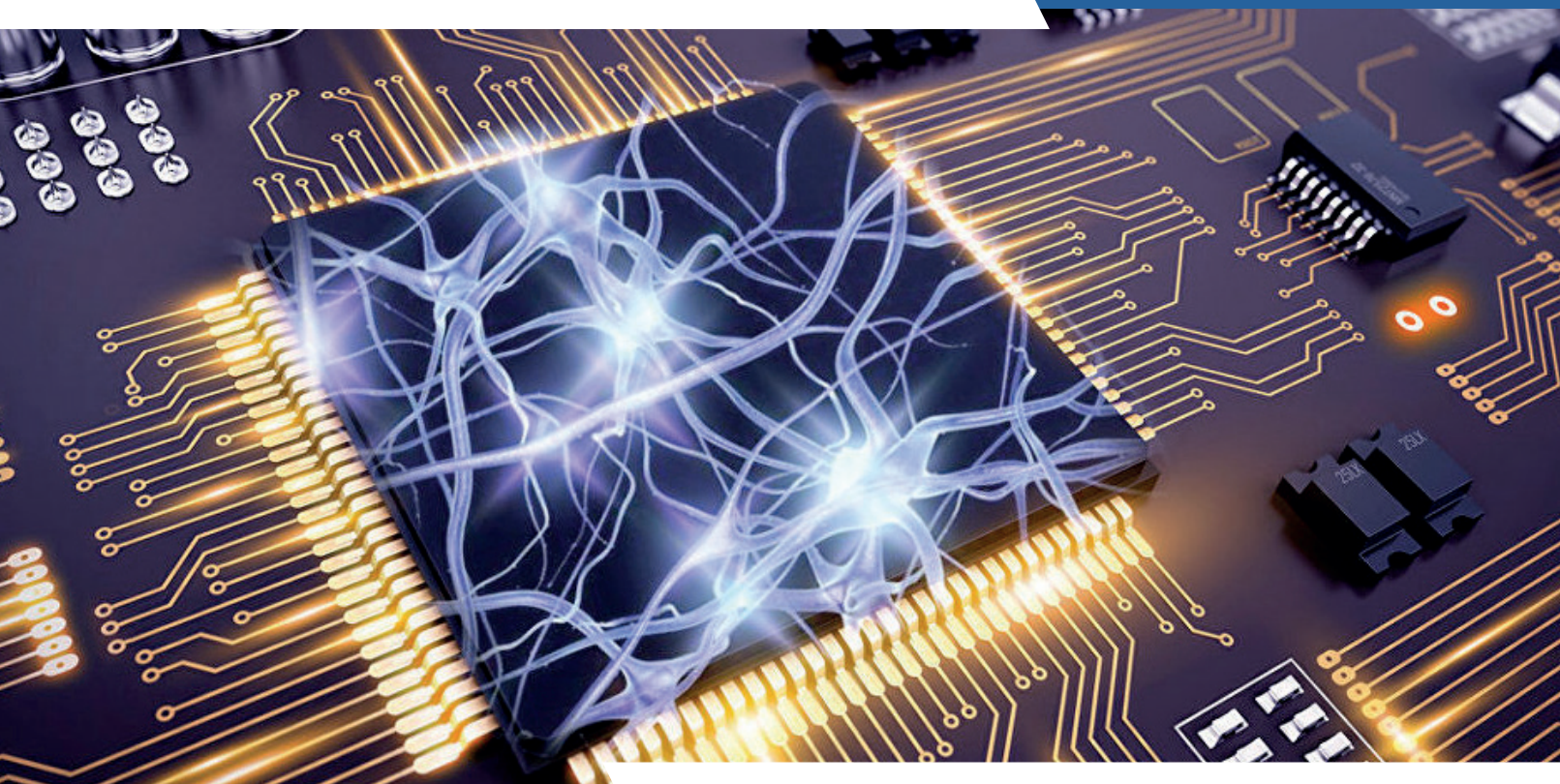


3⁽²³⁾ | **РАДИОЭЛЕКТРОННАЯ ОТРАСЛЬ:** **2026** | **ПРОБЛЕМЫ И ИХ РЕШЕНИЯ**



НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

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



УДК: 004.8; 621.3

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ, РАЗРАБОТКИ И ЗАПУСКА СИСТЕМ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ОПТИЧЕСКОЙ ИНСПЕКЦИИ ИЗДЕЛИЙ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ

RESULTS OF RESEARCH, DEVELOPMENT AND LAUNCH OF AUTOMATED OPTICAL INSPECTION SYSTEMS FOR ELECTRONIC PRODUCTS

Дормидошина Д.А., технический директор, эксперт по стандартизации,
+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., Technical, expert on standardization;
+7 (925) 104-77-96, dormidoshina@deyton.ru,

Rubtsov U.V., General Director, expert on standardization,
JSC "Central Design Office «Deyton», +7 (926) 009-37-00, Rubtsov@deyton.ru

Аннотация: в настоящей статье представлены результаты, полученные авторами в процессах исследований, разработки и запуска систем автоматизированной оптической инспекции изделий электронной техники в 2025 году и в первом квартале 2026 года в цехах изготовителей электронной техники.

Annotation: this article presents the results obtained by the authors in the research, development, and launch of automated optical inspection systems for electronic products in 2025 and the first quarter of 2026 in the workshops of electronic equipment manufacturers.

Ключевые слова: изделия электронной техники, автоматизированная оптическая инспекция контроля качества, технологии искусственного интеллекта, компьютерное зрение, глубокое обучение, нейронные сети.

Keywords: electronic products, automated optical inspection for quality control, artificial intelligence technologies, computer vision, deep learning, neural networks.

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

Введение

Низкое качество изготавливаемой радиоэлектронной продукции может на (15-20) % повлиять на доходы изготовителей. Это значительная сумма, которую можно потерять из-за того, что изделие не соответствует заявленным требованиям. В радиоэлектронной промышленности допускать попадание дефектных изделий к потребителям или отбраковывать качественные изделия электронной техники (далее – ИЭТ) из-за ложных срабатываний крайне убыточно и существенно снижает рейтинг предприятий [1].

Раньше предприятия полагались на специалистов-инспекторов, которые осматривали ИЭТ, проверяя их на наличие дефектов. Хотя человек может обладать невероятно острым зрением, но в своем большинстве не в силах выполнять монотонную и при этом интенсивную работу. Инспектор может уставать или отвлекаться в тот момент, когда имеется дефект. Автоматизированная система оптического обнаружения дефектов (далее – АПАК) не устает и способна работать в ночную смену.

Переход на АПАК не исключает человеческий фактор, а, наоборот, повышает его значимость. Вместо выявления дефектов специалисты могут со-



Дормидошина Д.А. Рубцов Ю.В.

средоточиться на устранении первопричин их возникновения. Этот современный сдвиг способствует повышению эффективности производства, гарантируя ожидания потребителя.

Развитие структуры систем автоматизированной оптической инспекции изделий электронной техники

Исследования в области эргономики показывают, что эффективность ручного контроля качества ИЭТ снижается на 25 % после часа непрерывной инспекции. Ручные проверки ставят на кон репутацию предприятия, полагаясь на готовность инспектора к работе. Современные производственные линии работают быстро. В производстве ИЭТ продукция может перемещаться со скоростью, которая превращает отдель-

ные элементы ИЭТ в размытое пятно. Если линия работает со скоростью 90 единиц продукции в минуту, то обнаружить трещину толщиной 3 мкм является невыполнимой задачей для человека. Он видит то, что ожидает увидеть – как правило это идеальный продукт. Этот психологический феномен, известный как «слепота невнимательности», заставляет инспекторов смотреть на дефект и не замечать его.

АПАК исключает этот фактор. Компьютерное зрение (далее – КЗ) захватывает изображения за микросекунды, фиксирует движение и анализирует каждый пиксель по отношению к эталонному образцу. Это объективный и беспристрастный подход.

В основе технологии работы АПАК лежит математика и свет. Типичная АПАК включает три основных компонента, работающие согласовано [2]. Если один из них неисправен, система не должна эксплуатироваться.

Оптика и освещение занимают важное место в структуре АПАК. Большинство специалистов фокусируются на разрешении камеры, но освещение также играет заметную роль [3]. Если оптика и освещение не позволит увидеть царапину на поверхности ИЭТ, 50-мегапиксельный сенсор камеры не поможет. Подсветка отлично подходит для измерения контуров элементов ИЭТ. Структурированный свет обеспечивает обнаружение трехмерных деформаций. Купольное освещение устраняет тени на блестящих отражающих поверхностях (например, на многоводных рамках микросхем).

После захвата изображения КЗ, программное обеспечение (далее – ПО) [4] берет на себя управление данными. В традиционных понятиях это основано на правилах, например, «если расстояние между точкой один и точкой два меньше 100 мкм, изделие не соответствует требованиям».

Это отлично подходит для простых задач типа «прошел / не прошел», например, проверки наличия элемента в ИЭТ. Если дефект субъективен АПАК переходит к оптическому контролю на основе искусственного интеллекта (далее – ИИ). АПАК, основанные на правилах, испытывают трудности с органическими формами. Царапина на поверхности ИЭТ может выглядеть по-разному каждый раз. Запрограммировать жесткое правило для «царапины» практически невозможно, потому что невозможно определить все возможные вариации царапины. Используя глубокое обучение (далее – ГО), мы обучаем систему на примерах, а не по правилам. Мы показываем системе 5000 изображений годных изделий и 1000 изображений бракованных. Нейронная сеть (далее – НС) благодаря ГО самостоятельно определяет разницу.

В основе оптического контроля лежит оценка: дефектов поверхности (царапин, вмятин, ямок, включений, загрязнений); точности размеров (длина, ширина, высота, зазоры, кромки); чистоты и текстуры поверхности; покрытий и маркировки; полноты элементов ИЭТ и их выравнивание.

Задача АПАК заключается в классификации предполагаемых дефектов. Специалист может либо подтверждать найденный дефект, либо отмечает его как допустимую вариацию процесса, либо констатирует ложное срабатывание. Допустимые вариации или индикаторы процесса особо важны. ПО, обрабатывая введенную специалистом информацию, в режиме реального времени может сигнализировать о появлении негативного тренда. Например, появление большого количества допустимых дефектов, связанных с недостаточной толщиной покрытий контактных площадок, служит сигналом для пересмотра и настройки процессов гальваники.

Эта возможность преобразует интеллектуальный контроль в производстве. Система учится обращать внимание на безобидные вариации, такие как микрокапля стекла на поверхности площадки под кристалл металлостеклянного корпуса, которая просто убирается, но если остается – может нарушить структурную целостность микросхемы.

Применение АПАК позволяет не только обнаруживать дефекты, но и обеспечивает улучшение технологических процессов на основе данных. Когда инспектор работает вручную, брак попадает в соответствующую корзину для брака и на этом все заканчивается. Возможно, кто-то пересчитывает ИЭТ в конце смены.

При использовании АПАК каждый брак фиксируется по времени и классифицируется. Возникают вопросы, например, увеличивается ли количество дефектов каждый понедельник с 8 утра? Постоянно ли левая сторона пресс-формы для упаковки микросхем в пластик делает заусенцы? Увеличился ли процент брака после смены поставщика материалов? Эти данные позволяют инженерам-технологам ремонтировать технологическое оборудование до того, как оно начнет производить тысячи бракованных ИЭТ. Это меняет философию с «обнаружения брака» на «предотвращение брака».

В регулируемых отраслях, таких как производство ИЭТ, необходима документация. Если потребитель пожалуется на дефект через шесть месяцев, АПАК позволит получить точное описание состояния качества изделия в день его изготовления. Можно доказать, что изделие покинуло предприятие в требуемом состоянии. Такой уровень защиты бесценен.

Развитие технологий в системах автоматизированной оптической инспекции изделий электронной техники

В АПАК применяются разные технологии. Выбор подходящей зависит от задач инспекции.

При исследовании задач и построении АПАК используются: 2D – 3D камеры, лазеры, интерферометрия, структурированный свет, гиперспектральная визуализация, каждая из которых подходит для различных целей контроля, материалов поверхностей, допусков и темпов производства.

Технология	Применения	Преимущества	Недостатки
2D-сканирование	Наличие элементов ИЭТ, правильность маркировки	Минимальное время внедрения, экономично	Сложно обнаруживать дефекты по высоте или глубине
3D-сканирование	Измерение размеров, анализ микрорельефа поверхности	Обнаруживает глубину, невосприимчиво к изменениям освещения	Более дорого, более медленная обработка
Линейное сканирование (1D)	Инспекция печатных плат в АПАК конвейерного типа	Высокое разрешение для поверхностей большой площади	Требует точной синхронизации движений
Лазерные триангуляционные датчики	Измерение высоты, плоскостности	Высокая точность	Высокая стоимость
Лазерные линейные сканеры:	Инспекция сложных геометрических форм	Высокая точность	Высокая стоимость
Интерферометрия	Интерференция световых волн для измерения микроскопических изменений на поверхностях	Обнаружение дефектов поверхностей размером менее микрона. Уменьшает количество ложных срабатываний в интерферометрических измерениях	Высокая стоимость
Структурированный свет	Источники структурированного света проецируют полосы или сетки на ИЭТ, а камеры фиксируют искажения	Быстрое трехмерное измерение сложных геометрических форм	Требуется полная изоляция от внешнего света
Гиперспектральная и мультиспектральная визуализация	Обнаружение неравномерностей покрытий за пределами видимого спектра невидимых для стандартных камер	Обнаружение дефектов поверхности размером менее микрона	Высокая стоимость. Требуется полная изоляция от внешнего света
Конфокальная микроскопия	Получение трехмерных изображений микроструктур и текстур поверхности с высоким разрешением	Ускоряет обнаружение микродефектов. Высокая контрастность и точность, возможность трёхмерного моделирования структуры	Высокая стоимость оборудования и необходимость специальных условий для проведения инспекции

В АПАК технологии могут совмещаться. Пример представлен на рис. 1. Инспектируемая печатная плата (далее – ПП) укладывается горизонтально, на защищенную от повреждений матрицу нижнего подсвета с изменением цветов и интенсивностей. Включается инспекция. Линейная камера передвигается поступательно и захватывает изображения, обрабатывая их с помощью технологий КЗ. Фиксируются доступные дефекты. В места с «подозри-

тельными» участками изображений отправляется зональная камера и проверяет наличие дефектов (как правило, в отверстиях). Предварительно, АПАК обучается с помощью технологий ИИ на участках ПП с дефектами, на определенных значениях интенсивностей и цветов матрицы нижнего подсвета. АПАК формирует протокол с указанием типа (вида) дефекта в определенных участках ПП.

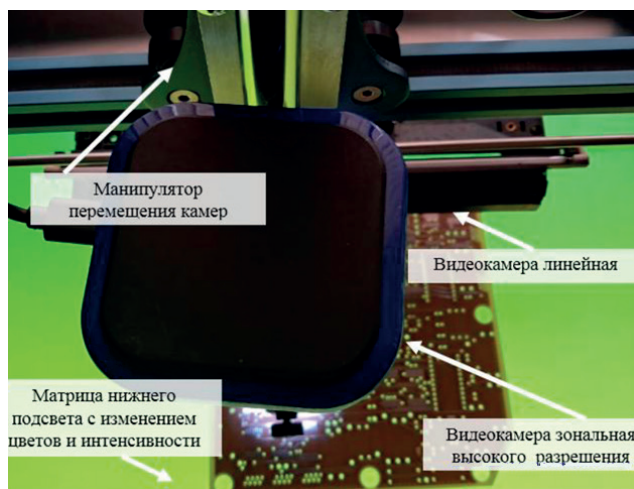


Рис. 1. Пример совмещения технологий линейного сканирования и 3D сканирования для инспекции качества ПП

Аналогичный пример с микроизоляторами представлен на рис. 2. Изделия укладываются вертикально на паллету, которая размещается на матрицу нижнего подсвета с изменением цветов и интенсивностей. Включается проверка. Линейная камера передвигается и снимает изображения, обрабатывая их с помощью технологий КЗ. Фиксируются доступные дефекты. В места с подозрительными участками изображений отправляется зональная камера и проверяет наличие дефектов.

Предварительно, АПАК обучается с помощью технологий ГО и НС на участках с дефектами, на определенных значениях интенсивностей и цветов матрицы нижнего подсвета. АПАК формирует протокол с указанием типа (вида) дефекта в определенных ячейках паллеты (в местах размещения изделий) для дальнейшей их сортировки.

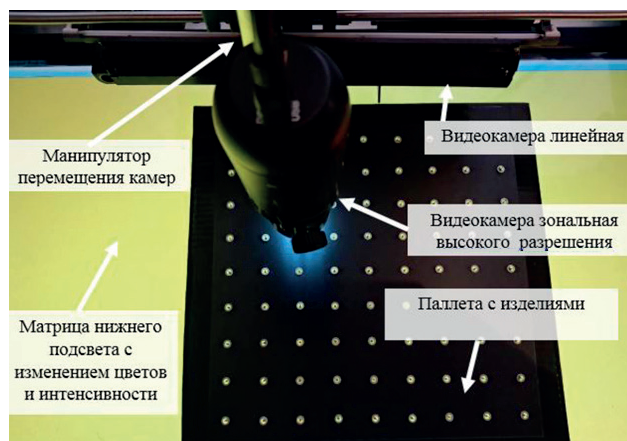


Рис. 2. Пример совмещения технологий для инспекции микроизоляторов

АПАК невозможно создать приобретением камеры и прикреплением ее к конвейеру. Если зависеть требования к АПАК – будут отбраковываться качественные ИЭТ. Это называется «избыточностью». И не желательно, потому что снижается объем выхода годной продукции. Баланс заключается в тонкой настройке ПО для понимания правил инспекции.

Именно в этом случае применение АПАК имеет решающее значение.

Факторы окружающей среды

АПАК, работающая в лаборатории, может не работать в цеху. Причины: различные условия эксплуатации – вибрация, пыль, окружающий свет. Имеется уникальный случай, когда во время внедрения АПАК начинала сбоить ежедневно около 14 часов. Оказалось, что луч солнца отражался от элемента оборудования под таким углом, что ослеплял камеру. Промышленная автоматизация требует прочных, закрытых установок, которые жестко защищаются от воздействия окружающей среды. В производстве изделий микроэлектроники даже пылинки – это большая проблема. На рис. 3 показана АПАК инспекции пластины с кристаллами с очисткой надповерхностных сторонних частиц, в том числе пыли.

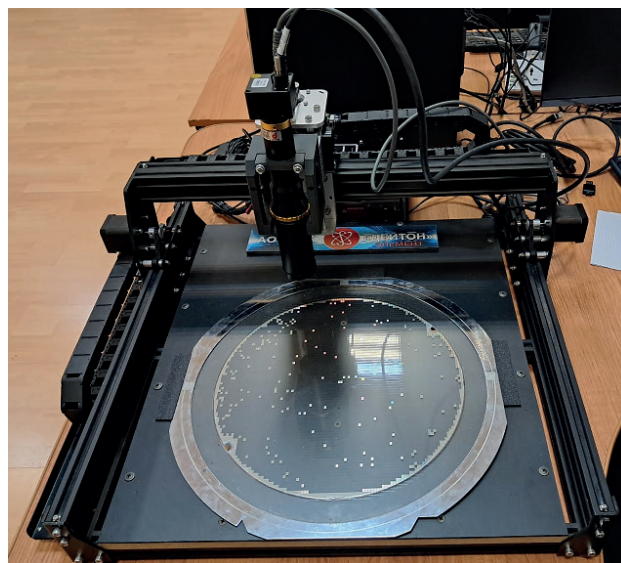


Рис. 3. Инспекция пластины 300 мм с кристаллами и очисткой надповерхностных сторонних частиц

Автоматический визуальный контроль здесь обязателен. АПАК сканируют пластины на наличие микроскопических повреждений в цепях. Без этой технологии современная отечественная электроника не может существовать. ПП (рис. 1) имеют сотни отверстий с радиусом 0,15 мм. Определить повреждение металлизации в таких отверстиях возможно только с АПАК.

При этом отражающие или полупрозрачные поверхности требуют использования специализированной оптики и освещений. Добавление камер, датчиков, роботов или новых рабочих процессов обработки данных может потребовать модификации конвейеров или систем TQM и MES [5]. Интеграция часто является наиболее трудоемким этапом. Правила обратной связи в реальном времени должны быть тщательно настроены, чтобы избежать сбоев в процессах.

Специалисты должны понимать и выполнять методики калибровки, настройки освещения, интер-

претации изображений, классификации и разметки дефектов. Отсутствие надлежащего обучения ведет к ошибкам инспекции.

Ошибки в идентификации дефектов приводят к ненужной доработке или упущению проблем с качеством. Баланс между чувствительностью и специфичностью, а также использование алгоритмов контроля с поддержкой ИИ имеют решающее значение для надежного обнаружения дефектов в существующей среде окружения.

Высокоскоростные камеры и 3D-системы генерируют огромные объемы данных. Требуются достаточные объемы хранения, вычислительные мощности и стандартизированные рабочие процессы для преобразования необработанных данных в полезную информацию. Кибербезопасность и интеграция ИТ являются дополнительными факторами, которые необходимо учитывать в взаимосвязанных средах.

Заключение

Радиоэлектронная промышленность прошла этап ручной (визуальной) инспекции качества ИЭТ. Время на обнаружение дефектов сокращается, а требования к качеству ИЭТ растут. КЗ, ГО, НС, технологии ИИ в составе АПАК обеспечивают стабильность инспекции и обеспечивают интеллектуальный анализ данных о дефектах, необходимых для изготовления современных ИЭТ.

Для достижения успеха уделяется пристальное внимание освещению, окружающей среде, интеграции, управлению данными и обучению специалистов, чтобы обеспечить надежную работу АПАК в реальных производственных условиях.

Речь идёт не только о фильтрации некачественной продукции, но и о понимании причин возникновения дефектов и совершенствовании технологических процессов. Будь то миниатюрные кристаллы или крупно габаритные силовые полупроводниковые диоды, АПАК должны достоверно определять дефекты.

Высокая точность, повторяемость, контроль в режиме реального времени, сбор данных и долгосрочная экономическая эффективность делают АПАК стратегическим вложением в производство ИЭТ.

Успех зависит от продуманных результатов разработки и внедрения. АПАК – это больше, чем инструмент контроля качества. Это стратегическая инвестиция, которая повышает операционную эффективность, поддерживает непрерывное совершенствование и обеспечивает долгосрочную прибыльность.

Производители, которые внедряют АПАК и сочетают их с отработанными передовыми методами разработки и изготовления ИЭТ, имеют наилучшие возможности для выпуска ИЭТ без дефектов и защиты репутации предприятия.

Литература

1. Булгаков О.Ю., Лепешкин А.В., Осипова Е.М. «Совершенствование системы оценки соответствия и подтверждения качества электронной продукции» // Радиоэлектронная отрасль: проблемы и их решения. 2023. № 2. С. 28-31.
2. Рубцов Ю.В., Малышев В.Э., Назаренко А.А. «Определение дефектов на изделиях микроэлектроники в режиме реального времени при помощи сверхточной нейронной сети» // Радиоэлектронная отрасль: проблемы и их решения. 2025. № 1 (17). С. 18-21.
3. Дормидошина Д.А., Евстифеев Ю.А., Ключников В.Н., Ключников Е.Н., Рубцов Ю.В. «Разработка и внедрение АПАК для поиска дефектов изделий микроэлектроники с помощью искусственного интеллекта - Часть 12. Тенденции развития систем освещения в методах автоматизированного оптического обнаружения дефектов изделий электронной техники в 2025 г.» // Электронные компоненты. 2026. № 1. С. 40-44.
4. Дормидошина Д.А., Рубцов Ю.В. «Обзор и анализ методов предварительной обработки изображений в автоматическом оптическом контроле качества изделий электронной техники» // Флагман науки. 2025. № 8 (31). С. 100-111.
5. Дормидошина Д.А. «Компьютерное зрение в системах контроля качества продукции и связь с TQM и MES» // Радиоэлектронная отрасль: проблемы и их решения. 2025. № 1 (17). С. 21-28.