

МЕТОДИКА АВТОМАТИЧЕСКОГО ОПТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

О.Н. Чирков, В.К. Здоровцов, М.Н. Тамбовцев

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: представлена разработка системы автоматического оптического контроля (АОК) печатных плат (ПП) радиотехнических устройств на основе глубоких нейронных сетей. Рассмотрены характерные дефекты ПП, возникающие на этапах фотолитографии, травления и металлизации, и предложены методы их автоматического обнаружения и классификации. Показано, что использование архитектуры YOLOv8 (модель компьютерного зрения с сегментацией объектов на изображениях) в сочетании с алгоритмами предварительной обработки изображений позволяет достичь высокой точности детектирования дефектов при времени обработки одного кадра менее 250 мс. Исследованы и внедрены стратегии ускорения инференса с использованием фреймворков OpenVINO и DeepSparse (открытые наборы инструментов для разработки приложений компьютерного зрения и искусственного интеллекта), обеспечивающие увеличение производительности в 4–5 и 11 раз соответственно. Разработана отказоустойчивая распределённая инфраструктура на базе Apache Kafka (система обмена сообщениями между серверными приложениями, работающая в режиме реального времени) и PostgreSQL (объектно-реляционная система управления базами данных (СУБД) с открытым исходным кодом), обеспечивающая параллельную обработку данных и целостность результатов. Реализован интерфейс взаимодействия с оператором для уведомления о статусе обработки и обновлении моделей. Экспериментальная оценка системы показала точность до 94 % и полноту до 89 %. Применение предложенной методики позволяет повысить выход годной продукции, сократить время контроля и снизить эксплуатационные затраты в производстве печатных плат радиотехнических устройств

Ключевые слова: автоматический оптический контроль, печатные платы, дефекты, нейронные сети, компьютерное зрение, телевизионные системы технического зрения

Благодарности: работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № FZGM-2025-0002)

Введение

Современное производство печатных плат (ПП) для радиотехнических устройств предъявляет высокие требования к качеству и надёжности межсоединений, что обусловлено миниатюризацией элементов и увеличением плотности монтажа [1-3]. Нарушения целостности проводников, межслойные короткие замыкания, нарушения изоляции и дефекты металлизации могут приводить к отказам аппаратуры в условиях электромагнитных помех и вибрационных нагрузок [4]. Автоматический оптический контроль (АОК) является ключевым этапом технологического процесса, обеспечивающим выявление дефектов на ранних стадиях производства [5].

Традиционные методы АОК, основанные на алгоритмах обработки изображений (пороговая сегментация, анализ текстур, выделение контуров), обладают ограниченной эффективностью при анализе сложных многослойных структур с вариативным фоном и наличием те-

ней [6]. В последние годы активно развиваются методы машинного обучения, в частности, свёрточные нейронные сети (CNN), которые демонстрируют высокую точность в задачах детектирования дефектов на изображениях [7, 8]. Однако их применение для контроля ПП связано с необходимостью обработки изображений высокого разрешения в реальном времени, что требует оптимизации вычислительных алгоритмов.

В данной работе предлагается методика автоматического оптического контроля качества изготовления ПП с использованием глубокой нейронной сети YOLOv8, оптимизированной для работы в составе распределённой системы с применением технологий OpenVINO и DeepSparse. Особое внимание уделено обеспечению отказоустойчивости, масштабируемости и интеграции с системами управления производством.

Постановка задачи

Каждый производственный дефект печатной платы, от технологического нарушения до применения материалов ненадлежащего каче-

ства, потенциально ведет к отказу конечного радиоустройства. Контроль качества изготовления печатных плат, включая классификацию допустимых дефектов по их типам, геометрическим параметрам и критичности, регламентирован - ГОСТ Р 53432-2009.

Выделим следующих типов дефектов:

1. Дефекты травления (рис. 1):

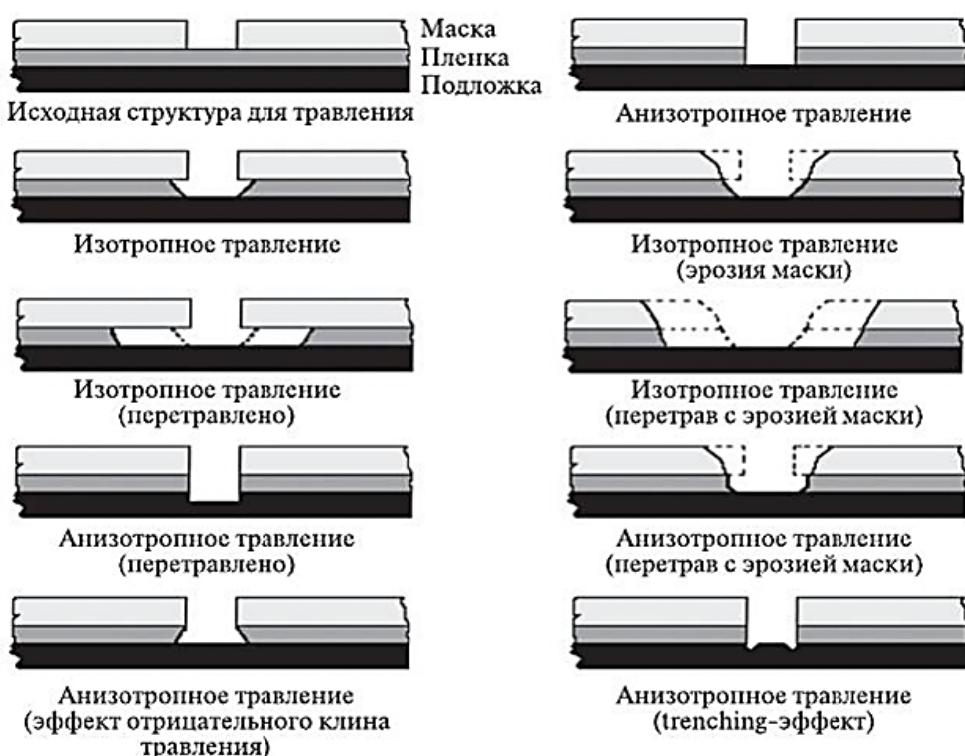


Рис. 1. Дефекты травления

2. Дефекты паяльной маски:

- Непрокрасы: отсутствие маски может привести к коротким замыканиям при пайке.
- Наплывы маски: попадание маски на контактные площадки.
- Отслоение маски: нарушение адгезии маски к основе, ведущее к её отслоению в процессе эксплуатации.

3. Дефекты металлизации:

- недостаточная толщина гальванического покрытия: снижает проводимость и механическую прочность переходных отверстий.
- пористость покрытия: приводит к окислению и коррозии контактов.
- отслоение металлизации: нарушение связи между слоями меди в отверстиях, приводящее к обрыву цепи.

4. Дефекты переходных отверстий:

- Недотрав: неполное удаление меди с незащищённых участков, приводящее к коротким замыканиям между проводниками.

- Перетрав: чрезмерное травление, истончающее проводники, может привести к обрыву цепи или изменению волнового сопротивления.

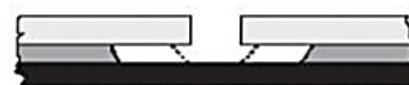
- Подтрав под маску: травление меди под защитной маской, что ослабляет адгезию и может вызвать отслоение маски.



Анизотропное травление



Изотропное травление



Изотропное травление (перетравлено)



Анизотропное травление (перетравлено)



Анизотропное травление (эффект отрицательного клина травления)



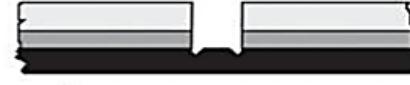
Изотропное травление (эррозия маски)



Изотропное травление (перетрав с эрозией маски)



Анизотропное травление (перетрав с эрозией маски)



Анизотропное травление (trenching-эффект)

- заполнение отверстий при пайке: закупорка отверстий припоеем, препятствующая монтажу компонентов.

- отслоение покрытия в отверстиях: нарушение целостности металлизации ведет к обрыву межслойных соединений.

5. Дефекты пайки:

- Холодная пайка: недостаточный прогрев, приводящий к ненадёжному контакту.

- Перегрев: разрушение паяного соединения или повреждение компонентов.

- Пустоты в паяных соединениях снижающие механическую прочность и теплопроводность.

6. Механические повреждения (рис. 2):

- Сколы и трещины: нарушение целостности диэлектрика или проводников.

- Деформация платы: искривление ПП, затрудняющее монтаж в корпус.



Рис. 2. Дефект скол

Оптические проявления дефектов характеризуются изменением яркости, текстуры и геометрии элементов на изображении, получаемом с помощью телевизионных систем технического зрения. Пример дефекта «обрыв проводника» представлен на рис. 3.



Рис. 3. Пример дефекта «обрыв проводника» на оптическом снимке

Методы контроля качества печатных плат

Для выявления перечисленных дефектов применяются различные методы контроля, которые можно разделить на контактные и бесконтактные.

1. Визуальный контроль (рис. 4). Представляет собой ручной осмотр. Используется лупа или микроскоп для выявления явных дефектов (трещины, сколы, непрокрасы). Недостаток — субъективность и низкая скорость.

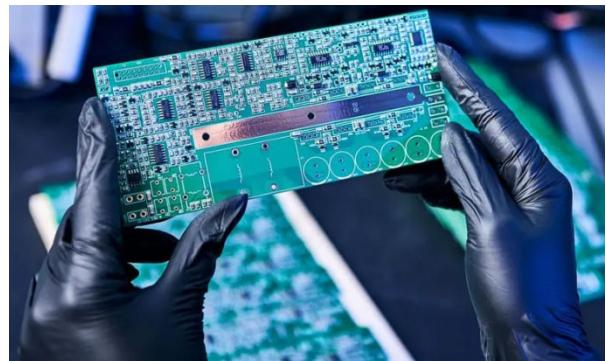


Рис. 4. Визуальный контроль

2. Автоматический оптический контроль (АОК). Система захвата изображения ПП с помощью камер высокого разрешения и сравнивает их с эталонным изображением или CAD-моделью. Обнаруживаемые дефекты:

- Обрывы и короткие замыкания проводников.
- Дефекты паяльной маски (непрокрасы, наплызы).
- Положение и наличие компонентов (для собранных плат).
- Дефекты травления (недотравы, перетравы).

Преимущества: высокая скорость и объективность; возможность интеграции в производственную линию; обнаружение дефектов на ранних стадиях.

3. Оптический контроль с помощью 3D-сканеров. Позволяет оценивать высоту компонентов, паяльных паст, выявлять непропаи.

Применение: Контроль качества паяных соединений после монтажа компонентов.

4. Рентгеновский контроль. Просвечивание платы рентгеновскими лучами для выявления скрытых дефектов.

Обнаруживаемые дефекты:

- Пустоты в паяных соединениях.
- Короткие замыкания под компонентами.
- Качество переходных отверстий.

5. Контроль импеданса. Проверка волнового сопротивления проводников, критичного для высокочастотных устройств. Используются специализированные измерители импеданса (TDR-анализаторы).

6. Электрический контроль. Проверка целостности цепей и отсутствия коротких замыканий. На специализированных стендах проводится массовая проверка собранных плат на соответствие электрическим параметрам.

Оптические исследования, в частности рассматриваемый автоматический оптический

контроль (АОК), являются одним из наиболее эффективных и распространённых методов контроля печатных плат, особенно на этапах изготовления основы и монтажа компонентов.

Ключевые преимущества оптических методов:

- Высокая скорость и производительность. Современные АОК-системы способны проверять сотни плат в час.
- Объективность и воспроизводимость. Исключается человеческий фактор, все решения принимаются на основе алгоритмов.
- Раннее обнаружение дефектов. Позволяют выявить проблемы на начальных этапах производства, минимизируя стоимость исправления.
- Неразрушающий контроль. Платы не повреждаются в процессе проверки.
- Гибкость и адаптивность. Системы можно быстро перенастраивать на новые типы плат.

Современные тенденции в оптическом контроле качества ПП

Применение искусственного интеллекта (ИИ) и нейронных сетей. Алгоритмы глубокого обучения (такие как YOLO, CNN) позволяют повысить точность детектирования сложных и малоразмерных дефектов, а также снизить количество ложных срабатываний.

Использование гиперспектральных камер позволяет анализировать не только геометрию, но и химический состав поверхностей, выявляя загрязнения и нарушения в материалах.

Интеграция с Industry 4.0. АОК-системы становятся частью «умной» фабрики, обмениваясь данными с MES-системами и оборудованием для корректировки технологического процесса в реальном времени.

Ограничения оптических методов:

- Неспособность выявлять скрытые дефекты (например, внутри слоёв многослойных печатных плат (МПП) или под компонентами). Для этого требуется рентгеновский контроль.
- Зависимость от условий освещения и чистоты поверхности платы.

Методика анализа изображений дефектов

Основной инструмент анализа изображений дефектов — это цифровые методы обработки сигналов и изображений. Ключевыми методами являются:

1) Фильтрация изображений — применяется для удаления шума и выделения контуров дефектов.

2) Выделение признаков — выделение особых точек, линий и областей, характеризующих структуру поверхности.

3) Классификация дефектов — разделение дефектов на классы согласно их физическим характеристикам.

Примеры цифровых фильтров:

- Среднеарифметический фильтр — сглаживает изображение, уменьшая шум.
- Медианный фильтр — устраняет выбросы, сохраняя границы деталей.
- Градиентный фильтр — выделяет края и особенности изображения.

Методы сегментации позволяют разделить изображение на отдельные регионы, соответствующие областям с различными характеристиками. Наиболее распространенные методы сегментирования:

- Алгоритм порогового разделения — простое бинарное преобразование изображения.
- Метод кластеризации — группировка пикселей по сходству характеристик.
- Вейвлет-анализ — масштабируемый анализ частотных составляющих изображения.

Критерии оценки качества:

- 1) Точность — доля правильно обнаруженных дефектов среди всех обнаруженных объектов.
- 2) Полнота — доля обнаруженных дефектов относительно общего числа дефектов в выборке.

3) F-мера — гармоническое среднее между точностью и полнотой.

4) mAP (mean Average Precision) — интегральная метрика качества детектирования.

5) Скорость работы - время, затрачиваемое на обработку 1 кадра.

Методика работы системы автоматического оптического контроля

Методику работы системы автоматического оптического контроля качества изготовления печатных плат можно разделить на три крупных этапа: первичная конфигурация, обучение, обработка (рис. 5).

Для эффективности работы системы, чтобы проще находить и исправлять ошибки параллельно с выполнением методики будут вестись два журнала логирования. Первый журнал будет содержать информацию о работе

системы, а второй журнал будет содержать информацию о работе пользовательского интерфейса.

Рассмотрим каждый из этапов:

1. Конфигурация - это этап на котором происходит первоначальное определение па-

раметров работы системы. Может производиться с помощью файла в рабочей директории, либо через аргументы командной строки при запуске.



Рис. 5. Методика работы системы

Конфигурация с помощью файла заключается в проверке существования файла, чтение его содержимого и дальнейшего разбора структуры в соответствии с правилами построения файлов конфигурации.

Конфигурация через аргументы командной строки заключается в том, что требуемые параметры система получает не из файла в рабочей директории, а с помощью задания параметров запуска программы.

2. Обучение - это этап на котором происходит чтение наборов, аннотированных данных, их проверка, создание статистических данных о наборе данных, аугментация, fine-tuning.

Аугментация используется для искусственного увеличения набора данных. За счет применения различных геометрических трансформаций и шумов. Данная операция позволяет снизить затраты на аннотацию дополнительных экземпляров.

3. Обработка - использование полученных в процессе обучения весов для анализа.

Обнаружение дефектов

Модуль детектирования принимает на вход ссылку на модель и данные из Kafka. При отсутствии оптимизированной версии модели выполняется её конвертация с использованием OpenVINO или DeepSparse (открытые наборы

инструментов для разработки приложений компьютерного зрения и искусственного интеллекта). Результаты детектирования (координаты дефектов, метки класса, уверенность) сохраняются в базу данных и сопровождаются аннотированными изображениями.

После загрузки набор данных ставится в очередь на обучение. Очередь реализована через Apache Kafka. На выходе мы получаем набор данных из метрик и тестовых изображений.

Журналирование системы разделено на 3 уровня: ошибка, информация и отладка. В таблицы записываются уровни ошибки и информация. Отладочная информация выводится в консоль на сервере. Для определения в каком модуле произошла ошибка ведется учет данных от кого поступила информация о событии.

Моделирование

По результатам моделирования (рис. 6-7) получены следующие ключевые результаты экспериментов:

Средняя скорость обработки: 420 мс/кадр.

Скорость с использованием OpenVINO: 95 мс/кадр (ускорение в ~4.4 раза).

Скорость с использованием DeepSparse: 38 мс/кадр (ускорение в ~11 раз).

Точность: до 94 %.

Полнота: до 89 %.

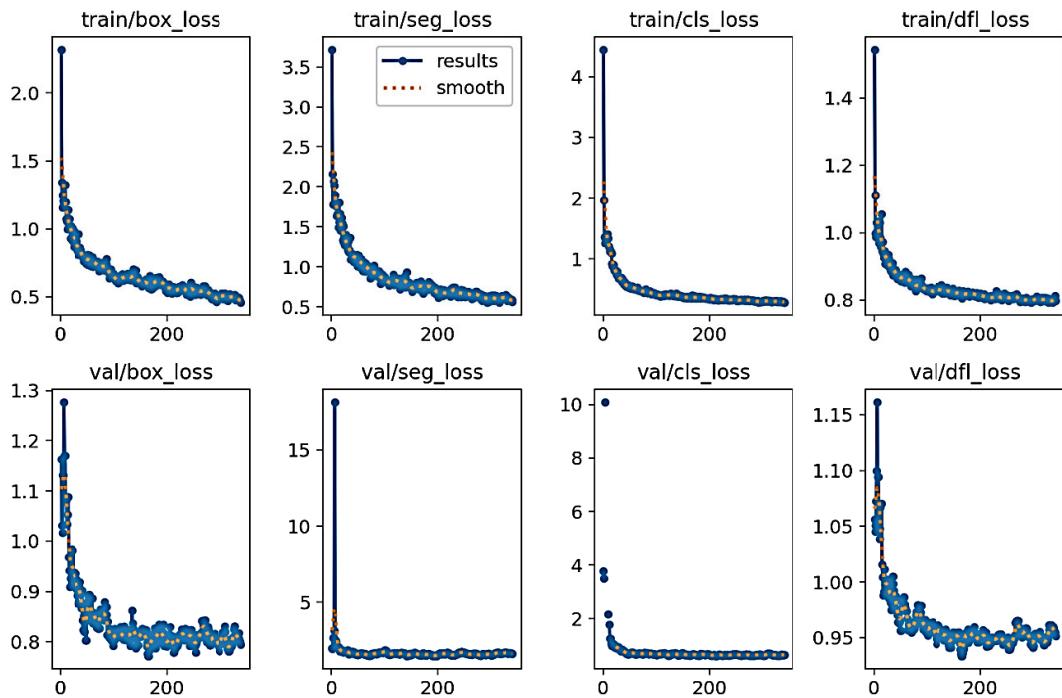


Рис. 6. Результаты анализа потерь

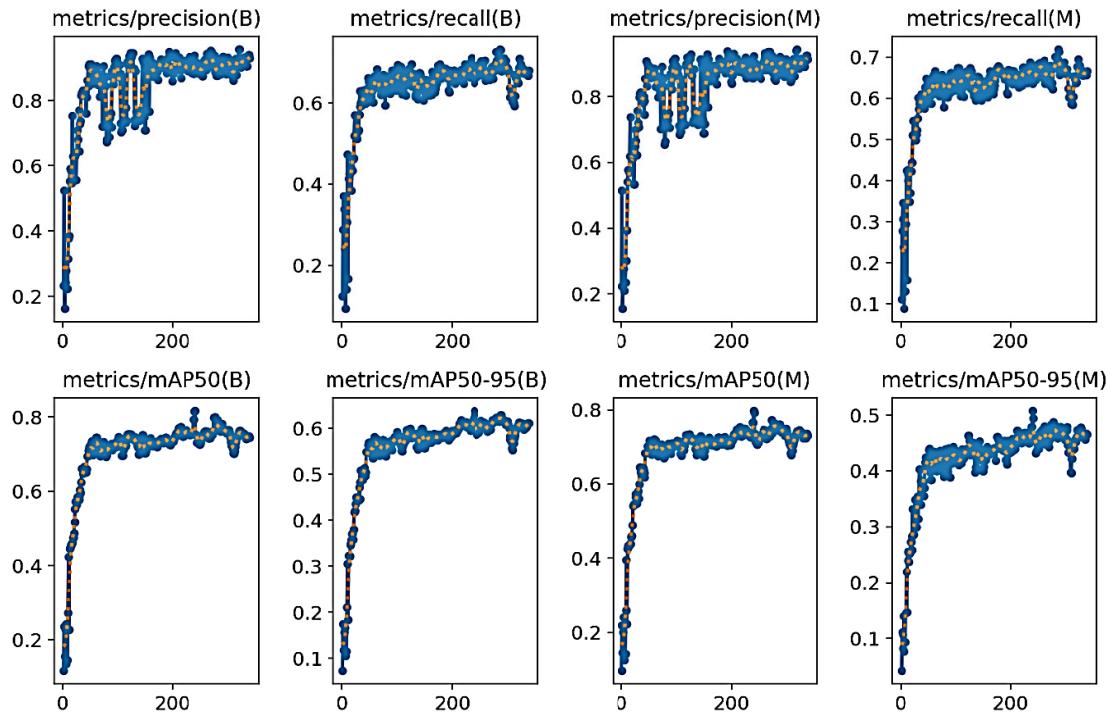


Рис. 7. Результаты анализа метрик

Заключение

Приведем основные научные результаты работы.

1. Разработаны методики предварительной обработки изображений и обнаружения дефектов на ПП с использованием архитекту-

ры YOLOv8. Показано, что применение глубокого обучения позволяет достичь высокой точности и чувствительности в обнаружении дефектов, обеспечивая обработку кадров менее чем за 250 мс/кадр.

2. Исследованы и применены две стратегии оптимизации производительности нейрон-

ных сетей: библиотека OpenVINO и библиотека DeepSparse. Использование OpenVINO ускоряет обработку изображений в среднем в 4-5 раз, тогда как DeepSparse увеличивает скорость распознавания в 11 раз, но с возможным снижением точности.

3. Создание инфраструктуры отказоустойчивости и параллельной обработки данных. Разработана архитектура распределённой системы на основе Apache Kafka для обеспечения отказоустойчивости и масштабируемости.

4. Эффективная работа с большими наборами данных. Спроектирована реляционная база данных PostgreSQL для хранения результатов обработки, настроек системы и истории событий.

5. Автоматизация процедуры обновления и тестирования моделей. Создана процедура автоматической загрузки и обучения моделей на размеченных наборах данных с последующим тестированием и сохранением лучших результатов. Включает использование механизма аугментации для искусственно увеличения набора данных, повышая общее качество распознавания.

6. Организация удобного интерфейса и уведомления пользователей.

7. Комплексная оценка качества работы системы: Продемонстрировано, что созданная система показывает высокую точность (94 %) и полноту (89 %), позволяя эффективно выявлять дефекты при изготовлении печатных плат. В зависимости от выбранного метода оптимизации средняя скорость обработки кадров варьируется от 15 до 450 мс.

Таким образом, полученные результаты показывают, что предложенная методика оптического контроля является высокоэффек-

тивной и экономически выгодной для промышленного применения.

Литература

1. Оптимизация оценки качества полупроводниковых пластин с помощью нейротехнологий CNN / О.Н. Чирков, А.Б. Антиликаторов, К.М. Шкаровский, М.Н. Тамбовцев // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2025. Т. 21. № 1. С. 81-87.
2. Чирков О.Н., Хрипунков А.П. Основные принципы разработки топологии при проектировании печатных плат с высокоскоростными цифровыми интерфейсами // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2025. Т. 21. № 2. С. 161-168.
3. Чирков О.Н., Костюков А.С., Хрипунков А.П. Методика проектирования печатных плат для работы с высокоскоростными цифровыми интерфейсами // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2025. Т. 21. № 3. С. 163-173.
4. Wang X., Liu Y., Zhang H. Automatic defect detection for silicon wafer surface using convolutional neural networks // IEEE Transactions on Industrial Informatics. 2018. 14(1). Pp. 354-363.
5. Liu Z., Chen J., Liang C. Efficient deep learning-based defect detection in semiconductor manufacturing // Journal of Manufacturing Systems. 2020. Vol. 56. pp. 155-166.
6. Kim D., Park K., Choi W. Deep learning based image segmentation for wafer inspection // Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation. 2019. Pp. 5421-5426.
7. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024666477 Российская Федерация. Программа контроля дефектов полупроводниковых пластин с использованием компьютерного зрения и алгоритмов глубокого машинного обучения : № 2024665362 : заявл. 04.07.2024 : опубл. 15.07.2024 / О.Н. Чирков, А.А. Пирогов, М.Н. Тамбовцев ; заявитель ФГБОУ «Воронежский государственный технический университет».
8. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024684516 Российская Федерация. Программа контроля дефектов полупроводниковых пластин в фотолитографии при технологии изготовления 350 нм с использованием CNN нейросети: № 2024683496: заявл. 10.10.2024: опубл. 17.10.2024 / О.Н. Чирков, М.Н. Тамбовцев; заявитель ФГБОУ «Воронежский государственный технический университет».

Поступила 16.09.2025; принята к публикации 11.11.2025

Информация об авторах

Чирков Олег Николаевич – старший преподаватель, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: chir_oleg@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2250-2100>
Здоровцов Вадим Константинович – студент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: kipr@vorstu.ru
Тамбовцев Максим Николаевич – студент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: kipr@vorstu.ru

TECHNIQUE OF AUTOMATIC OPTICAL QUALITY CONTROL OF PRINTED CIRCUIT BOARDS USING NEURAL NETWORKS

O.N. Chirkov, V.K. Zdorovtsov, M.N. Tambovtsev

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: the work is devoted to the development of an automatic optical control system for printed circuit boards (PCBs) of radio engineering devices based on deep neural networks. We considered the characteristic defects of PP that occur at the stages of photolithography, etching and metallization, and proposed methods for their automatic detection and classification. We show that using the YOLOv8 architecture (a computer vision model with segmentation of objects on images) in combination with image preprocessing algorithms makes it possible to achieve high accuracy in detecting defects with a processing time of less than 250 ms per frame. We researched and implemented strategies for accelerating inference using the OpenVINO and DeepSparse frameworks (open toolkits for developing computer vision and artificial intelligence applications), which increase productivity by 4-5 and 11 times, respectively. We developed a fault-tolerant distributed infrastructure based on Apache Kafka (a real-time messaging system between server applications) and PostgreSQL (an open source object-relational database management system), providing parallel data processing and integrity of results. We implemented the interface of interaction with the operator for notification of the status of processing and updating of models. An experimental evaluation of the system showed accuracy of up to 94 % and completeness of up to 89%. The application of the proposed methodology makes it possible to increase the yield of usable products, reduce control time and reduce operating costs in the production of printed circuit boards for radio engineering devices

Key words: automatic optical control, printed circuit boards, defects, neural networks, computer vision, television vision systems

Acknowledgments: this work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project no. FZGM-2025-0002)

References

1. Chirkov O.N., Antilikatorov A.B., Shkarovskiy K.M., Tambovtsev M.N. "Optimization of the quality assessment of semiconductor wafers using CNN neurotechnologies", *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2025, vol. 21, no. 1, pp. 81-87.
2. Chirkov O.N., Khripunkov A.P. "Basic principles of topology development in the design of printed circuit boards with high-speed digital interfaces", *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2025, vol. 21, no. 2, pp. 161-168.
3. Chirkov O.N., Kostyukov A.S., Khrinkov A.P. "Design methodology of printed circuit boards for working with high-speed digital interfaces", *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2025, vol. 21, no. 3, pp. 163-173.
4. Wang X., Liu Y., Zhang H. "Automatic defect detection for silicon wafer surface using convolutional neural networks", *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2018, no. 14(1), pp. 354-363.
5. Liu Z., Chen J., Liang C. "Efficient deep learning-based defect detection in semiconductor manufacturing", *Journal of Manufacturing Systems*, 2020, no. 56, pp. 155-166.
6. Kim D., Park K., Choi W. "Deep learning based image segmentation for wafer inspection", *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, 2019, pp. 5421-5426.
7. Chirkov O.N., Pirogov A.A., Tambovtsev M.N. "A program for defect control of semiconductor wafers using computer vision and deep Machine learning algorithms", Certificate of state registration of a computer program No. 2024666477 Russian Federation, no. 2024665362, application 07.04.2024, published 07.15.2024 , applicant Voronezh State Technical University.
8. Chirkov O.N., Tambovtsev M.N. "The program for defect control of semiconductor wafers in photolithography with 350 nm manufacturing technology using CNN neural network", Certificate of state registration of a computer program no. 2024684516 Russian Federation, no. 2024683496: application 10.10.2024: published 17.10.2024, applicant Voronezh State Technical University.

Submitted 16.09.2025; revised 11.11.2025

Information about the authors

- Oleg N. Chirkov**, Assistant Professor, Voronezh State Technical University (84 20th Anniversary of October str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: chir_oleg@mail.ru , ORCID: <https://orcid.org / 0000-0003-2250-2100>
- Vadim K. Zdorovtsov**, student, Voronezh State Technical University (84 20th Anniversary of October str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: kipr@vorstu.ru
- Maksim N. Tambovtsev**, student, Voronezh State Technical University (84 20th Anniversary of October str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: kipr@vorstu.ru