

2. Socher R., Huval B., Bhat B., Manning C. D., Ng A.Y., 2012. Convolutional-Recursive Deep Learning for 3D Object Classification.
3. LeCun Y., Bottou L., Bengio Y., Haffner P. Gradient Based Learning Applied to Document Recognition // PROC OF THE IEEE. 1998.
4. Goodfellow I., Bengio Y., Courville A. Deep Learning. The MIT Press, 2016.
5. Zhao L., Zhang Z. A improved pooling method for convolutional neural networks // Scientific Reports. 2024.
6. Basha S.S., Dubey S.R., Pulabaigari V., Mukherjee S. Impact of Fully Connected Layers on Performance of Convolutional Neural Networks for Image Classification // Neurocomputing. 2019.

УДК: 621.3

КОМПЬЮТЕРНОЕ ЗРЕНИЕ В СИСТЕМАХ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ПРОДУКЦИИ И СВЯЗЬ С TQM И MES

COMPUTER VISION IN QUALITY CONTROL SYSTEMS AND CONNECTION WITH TQM AND MES

Дормидошина Д.А., заместитель генерального директора, эксперт по стандартизации,
АО «ЦКБ «Дейтон», +7 (925) 104-77-96, dormidoshina@deyton.ru

Dormidoshina D.A., deputy General Director, expert on standardization,
JSC “Central Design Office “Deyton”, +7 (925) 104-77-96, dormidoshina@deyton.ru

Аннотация. Развитие технологий применения изделий электронной техники тесно связано с развитием систем технологических процессов. В этой статье показано, как разработка систем контроля качества и управления производством, таких как TQM и MES, связана с развитием методов автоматизированного съема изображений и анализа изображений, используемых в электронной промышленности. Развитие методов автоматизированного съема изображений обсуждается в контексте развития возможностей контроля качества изделий электронной техники. Также показано, в какой степени анализ изображений можно использовать для наблюдения за производственными параметрами и возможностями управления процессами. Отмечено, что использование систем компьютерного (технического) зрения в качестве системы контроля качества изготовления и применения изделий электронной техники будет расширяться. На фоне увеличения разрешения изображений произошло увеличение частоты съемки изображений, рост спектрального диапазона изображений, а также динамичное развитие методов трехмерной и гибридной съемки изображений. На основе опыта промышленного применения и задач определены направления, в которых системы компьютерного зрения будут играть ключевую роль в задачах контроля.

Annotation. The development of electronic product application technologies is closely related to the development of process engineering systems. This article shows how the development of quality control and manufacturing management systems, such as TQM and MES, is related to the development of automated image acquisition and image analysis methods used in the electronics industry. The development of automated image acquisition methods is discussed in the context of the development of quality control capabilities for electronic products. It is also shown to what extent image analysis can be used to monitor production parameters and process control capabilities. It is noted that the use of machine vision systems as a quality control system for the manufacture and application of electronic products will expand. Against the background of increasing image resolution, there was an increase in the frequency of image acquisition, an increase in the spectral range of images, and a dynamic development of three-dimensional and hybrid image acquisition methods. Based on the experience of industrial application and tasks, the directions in which computer vision systems will play a key role in control tasks are determined.

Ключевые слова: компьютерное зрение; анализ изображений; контроль качества; изделие электронной техники.

Keywords: computer vision, image analysis, quality control, electronic product.

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

Введение

Рост темпов использования систем компьютерного зрения (далее – КЗ) и методов анализа изображений при реализации контрольно-измерительных задач для оценки качества изготовления изделий электронной техники (далее – ИЭТ) (изделий, применяемых в электрических схемах функциональных узлов аппаратуры и выполняющие в них определенную функцию) [1] и ве-



Дормидошина Д.А.

дения производственного процесса оказывает существенное влияние на техническое и технологическое развитие предприятий, создание современных производственных мощностей, оборудования и производственных линий. Характерной особенностью современных производственных линий предприятий, изготавливающих ИЭТ, является их возрастающая структурная и функциональная сложность в управлении технологией и производственным процессом. Растет доля электронных систем, систем привода, систем управления, систем безопасности и специализированного программного обеспечения для управления работой оборудования. Большинство устройств также оснащены подсистемами, позволяющими осуществлять автоматическую диагностику рабочих параметров. Время работы и параметры каждой подсистемы контролируются, что позволяет собирать и анализировать исторические и текущие данные в производственных системах. На основании этих параметров определяют сроки периодических осмотров и капитальных ремонтов, а также степень износа узлов, работающих в оборудовании [2]. Результаты работы подсистем диагностики, установленных в оборудовании, позволяют сократить время реагирования сервисных служб и сократить время на демонтаж. Разработка систем контроля работы оборудования в настоящее время ориентирована на прогнозирование возможности возникновения отказов и использование искусственного интеллекта в этих задачах.

Оборудование, выполняющее операции в производственном процессе, также является частью системы управления качеством производства. Это предполагает оснащение систем управления производственными линиями и систем контроля и измерения, установленные на оборудовании, интерфейсами, обеспечивающими связь с системами:

- TPM (Total Productive Maintenance) – всеобщий уход за оборудованием: подход к обслуживанию производственного оборудования, направленный на постоянное поддержание его работоспособного состояния – это концепция, описывающая оптимизацию технического обслуживания и его совмещение с целями производства, важная часть более глобальной концепции бережливого производства – Lean Manufacturing;
- TQM (Total Quality Management) – метод непрерывного повышения качества всех процессов на предприятии;
- MES (Manufacturing Execution System) – система управления производственными процессами);
- ERP (Enterprise Resource Planning) – планирование ресурсов предприятия).

Наблюдение и анализ параметров производственного процесса, проводимые на постоянной основе, в настоящее время необходимы с точки зрения управления производственным процессом, связанного с управлением ресурсами предприятия, а также контролем и управлением качеством ИЭТ [3]. Это привело к динамичному развитию архитектуры промышленных информационных систем, используемых в управлении производственными процессами. Следующим шагом стала разработка стратегии «Ин-

дустрия 4.0», основой которой является так называемая «Умная фабрика», предполагающая интеграцию технических средств производства и киберфизических систем, поддерживающих операционные процессы и управление. К техническим средствам производства относятся оборудование, производственные линии, промышленная инфраструктура и транспортные средства. Внедрение концепции «Умной фабрики» направлено на достижение автономности операций управления, мониторинга и контроля качества ИЭТ за счет прямого обмена данными между устройствами оборудования и измерительными системами с использованием сетевой инфраструктуры и алгоритмов анализа данных и решений искусственного интеллекта [4].

Это связано с многолетним планомерным развитием управления технологическими операциями непосредственно в рамках выполнения конкретных задач. От операций по контролю качества на отдельных рабочих местах проводится внедрение систем измерения и контроля как важнейшей составляющей для оборудования и производственных станций. Это требует расширения задач, решаемых в системах управления производством. Также необходимо выбрать соответствующие методы контроля ИЭТ и измерить его параметры в промышленных условиях. При этом необходимо учитывать оборудование и конструкции устройств, установку сетевой инфраструктуры, позволяющей осуществлять измерения и анализ данных измерений. По результату проведенного контроля принимается решение о направлении элемента ИЭТ на дальнейшую переработку или снятии его с процесса из-за несоответствия параметрам, принятым в технологической документации. Параметры измерения ИЭТ передаются на взаимодействующие устройства оборудования и используются в процессе управления производством.

Также важно связать параметры, характеризующие качество ИЭТ, с параметрами производственного процесса [5]. Повышение требований к развитию функций средств производства в сторону реализации диагностики, анализа и сообщения о параметрах, описывающих работу производственных линий, приводит к разработке киберфизических систем [6]. Эти системы отвечают за управление процессом с помощью сенсорных сетей и мониторинг производства с помощью цифровых сетей [7]. Кроме того, киберфизические системы обеспечивают доступ к распределенным промышленным данным [8]. Киберфизические системы следует рассматривать как решения, объединяющие сенсорные сети с системами управления роботами, которые используют промышленные сети.

Современное состояние систем технического зрения в процессах автоматизированного контроля качества изделий электронной техники

Промышленное производство неразрывно связано с постоянной оценкой и улучшением качества продукции. Качество ИЭТ можно оценить в два этапа. Первый этап включает в себя контроль параметров изготовления ИЭТ и технических параметров готового ИЭТ. На следующем

этапе оценка качества ИЭТ проводится его потребителями.

Качество функционального проектирования – параметр, описывающий проект в контексте реализуемой функции. Правильная разработка ИЭТ требует опыта в выборе материалов и элементов, обеспечивающих выполнение предполагаемых функций ИЭТ. Далее необходимо рассмотреть вопросы, связанные с подготовкой технологической изготовления. Качество проекта определяет степень удовлетворенности получателя способом и объемом выполняемых функций, включенных в проект готового ИЭТ.

Качество изготовления ИЭТ – это степень соответствия параметров готового ИЭТ параметрам, принятым в проектной документации. Предполагается, что качество ИЭТ соответствует требованиям, если параметры, описывающие ИЭТ, находятся в пределах допусков, принятых в конструкторской документации. Во многих случаях параметры, принятые в конструкторской документации, сопровождаются и описательными параметрами, определяющими показатели ИЭТ. Все несоответствия предполагаемым параметрам указываются как дефекты ИЭТ.

Определяя роль систем КЗ в реализации задач контроля качества, подразумеваются задачи, связанные с контролем качества изготовления ИЭТ. Это качество можно описать параметрами, описывающими отдельные его свойства. Задача анализа информации, полученной в результате реализации КЗ – указать особенности, которые при параметрической оценке не соответствуют проектным предположениям. Следует отметить, что характеристики качества связаны с видом ИЭТ [9]. При этом речь идет о «производственных дефектах» или «производственных недостатках» в промышленной терминологии. На их формирование больше всего влияют неисправности оборудования, дефекты элементов и материалов, ошибки операторов, организации производства, неправильный или недостаточный технический контроль. Качество изготовления ИЭТ можно определить на основании измерений и испытаний, проводимых в процессе производства на операциях производственного контроля качества. Функциональное качество и качество изготовления ИЭТ вместе описываются как его потенциальное качество. Это проверено потребителями, которые определяют реальную степень удовлетворения своих ожиданий.

Системы КЗ в настоящее время берут на себя контрольно-измерительные операции на производственных линиях. Это связано со значительным увеличением производительности производственных линий и расширением задач контроля. Во многих случаях человек-контролер не может эффективно выполнять необходимые задачи управления. В основном это связано с увеличением частоты проверок, связанным с повышением эффективности производства. Также большое влияние на результаты оказывают отсутствие повторяемости проверок из-за монотонности выполняемой задачи и утомляемости человека. Существует также необходимость наблюдения за явлениями в окружающей среде, агрессивными для человека и такими, которые человеческий глаз не может зарегистрировать (например, из-за опасного для здоровья диапазона

длин волн условий технологических операций) [10]. Применение системы КЗ для выполнения задач в рамках контроля качества ИЭТ можно разделить на исследование и внедрение.

В рамках исследования и подготовки проектирования системы КЗ должны быть проведены исследования в области распознавания, описания задачи измерения и разработки технико-экономического обоснования [11]. Исследования следует проводить с учетом конкретных условий эксплуатации проектируемой системы КЗ. Должны быть включены исследования в области идентификации и оптического моделирования, не обязательные на этапе подготовки правильных условий освещения. Затем следует разработать и протестировать предварительные алгоритмы анализа изображений. Алгоритмы позволяют извлекать из изображения признаки, используемые для измерения параметров, описывающих ИЭТ. Результатом научно-исследовательской работы является разработка технико-экономического обоснования. Это исследование должно включать описание объема контрольных задач, которые могут быть выполнены, и их стоимости. Также следует указать задачи контроля, которые невозможно выполнить в данных производственных условиях. После этапа исследования на основании результатов, полученных в исследовательской части задачи, может быть принято решение о начале работ по внедрению. Только в рамках их реализации выполняются проекты, связанные с установкой системы контроля на производственные линии [12].

Подготовка успешного промышленного проекта требует от инженерного состава междисциплинарных знаний и опыта реализации. Необходимо сотрудничество специалистов в области механики, электроники, оптики и информатики. Инженеры, руководящие производственным процессом, и технологи, ответственные за изготовление ИЭТ, должны взаимодействовать напрямую.

Самый сложный этап внедрения системы контроля качества производства на основе КЗ – перенос на производственную линию решения, разработанного в лабораторных условиях. Серьезной проблемой является достижение предполагаемой точности измерения выбранных характеристик ИЭТ в условиях промышленных помех. Следует также учитывать перспективы модернизации производственных процессов на техническом и качественном уровне автоматизации процессов [13].

Еще одна задача – объединить систему визуального автоматизированного контроля с системами управления, работающими на предприятии, системами сбора и анализа производственных данных, а также системами управления производством и предприятием. На протяжении всей истории развитие производственных систем также приводило к разработке методов оценки производственного процесса. Исследования, проведенные на зарубежных фабриках электроники по статистическим методам описания изменчивости производства, позволили подготовить допущения для SPC (Statistical Process Control – систем статистического управления процессами). Эти исследования были продолжены и дополнены непрерывным улучшением

процессов, что привело к разработке систем управления качеством ИЭТ и процессов TQM. Этот метод управления предприятием направлен на постоянное повышение качества ИЭТ, как с точки зрения производства, так и с точки зрения функциональности ИЭТ.

Системы КЗ играют важную роль в сборе параметров, характеризующих качество производства ИЭТ. Это связано с возможностью контроля многих параметров ИЭТ в одной системе на основе анализа изображения ИЭТ. При этом системы КЗ позволяют связать параметры, описывающие качество ИЭТ, с идентификаторами ИЭТ и технологическими параметрами, при которых ИЭТ были изготовлены. Сбор данных, касающихся качества ИЭТ и параметров процесса, отправляется непосредственно в системы TQM и используется для оценки процесса и реагирования на его изменения.

Например, в производстве микросхем системы КЗ внедряются на каждом этапе производства. Прием сырья в производство в настоящее время осуществляется с использованием сортировочных систем классификации материалов. Первые сортировщики работали с использованием классических алгоритмов анализа изображений монохромных и цветных изображений [14]. Последующие решения использовали инфракрасную визуализацию [15]. С развитием нейронных сетей появились решения, использующие этот метод для классификации качества ИЭТ [16]. Все системы, независимо от используемого метода автоматизированного съема изображений или используемого алгоритма анализа изображений, работают в рамках TQM и обеспечивают качество поступающего в производство материала. Аналогичное развитие технологий КЗ наблюдается и для других видов ИЭТ. Первые научные статьи и реализации обсуждали использование 2D-монохромных и цветных изображений для анализа поверхности ИЭТ и обнаружения поверхностных дефектов с использованием классических алгоритмов анализа изображений [17]. Последующие исследования расширили методы измерения до 3D-решений [18]. На следующем этапе развития систем КЗ в отрасли были реализованы методы машинного обучения [19]. Однако наиболее динамичное развитие систем КЗ наблюдалось в электронике для автомобильного сектора. Можно предположить, что каждая вновь проектируемая производственная линия оборудована комплексом систем КЗ, контролирующей выпускаемую ИЭТ и параметры процессов. Системы КЗ (2D и 3D) используются вместе с промышленными роботами для определения местоположения элементов для изготовления ИЭТ. Поэтому они участвуют в производственном процессе. Кроме того, они также используются в операциях по контролю ИЭТ, где выполняют измерительные задачи [20]. В рамках 3D автоматизированного съема изображений в производственных процессах применяются системы контроля и измерения на основе лазерной триангуляции, стереовидения и метода TOF (Time-of-Flight – времяпролетный метод – измерения расстояния для получения информации о глубине с помощью камеры. Встроенный в камеру источник света излучает световые импульсы, которые достигают

объекта и отражаются обратно в сторону камеры, на основе затраченного световым импульсом времени измеряется расстояние до поверхности объекта и, следовательно, рассчитывается глубины для каждого отдельного пикселя изображения объекта) [21].

При этом наблюдается очень быстрое развитие гиперспектрального автоматизированного съема изображений при выполнении задач контроля в производственном процессе. Этот метод автоматизированного съема изображений позволил наблюдать ИЭТ в нескольких диапазонах электромагнитного излучения и выявлять корреляции между выбранными особенностями объекта и изображением в выбранном диапазоне автоматизированного съема изображений. В сочетании с решениями искусственного интеллекта гиперспектральная автоматизированного съема изображений может стать ключевой технологией обнаружения и оценки дефектов материалов и ИЭТ.

Тенденция внедрения систем автоматизированного съема изображений для измерения и контроля на производственных линиях, наблюдаемая в последние годы, может быть сохранена и в ближайшие годы. Одним из ограничений развития систем контроля качества на основе КЗ являются трудности с доступностью матриц автоматизированного съема изображений высокого разрешения с параметрами, необходимыми для построения систем измерения.

В настоящее время роль систем КЗ как источников данных при автоматизации контроля качества возрастает. Это особенно заметно на предприятиях, использующих системы баз данных и алгоритмы анализа технологических данных, работающие в рамках Smart Industry – взаимосвязанной сети устройств оборудования, механизмов связи и вычислительных мощностей, использующей искусственный интеллект и машинное обучение, для анализа данных, управления автоматизированными процессами и самообучения. Преимущество этого решения в том, что анализ изображения и описание качества ИЭТ в виде параметров осуществляется непосредственно системой КЗ на производственной линии.

Увеличение объемов использования систем КЗ связано с необходимостью автоматизации производственных процессов, а также с необходимостью реализации автоматического контроля качества ИЭТ, управления процессами и роботизацией. Опыт, полученный в ходе внедрения, свидетельствуют о том, что потребность в роботах растет практически на всех предприятиях промышленности. Термин VGR (Vision Guided Robotics) означает, что роботы будут оснащены системой КЗ, задача которой управлять роботом на основе информации, считываемой из окружающей среды системой КЗ. Это касается технологических роботов, выполняющих технологические операции – манипулирования, и транспортных роботов – мобильных роботов, выполняющих логистические функции на предприятиях. Увеличение использования роботов напрямую влияет на рост использования систем КЗ для поддержки технологических операций.

При этом меняется подход к построению алгоритмов контроля качества, используемых в системах КЗ. Очень

высок спрос на новые решения, позволяющие изменить подход к составлению алгоритма контроля качества ИЭТ. На основе использования алгоритмов искусственного интеллекта глубокое обучение применяется при подготовке приложений, позволяющих выявлять дефекты ИЭТ.

Не менее значительный рост заметен и прогнозируем при проектировании, конструировании и промышленном внедрении готовой системы КЗ на производственной линии в задачах качества.

Пути развития и препятствия развитию систем технического зрения в процессах автоматизированного контроля качества изделий электронной техники

Системы КЗ поддерживают автоматизацию всего спектра задач, выполняемых на производственных линиях. Они являются источником данных о качестве ИЭТ для систем управления качеством TQM и MES управления производством. Их бурное развитие заметно как по объему реализованных функций управления, так и по эффективности анализа изображений. Развитие методов анализа 2D-изображений, а также разработка методов получения и анализа 3D-изображений привели к расширению количества задач измерения и контроля, которые можно выполнять в промышленных условиях. Одновременно наблюдается увеличение набора контролируемых параметров и сокращение времени контроля. Автоматизация операций контроля с использованием систем КЗ обеспечивает сохранение повторяемости оценки параметров, характеризующих качество ИЭТ, и повышает эффективность оценки применительно к визуальному контролю, проводимому операторами. Развитие систем КЗ с оснащением их системами ввода-вывода, протоколами связи, интерфейсами HMI (Human-machine interface - решения, обеспечивающие взаимодействие человека-оператора с управляемыми им машинами) и базами данных позволяет интегрировать их непосредственно в системы промышленной автоматизации, системы контроля и управления качеством и производством.

Создание системы КЗ ИЭТ для 2D-изображений включает в себя выбор датчиков и оптики для достижения желаемого поля изображения и разрешения измерений. На основе исследований и инженерных знаний в системе могут быть реализованы алгоритмы контроля качества и измерения. Однако для систем 3D-изображений существуют некоторые ограничения из-за наличия аппаратного обеспечения, такого как массивы TOF высокого разрешения. Ограничения также возникают из-за самого метода автоматизированного съема изображений. Для каждой задачи проверки необходимо провести технико-экономическое обоснование и выбрать подходящий метод автоматизированного съема изображений. При построении гибридных систем автоматизированного съема изображений необходимо учитывать ограничения всех методов, используемых при построении образа ИЭТ.

Все более широкое использование систем КЗ в процессах контроля качества является результатом динамичного роста, наблюдаемого во многих областях науки

и техники. Наиболее существенное влияние на развитие всех методов автоматизированного съема изображений и их использование в системах контроля качества ИЭТ оказывают:

- развитие методов регистрации изображений определяется разработкой и наличием широкого спектра 2D-сенсоров, позволяющих осуществлять регистрацию видимого, инфракрасного и ультрафиолетового излучения, в том числе гиперспектральных камер после совмещения полей. Развитие технологий трехмерного автоматизированного съема изображений включает лазерную триангуляцию, стереовидение, структурированный свет, методы TOF, SFF (Shape from focus – метод трехмерной реконструкции, который заключается в использовании информации о фокусе оптической системы для обеспечения средств измерения трехмерной информации) и стереофотометрию;

- развитие оптики, которое привело к созданию линз для различных форматов датчиков, которые также позволяют получать изображения с различным разрешением, а также к появлению линз, специализированных для задач после измерения (например, телецентрических, изготовленных по индивидуальному заказу для выбранного поля зрения);

- разработка технических методов освещения и источников освещения для систем КЗ. Большая доступность осветителей позволяет подобрать решение контрольно-измерительной задачи;

- развитие процессорной электронной техники и интерфейсов связи, в том числе в промышленных системах, в первую очередь технологий USB Vision, Giga Vision и Camera Link, позволяют повысить частоту регистрации и анализа данных. USB Vision – стандарт интерфейса, описывающий спецификацию стандарта USB с особым акцентом на поддержку высокопроизводительных камер для USB 3.0 признан одним из самых быстродействующих стандартов камер для КЗ. Giga Vision – программно-технический метод сочетания гигапиксельной видеосъемки с широким полем обзора и детализацией с высоким разрешением. Camera Link – надежный и высокопроизводительный интерфейс для промышленных камер с высокой пропускной способностью и простотой использования;

- разработка алгоритмов анализа изображений, доступных в различных типах постпрограммирования для построения проектов в виде библиотек КЗ, доступных на используемых в настоящее время языках программирования.

В «Индустрии 4.0» большое внимание уделяется внедрению киберфизических систем для мониторинга производственных процессов. Цель – создать виртуальную копию реальных объектов для анализа данных и принятия решений. В Интернете вещей киберфизические системы позволяют строить каналы связи, позволяющие различным системам и людям работать вместе. В то же время данная деятельность требует крупных финансовых вложений (например, внедрение систем наблюдения и контроля производства, построение ИТ-инфраструктуры).

Радиоэлектронная промышленность движется к развитию «Индустрии 5.0», которая будет автономной и широко использовать человеко-машинные интерфейсы, в то же время уделяя большое внимание предотвращению образования отходов в производственных структурах, использованию вторичной переработки и значительно продлевая жизненный цикл ИЭТ.

С развитием систем контроля и измерения связано повышение эффективности производства и улучшение жизненного цикла ИЭТ за счет повышения ее качества. Это означает еще большее насыщение производственных линий оборудованием, позволяющим проводить многокритериальную оценку качества выпускаемых ИЭТ.

Наиболее значительным достижением в построении современных и перспективных промышленных систем контроля качества есть высокоскоростной контроль; мультиспектральная / гиперспектральная автоматизированного съема изображений при обнаружении браков / дефектов [22]. Использование методов 3D-изображения в задачах многомерного контроля ИЭТ также растет. Кроме того, в промышленных целях возникает создание гибридных систем контроля и измерения, которые сочетают в себе различные методы автоматизированного съема изображений (например, 2D-изображения в сочетании с 3D-изображениями и анализ многомерных изображений ИЭТ).

Процессы разработки систем КЗ можно разделить на две группы приложений. В первую группу входят более простые приложения, основанные на использовании готовых систем, поставляемых производителями. Эти приложения основаны на использовании интеллектуальных камер или датчиков КЗ различной степени сложности. Эти системы оптимизированы производителями и очень хорошо работают. Они массово используются на производственных линиях и в большинстве случаев не требуют обслуживания.

Вторая группа систем КЗ включает системы, изготовленные по индивидуальному заказу и предназначенные для конкретных задач контроля и пост-измерений. Однако эффективность этих систем сильно зависит от сотрудничества между компанией, создающей такую систему, и компанией, ее использующей. При подготовке таких систем КЗ, которые часто являются инновационными и уникальными, необходим надежный обмен информацией между разработчиком и пользователем систем.

Первым шагом, необходимым для подготовки эффективной системы автоматизированного контроля качества производства, является проведение предварительных исследований и разработка технико-экономического обоснования системы с учетом потребностей клиентов. Завершенное исследование и первоначальная стоимость внедрения должны показать пользователю, в какой степени будет выполнена задача. В то же время должно указываться на трудности внедрения системы КЗ для конкретной задачи проверки качества. Вопрос здесь в том, какие причины могут повлиять на эффективность системы.

Одной из причин может быть то, что не все новые технологии обработки изображений готовы к промышлен-

ному применению. Проблема может заключаться в очень разных рабочих параметрах систем КЗ. Например, слишком низкое разрешение изображений (например, TOF-изображение в промышленных приложениях) в настоящее время ограничено разрешением 640×480 пикселей – для многих приложений это слишком низкое разрешение. Другая причина – недостаточная устойчивость камер или методов съемки изображений к производственным воздействиям (например, рабочей температуре, вибрации, пыли и чрезмерной влажности). Другая причина заключается в том, что система КЗ не оснащена коммуникационными интерфейсами для обмена данными с промышленными контроллерами. Казалось бы, незначительная трудность связана с необходимостью преобразования сигналов через промежуточные устройства, что увеличивает стоимость внедрения и снижает надежность системы управления производством.

Еще одним препятствием может стать отношение инженерно-технического состава на производствах. Это обусловлено многолетним опытом работы с поставщиками оборудования для производственных линий. Это особенно важно в случае поставщиков оборудования, использующих системы КЗ. Невозможность быстрого устранения неисправности в работе системы КЗ влечет за собой конкретные финансовые потери. Эта ситуация заставила многие компании осознать, что системы КЗ сложны в обслуживании и ненадежны. Получатели поэтому осторожны и относятся к перспективным решениям со значительным недоверием. Здесь очевидна большая разница в оценке производительности лабораторных и промышленных систем. Например, эффективность систем КЗ на базе искусственного интеллекта в 80 – 90 % по-прежнему неприемлема во многих отраслях. Это связано с возможностью неправильной оценки качества более чем 10 % ИЭТ, что может привести к слишком большим финансовым потерям.

Поэтому крайне важно провести предварительные исследования и составить отчет с описанием рабочих параметров и ограничений системы. На этой основе можно определить условия, необходимые для эффективной работы системы автоматизированного съема изображений контроля качества, и принять решение о ее построении.

Последующая работа по внедрению системы автоматизированного съема изображений контроля качества также строится на сотрудничестве заказчика и проектировщика. Это связано с высокой вариативностью соответствующих материалов, технологий и компонентов, наблюдаемой на производственных линиях. Вся эта информация должна быть возвращена разработчику системы, который должен постоянно включать эту информацию в решение. Внедрение системы КЗ на производственной линии очень часто требует не только ввода в эксплуатацию системы КЗ, но и обновления рабочих программ многих устройств.

Таким образом, окончательный успех внедрения инновационных и передовых систем производственного видения зависит от многих параметров и сотрудничества инженеров, разрабатывающих ожидаемое решение.

Заключение

В мире информация об исследованиях и результатах применения систем КЗ для автоматизированного контроля качества ИЭТ на предприятиях имеется в большом объеме для различных решений. Реальных внедрений гораздо меньше. Но независимо, развитие разработки систем контроля качества с использованием технологий автоматизированного съема изображений представляется весьма динамичным. Это видно во многих научных публикациях, особенно касающихся сочетания технологий формирования изображений, использования новых типов видеосенсоров, использования новых технологий освещения и использования инноваций в прикладной оптике. В методах анализа изображений очевидно очень динамичное развитие алгоритмов на основе искусственного интеллекта. Однако многие промышленные приложения по-прежнему основаны на традиционных алгоритмах, которые уже много лет используются в системах КЗ.

Для использования систем автоматизированного съема изображений контроля качества в стандартных приложениях аппаратные и программные решения позволяют выполнять процесс контроля почти со 100 % эффективностью.

Однако столь высокая эффективность не может быть достигнута для задач контроля более высокой степени сложности. Это особенно заметно в приложениях, где разрабатываются новые аппаратные и программные решения в рамках подготовки к инновационным решениям. Повышение производительности системы управления на основе КЗ происходит постепенно за счет совершенствования и оптимизации внедряемых решений.

Это особенно важно в промышленных условиях и при наличии различных сбоев в работе производственных линий. Решение, подготовленное даже для одного и того же вида ИЭТ, но реализованное на другой производственной линии, часто требует фундаментальной переработки. Поэтому необходимо проявлять должную осторожность и хорошо понимать условия эксплуатации системы автоматизированного съема изображений контроля производства.

Однако, похоже, что независимо от стратегии, которая будет принята при дальнейшем развитии производственных процессов (например, «Индустрия 4.0», «Индустрия 5.0», «Умная индустрия» или какая-то новая концепция), системы КЗ станут решением для контроля за изготовлением и применением ИЭТ и оценки их качества по параметрам изготовления. Их наиболее важным преимуществом является объединение различной информации о параметрах ИЭТ на изображении, что является результатом возможности комбинировать методы автоматизированного съема изображений. В то же время на основе анализа одного изображения можно определить несколько параметров ИЭТ для оценки качества.

Литература:

- ГОСТ Р 53736-2009 «Изделия электронной техники. Порядок создания и постановки на производство. Основные положения».
- ГОСТ 18322-2016 «Система технического обслуживания и ремонта техники. Термины и определения».
- Marta Wolska, Tadeusz Gorewoda, Marek Roszak, Lesław Gajda, Implementation and Improvement of the Total Productive Maintenance Concept in an Organization, 2023.
- Tortorella G.L.; Fogliatto F.S.; Cauchick-Miguel P.A.; Kurnia S.; Jurburg D. Integration of Industry 4.0 technologies into Total Productive Maintenance practices. *Int. J. Prod. Econ.* 2021.
- Humayed A.; Lin J.; Li F.; Luo B. Cyber-Physical Systems Security – A Survey. *IEEE Internet Things J.* 2017, 4, 1802–1831.
- Ashibani Y.; Mahmoud Q.H. Cyber physical systems security: Analysis, challenges and solutions. *Comput. Secur.* 2017, 68, 81–97.
- Axelrod C.W. Managing the risks of cyber-physical systems. In Proceedings of the 2013 IEEE Long Island Systems, Applications and Technology Conference (LISAT), Farmingdale, NY, USA, 2013.
- Ватаманюк И.В., Яковлев Р.Н.. «Обобщенные теоретические модели киберфизических систем». Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук. Известия Юго-Западного государственного университета / Proceedings of the Southwest State University. 2019; 23(6): 161-175.
- Broy M. Cyber-Physical Systems; Broy M., Ed.; Springer Berlin Heidelberg: Berlin / Heidelberg, Germany, 2010; ISBN 978-3-642-14498-1.
- Sioma A. Automated Control of Surface Defects on Ceramic Tiles Using 3D Image Analysis. *Materials* 2020, 13, 1250.
- Struzikiewicz G.; Sioma A. Evaluation of Surface Roughness and Defect Formation after The Machining of Sintered Aluminum Alloy AlSi10Mg. *Materials* 2020, 13, 166.
- Smith M.L.; Smith L.N.; Hansen M.F. The quiet revolution in machine vision – A state-of-the-art survey paper, including historical review, perspectives, and future directions. *Comput. Ind.* 2021, 130, 103472.
- Lenty B. Tree-ring growth measurements automation using machine vision. In Proceedings of the Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High Energy Physics Experiments 2020; SPIE: Bellingham, WA, USA, 2020; p. 30.
- Sioma A. Geometry and resolution in triangulation vision systems. In Proceedings of the Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High Energy Physics Experiments 2020; SPIE – International Society for Optics and Photonics: Bellingham, WA, USA, 2020; Volume 11581, pp. 264–271.
- Aquino A.; Ponce J.M.; Andújar J.M. Identification of olive fruit, in intensive olive orchards, by means of its morphological structure using convolutional neural networks. *Comput. Electron. Agric.* 2020, 176, 105616.
- Rout A.; Deepak B.B.V.L.; Biswal B.B.; Mahanta G.B. Weld Seam Detection, Finding, and Setting of Process

- Parameters for Varying Weld Gap by the Utilization of Laser and Vision Sensor in Robotic Arc Welding. IEEE Trans. Ind. Electron. 2022, 69, 622–632.
17. Laszlo R.; Holonec R.; Copîndean R.; Dragan F. Sorting System for e-Waste Recycling using Contour Vision Sensors. In Proceedings of the 2019 8th International Conference on Modern Power Systems (MPS), Cluj, Romania.
 18. Tehrani A.; Karbasi H. A novel integration of hyper-spectral imaging and neural networks to process waste electrical and electronic plastics. In Proceedings of the 2017 IEEE Conference on Technologies for Sustainability (SusTech), Phoenix, AZ, USA, 12–14 November 2022; pp. 1–5.
 19. EMIS. Global Machine Vision Market | Industrial Machine Vision Market; Frost & Sullivan; EMIS: Santa Clara, CA, USA, 2021.
 20. EMIS. Global Forecast for Machine Vision Market (2022–2027 Outlook)—High Tech & Emerging Markets Report; Barnes Reports; EMIS: Santa Clara, CA, USA, 2021.
 21. IFR. The World Robotics 2021 Industrial Robots Report; IFR: Frankfurt, Germany, 2021.
 22. Machine Vision Market Size - By Technology (PC-Based, Smart Camera-Based, Embedded), By Application (Inspection, Gauging & Measurement, Guidance & Navigation, Identification, Verification, Sorting & Packaging, Robotics), Component, End-Use & Forecast, 2023 – 2032.