

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Тольяттинский государственный университет»

Институт машиностроения
(наименование института полностью)

Кафедра «Оборудование и технологии машиностроительного производства»
(наименование)

15.04.05 «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных
производств»
(код и наименование направления подготовки)

Передовые технологии машиностроительных производств
(направленность (профиль))

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА (МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ)

на тему Автоматизация контроля изделий машиностроения в рамках концепции
компьютерно-интегрированного производства

Обучающийся

А.С. Чернышёв

(Инициалы Фамилия)

(личная подпись)

Научный
руководитель

канд. техн. наук, доцент А.А. Козлов

(ученая степень (при наличии), ученое звание (при наличии), Инициалы Фамилия)

Тольятти 2025

Содержание

Введение.....	3
1 Теоретические основы компьютерно-интегрированного производства и автоматизации контроля.....	5
1.1 Концепция компьютерно-интегрированного производства.....	5
1.2 Роль автоматизации контроля качества в современном машиностроении	12
1.3 Виды и методы контроля качества изделий.....	14
1.4 Интеграция систем контроля в структуру компьютерно-интегрированного производства	18
1.5 Проблемы и вызовы автоматизации контроля в машиностроении	19
2. Анализ существующих систем автоматизации контроля.....	22
2.1 Обзор современных технологий.....	22
2.2 Сравнительный анализ промышленных решений.....	28
3 Разработка модели системы автоматизированного контроля	37
3.1 Архитектура системы автоматизированного контроля	37
3.2 Определение требований к системе	47
3.3 Разработка функциональной схемы системы	51
3.4 Разработка подсистемы регистрации деталей	53
3.5 Разработка подсистемы контроля времени поступления деталей на регистрацию.....	59
3.6 Разработка структурной схемы системы.....	61
Заключение	65
Список используемых источников.....	67

Введение

Развитие машиностроительного производства в современных условиях направлено на повышение качества продукции, сокращение сроков производства и снижение затрат. Это приводит к необходимости использования новых подходов к организации всего производственного процесса на основе концепции компьютерно-интегрированного производства, которая предполагает интеграцию всех этапов производства с использованием информационных технологий.

Автоматизация контроля изделий машиностроения один из ключевых этапов данной концепции. Внедрение автоматизированных систем контроля позволяет решить задачи повышения точности и скорости проведения контроля, сокращения времени обработки данных.

Рост сложности машиностроительных изделий, таких как авиационные компоненты, медицинское оборудование или элементы робототехники, требует применения высокоточных методов контроля. Традиционные подходы, основанные на ручных измерениях и выборочной проверке, не соответствуют требованиям скорости, точности и масштабируемости. Кроме того, глобальный тренд на индивидуализацию продукции усиливает потребность в гибких системах, способных адаптироваться к изменениям в конструкторской документации без остановки производства.

Концепция компьютерно-интегрированного производства, подразумевающая сквозную цифровизацию от проектирования (CAD/CAM) до управления ресурсами (ERP), остаётся неполной без автоматизации контроля. Разрыв между этапами производства и верификации качества приводит к увеличению времени на доработку изделий и росту затрат. Внедрение систем автоматизированного контроля, интегрированных с MES и IoT-платформами, позволяет устранить этот разрыв, обеспечивая непрерывный поток данных и оперативную корректировку процессов.

Целью работы является разработка модели системы автоматизации

контроля изделий машиностроения, совместимой с принципами компьютерно-интегрированного производства. Для её достижения поставлены следующие задачи:

- провести анализ современных технологий контроля (компьютерное зрение, 3D-сканирование, цифровые двойники) и их интеграции в компьютерно-интегрированное производство;
- выявить ограничения существующих решений, включая проблемы совместимости программных платформ и недостаточную точность в условиях высокой скорости производства;
- разработать архитектуру системы, объединяющей аппаратные (сенсоры, роботизированные комплексы) и программные компоненты (алгоритмы машинного обучения, интерфейсы для CAD/MES).

Научная новизна исследования заключается в комбинации методов глубокого обучения для распознавания дефектов с технологиями цифровых двойников, что позволяет прогнозировать качество изделий на ранних этапах производства. Кроме того, предложена модульная архитектура системы, обеспечивающая её адаптацию к различным типам производственных линий.

Практическая значимость работы состоит в снижении доли брака за счёт предиктивной аналитики и сокращении времени контроля. Внедрение системы способствует уменьшению зависимости от ручного труда, что особенно актуально в условиях дефицита квалифицированных кадров. Результаты исследования могут быть применены на предприятиях аэрокосмической, автомобильной и медицинской промышленности.

Работа состоит из введения, трёх глав, заключения и списка используемых источников.

1 Теоретические основы компьютерно-интегрированного производства и автоматизации контроля

1.1 Концепция компьютерно-интегрированного производства

Компьютерно-интегрированное производство (Computer Integrated Manufacturing, CIM) – это результат многолетней эволюции промышленных технологий, направленной на создание единой цифровой экосистемы предприятия. Первые шаги в автоматизации были сделаны в 1960-х годах с внедрением систем числового программного управления, которые позволили автоматизировать обработку металлов на станках. Однако настоящий прорыв произошел в 1980-х годах, когда развитие CAD (Computer-Aided Design) и CAM (Computer-Aided Manufacturing) систем обеспечило связь между проектированием и производством. Например, компания General Motors одной из первых внедрила CAD-технологии для проектирования автомобильных деталей, что сократило время разработки на 30%.

В 1990-х годах с появлением ERP (Enterprise Resource Planning) систем фокус сместился на интеграцию управления ресурсами. Такие компании, как SAP, предложили решения для объединения финансовых, логистических и производственных данных. Современный этап развития компьютерно-интегрированного производства, связанный с концепцией Индустрии 4.0, характеризуется использованием IoT (интернет вещей), Big Data (большие данные и аналитика) и искусственного интеллекта. Например, Siemens внедрила платформу MindSphere, которая собирает данные с оборудования в реальном времени для оптимизации производственных процессов.

Компьютерно-интегрированное производство базируется на следующих основных принципах. Сквозная цифровизация, обеспечивающая устранение «информационных разрывов» между этапами жизненного цикла продукта. Данные из CAD-систем передаются в CAM-модули, а затем в MES для управления производством.

Гибкость и адаптивность, обеспечивающие возможность перенастройки производственных линий без остановки. Например, роботизированные комплексы Fanuc могут менять инструмент за 0,5 секунды.

Стандартизация интерфейсов путем использования протоколов OPC UA и MTConnect для совместимости оборудования разных производителей.

Централизованная аналитика путем применения облачных платформ (Microsoft Azure, AWS) для обработки данных и прогнозирования.

«Рассмотрим ключевые компоненты компьютерно-интегрированного производства» [9].

«CAD-системы (Computer-Aided Design, CAD) – это системы геометрического автоматизированного проектирования, которые предназначены для создания» [9] и редактирования цифровых моделей объектов машиностроения, а также документирования проектных решений.

Пример результатов моделирования тисков при помощи программного обеспечения КОМПАС-3D приведен на рисунке 1.

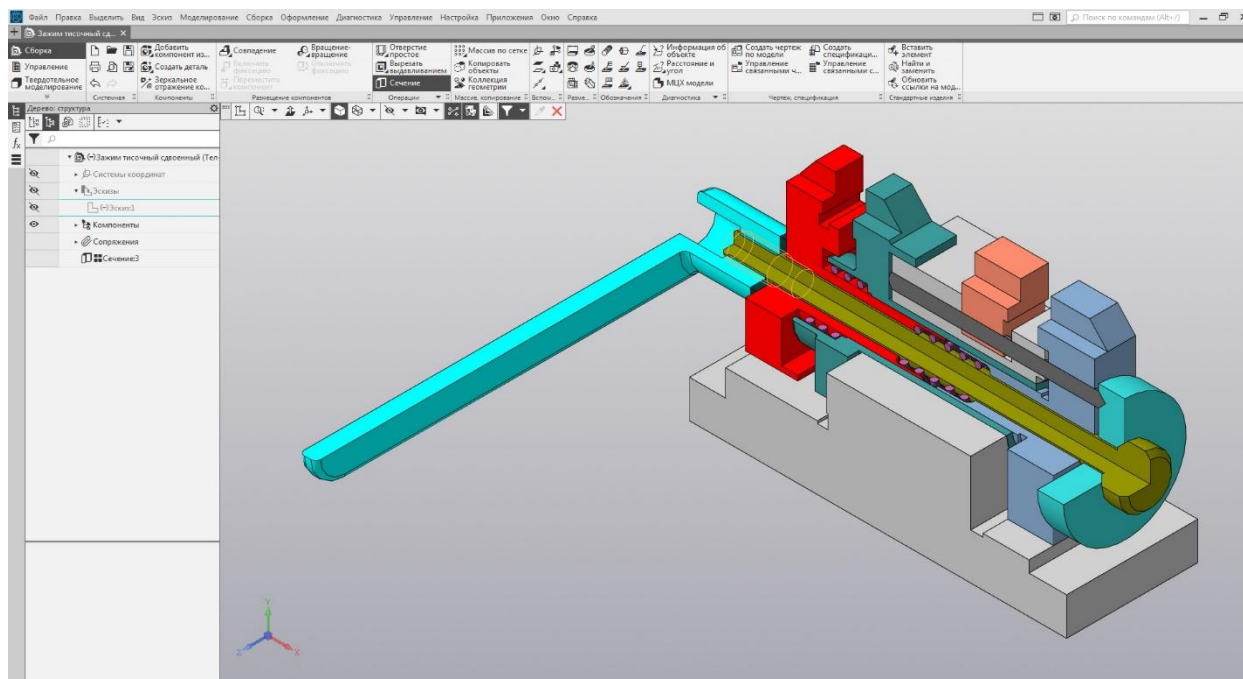


Рисунок 1 – Моделирование тисков при помощи КОМПАС-3D

CAE-системы (Computer-Aided Engineering, CAE) – системы автоматизации расчетов, предназначенные для решения широкого спектра инженерных задач связанных с проведением расчётов, анализа и симуляции физических процессов.

CAE-системы обычно тесно интегрированы с CAD-системами, что упрощает процесс передачи моделей и данных для анализа.

Пример результатов исследования прочностных характеристик рейки при помощи программного обеспечения ANSYS приведен на рисунке 2.

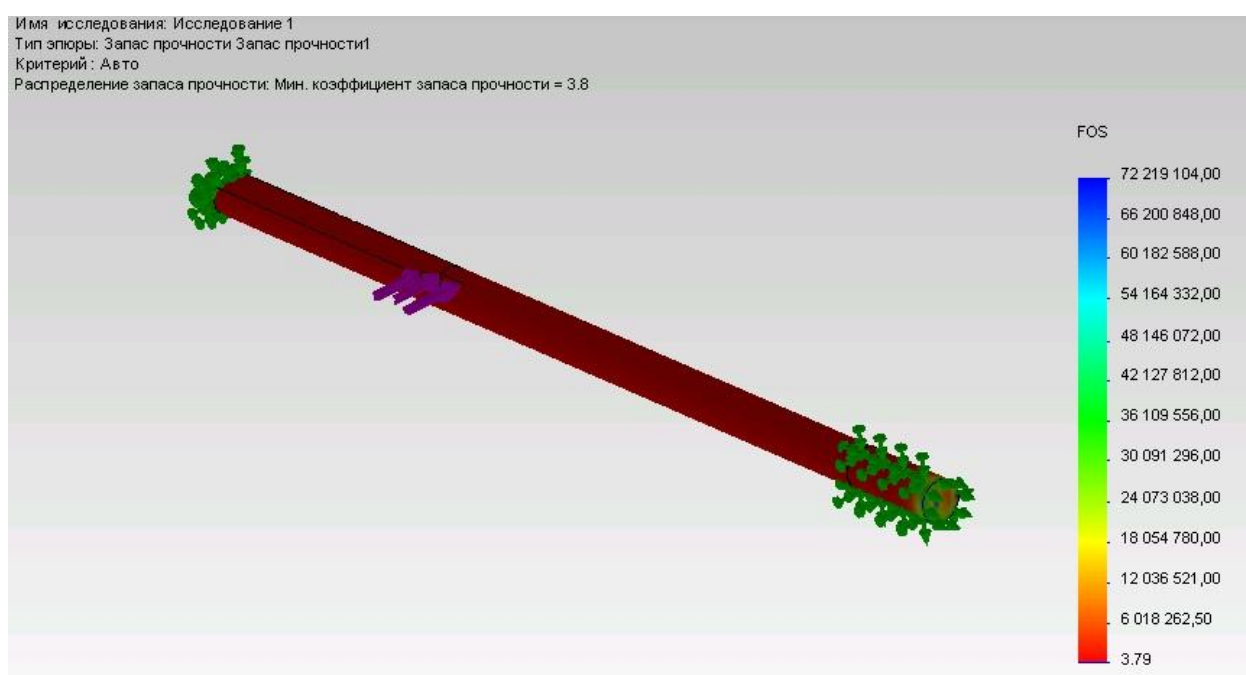


Рисунок 2 – Исследование прочностных характеристик рейки при помощи ANSYS

CAPP-системы (Computer-Aided Process Planning, CAPP) – это системы, предназначенные для автоматизации разработки технологических процессов производства изделий.

Работа CAPP-систем требует их интеграции с CAD-системами, с целью использования данных из CAD-систем для создания технологических процессов.

Пример результатов проектирования технологического процесса при

помощи программного обеспечения Вертикаль приведен на рисунке 3.

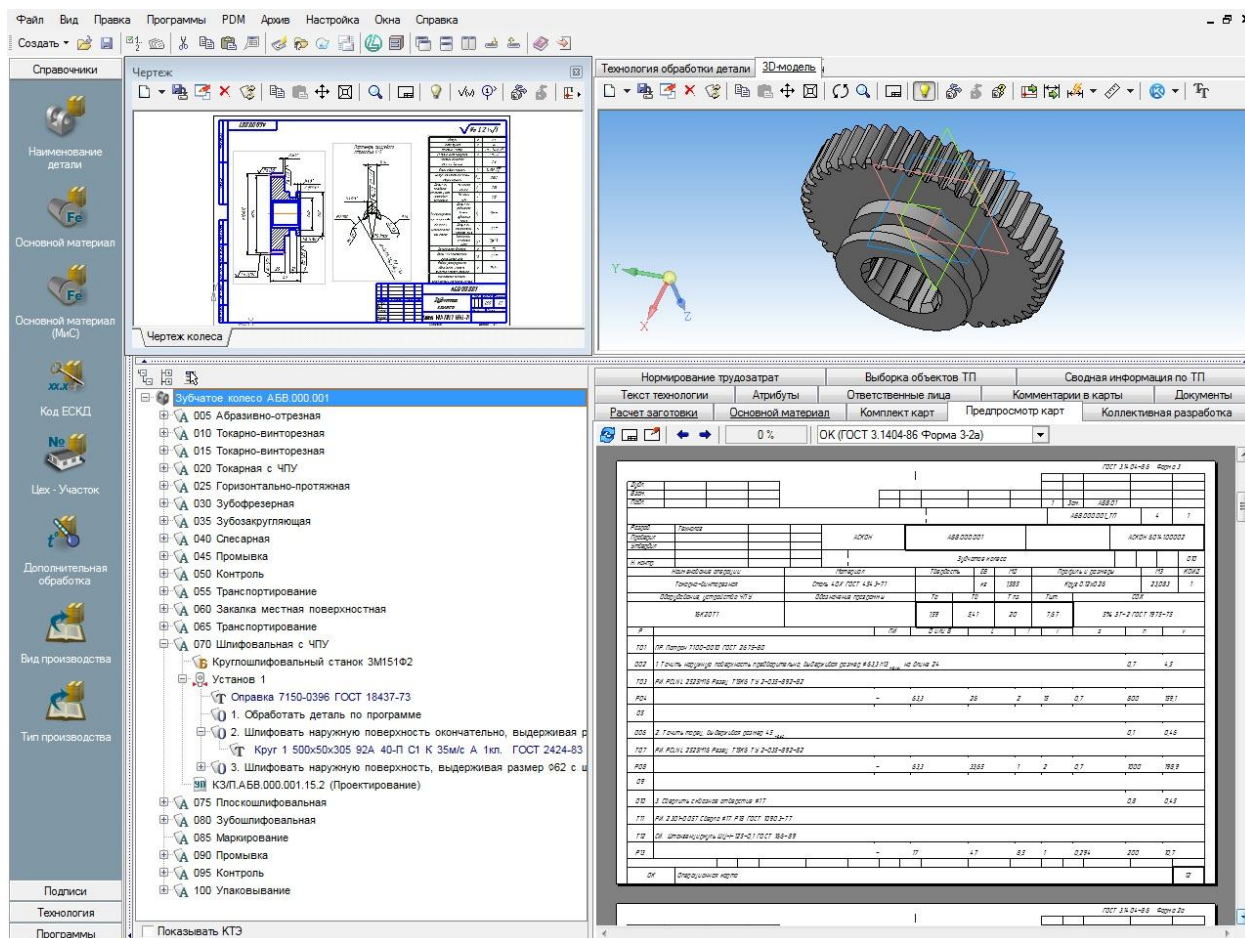


Рисунок 3 – Проектирование технологического процесса при помощи Вертикаль

CAM-системы (Computer-Aided Manufacturing, CAM) – системы технологической подготовки производства, предназначенный, в первую очередь, для подготовки управляющих программ для станков с числовым программным управлением.

Пример результатов разработки управляющей программы при помощи программного обеспечения PowerMill приведен на рисунке 4.

Современные CAM-системы позволяют решать следующие задачи: планирование последовательности операций; написание управляющих программ для станков с числовым программным управлением; подбор оптимальные параметры обработки.

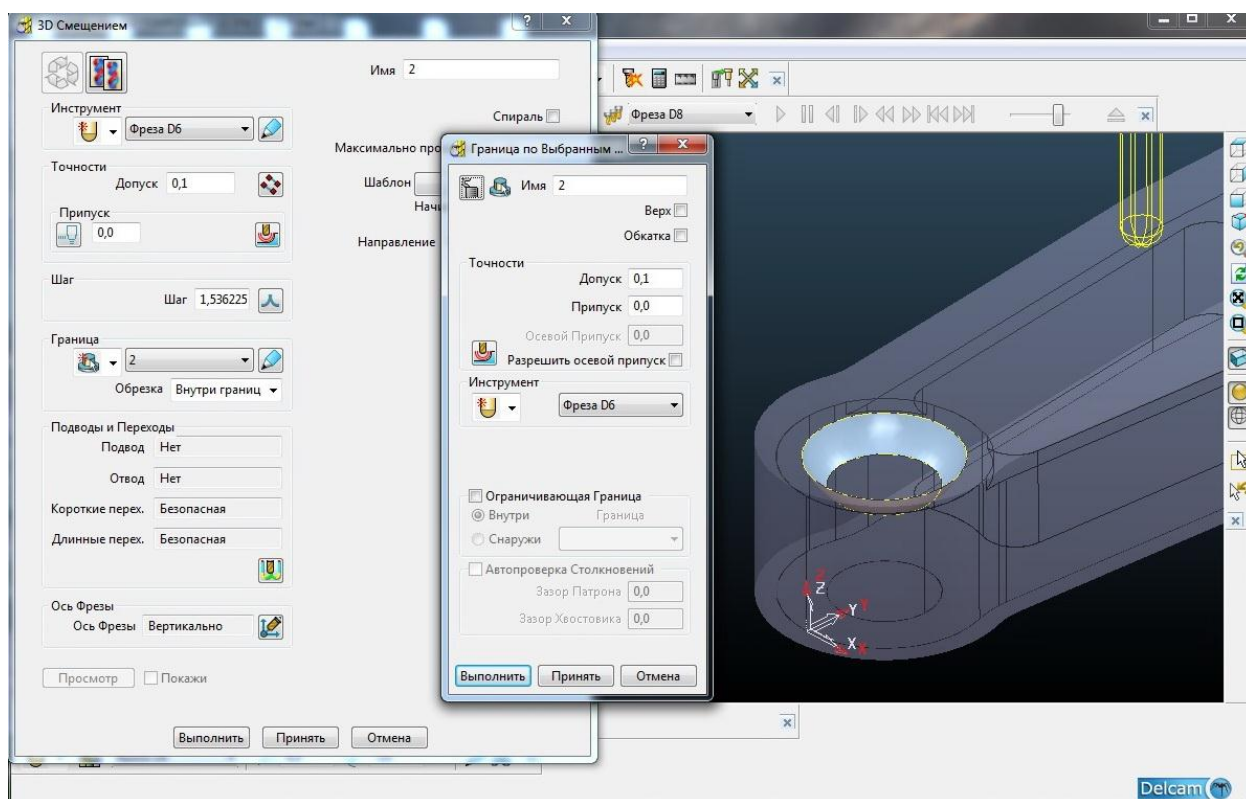


Рисунок 4 – Разработка управляющей программы при помощи PowerMill

CAQ-системы (Computer-Aided Quality, CAQ) – это системы, предназначенные для автоматизации процессов управления качеством на производстве.

Современные CAQ-системы позволяют автоматизировать функции контроля, анализа и повышения качества изделий на всех этапах жизненного цикла.

Использование CAQ-систем требует их интеграция с CAD-системами, CAM-системами, ERP-системами (системы планирования ресурсов предприятия) и MES-системами (системы управления производственными процессами).

SCADA-системы (Supervisory Control and Data Acquisition, SCADA) – это системы, предназначенные для мониторинга и управления технологическими процессами в режиме реального времени.

Ключевым элементом данных систем являются датчики, которые

собирают данные и исполнительные механизмы, которые выполняют команды. Обработка полученных данных их визуализация, ведение отчетности и выработка сигналов управления производится при помощи прикладного программного обеспечения.

«PDM-системы (Product Data Management, PDM)/ PLM-системы (Product Lifecycle Management, PLM) – это системы управления данными об изделии, предназначенные для управления всей информацией, связанной с продукцией, на протяжении всего её жизненного цикла» [9].

PDM-системы обеспечивают централизованное хранение, организацию, контроль и доступ к данным об изделиях, включая чертежи, спецификации, технологические процессы, документацию и другие связанные файлы.

PDM-системы обеспечивают взаимодействие с CAD-системами ERP-системами и MES-системами.

«PPS-системы (Production Planning and Scheduling, PPS) – это системы планирования и управления производством, предназначенные для оптимизации процессов планирования, управления и контроля производства. PPS-системы помогают предприятиям эффективно распределять ресурсы, составлять графики производства, минимизировать простои и обеспечивать выполнение заказов в срок» [9].

ERP-система (Enterprise Resource Planning, ERP) – это система управления предприятием, которая интегрирует все основные бизнес-процессы и функции организации в единую информационную систему.

В машиностроении ERP-системы играют ключевую роль, поскольку помогают оптимизировать управление производственными, финансовыми, логистическими и кадровыми процессами.

Рассмотрим подробнее информационную структуру компьютерно-интегрированного производства, приведенную на рисунке 5. В соответствии с приведенной схемой в структуре компьютерно-интегрированного производства можно выделить три уровня: уровень планирования, уровень

проектирования и уровень управления.

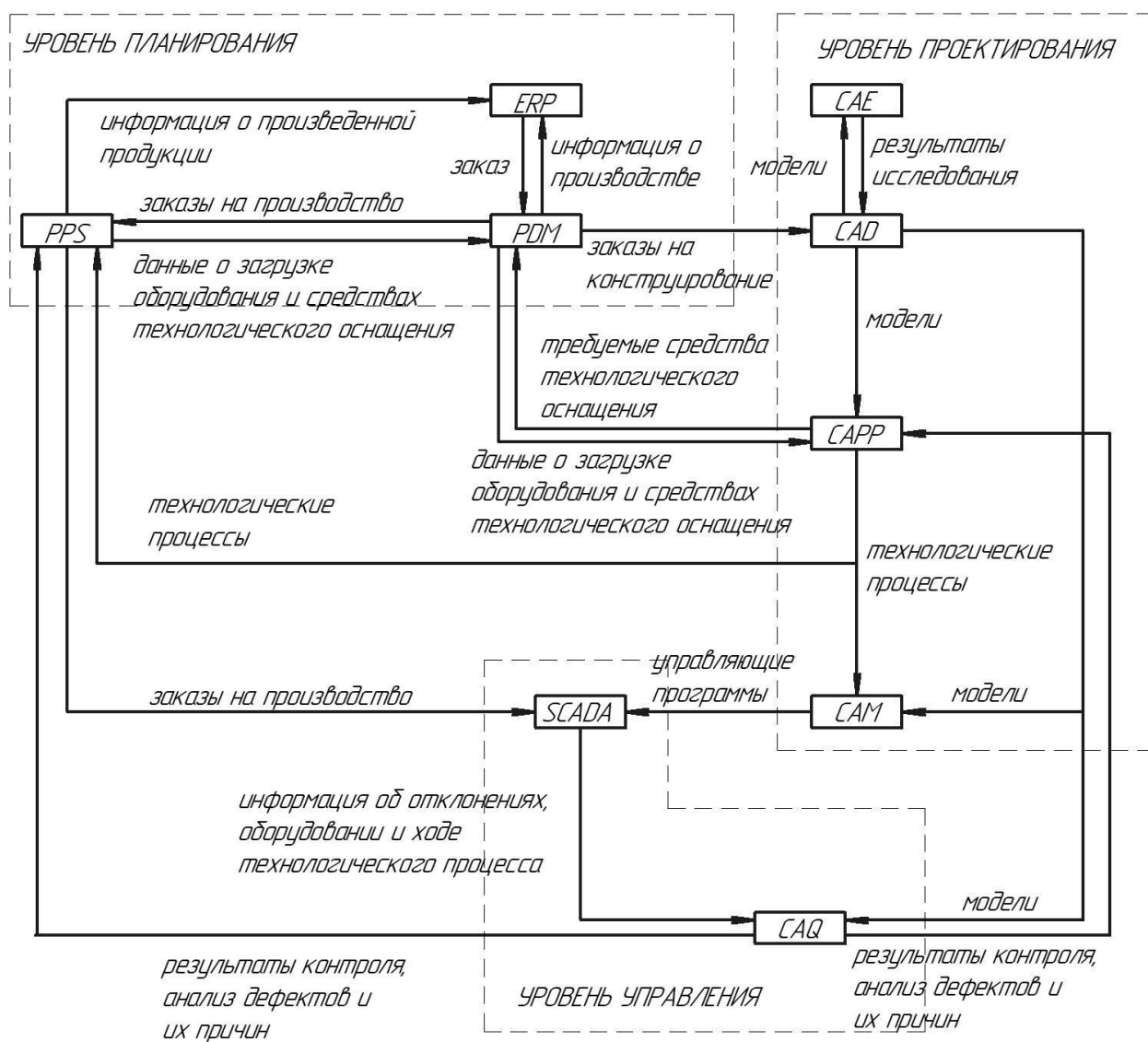


Рисунок 5 – Информационная структура компьютерно-интегрированного производства

Уровень планирования включает в себя автоматизированные системы, решающие задачи планирования и управления производством. К ним относятся ERP-система, PDM-система, PPS-система.

Уровень проектирования включает в себя автоматизированные системы решающие задачи проектирования изделий, технологических процессов, разработки управляющих программ для станков с числовым программным управлением. К ним относятся CAD-системы, CAE-системы,

CAPP-системы, CAM-системы.

Уровень управления включает в себя автоматизированные системы решающие задачи управления производственным оборудованием. К ним относятся CAQ-система, SCADA-система.

Преимущества такой структуры заключается в централизации данных, автоматизации процессов, гибкости и эффективности.

Все системы взаимодействуют через PDM/PLM и ERP, что обеспечивает согласованность информации, минимизирует ручной труд и ошибки. Достигается быстрая адаптация к изменениям в производственных требованиях, что приводит к оптимизации использования ресурсов и снижению издержек.

Эта схема является основой для создания современных "умных" производств (Smart Manufacturing) и реализации концепции Индустрии 4.0.

1.2 Роль автоматизации контроля качества в современном машиностроении

Современное машиностроение сталкивается с беспрецедентными вызовами: рост сложности изделий, ужесточение стандартов качества, сокращение сроков производства и необходимость минимизации затрат. В этих условиях автоматизация контроля качества перестала быть опциональной инновацией, а стала критическим элементом конкурентоспособности. Внедрение автоматизированных систем контроля позволяет сократить долю брака от 25% до 40%, а время проверки в 5–10 раз.

Ручные измерения с использованием штангенциркулей, микрометров и шаблонов в основном использовались в 1950–1970-е годы. Основная проблема данных методов заключается в субъективности и низкой скорости.

Внедрение координатно-измерительных машин и оптических систем в 1980–2000-е годы позволило существенно повысить точность измерений и

сократить субъективность. Например, первая контрольно-измерительная машина Mitutoyo имела точность 10 мкм. Однако данные системы имеют и недостатки, связанные со скоростью измерения для контрольно-измерительных машин, ограничениям по размеру контролируемой поверхности и стоимости

В настоящее время происходит цифровая трансформация на базе IoT, искусственного интеллекта и робототехники. Системы объединяют проектирование, производство и контроль в единый цикл.

Концепция «умного производства» подразумевает: сквозную интеграцию данных; использование цифровых двойников для прогнозирования дефектов; роботизированный контроль в режиме реального времени.

Для реализации автоматизации контроля качества используются следующие технологии: компьютерное зрение; робототехника и IoT [18]; цифровые двойники [3]; искусственный интеллект [34]. Более подробно особенности данных технологий рассмотрим далее.

Преимущества автоматизации контроля заключаются в следующем.

Повышение точности измерений. Например, лазерные сканеры достигают погрешности 0,5 мкм.

Высокая скорость измерений. Например, роботизированные системы Fanuc проверяют до 1000 деталей в час.

Масштабируемость, то есть возможность адаптации под новые продукты без остановки производства.

Снижение затрат на брак. Например, на заводе Toyota автоматизация сократила долю дефектов с 5% до 0,2%.

Данные контроля интегрируются в MES/ERP, обеспечивая автоматическое обновление производственных планов, формирование цифровых паспортов изделий.

Приведем примеры результатов внедрения данных систем. Внедрение в авиастроении 3D-сканирования крыльев самолётов выявляет отклонения

толщины в 0,1 мм. В автомобилестроении роботы-манипуляторы с искусственным интеллектом проверяют 10 000 сварных точек за смену, а внедрение ERP-системы «1С» сократило время согласования чертежей на 30%. В медицинской промышленности автоматизированный контроль хирургических инструментов снизил риск заражений на 40%.

Существует ряд проблем и ограничений, препятствующих внедрению современных технологий автоматизации контроля качества.

В первую очередь это технические сложности. Например, помехи в работе сенсоров, такие как пыль, вибрация и блики снижают точность оптических систем. Нейросети плохо распознают дефекты в нестандартных условиях (например, при низкой освещённости).

Другой не менее важный фактор экономический. Прежде всего, это высокая стоимость, а так же долгий срок окупаемости, который для малых предприятий от 3 до 5 лет.

Имеются и организационные риски. Наибольшую проблему составляет дефицит кадров, так как требуются инженеры по искусственному интеллекту и робототехнике. Возможны кибератаки. Так 34% промышленных систем сталкивались с хакерскими атаками в 2023 г. [43].

Наиболее перспективными являются следующие направления автоматизации контроля: самообучающиеся системы; блокчейн для отслеживания качества; применение роботов-инспекторов в опасных зонах; точечная коррекция дефектов вместо утилизации всей партии.

1.3 Виды и методы контроля качества изделий

Контроль качества – это систематический процесс, направленный на обеспечение соответствия продукции установленным требованиям.

В условиях глобализации и ужесточения конкуренции он становится ключевым элементом успеха предприятий. Согласно исследованию [38], 89% компаний, внедряющих комплексные системы контроля, отмечают рост

удовлетворенности клиентов и снижение затрат на брак. В условиях глобальной конкуренции контроль качества стал неотъемлемой частью производственных процессов, позволяя минимизировать брак, снижать затраты и повышать доверие клиентов. Современные подходы сочетают традиционные методы с цифровыми инновациями, создавая основу для «умного» производства.

Контроль качества осуществляется на всех этапах жизненного цикла изделия. Основные виды контроля качества включают входной, операционный, выходной и приемочный контроль.

Входной контроль осуществляется на этапе поступления материалов и комплектующих на рабочее место с целью проверки их соответствия установленным нормам и стандартам.

Операционный контроль осуществляется в процессе производства и включает в себя не только контроль изготавливаемого изделия, но и отслеживание параметров технологической системы, что позволяет выявлять отклонения на ранних стадиях и предотвращать брак.

Выходной контроль осуществляется на завершающем этапе производства с целью проверки изделий на соответствие требованиям и стандартам.

Приемочный контроль проводится при передаче изделий заказчику с целью проверки соответствия техническому заданию.

По организационной структуре различают сплошной и выборочный контроль.

Сплошной контроль подразумевает проверку абсолютно всех изделий. Позволяет практически исключить пропуск брака, но требует значительных затрат времени и ресурсов, что ограничивает область его применения контролем наиболее ответственных изделий.

Выборочный контроль подразумевает выполнение контроля определенного количества изделий из партии. Это позволяет существенно сократить затраты на проведение контроля, но требует применения

специальных методов статистической обработки данных. Наибольшее применение получил в условиях поточной формы организации производства.

Методы контроля изделий делят на две группы: неразрушающие методы и разрушающие методы.

К неразрушающим методам относят визуальные методы, ультразвуковую дефектоскопию, магнитные и радиографические методы, системы технического зрения и другие методы, которые позволяют выявлять дефекты без повреждения изделий. Неразрушающие методы контроля применяются при всех видах контроля во всех типах производств, что объясняется наличием большого числа устройств различного принципа действия, реализующих данные методы контроля.

К разрушающим методам контроля относят разнообразные методы механических испытаний, такие как растяжение, сжатие и изгиб и другие, которые приводят к разрушению испытуемых образцов. Разрушающие методы контроля чаще всего применяются на входном и приемочном контроле, где испытаниям подвергается несколько изделий из партии.

«Классификация устройств автоматического контроля качества изделий, используемых в механосборочном производстве, приведена на рисунке 6» [17].

«Значительный эффект достигается при использовании устройств активного контроля, позволяющих контролировать параметры качества в процессе выполнения технологических операций» [17].

«Устройства активного контроля, основанные на косвенном методе, непосредственно не соприкасаются с поверхностью изделия, так как окончание выполнения операции определяется не моментом достижения заданного размера, а, например, расстоянием, на которое перемещается рабочий орган станка, несущий режущий инструмент, до упора. Таким образом, они позволяют судить о параметрах качества изготавливаемых изделий на основании информации о состоянии элементов технологической системы» [17].

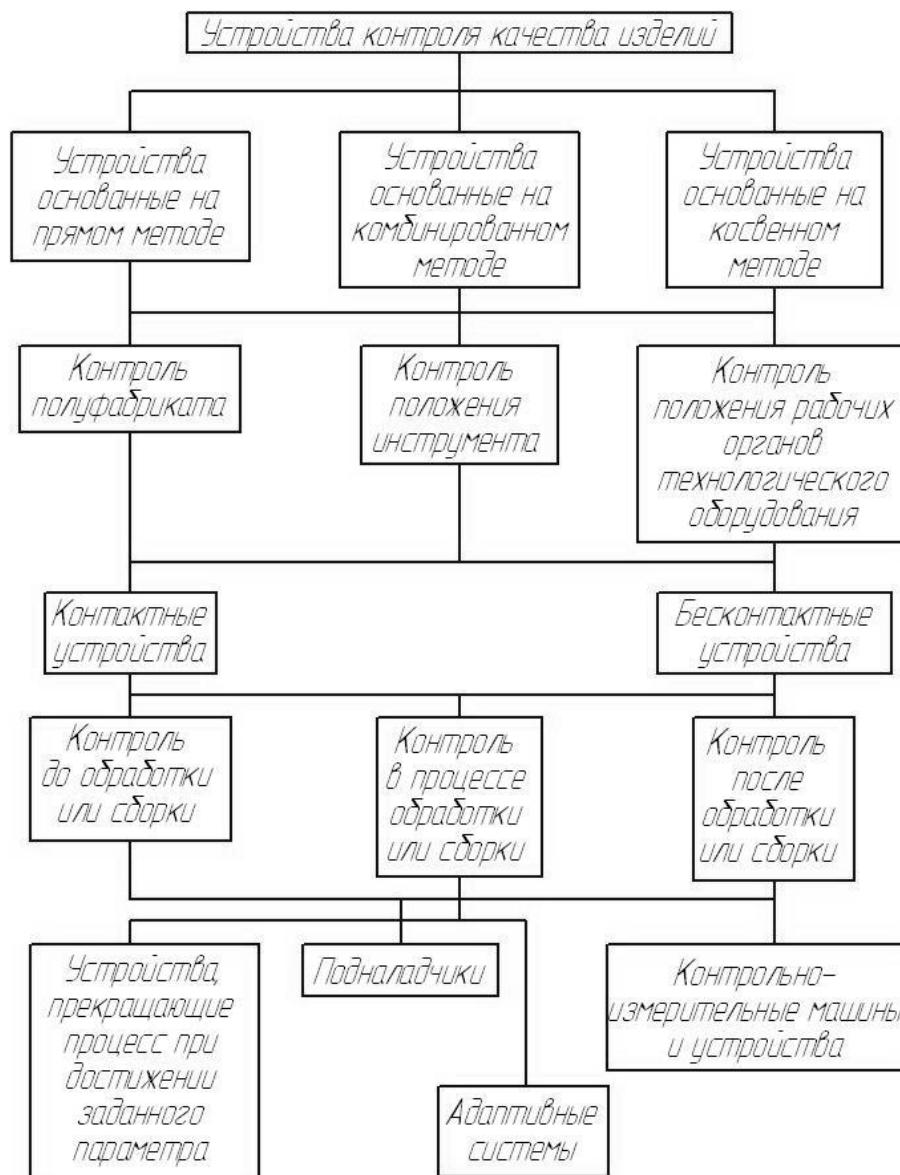


Рисунок 6 – Классификация устройств автоматического контроля качества изделий

«В устройствах контроля, основанных на комбинированном методе, используется как прямой, так и косвенный методы контроля в процессе технологической операции» [17].

«Автоматические контрольные устройства могут иметь контактные и бесконтактные датчики (пневматические, индуктивные, емкостные и лазерные), с помощью которых может быть произведен контроль до обработки или сборки, в процессе обработки или сборки, а также после обработки или сборки» [17].

1.4 Интеграция систем контроля в структуру компьютерно-интегрированного производства

Компьютерно-интегрированное производство представляет собой стратегию цифровизации, объединяющую все этапы жизненного цикла продукта от проектирования до логистики в единую информационную экосистему. Интеграция систем контроля качества в эту структуру играет ключевую роль, обеспечивая непрерывный поток данных, повышение точности измерений и оперативное устранение дефектов. Внедрение таких систем стало неотъемлемой частью концепции Индустрии 4.0 [33], где предиктивная аналитика и цифровые двойники позволяют не только фиксировать, но и предугадывать отклонения.

Основная цель интеграции заключается в создании сквозной видимости процессов [30]. Данные с сенсоров, таких как лазерные сканеры или IoT-датчики, передаются в режиме реального времени через промышленные сети (EtherCAT, OPC UA) в системы управления (MES, ERP) [19]. Например, на заводах механической обработки информация о геометрии деталей поступает в MES-платформы, где алгоритмы прогнозируют износ инструмента и корректируют параметры станков. Это исключает человеческий фактор и сокращает время на принятие решений.

Архитектура компьютерно-интегрированного производства строится на многоуровневой структуре [2]. На сенсорном уровне данные собираются роботизированными комплексами, такими как KUKA KR Quantec с 3D-сканерами, которые используются для контроля сварных швов. Сетевой уровень обеспечивает передачу информации через стандартизированные протоколы, такие как OPC UA, гарантируя совместимость оборудования разных производителей. На аналитическом уровне MES-систем, обрабатывают данные, а на управленческом ERP-платформы интегрируют их в бизнес-процессы.

Технологии интеграции включают как аппаратные, так и программные

решения. Например, роботы Fanuc с системами компьютерного зрения Cognex автоматизируют проверку кузовов автомобилей, сокращая время контроля с двух часов до 15 минут. Программное обеспечение, такое как Autodesk Fusion 360, генерирует управляющие программы для станков числовым программным управлением на основе данных измерений. Цифровые двойники, например виртуальные модели авиадвигателей, позволяют тестировать детали на усталость до начала производства, снижая долю брака на 25%.

Однако интеграция сталкивается с проблемами, такими как несовместимость форматов данных между CAD-системами [7]. Решением становится использование нейтральных форматов STEP и IGES, а также внедрение TSN (Time-Sensitive Networking) для устранения задержек передачи данных.

Организационные барьеры, включая сопротивление персонала, преодолеваются через обучение и демонстрацию экономии времени. Кибербезопасность обеспечивается блокчейн-технологиями, которые защищают данные от несанкционированного доступа. Экономические сложности, например, высокая стоимость роботизированных комплексов, смягчаются поэтапным внедрением и государственными субсидиями.

1.5 Проблемы и вызовы автоматизации контроля в машиностроении

Автоматизация контроля качества в машиностроении, несмотря на значительные преимущества, сталкивается с рядом сложностей, которые замедляют её внедрение и ограничивают эффективность. Эти вызовы требуют комплексного подхода, сочетающего технические инновации, организационные изменения и инвестиции в человеческий капитал.

Технические ограничения связаны со следующими проблемами. Низкой точностью в динамических условиях, так как сенсоры (например,

лазерные сканеры) чувствительны к вибрациям, запыленности и перепадам температур. Решение данной проблемы в использовании компенсационных алгоритмов и защитных кожухов для датчиков. Сложностью интеграции с устаревшим оборудованием. Старые станки с числовым программным управлением не поддерживают современные протоколы (OPC UA, MTConnect), что затрудняет передачу данных в MES-системы.

Ограничения искусственного интеллекта. Нейросети плохо справляются с распознаванием редких дефектов (например, микротрещин в композитных материалах) из-за недостатка обучающих данных.

Организационные барьеры связаны с дефицитом квалифицированных кадров. Нехватка инженеров, способных работать с системами искусственного интеллекта и робототехникой. По данным [11], 54% предприятий испытывают трудности с подбором персонала.

Сложности стандартизации связаны с разрозненными форматами данных (CAD-файлы, отчеты MES), что затрудняет создание единой базы.

Экономические факторы, связанные с высокими капитальными затратами, долгий срок окупаемости. Внедрение системы контроля на базе искусственного интеллекта окупается за период от 3 до 5 лет, что отпугивает инвесторов.

Киберриски и безопасность связаны с уязвимостью IoT-устройств. Хакерские атаки на датчики могут исказить данные контроля. Также имеется риск утечки интеллектуальной собственности. Цифровые модели изделий и алгоритмы контроля становятся мишенью промышленного шпионажа.

Решение обозначенных проблем видится в следующем.

Использование гибридных систем «человек-машина». Роботы выполняют рутинные измерения, а инженеры анализируют сложные случаи. На заводе Toyota такой подход сократил ошибки на 40%.

Использование цифровых двойников для тестирования. Виртуальные модели позволяют оптимизировать настройки контроля до внедрения в производство [1].

Использование облачных платформ. Таких как AWS IoT и Microsoft Azure, что снижает затраты на инфраструктуру.

По результатам выполнения данного раздела можно сделать следующие выводы.

Проблемы автоматизации контроля в машиностроении носят системный характер, но их решение открывает путь к созданию устойчивых и конкурентоспособных производств. Ключевыми факторами успеха станут инвестиции в научные исследования и разработки, направленные на создание новых продуктов и технологий, подготовка кадров и адаптация регуляторной базы. Технологии искусственного интеллекта, блокчейн и квантовые вычисления постепенно снижают барьеры, делая автоматизацию доступной даже для малых предприятий.

Интеграция систем контроля в компьютерно-интегрированное производство это не просто технологический апгрейд, а стратегический шаг к созданию «умных» производств. Она обеспечивает прозрачность процессов, сокращает издержки и повышает конкурентоспособность. Несмотря на сложности (высокие затраты, киберриски), преимущества перевешивают: автоматизация контроля позволяет предприятиям быстро адаптироваться к изменениям рынка и требованиям клиентов.

Контроль качества эволюционировал от ручных проверок до интеллектуальных систем, объединяющих искусственный интеллект, IoT и блокчейн. Несмотря на технические и организационные сложности, интеграция автоматизированных систем контроля позволяет достичь точности до 2 мкм и сократить время проверки на 75%. Дальнейшие исследования должны быть направлены на разработку самообучающихся алгоритмов и удешевление сенсорных технологий.

2 Анализ существующих систем автоматизации контроля

2.1 Обзор современных технологий

Современные системы автоматизации контроля в машиностроении базируются на интеграции передовых технологий, которые обеспечивают высокую точность, скорость и надёжность процессов. Ключевыми из них являются компьютерное зрение, IoT (Интернет вещей), цифровые двойники, а также специализированное программное обеспечение. Рассмотрим их подробнее.

Компьютерное зрение (Computer Vision, CV) – это технология, позволяющая машинам анализировать визуальные данные (изображения, видео) для автоматического контроля качества, обнаружения дефектов и измерения параметров.

Принцип работы данных систем заключается в следующем. Системы компьютерного зрения начинают с захвата изображений или видео с помощью промышленных камер. Затем данные обрабатываются алгоритмами, устраняющими шумы и корректирующими освещение. На этапе анализа используются методы искусственного интеллекта, такие как сверточные нейронные сети (CNN), которые классифицируют дефекты, выделяют области интереса (например, сварные швы) и измеряют геометрические параметры. Результаты передаются в системы управления производством (MES, SCADA) для корректировки процессов.

Традиционные методы обработки изображений включают фильтрацию и морфологические операции для выделения границ и очистки данных. Однако современные решения всё чаще опираются на глубокое обучение. Алгоритмы YOLO и ResNet обнаруживают дефекты за доли секунды, а генеративно-состязательные сети (GAN) создают синтетические данные для обучения моделей.

Область применения данных систем достаточно обширна. Например,

на автомобильных заводах компьютерное зрение контролирует качество сварных швов, выявляя поры и неравномерный провар. Камеры с инфракрасной подсветкой фиксируют дефекты, а нейросети анализируют их с точностью до 98%. Общий вид такой системы приведен на рисунке 7.

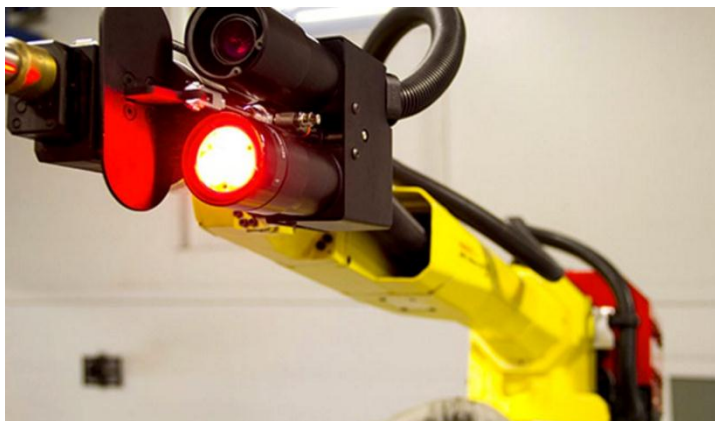


Рисунок 7 – Общий вид системы машинного зрения на основе камеры с инфракрасной подсветкой

Другой пример измерение геометрии деталей с помощью 3D-сканеров, которые сравнивают облака точек с CAD-моделями, обеспечивая допуск до ± 5 мкм.

Для реализации этих задач используются библиотеки обработки изображений (OpenCV) и фреймворки для обучения нейросетей (TensorFlow, PyTorch). Промышленные платформы интегрируются с CAD-системами и MES, автоматизируя формирование отчетов.

Для работы систем требуются мощные графические процессоры, промышленные камеры с высокой частотой съемки и структурированное освещение, минимизирующее блики. Обучение моделей проводится на серверах, а инференс на встроенных устройствах.

Технология обеспечивает точность измерений до 1 мкм и скорость обработки до 1000 деталей в минуту. Она снижает зависимость от ручного труда, сокращая затраты на контроль до 50%.

Основные проблемы включают чувствительность к внешним условиям

(пыль, вибрация), высокую стоимость оборудования и необходимость больших размеченных датасетов. Кроме того, существует риск кибератак, требующий усиленной защиты данных.

Компьютерное зрение тесно взаимодействует с CAD-системами, используя 3D-модели как эталон, и MES-платформами, передавая данные о браке для анализа. Роботизированные системы, оснащенные камерами, автоматически удаляют дефектные детали с конвейера.

Современные тренды включают Edge AI (обработка данных на устройстве), мультиспектральный анализ для выявления скрытых дефектов и генеративные модели, создающие синтетические данные.

Компьютерное зрение трансформирует машиностроение, делая контроль быстрым, точным и автоматизированным. Несмотря на технические и финансовые сложности, его внедрение окупается за счет снижения брака и повышения эффективности. Будущее технологии связано с интеграцией искусственного интеллекта, улучшенной аналитикой и устойчивостью к внешним помехам.

Рассмотрим следующую технологию. Интернет вещей (IoT) – это технология, объединяющая устройства, датчики и сети для сбора и анализа данных в режиме реального времени. В машиностроении IoT стал основой цифровой трансформации, позволяя перейти от реактивного управления к прогнозированию проблем и их предотвращению. Это достигается за счет непрерывного мониторинга оборудования, оптимизации процессов и повышения качества продукции.

Системы IoT включают датчики, измеряющие параметры вроде температуры, вибрации или давления, сети передачи данных (проводные и беспроводные), а также платформы для анализа информации. Например, датчики на станках отслеживают износ инструмента, а алгоритмы прогнозируют необходимость обслуживания. Данные передаются в облачные системы, где интегрируются с ERP и MES для автоматизации решений. Типовая структура системы на основе IoT приведена на рисунке 8.

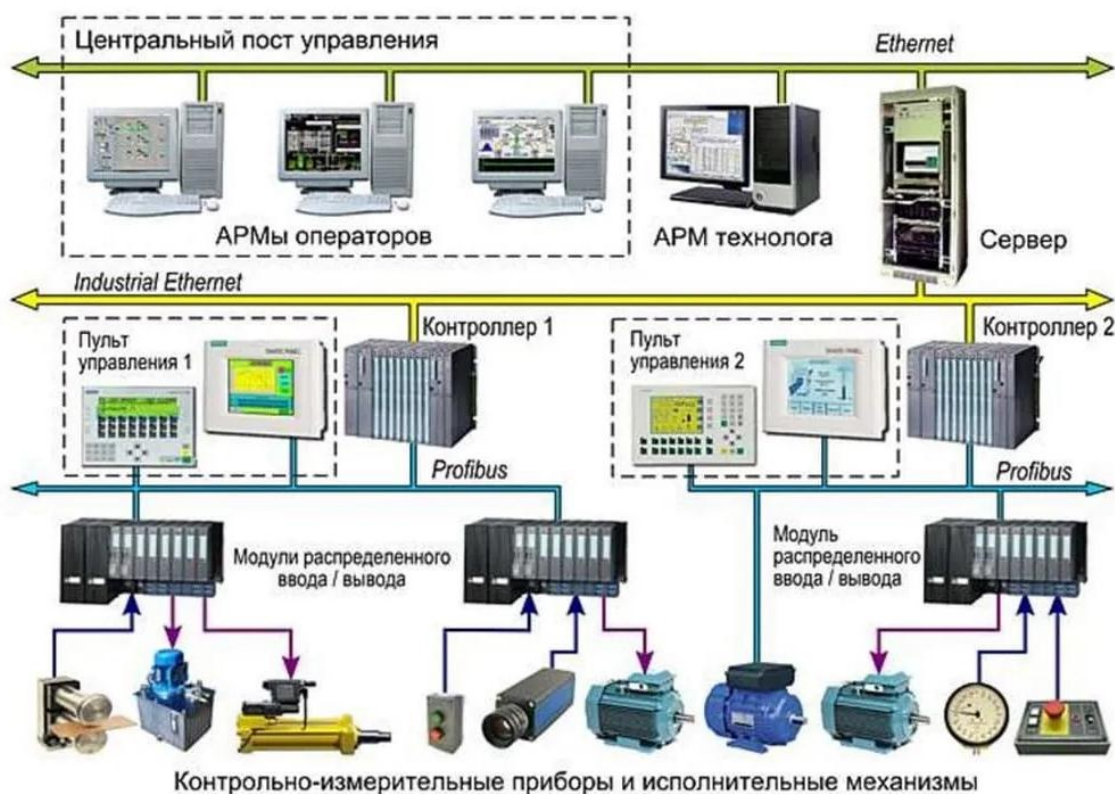


Рисунок 8 – Типовая структура системы на основе IoT

IoT используется для предиктивного обслуживания, когда оборудование ремонтируется до поломки, что сокращает простои. В управлении качеством датчики мгновенно обнаруживают отклонения в размерах деталей, останавливая конвейер. Технология также оптимизирует логистику, отслеживая движение сырья и готовой продукции, и снижает энергопотребление за счет анализа работы станков и систем.

Главные плюсы IoT заключаются в снижении затрат на ремонт и энергоресурсы, повышение точности контроля и гибкости производства. Предприятия сокращают брак, быстро адаптируются к изменениям спроса и минимизируют экологическое воздействие.

Внедрение IoT сталкивается с кибератаками, требующими усиленной защиты данных. Совместимость устаревшего оборудования с современными протоколами часто затруднена, а высокая стоимость датчиков и программного обеспечения может быть барьером для малых предприятий.

Кроме того, ошибки в данных из-за помех или неисправных сенсоров иногда приводят к некорректным решениям.

Еще одной перспективной технологией для использования в системах контроля является технология цифровых двойников. Суть данной технологии заключается в создании виртуальных копий объектов контроля и их синхронизации с реальными объектами путем использования данных от датчиков, сенсоров и других IoT-устройств. Алгоритмы машинного обучения анализируют эту информацию, выявляют закономерности и прогнозируют поведение объекта при развитии различных сценариев. Общая схема концепции цифровых двойников приведена на рисунке 9.

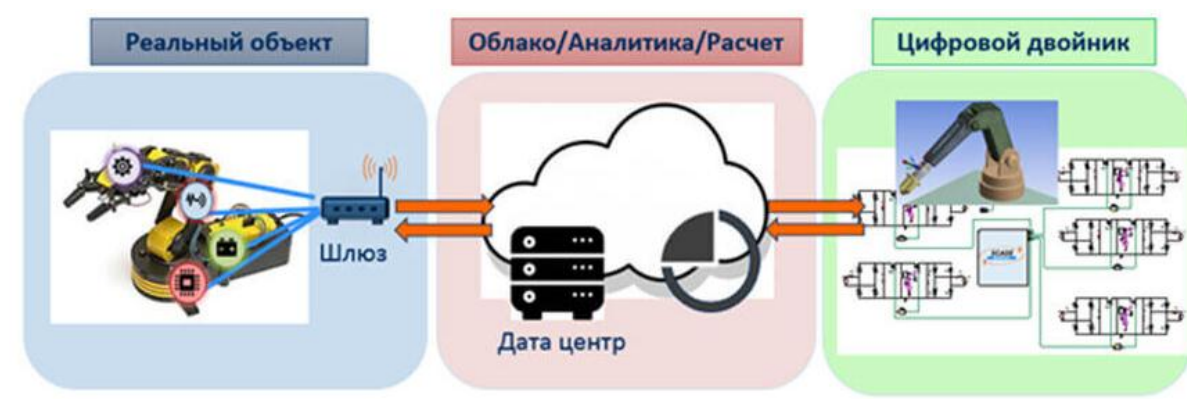


Рисунок 9 – Общая схема технологии цифровых двойников

Например, цифровой двойник станка включает его геометрические параметры, данные с датчиков о вибрации, температуре, износе деталей и энергопотреблении, поступающие в систему в режиме реального времени.

Использование цифровых двойников возможно для моделирования, синхронизации с реальным объектом и проведения аналитических исследований.

Моделирование подразумевает создание виртуального аналога и проведении различного рода исследований на нем. Это позволяет имитировать поведения объекта в реальных условиях без создания его прототипа. Такой подход сокращает время на проектирование и снижает его

стоимость, без потери точности проведения расчетов.

Синхронизация с реальным объектом подразумевает обмен данными между физическим объектом и его моделью в режиме реального времени. Чаще всего такой подход применяется для управления оборудованием в режиме реального времени. Это позволяет учитывать фактическое состояние оборудования и в случае необходимости перераспределять задачи между другим оборудованием.

Проведение аналитических исследований на цифровом двойнике позволяет решать задачи оптимизации и прогнозирования. Например, при помощи цифрового двойника станка можно спрогнозировать необходимость замены его узлов до их поломки.

В независимости от решаемой задачи, как следует из рисунка 9, создание цифровых двойников требует использования технологий: IoT для сбора необходимой информации, облачных платформ для хранения и обработки данных и искусственного интеллекта, который обучается на этих данных, чтобы предсказывать отказы или оптимизировать настройки.

Основой цифровых двойников объектов являются CAD-модели. От адекватности и точности используемых для их создания CAD-систем во многом зависят результаты моделирования.

При всех своих плюсах технология цифровых двойников имеет и недостатки. Основная из которых заключается в необходимости обработки больших объемов данных в режиме реального времени, что значительно затрудняет и удорожает внедрение данной технологии. В виду использования облачных технологий значительно увеличивается проблема обеспечения кибербезопасности. В случае использования на производстве устаревшего оборудования возникает проблема его физической интеграции в систему. Использование технологий искусственного интеллекта требует соответствующей подготовки сотрудников.

Цифровые двойники трансформируют машиностроение, делая его гибким, безопасным и эффективным. Несмотря на сложности, такие как

объем данных и киберугрозы, их потенциал огромен. Уже сейчас они помогают сократить время разработки, предупредить аварии и снизить потребление ресурсов. В ближайшие годы двойники смогут не только прогнозировать, но и самообучаться, адаптируясь к изменениям в реальном времени. Таким образом, цифровые двойники станут неотъемлемой частью концепции Индустрия 4.0, открывая путь к полностью автоматизированным и устойчивым производствам.

Рассмотренные технологии являются основой для автоматизации контроля изделий машиностроения в рамках концепции компьютерно-интегрированного производства.

2.2 Сравнительный анализ промышленных решений

Анализ видов и методов контроля качества изделий, а также обзор современных технологий, проведенный выше, показал, что для решения задачи автоматизация контроля изделий машиностроения в рамках концепции компьютерно-интегрированного производства наиболее подходят системы, работающие на основе систем машинного зрения.

Проведем анализ имеющихся промышленных решений. За основу возьмем наиболее характерные системы фирм ZEISS [42], Hexagon [25], Keyence [29].

В качестве основных систем фирмы ZEISS (Германия) примем координатно-измерительные машины серии PRISMO и оптические 3D-сканеры ATOS. Данные системы работают на программном обеспечении CALYPSO для анализа данных.

Преимущества:

- высочайшая точность (до 0,3 мкм) благодаря лазерным технологиям и эталонной калибровке;
- прямая интеграция с CAD моделями SolidWorks, CATIA;
- универсальность, так как подходят для контроля сложных деталей в

аэрокосмической и автомобильной отраслях.

Недостатки:

- высокая стоимость 300000 евро;
- сложность настройки, что требуется квалифицированных операторов;
- габариты, так как крупногабаритные модели занимают много места.

В качестве основных систем фирмы Hexagon (Швеция) примем координатно-измерительные машины Global S и портативные 3D-сканеры Absolute Arm. Данные системы работают на программной платформе PC-DMIS для метрологии с использованием системы Q-DAS для статистического анализа качества.

Преимущества:

- гибкость, что является следствием портативности;
- модульность, которая обеспечивает возможность комбинировать контактные и бесконтактные методы измерений;
- аналитика в виде статистического анализа в режиме реального времени.

Недостатки:

- ограниченная скорость (сканирование крупных объектов занимает часы);
- сложность интеграции, так как требует настройки под конкретные ERP-системы.

В качестве основных систем фирмы Keyence (Япония) примем оптические измерительные системы IM-8000, лазерные сканеры LJ-V7000, системы машинного зрения CV-X.

Преимущества:

- скорость обработки до 1000 измерений в минуту;
- простота использования вследствие использования интуитивного интерфейса, что требует минимального обучения персонала;
- компактность.

Недостатки:

- ограниченная точность (погрешность до 10 мкм);
- узкая специализация, не подходят для сверхсложных деталей.

Ключевые особенности систем сведем в таблицу 1.

Таблица 1 – Ключевые особенности систем

Параметр	ZEISS	Hexagon	Keyence
точность, мкм	0,3–1	1–5	5–10
скорость	средняя	низкая	высокая
стоимость, €	от 300000	от 150000 до 500000	от 50000 до 200000
ключевое отличие	эталонная точность	модульность	простота и скорость

Проведем анализ эффективности рассматриваемых систем в условиях массового производства в автомобилестроении на основе формализованного подхода [12]. «Суть данного подхода заключается в определении показателя привлекательности системы по формуле:

$$P = \sum_i \gamma_i \cdot A_i, \quad (1)$$

где $A_i \in \{0; 1\}$ – критерии оценки, которые говорят о наличии или отсутствии определенных свойств;

γ_i – весовые коэффициенты критериев.

$$\gamma_i = \frac{1}{\sum_j k_j}, \quad (2)$$

где k_j – баллы по усредненным экспертным оценкам» [12].

«Принимаем следующие критерии оценки:

- размер контролируемого объекта;
- скорость замера;
- обнаружение всех дефектов;
- точность измерений;

- время наладки системы;
- стоимость» [12].

«Далее для каждого из критериев присваиваем баллы на основе средневзвешенной экспертной оценкой специалистов в области контроля.

Размер контролируемого объекта:

- от 0,001 до 1 метра – 90 баллов;
- от 1 до 10 метров – 70 баллов;
- от 10 до 50 метров – 50 баллов;
- от 50 до 100 метров – 20 баллов.

Скорость замера:

- менее 100 точек в секунду – 10 баллов;
- от 100 до 500 точек в секунду – 60 баллов;
- от 500 до 1000 точек в секунду – 100 баллов.

Точность измерений:

- от 0,001 до 0,01 мм – 60 баллов;
- от 0,01 до 0,1 мм – 80 баллов;
- более 0,1 мм – 40 баллов.

Время наладки системы:

- до 10 минут – 60 баллов;
- от 10 до 30 минут – 50 баллов;
- более 30 минут – 30 баллов.

Стоимость системы:

- до 100000 долларов – 60 баллов;
- от 100000 до 250000 долларов – 10 баллов;
- более 250000 долларов – 0 баллов.

Обнаружение всех дефектов 100 баллов» [12].

Результаты оценки систем приведены на рисунке 10 в виде гистограммы.

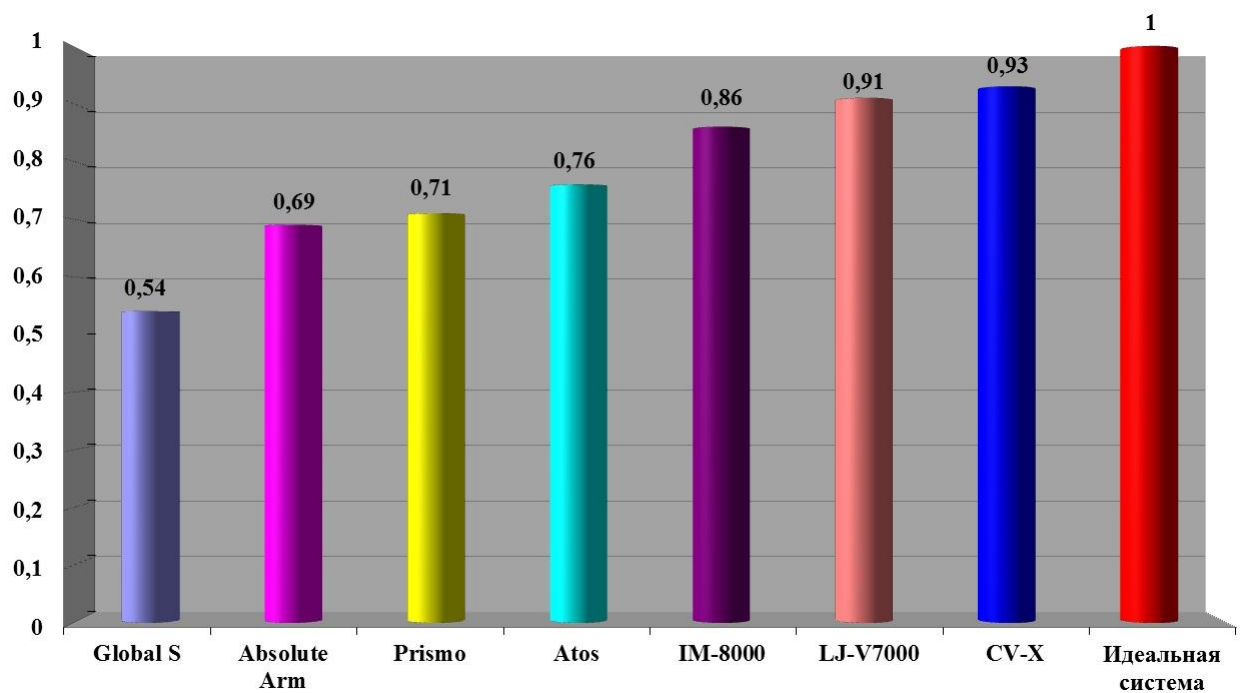


Рисунок 10 – Результаты оценки систем

«Проанализируем полученные результаты. Наименее привлекательными являются системы Global S, портативные 3D-сканеры Absolute Arm и системы PRISMO» [4]. Показатели данных систем составили от 0,54 до 0,71, что является неудовлетворительным результатом. Следовательно, использование данных систем в автоматизированных системах контроля в заданных условиях не целесообразно.

Показатели оптических 3D-сканеров ATOS и оптических измерительных систем IM-8000 составили от 0,76 до 0,86, что является хорошим результатом. «Следовательно, данные системы могут быть использованы для решения задач в автоматизированных системах контроля автомобилестроения» [4].

«Наилучший результат показали лазерные сканеры LJ-V7000, системы машинного зрения CV-X, 0,91 и 0,93 соответственно. Следовательно, данные системы наиболее соответствуют для решения задач в автоматизированных системах контроля автомобилестроения» [4].

«Из проведенного анализа также можно сделать вывод, что даже при

решении задач контроля автомобилестроения в условиях массового производства на данный момент не существует системы в полной мере отвечающей всем требованиям, то есть с показателем 1,0» [4].

Предложенная методика анализа систем контроля имеет ограничения, поскольку оценка критериев напрямую зависит от масштабов производства. Например, ключевые параметры, такие как стоимость, могут меняться при переходе на экономичные компоненты или увеличении объемов выпуска оборудования. Важно подчеркнуть, что результаты данного сравнения справедливы исключительно для задач автоматизации в автомобильной отрасли. Применение аналогичного подхода в других сферах или для иных целей может привести к принципиально иным выводам из-за различий в требованиях и условиях эксплуатации.

Исходя из полученных результатов анализа, применительно к рассматриваемым системам можно дать следующие рекомендации.

Системы фирмы ZEISS рекомендуется использовать для задач, требующих максимальной точности на крупных предприятиях аэрокосмической промышленности и медицинского оборудования. Данная фирма лидер в высокоточной метрологии, но требует значительных инвестиций

Системы фирмы Hexagon рекомендуется использовать для гибких решений с возможностью использования для контроля качества на строительных площадках или в энергетике. Данная фирма предлагает баланс между точностью и гибкостью, подходит для сложных производств

«Системы фирмы Keyence рекомендуется использовать для массового производства с высоким темпом» [4] (электроника, автомобильные компоненты), оптимальны для малого бизнеса благодаря простоте и скорости, но уступает в точности.

Выбор системы зависит от требований к точности, бюджета и масштабов производства.

2.3 Выявление потребностей отрасли

Современное машиностроение предъявляет высокие требования к системам автоматизации контроля, которые можно разделить на три ключевые категории.

Первая категория точность. В таких отраслях, как авиакосмическая или медицинская промышленность, допустимые отклонения измерений не превышают от 1 до 5 мкм. В автомобилестроении требования менее строгие порядка 50 мкм, но массовость производства требует стабильности результатов.

Вторая категория скорость. Контрольные системы не должны замедлять производственные линии. Технологии вроде высокоскоростных камер (от 1000 кадров/сек) и параллельной обработки данных на графическом процессоре обеспечивают выполнение тысяч измерений в минуту.

Вторая категория гибкость. Производства всё чаще переходят на создание индивидуального продукта, требуя быстрой перенастройки систем под новые модели. Например, роботизированные контрольно-измерительные машины со сменными сенсорами адаптируются к разным геометриям деталей за время от 10 до 15 минут. Программное обеспечение с открытыми протоколами API (например, на базе Python) позволяет интегрировать новые алгоритмы без остановки процессов.

Основной проблемой автоматизации контроля на современном этапе развития является интеграция с ERP/MES-системами.

В первую очередь это проблема совместимости форматов данных. Например, CAD-файлы из SolidWorks могут не поддерживаться Siemens PLM, что требует конвертации через промежуточные форматы (STEP, IGES).

Следующая проблема связана с задержкой передачи данных в системах реального времени. Например, в системах SCADA задержка более 50 мс критична. Решение данной проблемы в использовании стандартов TSN

(Time-Sensitive Networking) и граничных вычислений.

Проблема кибербезопасности связана с подключением IoT-устройств к MES-системам, что увеличивает риски хакерских атак. Компании внедряют блокчейн (Hyperledger Fabric) и двухфакторную аутентификацию.

Сложность масштабирования обусловлена тем, что старые MES-платформы (например, SAP R/3) плохо адаптируются к облачным решениям. Переход на SAP S/4HANA требует переобучения персонала и значительных инвестиций.

Удовлетворение требований отрасли к точности, скорости и гибкости невозможно без преодоления барьеров интеграции. Стандартизация интерфейсов, использование граничной аналитики и инвестиции в кибербезопасность становятся обязательными условиями для создания эффективных систем автоматизации контроля.

В ходе выполнения данного раздела были достигнуты следующие результаты.

Проведенный анализ современных систем автоматизации контроля в машиностроении выявил их ключевую роль в повышении эффективности, точности и гибкости производственных процессов. Технологии, такие как компьютерное зрение, IoT, цифровые двойники и специализированное программное обеспечение, формируют основу для цифровой трансформации отрасли. Компьютерное зрение, например, позволяет обнаруживать дефекты с точностью до 99%, а IoT-датчики обеспечивают непрерывный мониторинг оборудования, сокращая простои до 20%. Цифровые двойники, интегрированные с MES-системами, открывают возможности для прогнозирования износа и оптимизации процессов в режиме реального времени.

Сравнительный анализ решений от ведущих производителей (ZEISS, Hexagon, Keyence) показал, что выбор системы зависит от специфики задач. ZEISS доминирует в высокоточной метрологии для аэрокосмической отрасли, Hexagon предлагает гибкие модульные решения, а Keyence

обеспечивает скорость и простоту внедрения для массового производства. Однако все системы сталкиваются с общими вызовами: высокой стоимостью, сложностью интеграции с устаревшим оборудованием и необходимостью квалифицированных кадров.

Требования отрасли к точности, скорости и гибкости подчеркивают важность адаптивных технологий. При этом ключевым барьером остается интеграция систем контроля с ERP/MES-платформами. Проблемы несовместимости форматов данных, задержки передачи и киберриски требуют стандартизации протоколов, внедрения граничных вычислений и усиления мер безопасности.

В перспективе развитие технологий искусственного интеллекта, 5G и блокчейна стимулировать создание автономных систем контроля, способных самообучаться и адаптироваться к изменениям. Это позволит машиностроению перейти к устойчивому, безотходному производству, где качество и эффективность станут неотъемлемыми элементами цифровой экосистемы предприятия.

3 Разработка модели системы автоматизированного контроля

3.1 Архитектура системы автоматизированного контроля

Качество разрабатываемого программного продукта полностью зависит от того, насколько детально был произведен анализ предметной области. Поэтому важно выбрать такой метод проектирования, который позволит выявить все требования и ограничения системы и в дальнейшем облегчить разработку программного обеспечения.

Для описания системы контроля был выбран структурный подход. Он основан на принципе функциональной декомпозиции и позволит описать процессы контроля и регистрации деталей в цехе механической обработки, выявить последовательность выполнения работ, осуществляемые преобразования информационных и материальных потоков с целью обнаружения недостатков существующих способов и приемов выполнения операций контроля и регистрации деталей.

Общая методология IDEF [15] состоит из частных методологий моделирования, основанных на графическом представлении систем:

- IDEF0 (функциональная модель) используется для создания функциональной модели, отображающей структуру и функции системы, а также потоки информации и материальных объектов, связывающие эти функции;
- «DFD (диаграмма потоков данных) используются для описания документооборота и обработки информации» [26].

«Для описания системы контроля деталей предпочтительнее использовать модель IDEF0, так как она позволяет понять, какие объекты или информация служат сырьем для процессов, какие результаты производят работы, что является управляющими факторами и какие ресурсы для этого необходимы» [26]. DFD же дает представление лишь о преобразовании информационных потоков и не позволит получить нужное описание

системы.

Таким образом, для построения модели системы контроля деталей лучше всего подходит методология структурного анализа IDEF0.

Выполним описание процессов контроля и регистрации.

«Процесс моделирования какой-либо системы в IDEF0 начинается с определения контекста, то есть, наиболее абстрактного уровня описания системы в целом» [31]. «В контекст входит определение субъекта моделирования, цели и точки зрения на модель. Субъектом моделирования является система контроля деталей» [31]. Целью построения модели является описание процессов контроля и регистрации деталей для выявления путей оптимизации этих процессов.

На рисунке 11 представлена контекстная диаграмма, описывающая процесс ведения контроля на производственном участке в цехе механической обработки.

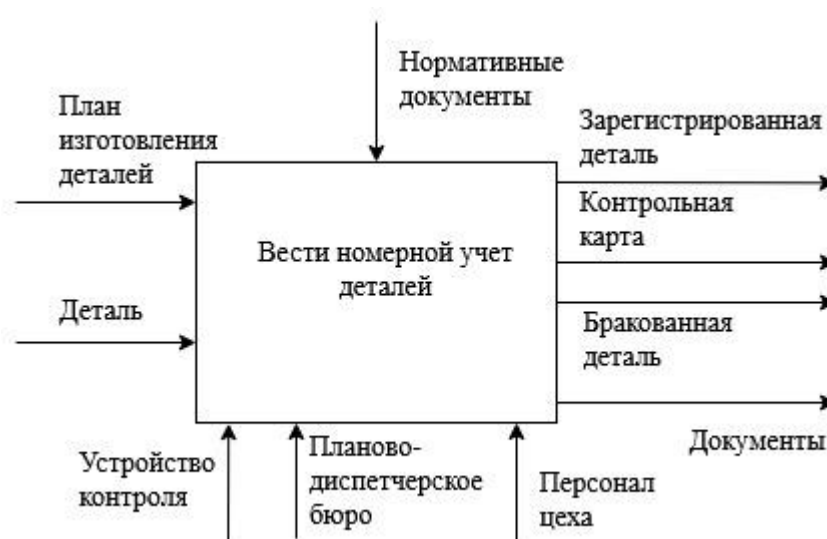


Рисунок 11 – Процесса ведения контроля на производственном участке

На вход процесса поступают детали и план изготовления. В процессе контроля и регистрации участвует персонал цеха, работники планово-диспетчерского бюро. Результатом этого процесса является

зарегистрированная деталь и прилагающаяся к нему контрольная карта изготовления. Службы цеха ведут документацию, необходимую на следующих этапах производства. При осуществлении процесса изготовления возможны дефекты, не подлежащего исправлению. В таком случае бракованные детали списываются и подлежат утилизации и передаче в производство по переработке отходов.

Данный процесс является более сложным и включает в себя следующие подпроцессы:

- выполнение технологической операции;
- выборочный контроль;
- дальнейшие стадии технологического процесса;
- регистрация детали в системе контроля;
- контроль параметров детали.

Каждый день бюро сводного планирования производства передает в планово-диспетчерского бюро план изготовления деталей операторам участка технического контроля. На основании этого плана сотрудники планово-диспетчерского бюро формируют задание с разбивкой по сменам, регламентирующее процессы контроля и регистрации деталей. Декомпозиция данного процесса приведена на рисунке 12.

На вход блока «Выполнение технологической операции» поступает деталь для ее обработки в соответствии с технологическим процессом.

Станок имеет собственную систему управления. В соответствии с планом по производству деталей, заданным сотрудниками планово-диспетчерского бюро, формируется план по производству деталей. Он передается на контроллер системы автоматического управления производством.

На этой стадии неисправность оборудования или программный сбой может привести к появлению дефекта, который является неустранимым. После выполнения операции производится выборочный контроль качества ее выполнения. Если контролер решает, что операция выполнена на должном

уровне, то деталь проходит дальнейшие стадии изготовления, если обнаруживается брак, то деталь списывается.

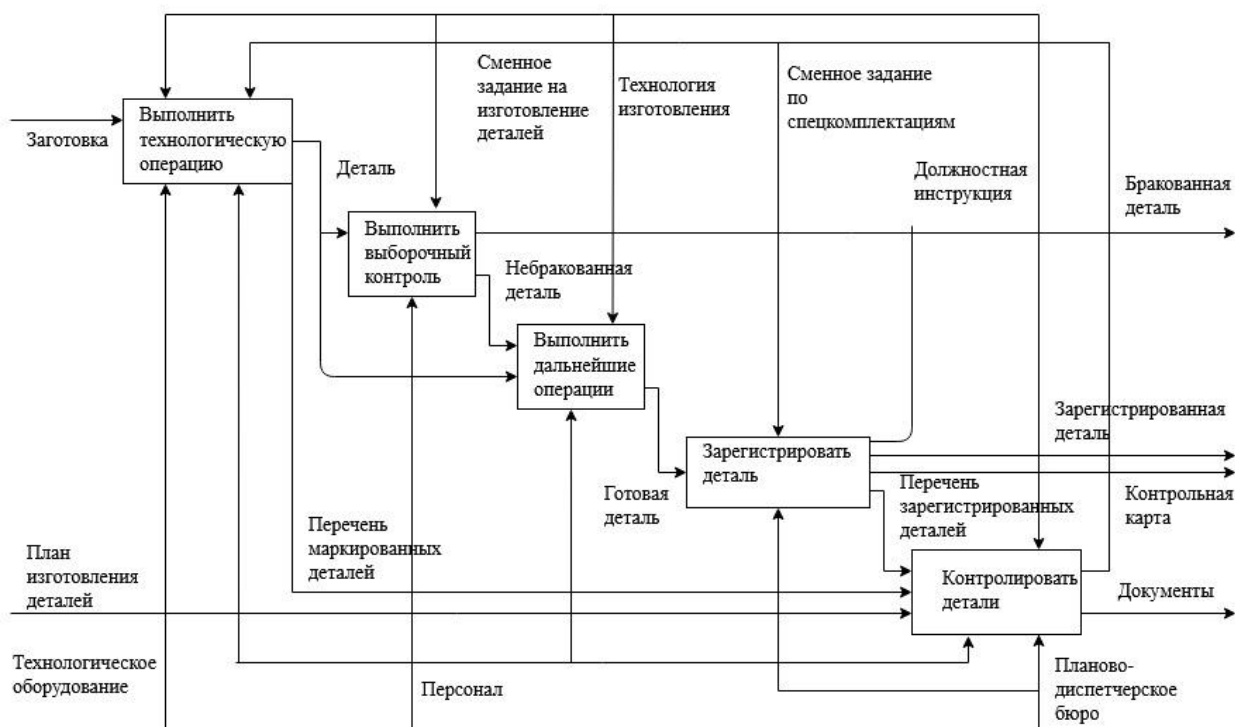


Рисунок 12 – Декомпозиции процесса ведения контроля на производственном участке

Регистрация детали производится работником планово-диспетчерского бюро на выходе из цеха. На этом этапе также должна быть оформлена контрольная карта изготовления.

Персонал цеха и сотрудники планово-диспетчерского бюро осуществляют контроль процесса изготовления деталей с помощью автоматизированной системы управления и контроля с целью предупреждения и своевременного устранения аварий и других, задерживающих производственный процесс ситуаций, а также получения необходимых документов и отчетов.

Итак, можно сделать вывод, что главным недостатком существующего способа контроля является пропуск брака, обнаружение которого на последующих стадиях приводит к утилизации детали.

Выполним анализ процесса регистрации детали.

Регистрация детали необходима для учета детали и важна для последующего ее использования при сборке. Диаграмма процесса регистрации приведена на рисунке 13.



Рисунок 13 – Декомпозиции процесса регистрации детали

Оператор определяет для каждой выходящей из цеха детали номер, нанесенный на ней каким-либо способом [27], и вносит его в базу данных. Кроме идентификационного номера по каждой детали регистрируется комплектация и вариант в типологии. Тип определяется потребностью текущего плана смены по специальным комплектациям, заданного планово-диспетчерским бюро. Также идентификационная бирка должна быть распечатана и вклеена в контрольную карту изготовления для использования в последующих точках регистрации.

При действующем способе регистрации повышается нагрузка на оператора, который определяет идентификационный номер визуально.

Ситуация усложняется тем, что на регистрацию детали чаще всего поступают в произвольном порядке. Это становится причиной появления несоответствий.

Поэтому нередко возникает необходимость проверки правильности регистрации (чтобы избежать путаницы на последующих этапах изготовления). Работник планово-диспетчерского бюро, используя данные о регистрационных номерах, а также сведения о бракованных деталях, составляет отчет, позволяющий обнаружить ошибки - случаи несоответствия регистрационного номера детали его идентификационному номеру.

Таким образом, проведенный анализ показал, что проведение регистрации оператором планово-диспетчерского бюро приводит к появлению ошибок, исправление которых влечет за собой дополнительные затраты и тормозит производственный процесс.

Выполним анализ процесса контроля.

Для мониторинга и контроля выполнения производственного процесса и состояния оборудования персонал и работники планово-диспетчерского бюро цеха должны иметь возможность осуществлять следующие задачи:

- контроль состояния межоперационных заделов на автоматических линиях, в накопителях и транспортных системах;
- контроль состояния и статистика простоев оборудования;
- контроль выполнения планового задания;
- учет состояния складов цеха;
- проверка регистрации деталей;
- формирование необходимых документов.

Для мониторинга процесса изготовления деталей персонал цеха и работники планово-диспетчерского бюро используют автоматизированную систему управления производством, которая имеет многоуровневую структуру. Верхний уровень обеспечивает планирование и контроль работы комплекса в целом. Функциями нижнего уровня являются управление и диагностика технологического оборудования и транспортных систем.

Технологическое оборудование контролируется системами управления, которые формируют информацию по их состоянию.



Как видно из анализа функций, автоматизированная система управления обеспечивает контроль выполнения производственного процесса и состояния оборудования и не решает проблем, возникающих в ходе выполнения контроля или регистрации детали. Значит, следует дополнить функции автоматизированной системы управления производством, для чего необходимо проанализировать возможные пути устранения выявленных недостатков.

Первая проблема пропуск брака. Наиболее частой причиной появления брака является неисправность оборудования. Так как проверка качества производится контролером выборочно, в таких условиях обнаруживаются не все случаи брака, а определение их на последующих этапах влечет за собой увеличение финансовых потерь из-за роста себестоимости списываемой детали. Значит необходимо выявлять все случаи брака сразу же. Решить эту проблему можно двумя способами. Заменить выборочный контроль качества маркировки на постоянный, но в таком случае повысится нагрузка на контролера и пропуск дефекта также не исключается. Более перспективным видится решение переложить функцию проверки качества на автоматическое устройство. В этом случае каждая деталь будет проверена, а участие контролера сведется к реакции на сигнал устройства. Схема процесса контроля деталей при использовании автоматического метода контроля качества представлена на рисунке 15.

Вторая проблема связана с проверкой правильности регистрации деталей (иногда такая проверка может понадобиться и в последующих цехах). Это проблема возникает из-за ошибок регистрации, связанных, в первую очередь, с повышенной нагрузкой на исполнителя, а также невнимательностью. Видимо, если регистрация будет проводиться в автоматическом режиме, это позволит устранить человеческие ошибки и исключить ненужные операции проверки регистрации деталей. Схема процесса регистрации деталей при использовании автоматического метода контроля качества представлена на рисунке 16.

Третья проблема связана с задержками поступления деталей на регистрацию. Они могут возникнуть по причине прохождения деталей через ремонтную зону для устранения возникшего дефекта, в худшем случае деталь может пропасть. Чтобы не допустить такой ситуации необходимо вовремя выявить истинное местонахождение детали, то есть, контролировать время поступления детали на регистрацию. Эта новая функция отражена на диаграмме контроля процесса изготовления деталей на рисунке 17.

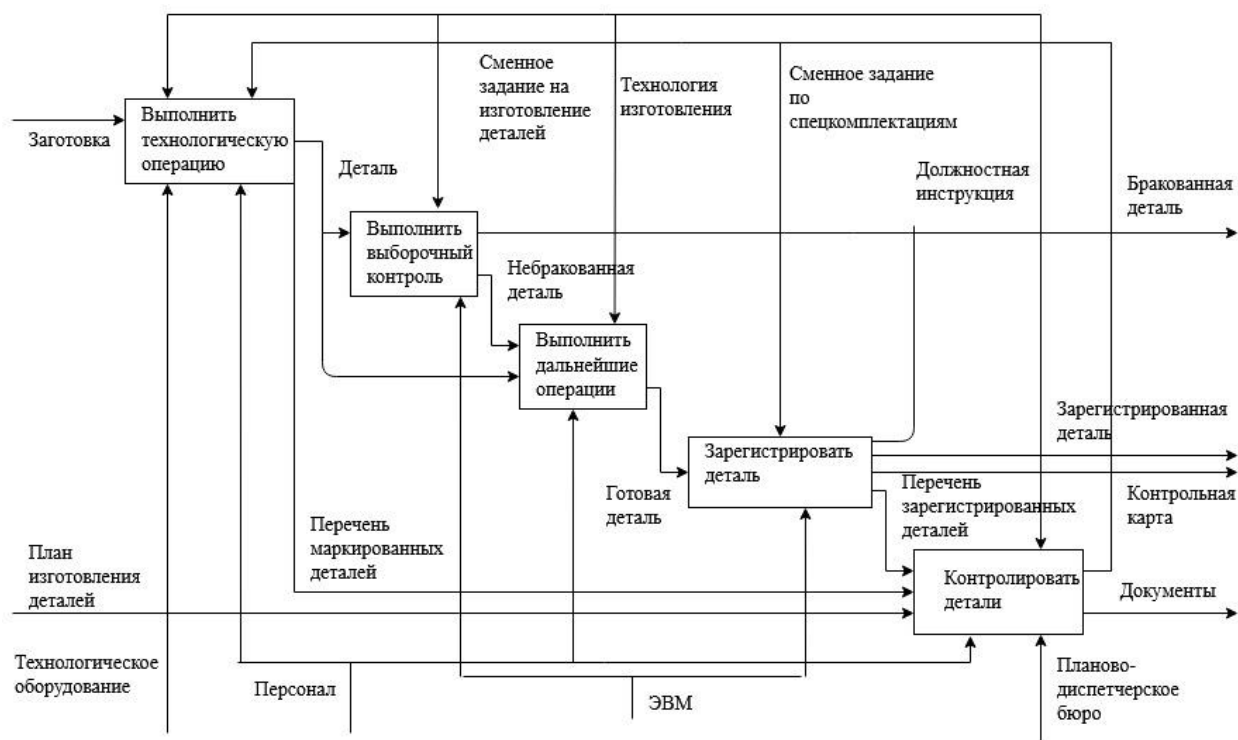


Рисунок 15 – Процесс контроля деталей при использовании автоматического метода контроля качества

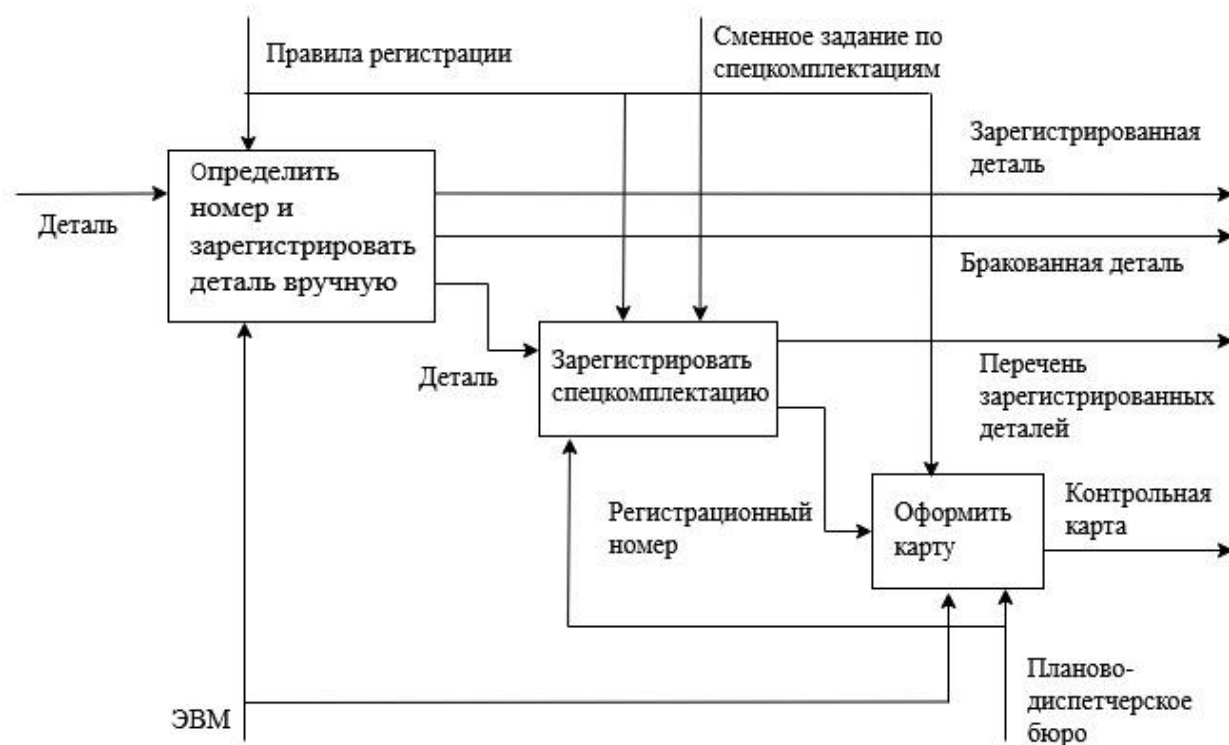


Рисунок 16 – Процесс регистрации деталей при использовании автоматического метода контроля качества



Рисунок 17 – Контроль процесса изготовления деталей

Для выполнения этой функции, нужно задать обоснованный промежуток времени, в течение которого деталь должна поступить на регистрацию. Чтобы его определить, достаточно провести статистический анализ и определить закон распределения периода времени между контролем и регистрацией и его параметры.

«Чтобы получить представление о распределении наблюдений, область экспериментальных значений случайной величины разбивают на r обычно одинаковых интервалов длины x и подсчитывают число наблюдений, попавших в каждый интервал» [6]. «По этим значениям подсчитывают соответствующие относительные частоты:

$$p_k^* = \frac{n_k}{n}, \sum_{k=1}^r p_k^* = 1, \quad (1)$$

где k – номер интервала;

n_k – число экспериментальных точек в k -ом интервале;

n – общее количество точек;

r – количество интервалов» [6].

«Затем вычисляют относительную плотность точек в каждом интервале:

$$f_k^* = \frac{p_k^*}{\Delta x} = \frac{n_k}{n\Delta x}, \quad k = 1, 2 \dots r, \quad (2)$$

где x – длина интервала» [6].

«Подсчитанные таким образом значения можно представить графически в виде ступенчатой кривой. По оси абсцисс откладываются соответствующие интервалы и на каждом из них, как на основании, строится прямоугольник, высота которого равна относительной плотности f_k^* . Полученная ступенчатая кривая называется гистограммой. Гистограмма дает наглядное представление о распределении наблюдаемых значений на числовой оси» [6]. Далее, нужно выбрать значение временного интервала, превышение которого характерно для проблемных деталей.

Таким образом, для устранения выявленных недостатков необходимо модернизировать существующий процесс и применить автоматизированный метод контроля качества, регистрации деталей и контроль времени их поступления на регистрацию.

3.2 Определение требований к системе

Как следует из анализа проблемных ситуаций, для оптимизации процессов контроля и регистрации деталей необходимо разработать соответствующую автоматизированную систему. «В первую очередь нужно сформулировать требования к разрабатываемой системе, для чего необходимо определить цели и аспекты ее использования с точки зрения пользователей. Для этого удобно воспользоваться языком моделирования UML (Unified Modelling Language)» [21].

«Для того чтобы определить поведение системы в UML применяется диаграмма вариантов использования (Use Case). Она рассматривается как главное средство для первичного моделирования динамики системы,

используется для выяснения требований к разрабатываемой системе, фиксации этих требований в форме, которая позволит проводить дальнейшую разработку» [28].

«В состав диаграмм Use Case входят варианты использования, пользователи, а также отношения зависимости, обобщения и ассоциации. Пользователи представляют внешний мир, нуждающийся в работе системы. Варианты использования представляют действия, выполняемые системой в интересах пользователей» [28].

«На рисунке 18 представлена диаграмма использования автоматизированной системы контроля и регистрации деталей. Эта система будет предназначена для использования:

- оператором участка технического контроля для определения качества выполнения операции маркировки;
- оператором планово-диспетчерского бюро для выполнения регистрации деталей и контроля времени их поступления» [21].



Рисунок 18 – Диаграмма использования автоматизированной системы контроля и регистрации деталей

При использовании системы контроль должен проходить в автоматическом режиме. Поэтому эти обязанности можно будет снять с контролера и возложить на оператора участка технического контроля. Этот пользователь системы сможет задать требуемые параметры качества. Система должна обработать полученные с устройства автоматизированного контроля параметры и определить необходимые показатели качества детали. При обнаружении брака система известит об этом контролера и зафиксирует этот случай для дальнейшего учета.

Кроме того, оператор сможет получать отчет о детали. Система должна предоставить по требованию пользователя отчет о процессе контроля деталей или о случаях брака за требуемый период времени.

«Регистрация готовых деталей также должна проходить в автоматическом режиме. Для выполнения этой операции система обрабатывает номер и вводит его в базу данных. При трудности распознавания номера система должна известить об этом оператора планово-диспетчерского бюро, чтобы он вручную зарегистрировал деталь» [13].

«Также одной из функций системы должен быть контроль времени поступления деталей на регистрацию. Получая данные маркировки и регистрации, система сможет определить момент времени, когда запаздывание детали уже недопустимо» [13].

«Работник планово-диспетчерского бюро будет иметь возможность получать отчеты о регистрации деталей и об опаздывающих деталях» [13].

«В итоге, можно сформулировать требования к разрабатываемой системе. Автоматизированная система контроля качества и регистрации деталей должна выполнять две основные функции» [16]: контроль качества изготовления деталей и их регистрацию.

Эти функции должны выполняться в автоматическом режиме. Система также должна вычислять предельное время поступления детали на регистрацию.

В системе должны быть предусмотрены:

- возможность задания показателей качества деталей пользователем;
- возможность переключения режима регистрации с автоматического на ручной;
- вывод на экран изображения номера детали для того, чтобы пользователь имел возможность контролировать выполнение системой своих функций;
- функция генерирования сообщений о случаях брака или ошибок регистрации, а также отклонения деталей от графика изготовления.

В результате рассмотрения процесса контроля деталей, были выявлены этапы, выполнение которых необходимо автоматизировать: этап контроля и этап регистрации деталей.

Для автоматизации операции контроля деталей необходимо разработать подсистему, которая будет выполнять:

- автоматическую проверку качества изготовления деталей;
- информирование контролера об обнаружении брака;
- формирование отчета о качестве изготовления и отчета о бракованных деталях.

Для автоматизации операции регистрации деталей необходимо разработать подсистему, которая будет выполнять:

- автоматическую регистрацию деталей в базе данных;
- информирование оператора планово-диспетчерского бюро об истечении срока регистрации детали;
- формирование отчета об опоздавших деталях.

Для осуществления поставленных задач необходимо:

- разработать функциональную схему автоматизированной системы контроля качества и регистрации деталей;
- разработать подсистему регистрации;
- разработать подсистему контроля времени поступления на регистрацию;

- разработать подсистему формирования отчетов.

Данная автоматизированная система должна функционировать на рабочих местах контролера и оператора планово-диспетчерского бюро, в качестве которых используются персональный компьютер с набором программно-технических средств.

Разрабатываемая автоматизированная система должна использовать возможности существующей базы данных автоматизированной системы управления производством, с технологией доступа клиент-сервер. В качестве сетевого протокола используется протокол TCP/IP, минимальная скорость передачи данных 10 Мбит/с.

3.3 Разработка функциональной схемы системы

Для разработки автоматизированной системы контроля и регистрации деталей необходимо:

- разработать подсистему контроля качества;
- разработать подсистему регистрации;
- разработать подсистему контроля времени поступления на регистрацию.

Для реализации этих задач, нужно выполнить следующие шаги:

- разработать функциональную структуру системы;
- разработать алгоритмы обработки изображения и распознавания номера детали;
- разработать алгоритм контроля времени поступления деталей на регистрацию.

Для разработки системы необходимо, прежде всего, определиться с ее структурой, то есть выделить компоненты этой системы и связи между ними. Результат уточнения структуры может быть представлен в виде функциональной схемы системы и описания ее компонентов.

«Функциональная схема – это схема взаимодействия компонентов

программного обеспечения с описанием информационных потоков, состава данных в потоках и указанием используемых файлов и устройств» [20].

Функциональная схема представлена на рисунке 19.

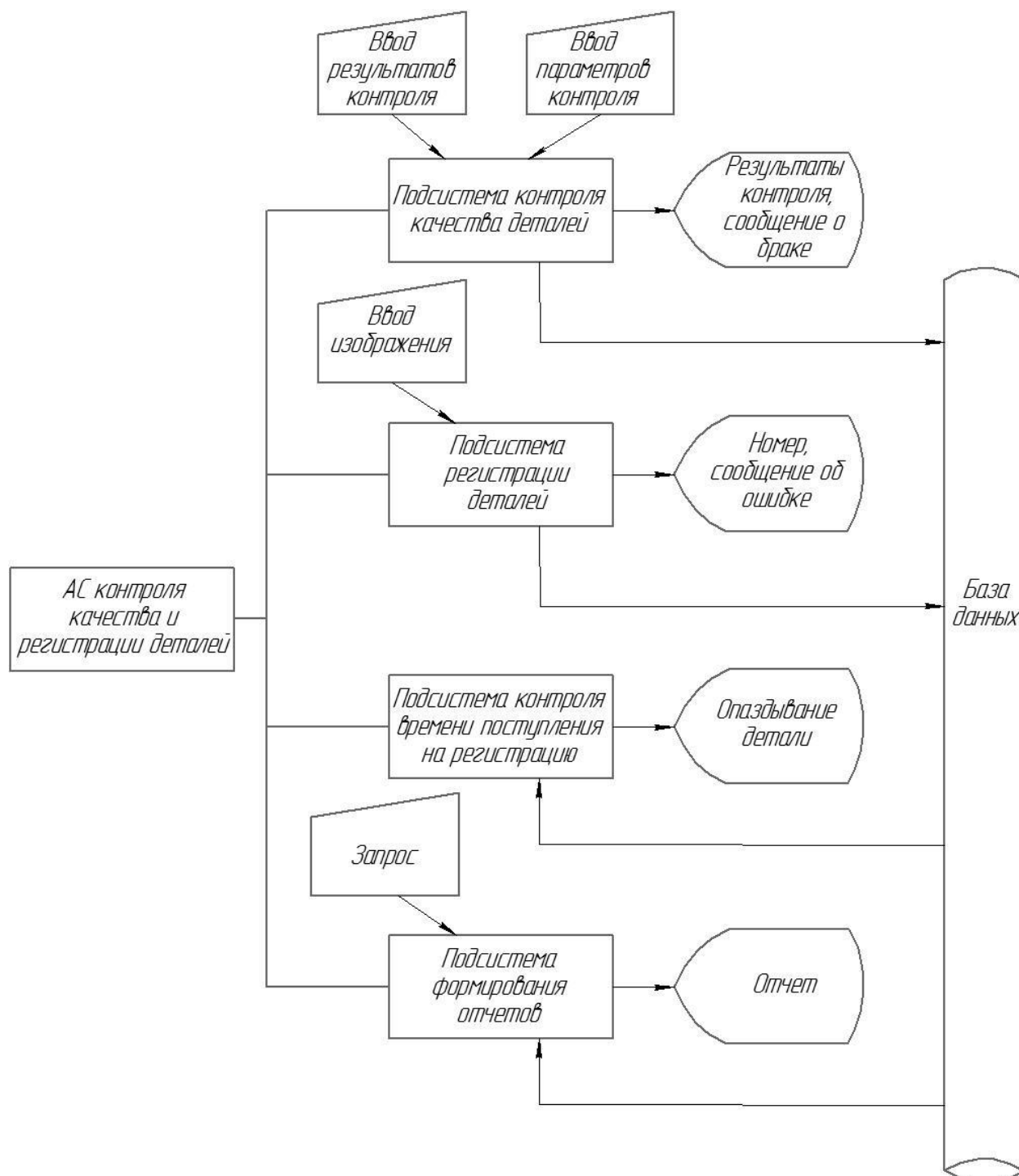


Рисунок 19 – Функциональная схема системы контроля качества и регистрации деталей

«Подсистема контроля качества деталей, получив параметры контроля и результаты контроля, должна обработать его и выдать результат выполнения маркировки на экран, при этом сохранив его в базе данных» [20].

Подсистема регистрации должна выполнять автоматическое внесение номера детали в базу данных.

Подсистема контроля времени поступления деталей на регистрацию должна определять срок поступления детали на регистрацию, используя данные из базы, и сообщать о факте запаздывания.

Подсистема формирования отчетов должна по запросу пользователя создавать отчеты.

3.4 Разработка подсистемы регистрации деталей

Технической основой системы регистрации деталей являются системы машинного зрения. «В связи с этим основной функцией подсистемы контроля регистрации деталей является обработка изображения и определение по нему необходимых характеристик нанесенной на деталь маркировки» [22]. «В рамках проектирования данной подсистемы необходимо решить задачу распознавания данной маркировки. Общий алгоритм, который необходимо реализовать в подсистеме регистрации, изображен в виде блок-схемы на рисунке 20» [22].

«Получив изображение от видеоустройства, подсистема должна обработать его для извлечения из него полезной информации» [22].

«Значит, необходимо определить, выполнена ли маркировка, как предполагает технология или нет. Для этого сначала проводится выделение области маркировки и отдельных символов. Если символы есть, то маркировка нанесена. В противном случае система должна сообщить о браке наблюдателю» [22].

«После первичной обработки полученной картинке необходимо выделить область маркировки и отдельные символы, а затем их распознать и

зарегистрировать деталь. В случае трудности распознавания система сообщит об этом наблюдателю» [22].

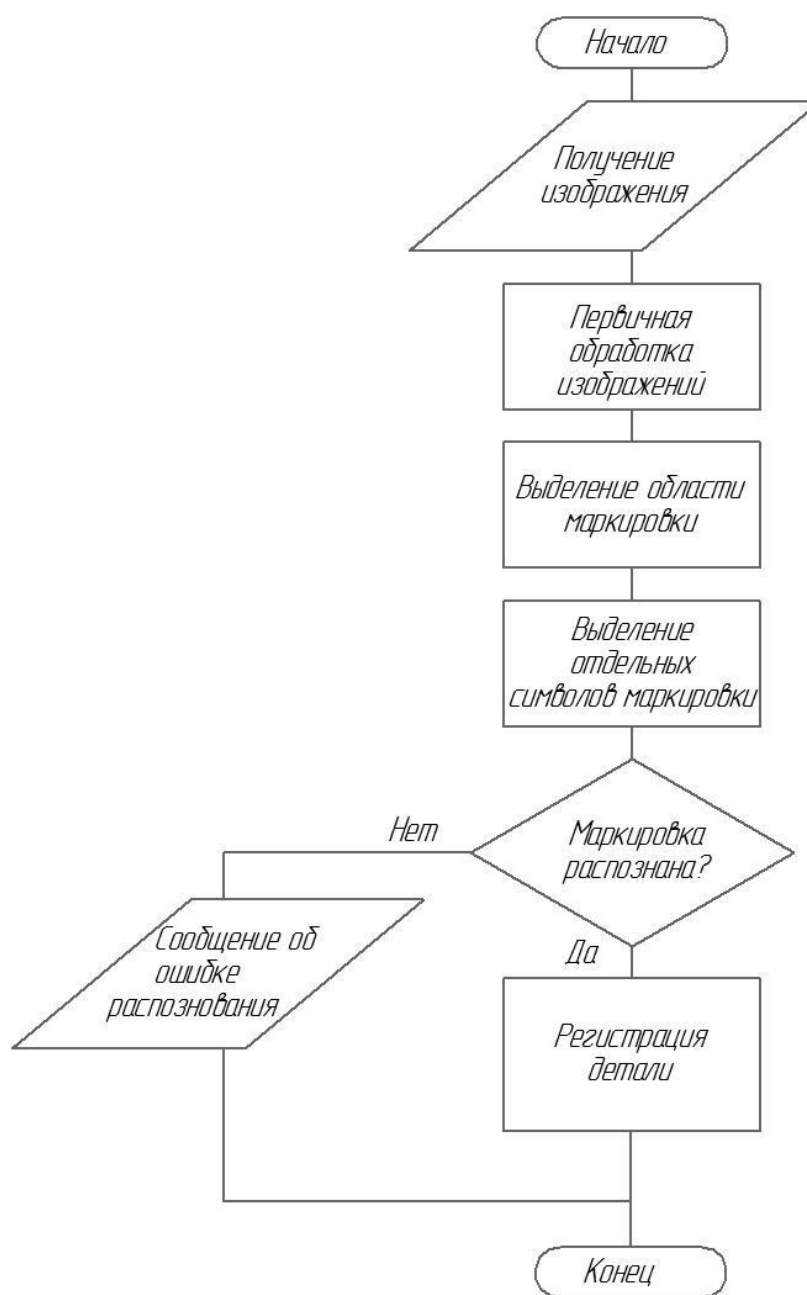


Рисунок 20 – Алгоритм работы подсистемы регистрации деталей

«Таким образом, для функционирования данной подсистемы необходимо создать процедуры:

- предобработка изображения;
- выделения области маркировки;

- выделения символов;
- распознавания маркировки» [22].

Операция предобработки применяется практически всегда после снятия информации с видеодатчика и преследует цель снижения помех на изображении, возникших в результате дискретизации и квантования, а также подавления внешних шумов. Для решения данной проблемы применяются различные методы восстановления изображений [8], [10], [14], [20].

На рисунке 21 представлена схема получения изображения.

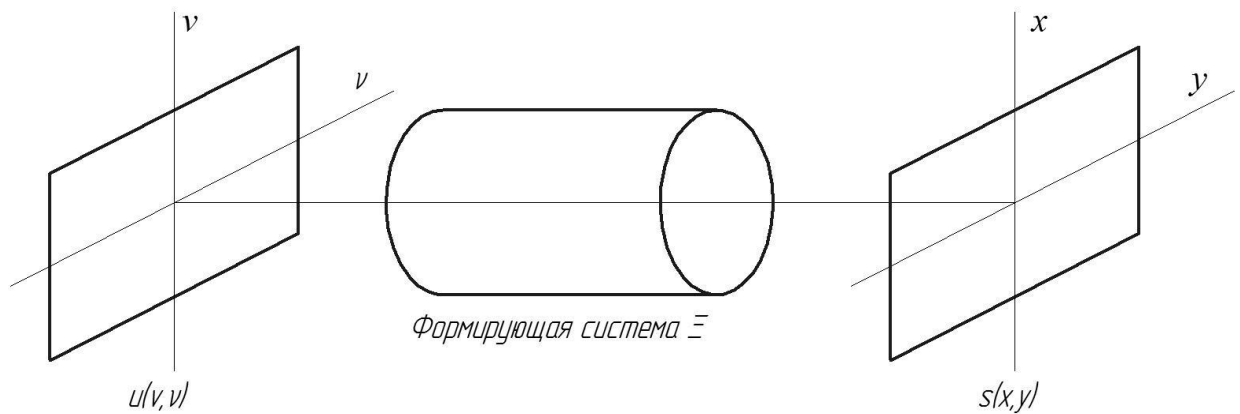


Рисунок 21 – Схема получения изображения

Изображение контролируемого объекта $s(x, y)$ получается при помощи преобразования:

$$s(x, y) = \Xi u(v, v), \quad (3)$$

где Ξ – оператор искажения;

$u(v, v)$ – функция распределения яркости объекта.

Оператор искажения Ξ выбирается исходя из вида формирующей системы. Функция $u(v, v)$ является исходным изображением. Восстановление изображения заключается в том, чтобы по наблюдаемому изображению контролируемого объекта $s(x, y)$ определить изображения

$\hat{u}(v, v)$, которое оценивает исходное изображение $u(v, v)$, то есть необходимо устранить искажения от оператора формирующей системы Ξ .

Графическая модель формирования изображения представлена на рисунке 22.

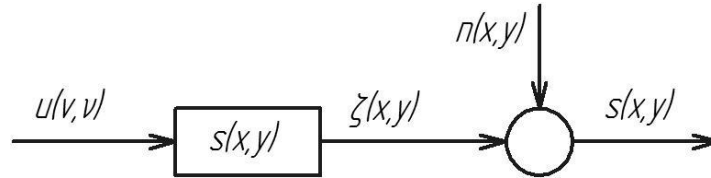


Рисунок 22 – Графическая модель формирования изображения

«Математическая модель получения нерезкого изображения:

$$s(x, y) = \zeta(x, y) + n(x, y), \quad (4)$$

где $\zeta(x, y)$ – линейно искаженное изображение без учета шума;

$n(x, y)$ – шум, вносимый физическим устройством записи изображения» [41].

«Линейно искаженное изображение без учета шума:

$$\begin{aligned} \zeta(x, y) &= h(x, y) \otimes \otimes u(x, y) = \iint_{(v, v) \in \Theta(u)} h(x - v, y - v) u(v, v) dv dv = \\ &= \iint_{(v, v) \in \Theta(u)} h(x, y) u(x - v, y - v) dv dv, (x, y) \in \Theta^{(s)}, \end{aligned} \quad (5)$$

где $\otimes \otimes$ – обозначает двумерную свертку;

$h(x, y)$ – импульсная характеристика искажающей системы» [41].

Исходное изображение в точке с координатами (v, v) с функцией яркости $u(v, v)$ будет искажено в соответствии со значениями функции $h(x, y)$ искажения в точке и аддитивного шума $n(x, y)$.

Яркость реального изображения принимается равной нулю на всех участках, кроме области кадра $\Theta^{(.)}$. Кадр изображения $s(x, y)$ обозначается $\Theta^{(s)}$.

Исходя из того, что реальные кадры имеют прямоугольную форму, условие принадлежности кадру определяется выражением:

$$s(x, y) = 0, \text{ при } |x| \geq \frac{L_x^{(s)}}{2}, |y| \geq \frac{L_y^{(s)}}{2} \text{ или } (x, y) \notin \Theta^{(s)}, \quad (6)$$

где $L_x^{(s)}$ – длинами вертикальной стороны кадра;

$L_y^{(s)}$ – длинами вертикальной стороны кадра;

$\Theta^{(s)}$ – размер кадра.

«Исходя из того, что системы формирования изображений формируют изображения, имеющие определенные границы, размеры кадров $\Theta^{(s)}$, $\Theta^{(\zeta)}$, $\Theta^{(n)}$ равны между собой (рисунок 23)» [41].

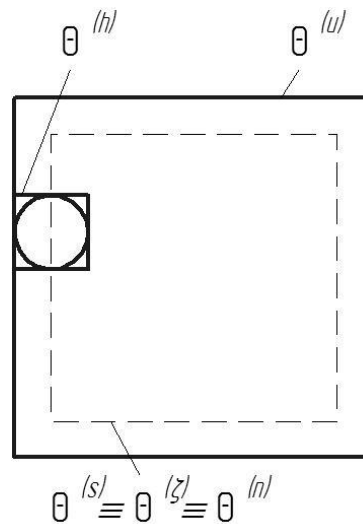


Рисунок 23 – Относительные размеры изображения и функции рассеяния точки

«Рассеяние точки кадра $\Theta^{(h)}$ содержит все точки с координатами (x, y) и является минимальным прямоугольником. При этом величина абсолютного

значения функции размытия в точках не равна нулю, например, когда:

$$|h(x, y)| \geq 10^{-10} \max |h(x, y)|. \quad (7) \gg [41]$$

«Границы кадра $\Theta^{(h)}$ показывают действие функции размытия точки. Очевидно, что все точки исходного изображения $u(v, v)$ «размазываются» в некоторую определенную область. Если перемещать кадр $\Theta^{(h)}$ по кадру наблюдаемого изображения $\Theta^{(s)}$, то получится кадр исходного изображения $\Theta^{(u)}$, который будет являться областью всех точек, охватываемых кадром $\Theta^{(h)}$ при данном перемещении» [41]. Тогда, размеры кадра исходного изображения больше размеров кадра наблюдаемого изображения. Их равенство возможно только когда линейные искажения отсутствуют.

В этом случае достаточно восстановить изображение в пределах кадра $\Theta^{(s)}$. Это обусловлено тем, что часть кадра $\Theta^{(u)}$, находящаяся за пределами кадра $\Theta^{(s)}$, воздействует на наблюдаемое изображение $s(x, y)$.

«Заменяя в формуле (5) для изображений, представленных в цифровой форме, двумерными массивами отсчетов, взятых на прямоугольных решетках с одинаковыми расстояниями $\Delta = \Delta x = \Delta y$ между узлами двумерные функции $u(v, v)$, $\zeta(x, y)$, $h(x, y)$, $s(x, y)$, $n(x, y)$ с непрерывными аргументами, получим следующий вид модели наблюдаемого изображения:

$$s(i_1, i_2) = \zeta(i_1, i_2) + n(i_1, i_2), \quad i_1 = -\frac{L_1^{(s)}}{2}, \frac{L_1^{(s)}}{2}, \quad i_2 = -\frac{L_2^{(s)}}{2}, \frac{L_2^{(s)}}{2}, \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \zeta(i_1, i_2) &= h(i_1, i_2) \otimes \otimes u(i_1, i_2) = \sum_{(j_1, j_2) \in \Theta^{(h)}} h(j_1, j_2) \times \\ &\times u(h(i_1 - j_1, i_2 - j_2), \end{aligned} \quad (9)$$

где: i_1 – номер строки;

i_2 – номер столбца» [39].

«Так как кадр является дискретным, то для определения его размеров $L_{i1}^{(\cdot)}$ и $L_{i2}^{(\cdot)}$ необходимо для аналогового изображения определить отношение длин вертикальной и горизонтальной сторон кадра к значению интервала дискретизации Δ » [39].

В дискретном случае операцию свертки можно заменить на операцию умножения в частотной области [39]. Перед проведением данного преобразования необходимо дополнить нулями массив $h(i_1, i_2)$, так как размеры кадра $\Theta^{(h)}$ меньше кадра $\Theta^{(u)}$. «Определяем спектр линейно искаженного изображения $\tilde{\zeta}(i_1, i_2)$:

$$\tilde{Z}(k_1, k_2) = \tilde{U}(k_1, k_2) \tilde{H}(k_1, k_2), \quad (10)$$

где $\tilde{U}(k_1, k_2)$ – спектр исходного изображения $\tilde{u}(i_1, i_2)$;

$\tilde{H}(k_1, k_2)$ – передаточная функция искажающей системы;

k_1 и k_2 – пространственные частоты.

Выполнив обратное двумерное дискретное преобразования Фурье от $\tilde{Z}(k_1, k_2)$ получим изображение $\tilde{\zeta}(i_1, i_2)$, размеры которого равны размерам кадра $\Theta^{(u)}$. Далее изображение $\tilde{\zeta}(i_1, i_2)$ «обрезается» до размеров кадра изображения и добавляется аддитивная помеха $n(i_1, i_2)$.

Математические основы реализации остальных процедур алгоритма работы подсистемы регистрации деталей более подробно рассмотрены в литературе [5], [14], [35], [36], [37], [40].

3.5 Разработка подсистемы контроля времени поступления деталей на регистрацию

Подсистема контроля времени поступления деталей на регистрацию должна выполнять следующие функции:

- для каждой детали, прошедшей контроль, определить крайний срок

- поступления на регистрацию;
- проверять, не вышло ли это время;
 - в случае если деталь вовремя не появится на регистрации, сообщить оператору об опоздании этой детали;
 - формировать отчет по всем опоздавшим деталям за выбранный период времени.

Алгоритм работы этой подсистемы представлен на рисунке 24.

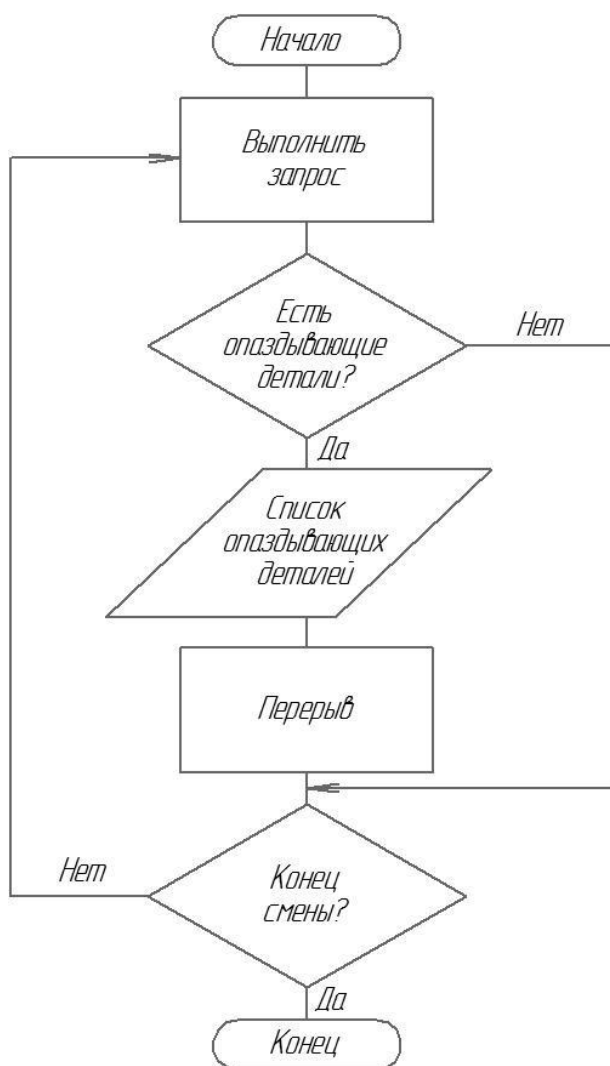


Рисунок 24 – Алгоритм работы подсистемы контроля времени поступления деталей на регистрацию

Для контроля времени поступления детали на регистрацию необходимо иметь сведения о времени регистрации.

3.6 Разработка структурной схемы системы

«В результате проведенной работы были разработаны функциональная схема системы, алгоритмы подсистемы регистрации, которая должна выполнять автоматическое внесение номера детали в базу данных и подсистема контроля времени поступления деталей на регистрацию» [23]. «Необходимо объединить разработанные технологии в единую» [23].

«Структурная схема автоматизированной системы представлена на рисунке 25» [32].

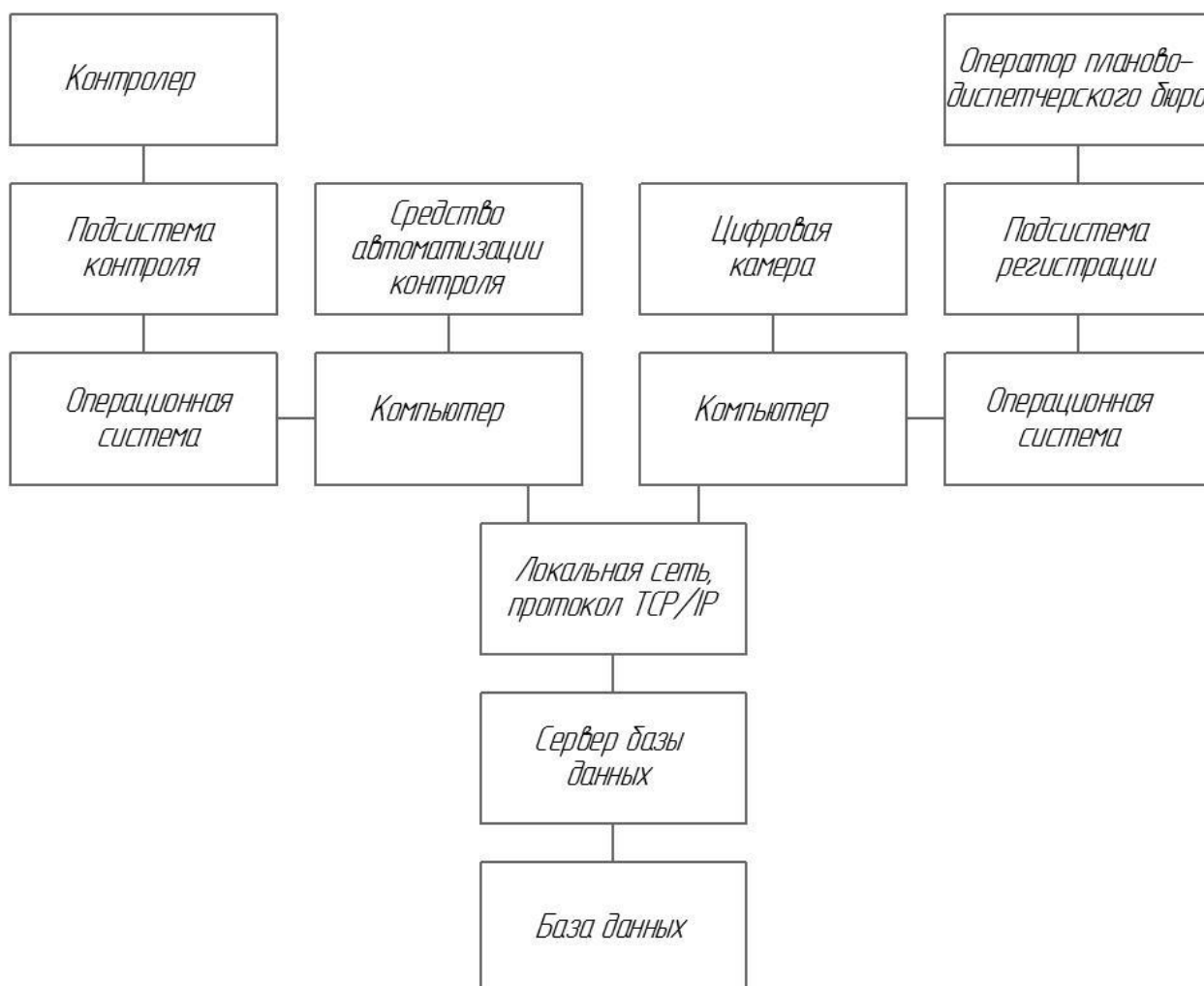


Рисунок 25 – Структурная схема автоматизированной системы контроля и регистрации деталей

предназначена для использования в цехе механической обработки и будет включать два рабочих места, которые выполнены в виде запускаемых файлов. К каждому рабочему компьютеру должны быть подключены соответствующие технические устройства.

Сбор данных для контролера производится при помощи средств автоматизации контроля, которые включают в себя различные сенсоры и датчики (оптические камеры для захвата изображений, 3D-лазерные сканеры, датчики вибрации, температуры, усилия). Выбор данных технических средств зависит от конкретных производственных условий и рассматривался ранее в разделе 2 данной работы.

Блок обработки данных в подсистемах контроля и регистрации основан на использовании технологий крайних вычислений и локальной обработки данных. Это связано с необходимостью работы с алгоритмами в реальном времени, позволяющими реализовать все преимущества технологии компьютерного зрения для обнаружения дефектов и машинного обучения для классификации и прогнозирования. Данный вопрос также рассматривался ранее при рассмотрении раздела 2 данной работы.

Система предполагает применение в структуре баз данных TimescaleDB для хранения временных рядов (размерные параметры), PostgreSQL для CAD-моделей и метаданных, а также облачного хранилища (AWS S3) для резервирования. Связь с сервером осуществляется по локальной сети. В качестве сетевого протокола используется протокол TCP/IP, минимальная скорость передачи данных 100 Мбит/с.

Пользовательский интерфейс должен обеспечивать;

- визуализацию с графиками, тепловыми картами, 3D-моделями и другими необходимыми параметрами;
- настройку параметров контроля;
- генерация отчетов (PDF, Excel);
- уведомления о критических отклонениях.

Разработанная структурная схема обеспечивает взаимодействие

спроектированной системы с системами CAD, CAM и ERP, что является обязательным условием для обеспечения концепции компьютерно-интегрированного производства. Данное взаимодействие выглядит следующим образом. Модель, полученная из CAD-системы, используется системой контроля в качестве эталона для контроля соответствия действительных и конструкторских параметров детали. Модели обработки, выполненные в CAM-модуле, анализируются системой контроля на соответствие точности изготовления. Выявленные отклонения возвращаются в CAD для корректировки чертежей, создавая обратную связь. Например, если обнаружено превышение допусков, конструкторы уточняют модель, что повышает точность последующих партий.

Результаты контроля передаются в ERP-системы для управления ресурсами и планирования. Данные о проценте брака, износе инструментов и времени простоя анализируются в режиме реального времени. Это позволяет автоматически корректировать производственные графики, оптимизировать закупки материалов и формировать отчеты для руководства. Например, при обнаружении повышенного износа фрезы ERP инициирует заказ новых инструментов, предотвращая простои.

На этапе проектирования создается CAD-модель с заданными допусками. В производстве CAM генерирует управляющий код для станка, а система контроля проверяет каждую деталь. При выявлении отклонений данные автоматически возвращаются в CAD для уточнения модели, а ERP пересчитывает планы выпуска. Это обеспечивает непрерывное улучшение качества и эффективности.

Интеграция сокращает время переналадки до 40% за счет автоматической корректировки процессов. Снижение брака достигается оперативной обратной связью с CAD, а оптимизация запасов благодаря прогнозам износа инструментов. Автоматизация отчетности упрощает анализ эффективности производства.

Связь системы контроля с CAD, CAM и ERP превращает разрозненные

этапы в единый интеллектуальный процесс. Это обеспечивает прозрачность от проектирования до выпуска, гибкость при изменениях и управляемость на основе данных. Для успешной реализации необходимы стандартизация форматов, надежные протоколы передачи данных и обучение персонала. Такая интеграция делает контроль качества, неотъемлемой частью жизненного цикла продукта, повышая конкурентоспособность производства.

Результатом выполнения данного раздела стала разработка модели системы автоматизированного контроля. Интеграция аппаратных и программных компонентов, таких как сенсоры, датчики и разработанные алгоритмы, позволяет создать интеллектуальную платформу, способную обеспечить высокую точность, скорость и гибкость контроля качества. Связь с CAD, CAM-системами обеспечивает использование проектных данных как эталона, а взаимодействие с ERP открывает возможности для оперативного управления ресурсами и корректировки производственных процессов на основе аналитики.

Преимущества такой системы проявляются в сокращении времени на переналадку, снижении доли брака за счет предиктивного анализа и автоматизации рутинных операций. Однако её внедрение требует решения задач по стандартизации данных, обеспечению кибербезопасности и обучению персонала.

В перспективе развитие технологий искусственного интеллекта и краевых вычислений позволит перейти к полностью автономным системам, способным самообучаться и адаптироваться к динамическим изменениям в производстве. Это не только повысит эффективность контроля, но и заложит основу для устойчивого, безотходного производства, где качество становится неотъемлемой частью цифрового жизненного цикла изделий.

Заключение

Проведённое исследование в рамках магистерской диссертации подтвердило, что автоматизация контроля изделий машиностроения в рамках концепции компьютерно-интегрированного производства является неотъемлемым элементом цифровой трансформации промышленности.

Проведен детальный анализ традиционных и современных методов контроля качества изделий в машиностроении. Выявлены их преимущества и недостатки, а также определены области применения. Сравнительный анализ решений от ведущих производителей (ZEISS, Hexagon, Keyence) показал, что выбор системы зависит от специфики задач.

Предложена модель автоматизации контроля, основанная на интеграции современных технологий, таких как IoT, большие данные и искусственный интеллект. Модель позволяет оптимизировать процессы контроля и повысить их эффективность.

Выявлены ключевые требования машиностроительных предприятий к современным системам контроля: точность, скорость и гибкость. Для их удовлетворения предложено использовать модульные решения с открытыми API. Предложена интеграция аппаратных и программных компонентов, таких как сенсоры, датчики и разработанные алгоритмы, что позволяет создать интеллектуальную платформу, способную обеспечить высокую точность, скорость и гибкость контроля качества.

Использование подобных систем позволит достичь следующих результатов:

- снижения затрат на брак до 25%;
- оптимизация использования ресурсов, за счет сокращения энергопотребления;
- уменьшения простоев за счет прогнозирования износа оборудования.

Перспективы развития подобных систем заключаются в использовании алгоритмов, способных адаптироваться к новым типам дефектов без

перепрограммирования, а также генеративных моделей, которые используют для создания синтетических данных обучения, что решает проблему нехватки данных.

Однако, внедрение и развитие систем подобного класса связано с рядом ограничений. К техническим ограничениям можно отнести большую вычислительную мощность данных систем. Обработка данных в реальном времени для крупных заводов требует квантовых или нейроморфных вычислений. Другая техническая проблема связана с созданием датчиков для экстремальных условий. Например, устойчивых к температурам для литейных цехов. Еще одной важной проблемой является создание единых отраслевых стандартов.

В заключении отметим, автоматизация контроля в рамках концепции компьютерно-интегрированного производства это не просто технологическая инновация, а фундамент для перехода к Индустрии 4.0. Она позволяет превратить разрозненные данные в ценную информацию для принятия решений, создать производственные цепочки, где качество встроено в каждый этап, а также добиться скорости, точности и адаптивности.

Список используемых источников

1. Голубцов А.Н., Соколов Д.Ю. Цифровые двойники в машиностроении. – СПб.: Политехника, 2021. – 214 с.
2. ГОСТ Р 56020-2014. Автоматизированные системы управления производством. Требования к интеграции. – Введ. 2015-01-01. – М.: Стандартинформ, 2014. – 24 с.
3. ГОСТ Р 57770-2017. Цифровые двойники изделий. Общие требования. – Введ. 2018-07-01. – М.: Стандартинформ, 2017. – 18 с.
4. Джарви Т. Интеграция машинного зрения и управления станком в одном ПК // Control Engineering Россия. – 2022. – № 2 (98). – С. 50–51.
5. Дьяков И.Ф., Дьяков В.И., Горшков Г.М. Возможности использования нейронной сети при обработке деталей в машиностроении // Вестник Ульяновского государственного технического университета. – 2024. – № 2 (106). – С. 25–31.
6. Иванов А.А., Петров В.В. Компьютерно-интегрированные производства: теория и практика. – М.: Машиностроение, 2020. – 345 с.
7. Иванова Е.М. Стандартизация данных в CAD/CAM-системах для автоматизации контроля // Наука и техника. – 2020. – № 12. – С. 34–39.
8. Кирьянов К.А. Устойчивые методы восстановления изображений во встроенных системах для повышения точности измерений механических величин на объектах: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.11.01. – СПб., 2013. – 23 с.
9. Копылов Ю.Р. Компьютерные технологии в машиностроении. Практикум: учеб. пособие. – СПб.: Лань, 2022. – 500 с. – URL: <https://e.lanbook.com/book/207005> (дата обращения: 13.05.2025).
10. Кузнецов П.В., Федоров А.А. Применение искусственного интеллекта в системах технического зрения // Автоматизация и современные технологии. – 2022. – № 4. – С. 12–18.
11. Лагута В.С., Федотова А.В. Виртуальная фабрика, виртуальное

предприятие и цифровые двойники в проектировании компьютерно-интегрированного производства // Русский инженер: сб. тез. II Всерос. конгр. с междунар. участием. – М., 2024. – С. 125–127.

12. Лосев В.В., Калинин А.О. К вопросу развития гибких производственных систем // Информатика. Экономика. Управление. – 2023. – № 4. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/k-voprosu-razvitiya-gibkih-proizvodstvennyh-sistem> (дата обращения: 13.05.2025).

13. Мальцев Н.А., Фролов Н.С. Применение платформы на базе искусственного интеллекта для анализа потока медиаданных в режиме реального времени // Труды Крыловского государственного научного центра. – 2023. – № S1. – С. 26–32.

14. Методы компьютерной обработки изображений: учеб. пособие для вузов / М.В. Гашников [и др.]; под ред. В.А. Сойфера. – 2-е изд., испр. – М.: Физматлит, 2003. – 780 с.

15. Новикова Т.Б. Методологии IDEF0: Типы связей, туннелирование стрелок // Международный журнал экспериментального образования. – 2016. – № 12-3. – С. 377–383.

16. Овсянников М.В., Подкопаев С.А. Облачная система управления производством в рамках жизненного цикла продукции на основе "Интернета вещей" // Вопросы инновационной экономики. – 2020. – № 3. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/oblachnaya-sistema-upravleniya-proizvodstvom-v-ramkah-zhiznennogo-tsikla-produktsii-na-osnove-interneta-veschey> (дата обращения: 18.05.2025).

17. Петренко А.С. Методы автоматизации контроля в условиях цифрового производства: дис. ... канд. техн. наук. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2021. – 187 с.

18. Роснано: Внедрение IoT на производстве [Электронный ресурс]. – URL: <https://rusnano.com> (дата обращения: 11.05.2025).

19. Смирнов С.К., Козлов А.В. Интеграция систем контроля качества в MES-платформы // Вестник машиностроения. – 2021. – № 5. – С. 45–52.

20. Соколова М.И. Роботизированные комплексы в системах контроля качества: дис. ... канд. техн. наук. – СПб.: СПбГПУ, 2020. – 154 с.

21. Тагиева Н.К., Старков А.В., Войнаш С.А., Загидуллин Р.Р., Соколова В.А., Ореховская А.А. Анализ применения искусственного интеллекта на протяжении всего жизненного цикла дорожно-строительной техники // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2024. – № 7. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-primeneniya-iskusstvennogo-intellekta-na-protyazhenii-vsego-zhiznennogo-tsikla-dorozhno-stroitelnoy-tehniki> (дата обращения: 23.04.2025).

22. Bosch Rexroth: Smart Quality Control in Automotive Manufacturing [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.boschrexroth.com> (дата обращения: 18.04.2025).

23. General Electric: Digital Twin for Turbine Blade Inspection [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.ge.com/news/reports> (дата обращения: 20.04.2025).

24. Groover M.P. Automation, Production Systems, and Computer-Integrated Manufacturing. – 5th ed. – London: Pearson, 2020. – 912 p.

25. Hexagon Manufacturing Intelligence. Product Overview [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.hexagonmi.com/products> (дата обращения: 25.04.2025).

26. IEEE Xplore Digital Library [Электронный ресурс]. – URL: <https://ieeexplore.ieee.org> (дата обращения: 22.04.2025).

27. ISO 10303:2020. Industrial automation systems and integration – Product data representation and exchange [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.iso.org> (дата обращения: 27.04.2025).

28. ISO 9001:2015. Quality management systems – Requirements [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.iso.org> (дата обращения: 18.04.2025).

29. KEYENCE. Sensors, Measurement Systems, Vision Systems [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.keyence.com/products> (дата

обращения: 18.04.2025).

30. Kumar R. Integration of AI and IoT for Predictive Quality Control: PhD Thesis. – Cambridge: MIT, 2022. – 320 p.

31. LeCun Y. A Path Towards Autonomous Machine Intelligence. Version 0.9.2, 2022-06-27 // OpenReview. – 2022. – 62 p. – URL: https://openreview.net/pdf?id=BZ5a1rkVsf&trk=public_post_comment-text (дата обращения: 18.05.2025).

32. Lee J., Bagheri B., Kao H.-A. A Cyber-Physical Systems Architecture for Industry 4.0-Based Manufacturing Systems // Manufacturing Letters. – 2015. – Vol. 3. – P. 18–23.

33. Lee J., Davari H., Singh J., Pandhare V. Industrial Artificial Intelligence for Industry 4.0-based Manufacturing Systems // Manufacturing Letters. – 2018. – Vol. 18. – P. 20–23.

34. Lee J., Lapira E., Bagheri B., Kao H.-A. Recent advances and trends in predictive manufacturing systems in big data environment // Manufacturing Letters. – 2013. – Vol. 1, No. 1. – P. 38–41.

35. PTC ThingWorx [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.ptc.com/en/products/thingworx> (дата обращения: 18.04.2025).

36. Scheer A.-W. CIM: Computer Integrated Manufacturing. – Berlin: Springer, 2019. – 478 p.

37. Siemens Digital Industries Software [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.plm.automation.siemens.com> (дата обращения: 21.04.2024).

38. Talavage J. Flexible Manufacturing Systems in Practice. Design: Analysis and Simulation. – Boca Raton: CRC Press, 2020. – 272 p.

39. Wang H., Zhao R., Cen Y., Zhang F., He Q., Liang L., Zeng M. Low-rank matrix recovery via smooth rank function and its application in image restoration // International Journal of Machine Learning and Cybernetics. – 2018. – Vol. 9, № 9. – P. 1565–1576.

40. Wang L., Zhang Q., Li X. Machine Vision-Based Defect Detection in Manufacturing: A Review // IEEE Transactions on Industrial Informatics. – 2022.

– Vol. 18, № 3. – P. 1234–1245.

41. Xue F., Liu J., Ai X. Recursive sure for image recovery via total variation minimization // Signal, Image and Video Processing. – 2019. – Vol. 13, № 4. – P. 795–803.

42. ZEISS Industrial Metrology [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.zeiss.com/metrology/products> (дата обращения: 18.04.2025).

43. Zhang Y., Liu H., Wang J. Digital Twin-Driven Predictive Maintenance in Industry 4.0 // Journal of Manufacturing Systems. – 2023. – Vol. 65. – P. 78–89.