размер, подтверждает соответствие упаковки и маркировки. Гарантирует однородность партии с точностью более 99%;

– для материалов, применяемых в продукции радиоэлектроники: проверяет процентную составляющую фракций, наличие сторонних материалов.

Список литературы:

1. Semiconductor and Electronics Optical Component Defect Inspection System Market Delivering Market and Business Intelligence Solutions. Optical Component Defect Inspection System Market Growth Analysis, Market Dynamics, Key Players and Innovations, Outlook and Forecast 2025-2032 – 2025 – URL: https://www.intelmarketresearch.com/optical-component-defect-inspection-system-market-3284 (дата обращения: 01.11.2025)

2. 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. №6. Стр. 6-15.

3. Дормидошина Д. А., Евстифеев Ю. А., Рубцов Ю.В., Кузнецов А. П. Разработка и внедрение АПАК для поиска дефектов изделий микроэлектроники с помощью искусственного интеллекта – Часть 4. Проверка качества порошковых материалов и микроструктур поверхностей // Электронные компоненты. 2025. №5. Стр. 21-25.

4. Рубцов Ю.В., Малышев В.Э., Назаренко А.А. Автоматизированный визуальный контроль качества изделий микроэлектроники методом сравнения шаблонов // Радиоэлектронная отрасль: проблемы и их решения. 2024. №1. Стр. 18-21.

5. Дормидошина Д. А., Евстифеев Ю. А., Рубцов Ю.В. Разработка и внедрение АПАК для поиска дефектов изделий микроэлектроники с помощью искусственного интеллекта – Часть 3. Обнаружение дефектов полупроводниковых пластин в поляризованном свете // Электронные компоненты. 2025. №3. Стр. 10-17.

6. Дормидошина Д. А. Компьютерное зрение в системах контроля качества продукции и связь с TQM и MES // Радиоэлектронная отрасль: проблемы и их решения. 2025. №1. Стр. 21-28.

7. Дормидошина Д. А. Роль технологического менеджмента в решении задач внедрения систем автоматизированного оптического контроля качества изделий электронной техники // Вестник Екатерининского института. 2025. №1. Стр. 31-38.