

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ЧУВАШСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ И.Н. УЛЬЯНОВА»

На правах рукописи

ГОЛУБЦОВ НИКОЛАЙ СЕРГЕЕВИЧ

**РАЗРАБОТКА ИНСТРУМЕНТАРИЯ ОРГАНИЗАЦИИ
РОБОТИЗИРОВАННОГО СБОРОЧНОГО ПРОИЗВОДСТВА
МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРЕДПРИЯТИЯ**

2.5.22 Управление качеством продукции. Стандартизация.

Организация производства

Диссертация на соискание ученой степени кандидата
технических наук

Научный руководитель:
Семенов Владислав Львович,
кандидат экономических наук, доцент

Чебоксары – 2026

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
ГЛАВА 1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ К ОРГАНИЗАЦИИ РОБОТИЗИРОВАННОГО СБОРОЧНОГО ПРОИЗВОДСТВА	12
1.1 Тренды и проблемы автоматизации и роботизации производственных процессов в машиностроении.....	12
1.2 Классификация системных ограничений, влияющих на создание и функционирование роботизированного сборочного производства.....	22
1.3 Выбор и обоснование модели матричного производства как основы для создания интеллектуальных производственных ячеек	32
1.4 Выводы по главе 1.....	42
ГЛАВА 2. РАЗРАБОТКА ИНСТРУМЕНТАРИЯ ОЦЕНКИ ПОТЕНЦИАЛА РОБОТИЗАЦИИ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ	44
2.1 Методика оценочного аудита потенциала автоматизации и роботизации производственных процессов	44
2.2 Математическая модель оценки потенциала автоматизации и роботизации	58
2.3 Комплекс показателей технико-экономического обоснования применения автоматизации и роботизации технологических и вспомогательных операций.	63
2.4 Выводы по главе 2.....	69
ГЛАВА 3. ПОДХОДЫ К СОЗДАНИЮ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ РОБОТИЗИРОВАННЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ЯЧЕЕК	71
3.1 Структурно-функциональная модель интеллектуальной производственной ячейки	71
3.2 Оценка и анализ рисков появления потенциальных несоответствий и отказов функционирования интеллектуальных производственных ячеек	87
3.3 Последовательность адаптивной системной интеграции роботизированных комплексов в производственные процессы машиностроительного предприятия ..	100
3.4 Выводы по главе 3.....	114

ГЛАВА 4. ПРАКТИЧЕСКАЯ АПРОБАЦИЯ РАЗРАБОТАННОГО ИНСТРУМЕНТАРИЯ СОЗДАНИЯ РОБОТИЗИРОВАННОГО СБОРОЧНОГО ПРОИЗВОДСТВА	118
4.1 Методика организационного развития производственной системы для повышения эффективности автоматизации и роботизации производственных процессов	118
4.2 Разработка технического предложения по созданию и функционированию участка роботизированной сборки БПЛА	137
4.3 Аprobация производственно-технологических решений по созданию серийного роботизированного производства.....	149
4.4 Выводы по главе 4.....	173
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	175
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	177
ПРИЛОЖЕНИЯ	192
ПРИЛОЖЕНИЕ 1.....	192
ПРИЛОЖЕНИЕ 2.....	195
ПРИЛОЖЕНИЕ 3.....	211
ПРИЛОЖЕНИЕ 4.....	238
ПРИЛОЖЕНИЕ 5.....	239
ПРИЛОЖЕНИЕ 6.....	240
ПРИЛОЖЕНИЕ 7.....	241

ВВЕДЕНИЕ

В современных условиях глобальной технологической конкуренции и социально-экономических и технологических вызовов для промышленности глобальное (кратное) повышение эффективности и конкурентоспособности машиностроительных предприятий является ключевым фактором успеха. Совершенствование подходов к организации серийного роботизированного производства представляет собой не просто техническую задачу, а комплексную стратегическую программу организационных, технологических и технических направлений, обусловленную взаимосвязанными факторами, которые определяют будущее отрасли.

Основным вектором развития для обеспечения технологического суверенитета Российской Федерации является повышение глобальной конкурентоспособности и производительности. Роботизация выступает ключевым драйвером роста производительности труда за счёт исключения ошибок, обеспечения стабильного качества продукции и бесперебойной работы оборудования. В серийном производстве машин и компонентов это приводит к прямому увеличению объёмов выпуска и снижению удельной себестоимости единицы продукции, что является фундаментом для укрепления позиций как на внутреннем, так и внешнем рынках. Исследования показывают, что автоматизированные заводы могут производить на 60% больше продукции, а эффективное управление роботизированными комплексами позволяет радикально сократить время на переналадку и выпуск малых партий, минимизируя простои.

При этом машиностроительная отрасль сталкивается с острой нехваткой квалифицированной рабочей силы, особенно в опасных, вредных и монотонных областях (сварка, покраска, перемещение тяжёлых деталей). Старение персонала усугубляет эту проблему. Роботизация не только замещает вакансии, которые невозможно заполнить, но и решает задачу выполнения операций, определённых как «3D» (dull, dirty, dangerous – скучные, грязные, опасные). Это приводит к

улучшению условий труда, перераспределению человеческих ресурсов на более интеллектуальные задачи по управлению, программированию и обслуживанию систем.

Традиционные роботизированные комплексы для серийного производства часто характеризуются низкой гибкостью и высокими затратами на интеграцию и перепрофилирование под новые задачи или продукты. Это делает их уязвимыми перед лицом быстро меняющегося рынка. Современная парадигма требует перехода к реконфигурируемым и кастомизированным производствам, способным к быстрой переналадке. Совершенствование организационных подходов предполагает применение комплексных решений для снижения порога входа, особенно для средних предприятий, и сокращения сроков окупаемости инвестиций. При этом необходимо отметить, что для автоматизации и роботизации производственных процессов требуется адаптация конструкции изделий под возможности и ограничения роботизированных комплексов.

Прогресс в робототехнике сегодня определяется не столько механической мощностью, сколько интеллектуальными функциями: искусственным интеллектом, машинным зрением, интеграцией с цифровыми двойниками и IoT. Однако потенциал этих технологий остаётся нераскрытым при использовании устаревших организационных моделей. Развитие подходов к управлению необходимо для внедрения интеллектуальных роботов, способных к автономному принятию решений, адаптации в реальном времени и безопасному сотрудничеству с человеком (коботы). Это открывает путь к созданию полностью автоматизированных, гибких цехов с единым центром управления.

Роботизация вносит новые риски и требует создания безопасной среды труда с соблюдением жёстких нормативов. Эффективная организация процесса подразумевает заблаговременное планирование этих аспектов. Одновременно возникает насущная потребность в массовом обучении персонала навыкам взаимодействия с роботизированными системами, их программирования и обслуживания. Отсутствие таких компетенций сегодня является одним из главных

барьеров для автоматизации, а их формирование – ключевым элементом успешной модернизации.

Таким образом, актуальность совершенствования подходов к организации серийного роботизированного производства в машиностроении продиктована острой необходимостью комплексного решения проблем конкурентоспособности, кадрового дефицита, технологической гибкости и интеграции инноваций. Успех в этой области станет определяющим фактором для технологического суверенитета и устойчивого развития российской промышленности в долгосрочной перспективе.

Степень разработанности темы

Научно-практические направления работы задаются на основе трудов выдающихся отечественных ученых в области организации производства и управления качеством: Ю.П. Адлера, В.Н. Азарова, Г.Г. Азгальдова, И.З. Аронова, В.А. Барвинка, В.Я. Белобрагина, Б.В. Бойцова, В.В. Бойцова, В.А. Васильева, В.Г. Версана, Г.П. Воронина, А.В. Гличева, В.А. Лapidуса, В.В. Окрепилова, И.И. Чайки и др.

Наиболее важные научно-прикладные аспекты исследования определяются в работах Д.В. Антипова, В.Ф. Безъязычного, С.А. Васина, В.Е. Годлевского, О.А. Горленко, С.Я. Гродзенского, В.П. Димитрова, А.Я. Дмитриева, В.В. Ефимова А.В. Зажигалкина, А.Г. Ивахненко, В.А. Качалова, В.Я. Кершенбаума, Ю.С. Ключкова, В.Н. Клячкина, В.Н. Козловского, П.А. Лончих, С.В. Мищенко, С.Н. Николаева, И.Н. Омельченко, К.Г. Пивоварова, Е.В. Плахотниковой, М.А. Поляковой, С.В. Пономарева, В.Б. Протасьева, С.В. Пугачева, М.И. Розно, Т.А. Салимовой, Е.Г. Семеновой, Л.Е. Скрипко, А.Г. Сусллова, Х.А. Фасхиева, А.И. Хаймович, И.Н. Хаймович, Ю.К. Чернова, А.Д. Шадрина, А.П. Шалаева, В.Л. Шпера, В.В. Щипанова, Г.Л. Юнака и многих других российских ученых.

Значительный вклад в решение теоретических и практических вопросов развития организации производства и производственных систем внесли такие

ученые, как В.А. Васильев, И.Н. Омельченко, Д.В. Антипов, И.Н. Хаймович, А.И. Хаймович, Г.М. Гришанов, А.Е. Бром и др.

Вопросами роботизации производственных процессов занимались ученые Д.В. Антипов, В.А. Васильев, И.С. Ткаченко, В.Л. Коткин, Ф.С. Ющенко, Ю.Д. Лысенко, В.А. Звягинцев, А.А. Иголкин и др.

На сегодняшний день на предприятиях машиностроения не решена задача по комплексному и рациональному подходу к автоматизации и роботизации производственных процессов. Эта проблема обусловлена рядом факторов:

- отсутствует методика оценки потенциала роботизации серийного производства;

- отсутствуют единые подходы и инструментарий создания и функционирования серийного роботизированного производства, состоящего из интеллектуальных производственных ячеек;

- отсутствует единая терминология по интеллектуальным роботизированным ячейкам;

- отсутствует методика обоснованного выбора типа производства, наиболее подходящего под особенности серийного роботизированного производства.

Существуют множество различных подходов к автоматизации и роботизации производственных процессов, при этом их эффективность и целесообразность не всегда приводит к обеспечению гибкости производительности, качеству и минимальным затратам при производстве машиностроительной продукции. Вследствие этого не решена проблема комплексности подхода к роботизации серийных производств.

В теории организации производства нет единой научно-обоснованной технологии создания серийного роботизированного производства, обеспечивающего гибкость, производительность, качество и минимальные затраты при производстве машиностроительной продукции.

Научной проблемой является отсутствие комплексного научно-обоснованного подхода к созданию интеллектуальных роботизированных

производственных ячеек, обеспечивающего потенциал роботизации производственных процессов, гибкость и производительность при производстве машиностроительной продукции.

Научная гипотеза диссертационного исследования: решить научно-практическую задачу создания интеллектуальных роботизированных производственных ячеек можно за счет разработки инструментария оценки потенциала роботизации производственных процессов, а также разработки алгоритмов и моделей создания и организационного развития интеллектуальных роботизированных производственных ячеек, учитывающих системные ограничения и риски.

Повысить производительность серийного производства можно за счет обоснованного применения инструментария создания и функционирования серийного роботизированного производства.

Объект исследования: производственные процессы роботизированного сборочного производства машиностроительной продукции.

Предмет исследования: инструментарий организации и управления роботизированного сборочного производства.

Целью исследования является повышение производительности процессов сборочного производства за счет создания интеллектуальных роботизированных производственных ячеек.

Целевыми показателями, оценивающими степень достижения цели, являются:

1. Повышение производительности труда на производстве за счет увеличения скорости выполнения технологических операций.
2. Повышение плотности автоматизации и роботизации производственных процессов.
3. Снижение трудоёмкости выполнения технологических операций за счет автоматизации и роботизации производственных процессов.

Задачи исследования:

1. Провести теоретический анализ существующих подходов к организации роботизированного сборочного производства.
2. Разработать инструментарий оценки потенциала роботизации производственных процессов.
3. Разработать подходы к созданию интеллектуальных роботизированных производственных ячеек.
4. Провести практическую апробацию разработанного инструментария по созданию роботизированного производства.

Научной новизной обладают следующие результаты диссертационного исследования:

1. Методика оценочного аудита производственных процессов для выявления потенциала автоматизации и роботизации, содержащая классификацию системных ограничений, влияющих на организацию роботизированного сборочного производства, алгоритм и критерии оценки потенциала, комплекс количественных и качественных показателей технико-экономического обоснования целесообразности автоматизации и роботизации (п. 16. Моделирование и оптимизация организационных структур и производственных процессов, вспомогательных и обслуживающих производств. Экспертные системы в организации производственных процессов, паспорта научной специальности 2.5.22).

2. Структурно-функциональная модель интеллектуальной роботизированной производственной ячейки, отличающаяся от существующих тем, что содержит классификацию цифровых и физических компонентов и последовательность адаптивной системной интеграции роботизированных комплексов в производственные процессы (п. 13. Научные основы цифровых, автоматизированных комплексных систем управления производством и качеством работ на базе технических регламентов и стандартов, паспорта научной специальности 2.5.22).

3. Классификация рисков появления потенциальных несоответствий функционирования интеллектуальной роботизированной производственной ячейки, разработанной на основе методики PFMEA (Failure Mode and Effects Analysis), распределенная по 6 группам компонентов (п. 22. Разработка методов и средств организации производства в условиях организационно-управленческих, технологических и технических рисков, паспорта научной специальности 2.5.22).

4. Методика организационного развития интеллектуальных роботизированных производственных ячеек, отличающаяся от существующей тем, что выделены 4 уровня, определены критерии и характеристики для каждого уровня, разработана математическая модель оценки и перехода на следующий уровень развития (п. 25. Разработка моделей описания, методов и алгоритмов решения задач проектирования производственных систем, организации производства и принятия управленческих решений в цифровой экономике, паспорта научной специальности 2.5.22).

Положения, выносимые на защиту:

1. Методика оценочного аудита производственных процессов для выявления потенциала автоматизации и роботизации.

2. Структурно-функциональная модель интеллектуальной роботизированной производственной ячейки.

3. Классификация рисков появления потенциальных несоответствий функционирования интеллектуальной роботизированной производственной ячейки.

4. Методика организационного развития интеллектуальных роботизированных производственных ячеек.

5. Результаты применения разработанных решений по созданию серийного роботизированного производства.

Соответствие паспорту специальности: тема и содержание диссертации соответствуют паспорту научной специальности 2.5.22 Управление качеством продукции. Стандартизация. Организация производства в части пунктов: 13. Научные основы цифровых, автоматизированных комплексных систем

управления производством и качеством работ на базе технических регламентов и стандартов; 16. Моделирование и оптимизация организационных структур и производственных процессов, вспомогательных и обслуживающих производств. Экспертные системы в организации производственных процессов; 22. Разработка методов и средств организации производства в условиях организационно-управленческих, технологических и технических рисков; 25. Разработка моделей описания, методов и алгоритмов решения задач проектирования производственных систем, организации производства и принятия управленческих решений в цифровой экономике.

Методы исследования: в диссертационном исследовании применялись методы экспертного анализа, методы математического моделирования, методы и подходы теории организации производства, методы теории ограничения систем, методы системного анализа сложных технических и организационных систем.

Структура и объём диссертации: диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, включающего 120 наименований, семи приложений. Объём диссертации – 241 страниц, содержит 40 рисунков, 67 таблиц.

ГЛАВА 1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ К ОРГАНИЗАЦИИ РОБОТИЗИРОВАННОГО СБОРОЧНОГО ПРОИЗВОДСТВА

1.1 Тренды и проблемы автоматизации и роботизации производственных процессов в машиностроении

«Индустрия 4.0», или четвертая промышленная революция, – это не просто очередной технологический скачок, а фундаментальное преобразование производственных процессов и бизнес-моделей. Она объединяет передовые технологии, создавая взаимосвязанную интеллектуальную экосистему, которая радикально меняет то, как мы производим, потребляем и взаимодействуем с окружающим миром (рисунок 1.1).



Рисунок 1.1 – Составляющие «Индустрии 4.0»

Ключевыми трендами, формирующими лицо этой революции, являются:

1. Интернет вещей (IoT): мир, соединенный данными.
2. Большие данные и аналитика: извлечение ценности из информации.
3. Искусственный интеллект (AI) и машинное обучение (ML): интеллект в сердце производства.
4. Автоматизация и роботизация: роботы – новые рабочие.

Основными и наиболее важными среди них являются автоматизация и роботизация. Они позволяют автоматизировать рутинные, опасные и трудоемкие задачи, повышая производительность и снижая затраты [1, 5]. Преимущества RPA (Robotic Process Automation) представлены на рисунке 1.2.



Рисунок 1.2 – Преимущества RPA

В таблице 1.1 представлены направления развития в области автоматизации и роботизации.

«Индустрия 4.0» – синергетическое взаимодействие технологий и инструментария, которое радикально меняет ландшафт производства. Для внедрения сквозных технологий «Индустрии 4.0» в диссертационном исследовании создана структурная модель киберфизической производственной

системы, являющейся основой для организации производства, цифровизации и автоматизации производственных процессов.

Таблица 1.1 – Направления в автоматизации и роботизации

Направление	Описание
Коллаборативные роботы (коботы)	Роботы, работающие бок о бок с людьми, выполняют сложные задачи, требующие человеческого надзора и вмешательства. Это позволяет максимально использовать преимущества как автоматизации, так и человеческого интеллекта
Гибкость и адаптивность	Современные автоматизированные системы способны быстро перестраиваться под производство различных продуктов, повышая гибкость и эффективность производства
Автоматизированное и роботизированное оборудование, работающее на новых принципах «темные/безлюдное производство»	Перспективное технологическое оборудование, построенное на новых принципах без учета фактора взаимодействия с человеком, позволяющее пересматривать традиционные требования к проектированию систем безопасности при взаимодействии с человеком

Структурная модель киберфизической производственной системы представляет собой комплексную архитектуру, объединяющую физические и виртуальные компоненты для достижения эффективного управления производственными процессами. В основе этой модели лежит интеграция информационных технологий, сенсорных систем, автоматизации и анализа данных, что позволяет создать адаптивные и интеллектуальные производственные среды.

Киберфизическая система включает в себя физические объекты, такие как машины, роботы и производственные линии, которые взаимодействуют с программными компонентами, обеспечивающими мониторинг, управление и оптимизацию процессов. Важным аспектом структурной модели является наличие сенсоров и актуаторов, которые позволяют собирать данные о состоянии оборудования, параметрах окружающей среды и ходе производственных операций. Эти данные передаются в облачные или локальные вычислительные системы для анализа и принятия решений.

Одним из ключевых элементов структурной модели является уровень взаимодействия. Он включает в себя интерфейсы для обмена данными между физическими устройствами и программным обеспечением. Это может быть реализовано через протоколы связи, такие как MQTT, OPC UA или RESTful API, которые обеспечивают надежную передачу информации в реальном времени. На уровне взаимодействия происходит интеграция с системами управления предприятием (ERP) и управления производственными ресурсами (MRP), что позволяет оптимизировать планирование и распределение ресурсов.

Важным элементом взаимодействия физических и цифровых компонентов являются алгоритмы анализа данных и машинного обучения. Эти алгоритмы обрабатывают большие объемы информации, получаемой от сенсоров, для выявления закономерностей, предсказания сбоев и оптимизации процессов. Например, с помощью предиктивной аналитики можно заранее определить необходимость технического обслуживания оборудования, что позволяет избежать простоев и повысить эффективность производства.

Кроме того, структурная модель киберфизической производственной системы должна учитывать аспекты устойчивого развития и экологии. Это означает внедрение технологий, способствующих снижению энергопотребления, минимизации отходов и оптимизации использования ресурсов. Например, системы управления энергией могут анализировать потребление электроэнергии в реальном времени и регулировать работу оборудования для достижения наилучших показателей эффективности.

Разработанная в диссертационном исследовании структурная модель киберфизической производственной системы приведена на рисунке 1.3.

В структурной модели киберфизической производственной системы описаны ключевые процессы, которые играют важную роль в управлении производственными системами. Эти процессы охватывают различные аспекты от проектирования новых продуктов до их производства и обслуживания [66].

Основные элементы и процессы структурной модели киберфизической системы представлены в таблице 1.2.

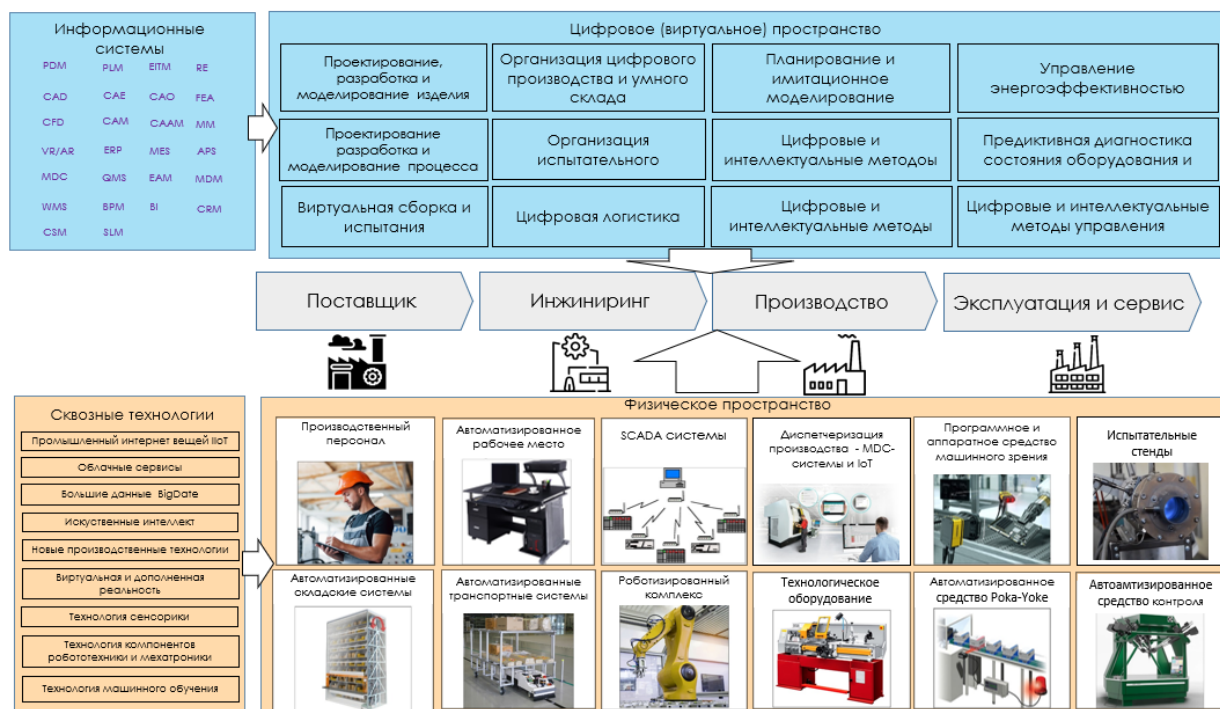


Рисунок 1.3 – Структурная модель киберфизической системы

Таблица 1.2 – Основные элементы и процессы структурной модели киберфизической системы

№	Элемент и процесс	Описание
1	Проектирование и разработка	На этом этапе осуществляется создание и планирование новых товаров или услуг. Включает в себя определение технических характеристик, функциональных требований и стандартов качества, которые должны быть соблюдены в процессе производства. Это критически важный шаг, который закладывает основу для успешного внедрения продукта на рынок
2	Организация производственного процесса	Данный процесс включает оптимизацию этапов производства, что позволяет повысить общую эффективность и снизить затраты. Важно внимательно подходить к каждому этапу, чтобы минимизировать время простоя и улучшить качество продукции. Применение методов бережливого производства и других современных подходов помогает достичь этих целей

окончание таблицы 1.2

№	Элемент и процесс	Описание
3	Цифровая логистика	Происходит управление движением материалов и информации с использованием современных цифровых технологий. Это включает в себя отслеживание запасов, управление поставками и интеграцию различных систем для обеспечения эффективного взаимодействия всех участников процесса
4	Виртуальная среда	Использование цифровых платформ для симуляции и моделирования производственных процессов позволяет детально изучить и оптимизировать их без необходимости проведения реальных экспериментов. Это позволяет выявить потенциальные узкие места и улучшить производительность на этапе проектирования
5	Управление ресурсами	Эффективное распределение и использование материалов, оборудования и человеческих ресурсов являются залогом успешного функционирования производственной системы. Это требует постоянного мониторинга и анализа, чтобы гарантировать, наилучшее использование всех ресурсов
6	Поставщики	Взаимодействие с поставщиками является важной частью производственного процесса, так как от качества и своевременности поставок зависит успешность всей цепочки. Эффективное управление отношениями с поставщиками помогает обеспечить наличие необходимых материалов и компонентов в нужное время
7	Инженерия	Включает в себя проектирование и техническое сопровождение производственных решений. Инженеры работают над улучшением существующих технологий и разработкой новых, что позволяет повышать производительность и качество продукции
8	Производственные операции	Непосредственное изготовление продукции включает в себя все этапы от сборки до контроля качества. Этот процесс должен быть организован таким образом, чтобы обеспечить максимальную эффективность и соответствие установленным стандартам
9	Эксплуатация и сервис	Обслуживание и поддержка оборудования, а также предоставление сервисных услуг являются важными аспектами, которые помогают поддерживать производственные процессы на высоком уровне. Это включает в себя регулярные проверки, техническое обслуживание и ремонт

Автоматизация и роботизация в области производства представляют собой важные и значимые факторы, способствующие модернизации и оптимизации работы промышленных предприятий. Их воздействие на ключевые показатели производственного процесса можно проанализировать через несколько основных аспектов, которые демонстрируют смену облика современного производства с помощью технологий.

Однако во многих исследованиях отражается влияние роботизации на социально-экономические аспекты, которое затрагивает множество факторов, включая производительность, занятость, качество жизни, инновации и устойчивое развитие.

В диссертационном исследовании подробно были рассмотрены социально-экономические аспекты (таблица 1.3).

Таблица 1.3 – Влияние уровня автоматизации и роботизации на социально-экономические аспекты

Аспекты		Влияние
1. Экономические аспекты	1.1. Повышение производительности	<p>Автоматизация и роботизация позволяют значительно увеличить производительность труда:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Скорость выполнения операций. Машины могут выполнять задачи с высокой скоростью, что позволяет предприятиям увеличивать объемы производства. Например, в автомобильной промышленности роботы могут собирать автомобили на конвейере быстрее людей. • Точность и стабильность. Автоматизированные системы обеспечивают высокую точность выполнения операций, что снижает количество ошибок и бракованной продукции. Это особенно важно в таких отраслях, как производство медицинских изделий или электроники, где качество критично. • Оптимизация процессов. Внедрение автоматизированных систем управления позволяет оптимизировать производственные процессы, минимизируя время простоя и повышая общую эффективность
	1.2. Снижение затрат	<p>Автоматизация помогает снизить затраты на разных уровнях:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Снижение трудозатрат. Компании могут сократить численность рабочей силы в рутинных задачах, что

продолжение таблицы 1.3

Аспекты		Влияние
		<p>позволяет уменьшить затраты на заработную плату. Это особенно актуально для предприятий с низкой добавленной стоимостью.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Снижение затрат на обучение. Автоматизированные системы требуют меньшего количества обученных специалистов для выполнения рутинных операций, что также снижает затраты на обучение и подготовку кадров. • Уменьшение затрат на сырье. Современные технологии позволяют более эффективно использовать сырье, что снижает общие затраты на производство
	1.3. Увеличение прибыли	<p>Снижение затрат и повышение производительности напрямую влияют на прибыль компаний:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Инвестиции в инновации. Компании могут направлять средства, сэкономленные за счет автоматизации, на исследования и разработки новых продуктов или технологий, что создает дополнительные источники дохода. • Увеличение рыночной доли. Более высокая эффективность позволяет компаниям предлагать конкурентоспособные цены, что может привести к увеличению рыночной доли
2. Социальные аспекты	2.1. Изменение структуры занятости	<p>Автоматизация приводит к значительным изменениям на рынке труда:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Сокращение рабочих мест. Рутинные и низкоквалифицированные рабочие места подвержены автоматизации. Например, в производственных отраслях часто происходит замена операторов машинами. • Создание новых профессий. В то же время появляются новые рабочие места, требующие более высокой квалификации. Это могут быть специалисты по программированию, инженеры по робототехнике и аналитики данных. • Изменение требований к квалификации. Работники должны адаптироваться к новым реалиям, что требует повышения квалификации и обучения
	2.2. Переобучение и повышение квалификации	<p>Необходимость переобучения становится актуальной в условиях автоматизации:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Программы переподготовки. Компании должны инвестировать в обучение своих сотрудников для подготовки их к новым требованиям рынка труда. Это может включать курсы по программированию, работе с новыми технологиями и управлению проектами. • Государственные инициативы. Государственные программы могут поддерживать переобучение и профессиональную подготовку, чтобы помочь работникам адаптироваться к изменениям на рынке труда. Примеры таких инициатив включают финансирование образовательных

продолжение таблицы 1.3

Аспекты		Влияние
	2.3. Улучшение условий труда	<p>программ и создание центров переподготовки</p> <p>Автоматизация может привести к улучшению условий труда:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Снижение физической нагрузки. Роботы могут выполнять тяжелые и опасные задачи (например, подъем тяжестей или работу в опасных условиях), снижая риск травм для работников. • Улучшение качества жизни. Работники могут сосредоточиться на более творческих и интеллектуальных задачах, что повышает удовлетворенность работой и может привести к улучшению психоэмоционального состояния
3. Технологические аспекты	3.1. Инновации	<p>Автоматизация и роботизация способствуют развитию новых технологий:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Исследования и разработки. Компании, внедряющие новые технологии, могут стать лидерами в своих отраслях. Например, компании, занимающиеся разработкой искусственного интеллекта и машинного обучения, могут значительно повысить свою конкурентоспособность. • Совместная работа человека и машины. Новые формы взаимодействия между людьми и машинами открывают возможности для инновационного подхода к производственным процессам. Например, концепция «человек-машина» предполагает совместную работу для достижения лучших результатов
	3.2. Информационные технологии	<p>Современные производственные системы требуют интеграции информационных технологий:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Системы управления. Автоматизация требует внедрения современных систем управления (ERP, MES), что улучшает координацию и управление производственными процессами. Эти системы позволяют отслеживать все этапы производства в реальном времени. • Анализ данных. Большие объемы данных, собираемые автоматизированными системами, могут быть использованы для анализа и оптимизации процессов. Это позволяет выявлять узкие места в производстве и принимать обоснованные решения для повышения эффективности
4. Экономические аспекты	4.1. Устойчивое развитие	<p>Автоматизация может способствовать устойчивому развитию:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Эффективное использование ресурсов. Автоматизированные процессы часто более эффективны в использовании сырья и энергии. Например, современные технологии позволяют значительно снизить потребление энергии в производственных процессах. • Снижение отходов. Точные процессы снижают

окончание таблицы 1.3

Аспекты		Влияние
		количество отходов и бракованной продукции. Это важно не только для экономии ресурсов, но и для уменьшения негативного воздействия на окружающую среду
	4.2. Экологическая ответственность	<p>Компании могут использовать автоматизацию для повышения своей экологической ответственности:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Системы мониторинга. Современные технологии позволяют отслеживать экологические показатели в реальном времени и принимать меры по их улучшению. Например, компании могут внедрять системы мониторинга выбросов углекислого газа. • Инвестиции в экологически чистые технологии. Снижение затрат может позволить компаниям инвестировать в экологически чистые технологии и практики, такие как использование возобновляемых источников энергии или переработка отходов
5. Политические и правовые аспекты	5.1. Регулирование труда	<p>С увеличением уровня автоматизации возникает необходимость в изменении законодательства:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Защита прав работников. Необходимость защиты прав работников, которые могут потерять работу из-за автоматизации, требует разработки новых законодательных инициатив, таких как программы социальной защиты или минимальные гарантии занятости. • Регулирование новых профессий. Появление новых профессий требует обновления образовательных стандартов и профессиональных квалификаций, а также создания аккредитационных органов для новых специальностей
	5.2. Глобализация	<p>Автоматизация может способствовать глобализации производства:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Перемещение производств. Компании могут переносить производство в регионы с более низкими затратами на труд благодаря автоматизации. Это может привести к изменению структуры глобальных цепочек поставок. • Конкуренция на международном уровне. Страны с высоким уровнем автоматизации могут конкурировать на международном рынке более эффективно, что может привести к изменению баланса сил в мировой экономике

Для успешного внедрения автоматизации необходимо учитывать все эти аспекты и разрабатывать стратегии, которые обеспечат баланс между экономическими выгодами и социальными последствиями. Это требует сотрудничества между государством, бизнесом и образовательными учреждениями для создания устойчивой и инклюзивной экономики будущего.

В целом, важно понимать, что автоматизация – это не только технологический процесс, но и социальное явление, которое требует комплексного подхода к его изучению и внедрению в практику.

1.2 Классификация системных ограничений, влияющих на создание и функционирование роботизированного сборочного производства

Серийное роботизированное производство представляет собой высокоэффективную систему, которая значительно улучшает производственные процессы, однако оно сталкивается с рядом ограничений и проблем. Среди самых распространённых можно выделить высокую стоимость внедрения, сложность перенастройки роботизированных комплексов, ограниченную адаптацию к нестандартным производственным задачам, высокие требования к квалификации персонала, длительную системную интеграцию роботизированных комплексов, ограничения по скорости и точности и др.

Несмотря на перечисленные ограничения, роботизированные системы остаются ключевым элементом киберфизических производственных систем, особенно в условиях возрастающей конкуренции и необходимости повышения производительности и улучшения качества продукции. Для рационального внедрения технологий серийного роботизированного производства необходимо провести анализ системных ограничений, устранение которых позволит повысить эффективность внедрения [68, 85].

В соответствии с теорией ограничения систем Э. Голдратта (ТОС), системное ограничение – самый слабый элемент производственной системы. Системное ограничение – фактор (ресурс, управленческое правило, технология и др.), влияющий на появление узких мест, несоответствий и производственных проблем [2, 22].

Системные ограничения, как правило, подразделяются на ограничение мощности, объема рынка, времени и др.

В любое время в организации имеется небольшое количество системных ограничений, влияющих на ее рост и развитие. Устраняя одно системное ограничение, возникает следующее. Процесс роста и развития представляет собой выявление и последовательное устранение системных ограничений, действующих в организации в данный момент [3].

Пример влияния системных ограничений на повышение производительности производственных процессов приведен на рисунке 1.4.



Рисунок 1.4 – Пример влияния системных ограничений на повышение производительности производственных процессов

В соответствии с ТОС разработан цикл мероприятий по устранению системных ограничений. Он состоит из четырех последовательных шагов и направлен на последовательное устранение внутренних и внешних системных ограничений: выявить системное ограничение, максимально использовать его,

подчинить все другие элементы производственной системы системному ограничению, «расшить» системное ограничение.

Таким образом, важным аспектом для развития организации и внедрения современных методов организации и роботизации производств является анализ и выявление системных ограничений.

Целью разработки классификации системных ограничений, влияющих на создание и функционирование серийного роботизированного производства, является выявление ключевых факторов, учет и минимизация которых позволит эффективно внедрять роботизированные комплексы и другие цифровые компоненты интеллектуальных производственных ячеек.

Для создания классификации необходимо провести комплексный анализ и выделить критерии, по которым будет проведена классификация.

На основе методики 6М были разработаны критерии классификации системных ограничений. Данная методика представляет шесть групп факторов – критериев классификации, влияющих на производственные процессы (рисунок 1.5).

На основе критериев 6М разработана классификация системных ограничений, влияющих на создание и функционирование серийного роботизированного производства машиностроительной продукции, представленная в таблице 1.4.

Таким образом, разработанная классификация системных ограничений, влияющих на создание серийного роботизированного производства, позволяет минимизировать влияние негативных факторов и разработать программу мероприятий, направленную на рациональное внедрение технологий серийного роботизированного производства.

Создание и функционирование серийного роботизированного производства – это многогранный процесс, который требует интеграции передовых технологий, тщательной организации труда и управления качеством. Важно рассмотреть

ключевые аспекты, которые необходимо учитывать при проектировании и запуске таких производств [4, 115].

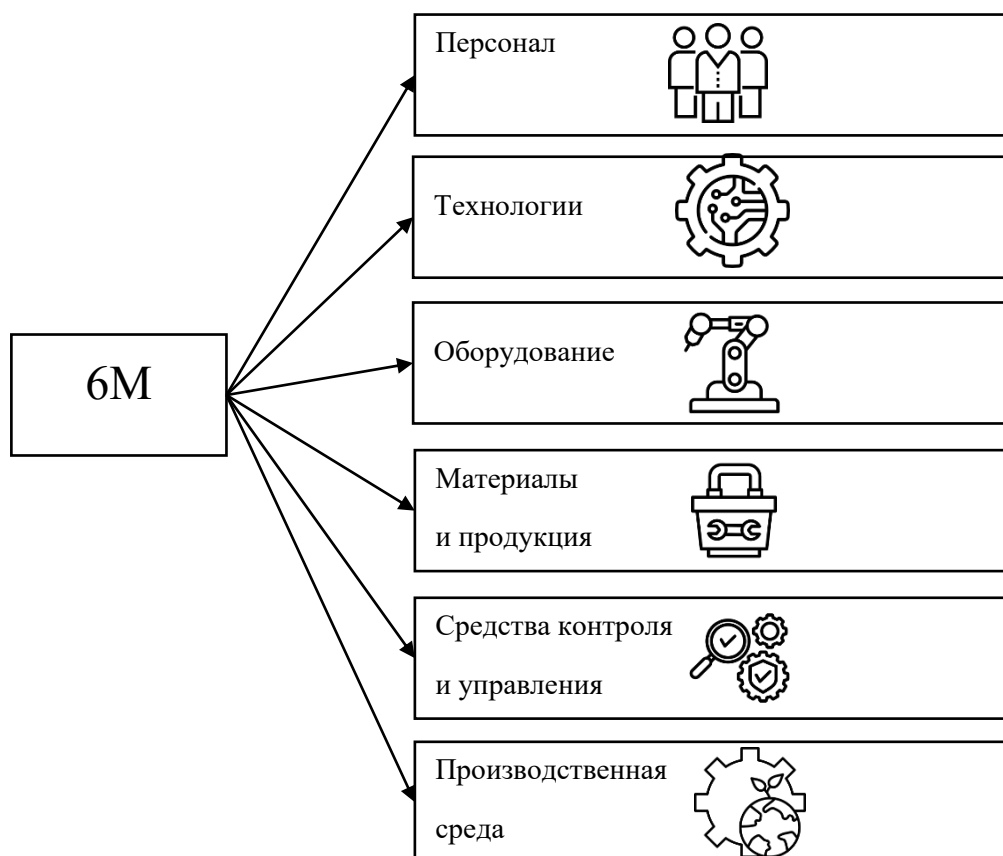


Рисунок 1.5 – Критерии классификации системных ограничений, влияющих на создание и функционирование серийного роботизированного производства машиностроительной продукции

Таблица 1.4 – Классификация системных ограничений

№ п/п	Критерий классификации	Системное ограничение
1	Производственный персонал	Недостаточная компетентность персонала негативно влияет на эффективность внедрения технологий серийного роботизированного производства
		Требуются дополнительные инструменты мотивации для производственного персонала при внедрении роботизированных комплексов
		Дополнительные требования к обеспечению безопасной работы персонала на производственном участке
2	Технологии	Не все технологические операции подвергаются роботизации

окончание таблицы 1.4

№ п/п	Критерий классификации	Системное ограничение
		Роботизированные комплексы требуют проектирования и внедрения специализированного технологического оснащения
		На некоторых операциях скорость работы роботизированных комплексов меньше скорости работы производственного персонала
3	Оборудование	Роботизированные комплексы требуют финансовых и временных затрат на пуско-наладку
		Роботизированные комплексы сложны в настройке и обслуживании
		Роботизированные комплексы, как правило, дорогостоящие и требуют дополнительных затрат на ремонт и техническое обслуживание
4	Материалы и продукция	Компоненты и комплектующие требуют дополнительной адаптации под возможности роботизированной сборки
		Продукция, изготавливаемая посредством серийного роботизированного производства, требует адаптации под возможности роботизированной сборки
5	Средства контроля и управления	Требуется специализированные программно-аппаратные комплексы для контроля качества выполнения роботизированных операций
		Необходима автоматизация средств контроля качества выполнения технологических операций
		Для эффективной работы роботизированных производственных участков требуется автоматизация систем управления
		Внедрение автоматизированных систем управления требует специализированного программного обеспечения
6	Производственная среда	Требуется внедрение специализированных устройств защиты для работы роботизированных комплексов
		Необходима организация производственных участков для использования роботизированных транспортных систем

Перед началом проектирования роботизированного производства следует четко сформулировать цели и задачи, которые помогут направить усилия команды на достижение конкретных результатов:

- Увеличение производительности. Необходимо определить ожидаемый объем производства и темпы, которые будут обеспечивать рентабельность. Это включает в себя анализ текущих процессов и их оптимизацию с помощью автоматизации.

- Снижение затрат. Оценка экономической целесообразности использования роботизированных решений по сравнению с традиционными методами. Здесь важно учитывать не только начальные инвестиции, но и долгосрочные эксплуатационные расходы.

- Повышение качества продукции. Роботы способны минимизировать влияние человеческого фактора, что приводит к повышению точности и однородности продукции. Важно установить стандарты качества и методы контроля, чтобы обеспечить соответствие продукции этим стандартам.

Выбор технологий – один из ключевых этапов в создании роботизированного производства.

Создание и функционирование серийного роботизированного производства – это сложный, но интересный процесс, требующий комплексного подхода. Успех зависит от правильного определения целей, выбора технологий, проектирования системы и управления качеством. Внедрение роботизированных решений может значительно повысить эффективность и конкурентоспособность производства, но для этого необходимо тщательно продумать каждый этап.

В настоящее время одним из путей сокращения сроков создания сложного технического изделия в машиностроении является широкое внедрение автоматизации и роботизации. Использование таких технологий совместно с интуицией и опытом инженера позволяет оперативно рассматривать большое количество альтернатив и выбирать оптимальное производственное решение [100]. Внедрение технологий автоматизации и роботизации позволяет наращивать гибкость и эффективность производства, а также повышает производительность труда, обеспечивает стабильность качества и снижает трудоёмкость выполнения технологических и вспомогательных операций.

Пример производственной планировки серийного роботизированного производства, оснащенного роботизированными комплексами, транспортными системами и другими компонентами роботизированного производства, приведен на рисунке 1.6.

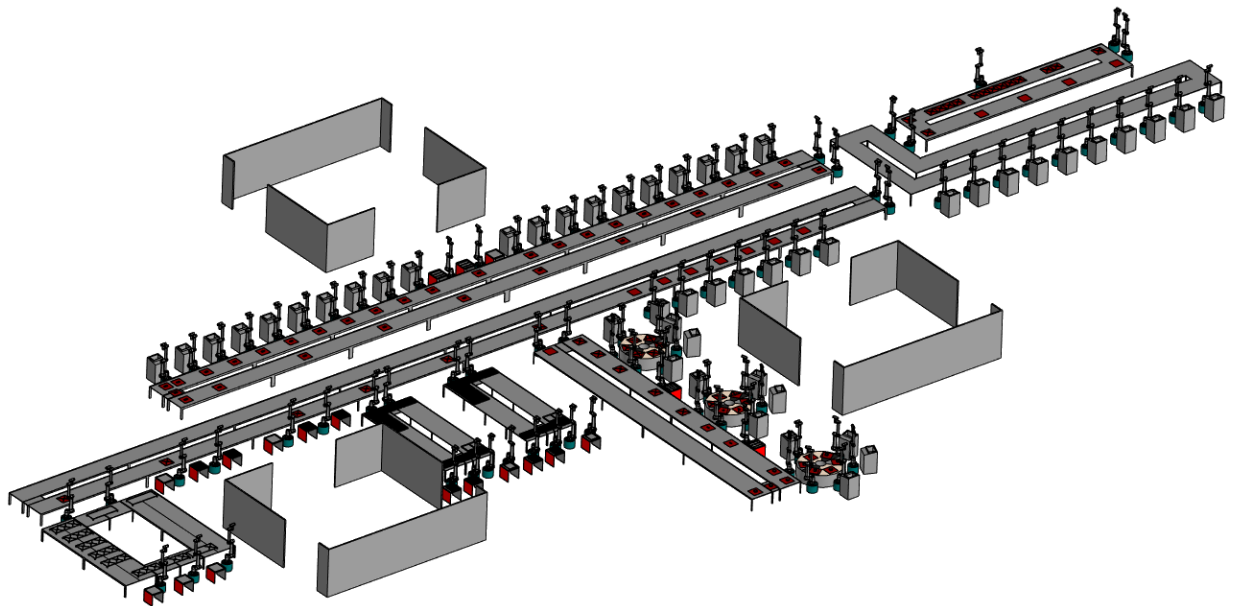


Рисунок 1.6 – Производственная планировка серийного роботизированного производства

На сегодняшний день отсутствуют единые стандарты и методики перехода на серийное роботизированное производства, что часто приводит к неудачным и неэффективным решениям по автоматизации и роботизации производств.

Для повышения результативности внедрения технологий серийного автоматизированного и роботизированного производства необходимо учитывать ключевые особенности, возможности и ограничения серийного производства, а также использовать проверенный инструментарий создания роботизированных производств.

Серийное производство в машиностроении характеризуется рядом ключевых особенностей, определяющих специфику организации производственного процесса, требования к оборудованию и персоналу, а также подходы к управлению качеством и производительностью [95, 117].

Ключевые особенности серийного производства в машиностроении приведены в таблице 1.5.

Таблица 1.5 – Ключевые особенности серийного производства в машиностроении

Особенность	Описание
Высокая скорость производства	<p>Производственные процессы должны стремиться к максимальной скорости и снижению трудоёмкости и потерь рабочего времени.</p> <p>Производственные участки должны быть сбалансированы по пропускной способности (производительности)</p>
Стабильность параметров качества выпускаемой продукции	<p>Высокая степень стандартизации и унификации комплектующих и узлов.</p> <p>Высокая степень стандартизации производственных процессов.</p> <p>Высокая степень обеспечения технологическим оснащением производственных участков.</p> <p>Высокая степень автоматизации и роботизации.</p> <p>Стабильное качество поставок компонентов и материалов для обеспечения серийного производства</p>
Масштабируемость	<p>Производственные мощности должны быть достаточно гибкими, чтобы справляться с большими объемами заказов.</p> <p>Масштабируемость достигается за счет использования высокопроизводительного оборудования и автоматизации процессов</p>
Минимальные производственные издержки	<p>Высокая степень специализации производственных участков и рабочих мест.</p> <p>Высокая степень гибкости при переналадке оборудования и переходе от одного типа продукции к другому</p>
Автоматизация	<p>Использование промышленных роботов, станков с числовым программным управлением (ЧПУ), конвейеров и других механизмов, которые позволяют минимизировать участие человека в процессе производства</p>
Поточное производство	<p>Продукция движется по конвейеру или другой транспортной системе, проходя через различные стадии обработки.</p> <p>Поточные линии позволяют обеспечить непрерывность производственного процесса и минимизировать временные потери</p>
Использование специализированных инструментов и оснастки	<p>Применение специализированного инструмента и оснастки, разработанных специально для конкретного типа продукции.</p> <p>Снижение трудоёмкости выполнения технологических и вспомогательных операций.</p> <p>Снижение времени цикла</p>
Контроль качества	<p>Используется система контроля на каждом этапе производства, включая входной контроль материалов, промежуточный контроль полуфабрикатов и выходной контроль готовой продукции.</p> <p>Применяются методы статистического контроля качества (SPC) и инструменты бережливого производства (Lean)</p>
Оптимизация логистических процессов	<p>Оптимизация движения материалов, комплектующих и готовой продукции внутри предприятия и между предприятиями-партнерами позволяет минимизировать запасы и сократить сроки выполнения заказов</p>

окончание таблицы 1.5

Особенность	Описание
Оперативное планирование и управление запасами	<p>Используются системы управления запасами (MRP, ERP), позволяющие минимизировать избыточные запасы и предотвратить дефицит необходимых материалов.</p> <p>Оперативное планирование позволяет рационально загрузить производственные участки и минимизировать время протекания процессов</p>
Управление жизненным циклом продукта	<p>Особое внимание необходимо уделять управлению жизненным циклом продукта, начиная от разработки концепции и заканчивая утилизацией.</p> <p>Необходимо организовать процессы через все стадии создания продукта, начиная от анализа рынка, проектирования, производства, маркетинга, продажи и послепродажного обслуживания</p>
Инновационные технологии	<p>Современное серийное производство активно внедряет инновационные технологии, такие как аддитивные технологии (3D-печать), цифровые двойники, Интернет вещей (IoT) и bigdata.</p> <p>Технологии позволяют улучшить качество продукции, снизить затраты и повысить гибкость производства.</p>

Таким образом, серийное производство в машиностроении представляет собой высокоорганизованный и технологичный процесс, направленный на массовое изготовление качественной продукции с минимальными затратами и высокими темпами. При этом автоматизация и роботизация должны обеспечивать результативность реализации вышеперечисленных особенностей.

Автоматизация и роботизация производственных процессов имеют ряд преимуществ:

1. Повышение производительности за счет использования роботизированных комплексов, способных работать круглосуточно без перерывов и остановок, что позволяет значительно увеличить объемы выпускаемой продукции, минимизировать простои и повышать скорость выполнения сложных технологических задач.

2. Снижение трудоемкости и затрат на рабочую силу там, где это целесообразно и экономически эффективно. Это особенно актуально для монотонных, скоростных и физически тяжелых работ.

3. Высокая точность и повторяемость выполнения технологических и вспомогательных операций роботизированными комплексами за счет обеспечения

высокой точности выполнения операций, что помогает минимизировать количество брака и поддерживать стабильное качество продукции.

4. Обеспечение безопасности работы при выполнении опасных операций, таких как сварка, резка металла или работа с химическими веществами без риска для здоровья людей, что улучшает условия труда и снижает травматизм на производстве.

5. Повышение гибкости производства за счет быстрой переналадки роботизированных комплексов для выполнения технологических и вспомогательных операций, что влияет на увеличение номенклатуры и объема выпускаемой продукции.

6. Оптимизация производственных процессов за счет уменьшения количества промежуточных этапов, сокращения времени обработки деталей и повышения общей эффективности производства.

7. Уменьшение брака и расхода материалов и комплектующих за счет стабильности технологических процессов и уменьшения дефектов и несоответствий продукции, что влияет на себестоимость продукции и экологическую ответственность предприятия.

8. Экономия пространства за счет компактности и универсальности роботизированных комплексов, что позволяет организовать производство даже на ограниченных производственных площадях.

9. Конкурентоспособность организации за счет использования передовых технологий, повышения производительности и снижения затрат, реализации продукции по более привлекательным ценам.

10. Минимальное влияние человеческого фактора и уменьшение несоответствий и дефектов вследствие усталости, невнимательности и прочее. Роботизированные комплексы исключают эти риски, стабильно выполняя задачи в рамках программы.

Вышеперечисленные преимущества наглядно демонстрируют, что роботизация важный инструмент повышения эффективности и конкурентоспособности предприятий в машиностроительной отрасли.

1.3 Выбор и обоснование модели матричного производства как основы для создания интеллектуальных производственных ячеек

Производственные системы являются ключевыми элементами любой промышленной деятельности. Они представляют собой комплекс взаимосвязанных процессов, которые обеспечивают создание товаров и услуг. Модели производственных систем – это абстрактные представления, которые помогают понять, анализировать и оптимизировать эти процессы. Следует рассмотреть классификацию производственных систем, а также различные модели, используемые в производственной среде.

Классификация производственных систем может быть выполнена по нескольким критериям, наиболее распространенными из которых являются тип производства и уровень автоматизации (таблица 1.6).

Модели производственных систем играют важную роль в оптимизации процессов и повышении эффективности производства. Понимание различных типов и моделей позволяет компаниям адаптироваться к изменениям на рынке, улучшать качество продукции и снижать затраты. В условиях быстро меняющейся экономики применение правильной модели может стать ключевым фактором успеха для любого предприятия (рисунок 1.7).

Таблица 1.6 – Классификация производственных систем

Вид производства		Описание
По типу производства	Серийное	Изготавливается ограниченное количество однотипной продукции. Применяется в таких отраслях, как машиностроение и текстильная промышленность. Позволяет использовать стандартные процессы и оборудование, что снижает затраты и время на производство
	Массовое	Характеризуется производством больших объемов однотипной продукции с высокой степенью автоматизации. Примером может служить автомобилестроение, где на конвейерах выпускаются тысячи автомобилей в день. Этот тип производства требует значительных инвестиций в оборудование, но позволяет достигать высокой эффективности

окончание таблицы 1.6

Вид производства		Описание
	Единичное	Изготовление уникальных изделий по индивидуальным заказам. Примеры включают строительство зданий или изготовление мебели. Единичное производство требует высокой квалификации работников и гибкости в процессах
	Поточное	Непрерывный процесс, при котором материалы перемещаются через несколько этапов без остановки. Ярким примером является нефтехимическая промышленность, где процессы переработки идут круглосуточно и требуют точной синхронизации
По уровню автоматизации	Ручное	Минимальная автоматизация и высокая зависимость от человеческого труда. Часто используется в малых предприятиях, где персонал выполняет все операции вручную
	Полуавтоматизированное	Процессы частично автоматизированы с использованием машин и оборудования, однако требуется участие операторов. Это позволяет повысить эффективность, сохраняя при этом гибкость
	Автоматизированное	Процессы полностью автоматизированы, и вмешательство человека минимально. Применяется в высокотехнологичных отраслях и позволяет достигать высокой производительности и качества продукции

Поточное производство – прогрессивный способ организации производства, характеризующийся расчленением производственного процесса на отдельные, относительно короткие операции, выполняемые на специально оборудованных, последовательно расположенных рабочих местах – поточных линиях. Как правило, поточное производство организуется для серийного выпуска продукции. Серийное производство, в свою очередь, характеризуется узкой номенклатурой и большим объёмом выпуска изделий, непрерывно изготавливаемых или ремонтируемых в течение продолжительного времени. Критерием серийности производства является «коэффициент закрепления операций» в соответствии с ГОСТ 14.004-83.

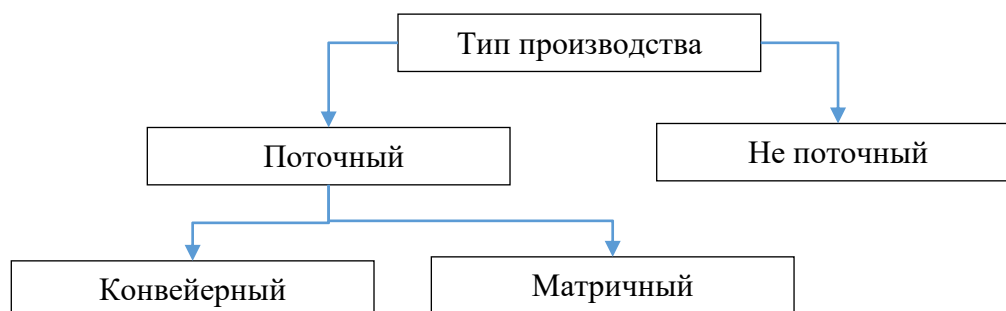


Рисунок 1.7 – Типы производства, применяемые в машиностроении

Особенности поточного производства:

- осуществление деталями и сборочными единицами движения по производственным участкам и рабочим местам;
- за каждым производственным участком и рабочим местом закрепляется выполнение постоянно повторяющихся операций;
- за каждым производственным участком и рабочим местом используется специализированное высокопроизводительное оборудование, которое расставляется по поточному принципу (т.е. по ходу технологического процесса) и во многих случаях связывается транспортирующими устройствами и конвейерами с постами промежуточного автоматического контроля, а также промежуточными складами-накопителями заготовок, снабжёнными автоматическими перегружателями (роботами-манипуляторами);
- широко применяются автоматические и роботизированные линии и управляемые ЭВМ.

Непоточное производство характеризуется неравномерным движением полуфабриката в процессе изготовления изделия, т. е. технологический процесс изготовления изделия прерывается вследствие различной продолжительности выполнения операций, а полуфабрикаты накапливаются у рабочих мест и на складах. Сборку изделий начинают лишь при наличии на складах полных комплектов деталей. В непоточном производстве отсутствует такт выпуска, а производственный процесс регулируется графиком, составленным с учетом

плановых сроков и трудоемкости изготовления изделий. Непоточный метод применяется, в основном, в единичном и позаказном производстве и характерен для экспериментального и ремонтно-механического цехов, а также крупногабаритных изделий, движение которых по потоку через производственные участки затруднено. Примером непоточного производства является строительство крупногабаритных судов и т.д.

В свою очередь поточный тип производства может быть разделен на конвейерный и матричный.

Конвейерный тип производства характеризуется как система поточной организации производства на основе конвейера, при которой производство разделено на простейшие короткие операции, а перемещение деталей осуществляется автоматически. Это такая организация выполнения операций над объектами, при которой весь процесс воздействия разделяется на последовательность стадий с целью повышения производительности путём одновременного независимого выполнения операций над несколькими объектами, проходящими различные стадии. Конвейером также называют средство продвижения объектов между стадиями при такой организации. Подобное расчленение производственного процесса на простейшие операции позволяет одному рабочему выполнять какую-либо одну операцию, не тратя время на смену инструментов и передачу деталей другому рабочему. Такая параллельность производственного процесса позволяет уменьшить количество рабочих часов, необходимых для производства одного изделия. Недостатком системы производства является повышенная монотонность труда. Конвейерная линия должна настраиваться на разную скорость работы для обеспечения оптимальной интенсивности труда в зависимости от трудоспособности людей – относительно более быстро работа идёт первые 2-3 часа, после обеда и перед окончанием рабочего дня. При этом для борьбы с усталостью должна происходить ротация рабочих.

Матричный тип производства состоит в том, что сборочные операции на производственных участках выполняются не на жестко организованном последовательном конвейере, а внутри отдельных стандартных производственных ячеек, которые размещаются в цехе в узлах регулярной сетки – матрицы (рисунок 1.8).

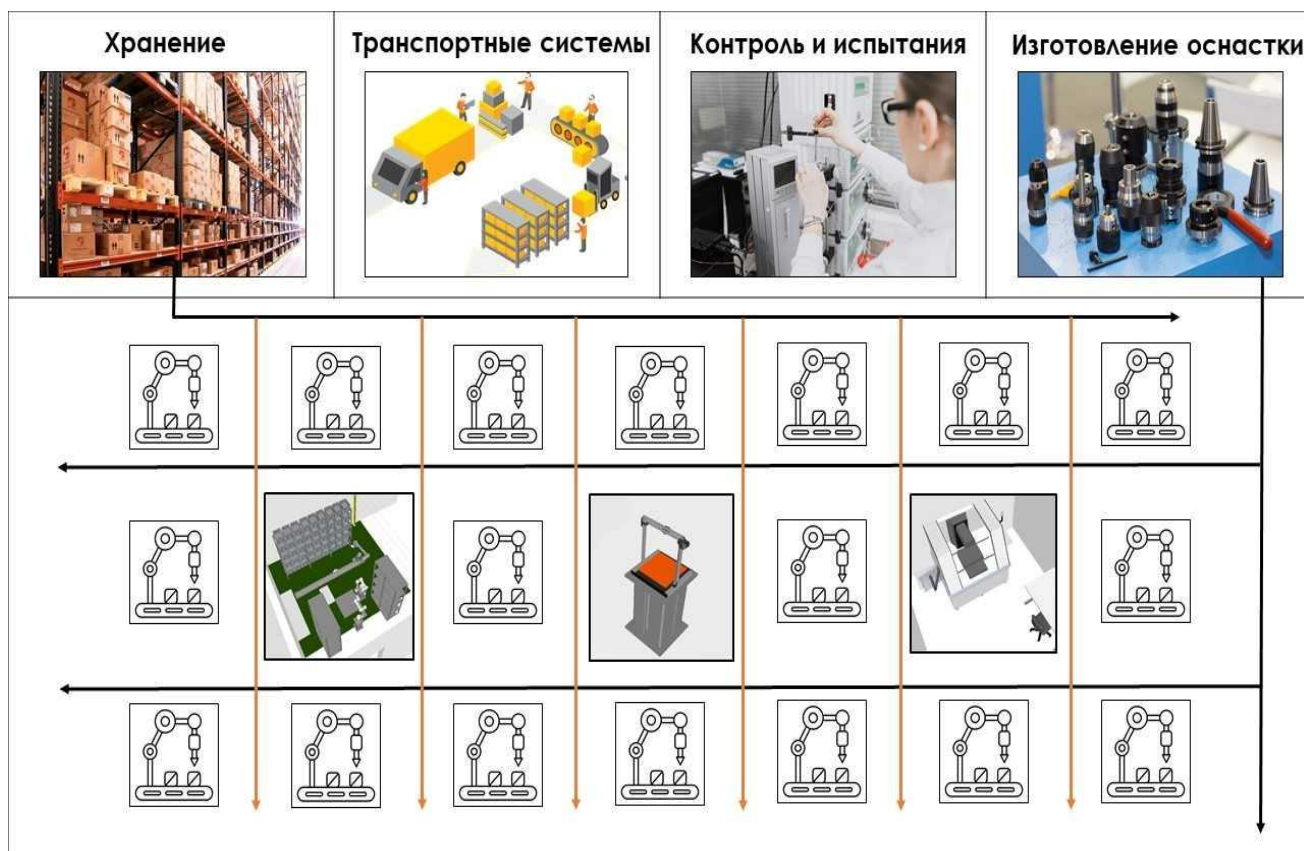


Рисунок 1.8 – Матричный тип производства

Преимущества матричного производства:

- максимальная скорость производственных процессов (производительность) при большой номенклатуре выпускаемой продукции (высокая степень кастомизации производства);
- высокая степень унификации и стандартизации производственно-технологических решений (унифицированные производственные ячейки);
- высокая степень масштабируемости производства, без рисков получения несбалансированных производственных участков (участков, являющихся

«узкими» местами, сдерживающих производственный поток по производительности).

Максимальное преимущество матричное производство приобретает при «глубокой» автоматизации и роботизации производственных процессов.

Основными элементами автоматизации, роботизации и цифровизации на производственном предприятии являются:

- умные автоматизированные склады для выполнения складских операций (приемка, входной контроль, сортировка комплектующих и компонентов, комплектование комплектующих для хранения, адресное хранение, комплектование заказа для выдачи на производственные участки и т.д.);

- автоматизация и роботизация процессов аддитивного производства и механической обработки (постобработки);

- автоматизированные системы хранения комплектующих изделий и полуфабрикатов на производственных участках;

- автоматизированные системы идентификации и прослеживаемости комплектующих и компонентов;

- роботизированные системы транспортировки (роботизированные тележки) для перемещения компонентов между производственными участками;

- автоматизация и роботизация сварочных и сборочных участков;

- автоматизированные системы контроля, измерений и испытаний компонентов;

- системы машинного зрения для контроля качества сборочных процессов;

- автоматизированные системы Рока Уока (защиты от ошибок) и другое;

- бесшовная интеграция автоматизированных систем управления технологическими процессами «нижнего» уровня (SCADA) и автоматизированных информационных систем управления «верхнего» уровня (WMS, MES, ERP).

В производственных ячейках могут устанавливаться промышленные и колаборативные роботы и поворотные столы с необходимой технологической

оснасткой, приемные приспособления для инструментов, специализированное оборудование для обеспечения сборочных процессов без участия человека [74, 76, 106]. При необходимости такие сборочные ячейки можно индивидуально расширять и переконфигурировать с помощью специального технологического оборудования в зависимости от поставленных производственных задач (рисунок 1.9).



Рисунок 1.9 – Пример роботизированной сборочной ячейки

Производственные участки, снабженные автоматизированными и роботизированными комплексами, системами машинного зрения, SCADA-системами и другими программно-аппаратными комплексами, построенными на принципах киберфизических систем, называются интеллектуальными производственными ячейками.

Ключевые характеристики матричного производства:

- Ячеистая структура. Производство организовано в виде множества универсальных, автономных или полуавтономных ячеек (рабочих центров), а не в

виде традиционной последовательной линии. Каждая ячейка выполняет определенный набор операций. Отсутствие «узких» мест, сдерживающих производство по производительности.

- Многовариантность маршрутов. Деталь или изделие может перемещаться между ячейками по различным, заранее заданным и динамически выбираемым маршрутам. Это позволяет обходить неисправные или занятые участки.

- Высокая гибкость производства. Способность быстро и с минимальными затратами переходить с производства одного изделия на другое. Это достигается за счет перепрограммирования роботов и смены оснастки.

- Модульность и масштабируемость. Производственную систему легко расширять, добавляя новые стандартизированные модули-ячейки, или модернизировать, заменяя отдельные модули без остановки всей системы. Низкие риски выхода из строя лимитирующего оборудования и, как следствие, низкие риски задержки заказа.

- Децентрализация управления. Управление производственными процессами распределено между уровнями (центральная система – ячейка – робот). Ячейки обладают собственной «интеллектуальностью» для принятия оперативных решений.

- Универсальность оборудования. В ячейках используются многофункциональные роботы (например, коботы с быстросменными инструментами) и обрабатывающие центры, способные выполнять широкий спектр операций (фрезерование, сверление, сборка, контроль).

- Параллельность процессов. Несколько различных изделий могут одновременно находиться на разных стадиях производства в разных ячейках, что значительно сокращает общее время выполнения заказа.

- «Бесшовная» интеграция контрольно-измерительных приборов. В производственные ячейки встроены системы контроля качества (машинное зрение, лазерные сканеры), что позволяет осуществлять контроль в режиме реального времени и немедленно реагировать на дефекты.

- Робастность (устойчивость к сбоям). Благодаря множественности маршрутов, выход из строя одной ячейки или робота не парализует всё производство. Поток продукции перенаправляется через другие, работоспособные ячейки.

- Самодиагностика, мониторинг и предиктивное обслуживание. Система постоянно мониторит состояние оборудования, предсказывает возможные отказы и инициирует обслуживание до наступления критической поломки.

- Резервирование мощностей. Наличие избыточных мощностей в ключевых ячейках или роботов-дублеров, которые могут быть задействованы в пиковые нагрузки или при отказах.

- Глубокая цифровизация и использование IoT. Все оборудование, оснастка и продукты (через RFID-метки или QR-коды) являются источниками данных, объединенными в единую сеть.

- Централизованная система управления на основе WMS, MES и APS. Интеллектуальная система, которая в реальном времени распределяет задания по ячейкам, выбирает оптимальные маршруты и управляет ресурсами на основе текущего состояния системы и поступающих заказов.

- Высокая скорость вывода новых продуктов. Благодаря гибкости и модульности производство можно быстро адаптировать под требования нового изделия.

Матричное производство представляет собой современный подход к организации производственных участков, который позволяет производствам быть более гибкими и адаптивными в условиях быстро меняющегося рынка и спроса на сложную продукцию с длительными производственными циклами. При правильном управлении и эффективной коммуникации этот метод может значительно повысить производительность и инновационность [7].

Ключевая суть матричного роботизированного производства – это переход от жесткой, последовательной, «линейной» логики к гибкой, адаптивной, «сетевой». Это производство, которое ведет себя не как конвейер, а как живой,

самонастраивающийся организм, способный эффективно реагировать на изменения как во внешней среде (спрос), так и во внутренней (сбои оборудования).

Однако для успешного внедрения матричной структуры необходимо учитывать возможные риски и системные ограничения, например, такие как сложность в роботизации технологических операций, необходимость адаптации конструкции под возможности роботизации и высокие требования к компетентности персонала.

Для создания матричного производства с перечнем ключевых преимуществ, отраженных выше, необходимо создавать интеллектуальные роботизированные производственные ячейки. На сегодняшний день существуют ряд проблем, влияющих на создание таких ячеек:

- отсутствие методики оценки потенциала создания интеллектуальной производственной ячейки для выполнения определенных технологических процессов и операций;
- единых подходов и инструментария создания и функционирования интеллектуальных производственных ячеек;
- классификации компонентов интеллектуальных роботизированных производственных ячеек;
- единой терминологии по интеллектуальным роботизированным ячейкам [9, 14, 59-60].

Проведенный анализ научной и технической литературы позволил обобщить и сформулировать определение для интеллектуальной роботизированной производственной ячейки.

Интеллектуальная роботизированная производственная ячейка (ИРПЯ) – это производственный участок, обладающий всеми характеристиками киберфизической производственной системы, являющейся базовой структурной единицей производственного подразделения (цеха) машиностроительного производства, в которой выполняются технологические и вспомогательные операции [65].

1.4 Выводы по главе 1

Таким образом, проведенный анализ теоретических подходов к созданию серийного роботизированного производства позволил сделать следующие выводы:

1. На сегодняшний день главным трендом в современном машиностроении является переход к производственной концепции «Индустрия 4.0», в которой системообразующую роль занимают киберфизические производственные системы.

2. Основу киберфизических производственных систем составляют роботизированные комплексы, интегрированные с автоматизированными системами управления «нижнего» и «верхнего» уровня, а также интегрированные с программно-аппаратными комплексами, обладающими интеллектуальными системами (машинное зрение, программные модули, цифровые Рока Уока).

3. Активизация процесса внедрения киберфизических производственных систем наряду с автоматизацией и роботизацией производственных процессов существенным образом влияет на социальные аспекты и производственный персонал. Поэтому учет социально-экономических аспектов, рисков и возможностей, связанных с ними, является ключевой задачей внедрения киберфизических производственных систем.

4. Проведена классификация системных ограничений – факторов, влияющих на появление «узких» мест, несоответствий и производственных проблем. Выделено 6 групп и 17 системных ограничений. Все системные ограничения необходимо учитывать при создании и функционировании производственных систем, построенных на принципах киберфизических производственных систем.

5. Проведен анализ ключевых аспектов в создании автоматизированных и роботизированных производственных систем, а также выявлены ключевые особенности серийного производства.

6. Сформулированы основные преимущества создания серийного роботизированного производства. Для эффективности серийных роботизированных производств необходимо сформировать свод требований и ограничений как к производимой продукции и ее конструктивным элементам, так и к технологическим процессам и производственным участкам.

7. Определены основные компоненты интеллектуальной производственной ячейки.

8. Доказано, что для эффективности функционирования серийных роботизированных производств необходимо применять матричный тип производства.

9. Сформулированы ключевые характеристики матричного типа производства как основы для создания серийного роботизированного производства.

10. Сформулирована научная проблема: в теории организации производства нет единой научно-обоснованной технологии создания серийного роботизированного производства, обеспечивающего гибкость, производительность, качество и минимальные затраты при производстве машиностроительной продукции.

ГЛАВА 2. РАЗРАБОТКА ИНСТРУМЕНТАРИЯ ОЦЕНКИ ПОТЕНЦИАЛА РОБОТИЗАЦИИ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ

2.1 Методика оценочного аудита потенциала автоматизации и роботизации производственных процессов

Важным этапом внедрения технологий автоматизации и роботизации производственных процессов является оценочный аудит потенциала, который представляет собой значимый инструмент для организаций, ориентированных на повышение своей эффективности и конкурентоспособности, и позволяет повысить эффективность мероприятий по автоматизации и роботизации. Основная цель оценочного аудита заключается в выявлении возможностей для интеграции автоматизированных систем и роботизированных решений, способствующих повышению производительности производственных процессов, снижению затрат и улучшению качества выпускаемой продукции [6, 10]. Оценочный аудит потенциала автоматизации и роботизации производственных процессов является «инструментом» обеспечения и достижения целевых производственных показателей автоматизации и роботизации производственных процессов. Задачи оценочного аудита приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Задачи оценочного аудита потенциала автоматизации и роботизации

Задачи	Описание
Целеполагание	Установление целей и целевых показателей «улучшенного» производственного процесса. Устанавливаются идеальные и целевые количественные и качественные показатели производственного процесса
Анализ текущего состояния производственных процессов (производительность, качество, условия труда)	Проводится анализ текущих производственных процессов, включающий их структуру, последовательность выполняемых операций, применяемое оборудование и используемые технологии. Данный этап направлен на идентификацию узких мест и факторов неэффективности, устранение которых возможно посредством автоматизации. Важную роль играет также

продолжение таблицы 2.1

Задачи	Описание
Оценка эффективности использования ресурсов	<p>оценка текущего уровня используемых технологий и программного обеспечения, позволяющая определить степень их соответствия современным стандартам и требованиям</p> <p>Определение, эффективности использования существующих материальных, человеческих и финансовых ресурсов, и выявление потенциальных точек роста эффективности путем внедрения роботизированных решений:</p> <ul style="list-style-type: none"> - проводится анализ текущего состояния загрузки основных производственных активов (станков, машин, линий); - выявляются периоды простаивания оборудования, избыточные мощности, или наоборот, перегруженность отдельных участков; - оценивается степень износа существующего оборудования и возможность продления ресурса либо потребность в замене устаревших агрегатов; - оценивается уровень загрузки основного технологического оборудования; - рассчитывается эффективность организации трудовых процессов; - регистрируются потери рабочего времени и неиспользуемые резервы оптимизации материальных потоков; - оценивается недостаточность финансовых и кадровых ресурсов для достижения поставленных целей; - анализируется структура занятости: распределение численности персонала между участками и операциями, выявление зон чрезмерной нагрузки или низкой продуктивности; - исследуется текучесть кадров, причины увольнений и дефицит квалифицированных специалистов; - рассчитывается средняя производительность одного сотрудника и сравнивается с аналогичными показателями конкурентов; - формируется перечень приоритетных направлений совершенствования ресурсного обеспечения, составляется предварительный баланс требований к дополнительным инвестициям и кадрам; - обосновываются меры по повышению коэффициента полезного использования имеющихся ресурсов, улучшению условий труда и снижению экологического ущерба
Определение приоритетных процессов и участков для автоматизации и роботизации	<p>Анализ производственных участков и операций (технологических и вспомогательных), выполняемых на данных участках. Ранжирование и приоритизация участков, требующих автоматизации и роботизации</p>
Разработка целевых производственных показателей автоматизации и роботизации	<p>Целевые показатели производственного процесса можно разделить на группы показателей:</p> <ul style="list-style-type: none"> - временных: время производственного цикла, время цикла операции, время переналадки, время ожидания заказа в очереди, трудоемкость выполнения операций и др.;

окончание таблицы 2.1

Задачи	Описание
	<ul style="list-style-type: none"> - объемных: объемы производства, производительность труда; - качества продукции: уровень дефектности, доля продукции произведенных с первого раза и др.; - затратных: затраты на производство, себестоимость продукции, трудоемкость, материалоемкость и др.;
Оценка готовности предприятия	<p>Анализ кадрового состава, текущей корпоративной культуры и уровня технологической компетентности персонала. Понимание степени готовности команды к принятию новых технологий и адаптации к ним выступает критическим условием успешной реализации автоматизации. Учитываются также возможные риски и потенциальное сопротивление изменениям, что обуславливает необходимость разработки стратегий управления этими процессами</p>
Разработка программы	<p>Формирование дорожной карты внедрения автоматизации и роботизации. Она предусматривает определение приоритетных направлений для автоматизации, разработку пошагового плана внедрения новых технологий и оценку необходимого объема инвестиций.</p> <p>Программа содержит:</p> <ul style="list-style-type: none"> - целевую карты потока процесса, включающую автоматизированные и роботизированные процессы; - эскизный проект технологической планировки 3D и 2D с технологическим оснащением; - перечень технологического оборудования; - перечень специализированной технологической оснастки; - расчет целевых производственных показателей; - экономическое обоснование проекта по автоматизации и роботизации; <p>Подобный подход минимизирует риски и обеспечивает плавный переход к обновленным производственным процессам</p>

Итоговые результаты оценочного аудита оформляются в виде отчетного документа, содержащего рекомендации относительно внедрения автоматизации и роботизации, а также прогнозы ожидаемых результатов от этих преобразований. Эти материалы служат основой для принятия руководством взвешенных решений по дальнейшему развитию производственного процесса и позволяют установить конкретные цели и ключевые показатели эффективности для мониторинга результативности реализованных решений.

Оценка потенциала автоматизации и роботизации производственных процессов – это сложный процесс, который требует системного и структурированного подхода [71].

Аудит проводится в три этапа:

1. Планирование аудита.
2. Проведение.
3. Подготовка отчетной документации.

На этапе планирования аудита (этап 1) собирается и регистрируется информация, приведенная в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Структурированная информация на этапе планирования оценочного аудита

№ п/п	Наименование	Комментарий
1	Наименование организации	
2	Производственные площадки	Указывается перечень производственных подразделений, в которых осуществляется выпуск продукции
2	Цели и задачи аудита	Целью аудита является оценка потенциальной эффективности и результативности внедрения технологий автоматизированного и роботизированного производства <i>Документируется четкое понимание, что именно вы хотите достичь с помощью автоматизации (например, повышение производительности, снижение затрат, улучшение качества).</i> <i>Формулируются конкретные задачи, которые необходимо решить (например, уменьшение времени цикла, сокращение ошибок)</i>
3	Объект аудита	Указываются производственные процессы и их границы. Приводится перечень технологических и вспомогательных процессов. Приводится номенклатура выпускаемой продукции
4	Критерии аудита	Указывается перечень рассматриваемых вопросов для проведения аудита, например, оценка технологичности конструкции под задачи роботизации, применяемое технологическое оснащение производственных

окончание таблицы 2.2

№ п/п	Наименование	Комментарий
		участков, складские системы, транспортные системы, цифровизация процессов организации и управления производственными процессами
5	Методы аудита	К методам аудита относятся: - наблюдение за процессами; - интервьюирование; - сбор данных для расчета производственных показателей; - имитационное моделирование технологических и вспомогательных процессов; - математическое моделирование процессов организации и производства
6	Длительность аудита	Указываются даты и временные интервалы для выполнения процедур аудита
7	Команды аудитов и их роли	Указывается команда аудиторов и их роли. Роли в аудите: - руководитель группы аудиторов; - специалист по организации производства; - робототехник-мехатроник; - технолог; - разработчик продукта; - специалист по управлению качеством в производстве
8	Сотрудники, участвующие в аудите, и их роли	Указывается список участников в аудите со стороны организации. Как правило, это начальник производства, производственные мастера, ответственный за роботизацию, ответственный за цифровизацию, технолог производственного участка, разработчик продукта
9	Потребность в ресурсах	Указываются необходимые материальные ресурсы для проведения аудита, например, оргтехника, программное обеспечение, средства измерения и контроля и т.д.

Подробный порядок оценки, включая ключевые этапы и методы, представлен в таблице 2.3.

Объекты оценочного аудита потенциала автоматизации и роботизации, приведенные в таблице 2.4, представляют собой ключевые элементы, которые подлежат анализу для выявления возможностей и потенциальных преимуществ внедрения автоматизированных и роботизированных решений.

Таблица 2.3 – Методика оценочного аудита производственных процессов для выявления потенциала автоматизации и роботизации

Теоретическая база	Процедурная часть	Методы и инструменты
<p>- Принципы автоматизации и роботизации производственного процесса</p> <p>- Классификация системных ограничений</p> <p>- Целеполагание и целевые показатели автоматизированного и роботизированного производственного процесса</p> <p>- РИДы и результаты НИОКР в области автоматизации и роботизации</p> <p>- Научные публикации в области автоматизации и роботизации производственных процессов</p>	<p>Этап 1. Планирование аудита. Сбор и структурирование данных. Формирование системы целей и целевых показателей автоматизированного и роботизированного производственного процесса</p> <p>Результаты:</p> <ul style="list-style-type: none"> - План и программа аудита. - Чек-листы аудита. - Целевые показатели 	<ul style="list-style-type: none"> - Сбор данных по производственным показателям - Реестр системных ограничений - Методика оценки рисков - Картирование производственного процесса - Имитационное моделирование производственного процесса - Лучшие практики в отрасли в области автоматизации и роботизации - Технико-экономическое обоснование проекта по роботизации производственных процессов
	<p>Этап 2. Сбор и анализ данных по показателям и критериям анализируемого производственного процесса. Наблюдение за процессами. Анализ технической документации (конструкторская и технологическая). Анализ технологичности конструкции</p> <p>Результаты:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Собранные и зарегистрированные данные по критериям оценочного аудита. - Системные ограничения. - Реестр проблем. - Реестр рисков 	
	<p>Этап 3. Построение карты потока производственного процесса текущего состояния. Выявление потенциальных областей для автоматизации</p> <p>Результаты:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Карты потока производственного процесса. - Производственные показатели 	
	<p>4. Разработка требований, критериев, ограничений и целевых показателей автоматизированного и роботизированного производственного процесса. Анализ и выявление областей, требующих автоматизации и роботизации. Построение карты потока производственного процесса идеального состояния</p>	

окончание таблицы 2.3

Теоретическая база	Процедурная часть	Методы и инструменты
	<p>Результаты:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Классификация требований и ограничений. - Карта потока создания ценностей роботизированного процесса 	
	<p>5. Уточнение перечня ограничений (законодательных, ресурсных, кадровых, финансовых, организационных, технологических, технических) и требований к автоматизированному и роботизированному производственному процессу</p> <p>Результаты:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Перечень ограничений и требований к роботизированному производственному процессу 	
	<p>6. Построение карты потока производственного процесса целевого состояния. Имитационное моделирование. Расчет целевых производственных показателей</p> <p>Результаты:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Карта потока целевого состояния. - Имитационная модель производственного процесса 	
	<p>7. Разработка мероприятия по автоматизации и роботизации. Техно-экономическое обоснование проекта. Оценка рисков проекта по автоматизации и роботизации. Расчет затрат на автоматизацию и роботизацию</p> <p>Результаты:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Программа модернизации производства. - Техно-экономическое обоснование. - Оценка рисков проекта 	

Таблица 2.4 – Объекты оценочного аудита потенциала автоматизации и роботизации

Категория	Составляющие	Описание
Производственные процессы	Текущие процессы	Анализ всех этапов производственного цикла, включая подготовку материалов, сборку, тестирование и упаковку. Важно детально документировать каждый этап, чтобы понять, где могут возникнуть узкие места или неэффективности
	Временные затраты	Оценка времени, затрачиваемого на выполнение каждой операции, что помогает выявить возможности для сокращения времени цикла
	Качество продукции	Анализ показателей качества на каждом этапе процесса для определения областей, где автоматизация может снизить количество дефектов и улучшить общую производительность
Технологическое оборудование	Существующее оборудование	Оценка текущего состояния машин и оборудования, их производительности и надежности. Это включает в себя анализ технических характеристик, возраст оборудования и возможность его модернизации
	Современные технологии	Исследование доступных технологий автоматизации и роботизации, таких как промышленные роботы, системы автоматизированного управления, сенсоры и IoT-устройства. Важно понять, какие технологии могут быть интегрированы в существующие процессы
	Интеграция систем	Оценка возможности интеграции новых технологий с уже существующими системами управления, такими как ERP и MES
Человеческий капитал	Квалификация сотрудников	Оценка уровня подготовки персонала для работы с новыми технологиями. Это может включать в себя анализ навыков, необходимых для работы с автоматизированными системами
	Обучение и развитие	Определение потребностей в обучении для повышения квалификации сотрудников. Важно учитывать, как обучение может повлиять на успешность внедрения автоматизации
	Корпоративная культура	Анализ отношения сотрудников к изменениям и готовности принимать новые технологии. Сопротивление изменениям может стать серьезным барьером для успешной автоматизации
Организационная структура	Структура управления	Оценка текущей организационной структуры и ее способности адаптироваться к изменениям, связанным с автоматизацией. Это включает в себя анализ ролей и обязанностей сотрудников в контексте новых процессов

окончание таблицы 2.4

Категория	Составляющие	Описание
	Коммуникационные потоки	Изучение внутренних коммуникационных процессов для выявления возможных проблем в передаче информации между различными подразделениями
Финансовые аспекты	Капитальные затраты	Оценка затрат на приобретение нового оборудования и программного обеспечения для автоматизации. Важно учитывать не только начальные инвестиции, но и долгосрочные расходы на обслуживание
	Операционные затраты	Анализ текущих операционных затрат, связанных с производственными процессами, включая затраты на рабочую силу, материалы и энергоресурсы
	Возврат инвестиций (ROI)	Прогнозирование ожидаемой экономии от внедрения автоматизации. Это включает в себя расчет сроков окупаемости и потенциальных выгод от повышения эффективности
Рынок и конкурентная среда	Анализ рынка	Оценка рыночных тенденций и требований клиентов к качеству продукции и скорости выполнения заказов. Понимание рыночной динамики поможет определить необходимость внедрения автоматизации
	Конкуренция	Исследование действий конкурентов в области автоматизации и роботизации. Это поможет понять, какие решения уже применяются на рынке и какие преимущества они предоставляют
Риски и барьеры	Идентификация рисков	Оценка возможных рисков, связанных с внедрением автоматизации, включая технические проблемы, недостаток квалифицированного персонала или финансовые ограничения
	Барьерные факторы	Анализ факторов, которые могут препятствовать успешному внедрению автоматизации, таких как недостаток финансирования, сопротивление со стороны сотрудников или недостаточная поддержка со стороны руководства
Экологические аспекты	Устойчивое развитие	Оценка воздействия автоматизации на окружающую среду. Это может включать в себя анализ снижения отходов, улучшения энергоэффективности и сокращения выбросов
	Социальная ответственность	Рассмотрение социальных аспектов внедрения автоматизации, таких как влияние на рабочие места и сообщество в целом

Комплексный анализ этих объектов позволяет идентифицировать основные возможности для внедрения инновационных технологий, а также оценить потенциальные риски и препятствия, которые требуют учета при разработке стратегии автоматизации [78]. Такой подход способствует принятию более обоснованных управленческих решений относительно целесообразности внедрения автоматизированных решений и их воздействия на операционные процессы компании.

Таким образом, описанная методика аудита потенциала автоматизации и роботизации позволяет повысить результативность проведения аудита.

Исходные данные для аудита потенциала автоматизации и роботизации производственных процессов представляют собой совокупность информации, необходимой для комплексного анализа текущего состояния производственной системы, выявления возможностей для усовершенствования и определения направлений для внедрения новых технологий.

Исходные данные для проведения аудита и оценки потенциала автоматизации и роботизации приведены в таблице 2.5.

Таблица 2.5 – Исходные данные для проведения оценочного аудита

№ п/п	Критерий аудита	Исходные данные	Результат
1	Технологичность конструкции	<ul style="list-style-type: none"> - КД на изделие. - Спецификация. - Компоненты изделия. - Готовые изделия 	<ul style="list-style-type: none"> - Оценка технологичности конструкции под возможности роботизации. - Рекомендации по повышению технологичности конструкции изделия. - 3D-модели компонентов и изделия
2	Производственные показатели	<ul style="list-style-type: none"> - Годовая программа производства. - Объем производства в смену. - Объем производства в час. - Производительность труда. - Выработка на 1 рабочего на производственном участке. - Такт производства. - Численность производственных 	Целевые показатели автоматизированного и роботизированного производственного процесса

продолжение таблицы 2.5

№ п/п	Критерий аудита	Исходные данные	Результат
		<p>рабочих в процессе.</p> <ul style="list-style-type: none"> - Количество смен. - Уровень гибкости производства. - Площадь, занятая под производством. - Трудоемкость изготовления компонентов. - Общая эффективность использования оборудования 	
3	Тип производства	<ul style="list-style-type: none"> - Тип производства. - Перечень производственных участков. - Всесторонний анализ производственных затрат, учитывающий стоимость материалов, трудозатрат, амортизационных отчислений и прочих накладных расходов. - Исследование текущих трендов в области автоматизации и роботизации в схожих секторах экономики. 	Оценка соответствия типа производства
4	Системные ограничения	<ul style="list-style-type: none"> - Организационные. - Проектно-конструкторские. - Производственно-технологические. - Экономические 	Реестр системных ограничений
5	Модель производственной системы	<ul style="list-style-type: none"> - Инвестиции в технологии: Исторический анализ вложений в оборудование и технологии, включая сведения о ранее выполненных проектах по автоматизации. - Оценка уровня взаимосвязанности различных информационных систем и оборудования на предприятии. - Оценка доступности и достоверности данных для аналитических целей (например, наличие актуальной отчетности, возможность получения данных в режиме реального времени) 	Несоответствия в производственной системе
6	Запасы	<ul style="list-style-type: none"> - Перечень комплектующих и компонентов, подвергаемых входному контролю и хранению на складах. 	<ul style="list-style-type: none"> - Несоответствия в системе управления запасами. - Перечень операций, предлагаемых для

продолжение таблицы 2.5

№ п/п	Критерий аудита	Исходные данные	Результат
		<ul style="list-style-type: none"> - Объем запасов, комплектующих и компонентов. - Применение тары. - Система хранения (адресная/ FIFO). - Цифровизация процессов управления запасами 	<ul style="list-style-type: none"> автоматизации и роботизации. - Расчет достаточности запасов. - Оценка соответствия тары для хранения под возможности роботизации
7	Технологические операции	<ul style="list-style-type: none"> - Количество задействованного персонала. - Количество технологических операций. - Время цикла технологических операций. - Уровень дефектности на операции. - Дополнительная трудоемкость на устранение несоответствий и дефектов. - Описание технологических процессов. - Статистические данные о рабочем времени: информация о продолжительности работы оборудования и сотрудников, включая случаи простоя, их причины и фактическое/плановое время выполнения операций 	<ul style="list-style-type: none"> - Цели по снижению трудоемкости. - Цели по снижению времени цикла. - Цели по высвобождению персонала. - Перечень операций, целесообразных для роботизации
8	Вспомогательные операции	<ul style="list-style-type: none"> - Количество задействованного персонала. - Количество вспомогательных операций. - Время цикла вспомогательных операций. - Описание вспомогательных процессов 	<ul style="list-style-type: none"> - Цели по снижению трудоемкости. - Цели по снижению времени цикла. - Цели по высвобождению персонала. - Перечень операций, целесообразных для роботизации
9	Незавершенное производство и межоперационные заделы	<ul style="list-style-type: none"> - Объем запасов. - Места хранения межоперационных запасов. - Тип и форма тары для хранения межоперационных запасов 	<ul style="list-style-type: none"> - Расчет достаточности в межоперационных запасах. - Оценка соответствия тары для хранения НЗП под возможности роботизации
10	Планировка производственных участков	<ul style="list-style-type: none"> - Перечень технологического оснащения (оборудования, оснастка, системы хранения). - Показатели текущих мощностных характеристик оборудования, его состояния и возможностей 	<ul style="list-style-type: none"> - Имитационная модель расстановки технологического оснащения

окончание таблицы 2.5

№ п/п	Критерий аудита	Исходные данные	Результат
		<p>для повышения производительности.</p> <ul style="list-style-type: none"> - Маршруты движения материальных ценностей в процессе производства. - Данные о планах технического обслуживания и ремонта оборудования, частота возникновения неисправностей и потребность в замене. - Оценка способности существующего оборудования интегрироваться с новыми автоматизированными системами 	0
11	<p>Схема движение материального потока (производственная логистика)</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Последовательность выполнение технологических и вспомогательных операций. - Технологическая документация (маршрутно-операционные карты, операционные карты, рабочие инструкции). - Требования к комплектации поставки комплектующих на операции. - Детализированные характеристики всех производственных этапов, включая последовательность операций, используемое оборудование и применяемые технологии 	Карта потока создания ценностей с обозначением производственной логистики
12	<p>Человеческие ресурсы</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Квалификация сотрудников. - Рабочие нагрузки: анализ распределения трудовых обязанностей между персоналом, учитывая случаи перегрузки либо недостаточной загрузки. - Оценка степени заинтересованности сотрудников в процессе автоматизации и их готовность к нововведениям 	<ul style="list-style-type: none"> - Матрица компетентности сотрудников. - Роли, ответственность и полномочия сотрудников

Сбор вышеуказанных данных составляет основу подготовительного этапа к аудиту потенциала автоматизации и роботизации производственных процессов. Они обеспечивают целостное понимание текущего положения дел на

предприятия, помогают обнаружить узкие места и определить перспективы для модернизации с использованием современных технологий. Чем полнее и точнее собранная информация, тем точнее будут выводы и рекомендации по внедрению автоматизации.

По результатам оценочного аудита разрабатывается программа модернизации производственной системы.

Структура программы модернизации приведена в таблице 2.6.

Таблица 2.6 – Структура программы модернизации производственных процессов

№ п/п	Раздел	Описание
1	Проектно-конструкторские решения под задачи автоматизации и роботизации производственных процессов	Описываются мероприятия по адаптации конструкции изделия под возможности автоматизированного и роботизированного производства
2	Подбор технологического оборудования для автоматизации и роботизации	Приводятся мероприятия по подбору, закупке, поставке и пуско-наладке технологического оборудования
3	Проектирование и обеспечение технологической оснасткой	Описываются мероприятия по проектированию и обеспечению технологической оснасткой для выполнения технологических и вспомогательных операций
4	Интеграция с автоматизированными системами управления «нижнего» уровня	Указываются мероприятия по внедрению SCADA
5	Интеграция с автоматизированными информационными системами «верхнего» уровня	Описываются мероприятия по внедрению WMS, MES, ERP систем
6	Разработка технологической документации	Приводятся мероприятия по разработке технологической документации и управляющих программ
7	Отработка технологических операций	Описываются мероприятия по выходу на показатели серийного производства

Таким образом, результаты аудита потенциала автоматизации и роботизации производственных процессов представляют собой комплексное исследование, которое выявляет значительные возможности для оптимизации деятельности предприятия. Реализация рекомендаций по внедрению автоматизации, модернизации оборудования, подготовке кадров и интеграции

информационных систем может привести к повышению эффективности работы предприятия, снижению затрат и улучшению качества продукции. Систематический подход к данным преобразованиям обеспечит устойчивый успех и конкурентоспособность на рынке.

2.2 Математическая модель оценки потенциала автоматизации и роботизации

Создание математической модели для оценки потенциала автоматизации и роботизации производственных процессов – это комплексная задача, которая включает в себя множество факторов [80]. Ниже представлена подробная структура модели, включая определение переменных, формулы, методы оценки и принятия решений.

Для построения модели необходимо определить входные данные для расчетов (таблица 2.7).

Таблица 2.7 – Входные данные для расчета потенциала роботизации

Переменная	Обозначение	Единица измерения
Базовые (до роботизации):		
- годовые производственные затраты	C_1	руб./год
- годовой объем производства	V_1	ед./год
- численность рабочих	N_1	чел.
- годовой фонд времени 1 рабочего	T	час/год
- цена единицы продукции	P	руб./ед.
- Параметры роботизации:		
- капитальные затраты на роботизацию	K	руб.

окончание таблицы 2.7

Переменная	Обозначение	Единица измерения
- годовые затраты после роботизации	C_2	руб./год
- численность после роботизации	N_2	чел.
- новый объем производства (сценарий)	V_2	ед./год
- Экономические параметры:		
- нормативный коэффициент эффективности	E_H	безразм.
- срок жизни проекта	t	Лет ²¹
- ставка дисконтирования	r	безразм. (часто ббг= E_H)

Проведем расчет показателей производительности [27, 29].

Расчет трудоемкости – затраты рабочего времени на единицу продукции:

$$Tp(x) = \frac{N^x \times T^1}{V_x} \quad (2.1)$$

где x – индекс варианта: 1 (базовый, без комплексной роботизации) или 2 (роботизированный); V_x – объем производства для варианта x .

Формулы для расчета трудоемкости в базовом и проектном варианте (для роботизации):

$$Tp_1 = \frac{N_1 \times T_1}{V_1}. \quad (2.2)$$

$$Tp_2 = \frac{N_2 \times T_2}{V_2}. \quad (2.3)$$

Формула расчета изменения трудоемкости:

$$\Delta Tp = Tp_1 - Tp_2 \left[\frac{\text{чел.*час}}{\text{ед.}} \right]. \quad (2.4)$$

Расчет выработки – объем продукции на одного рабочего в год:

$$W(x) = \frac{V_x}{N_x}. \quad (2.5)$$

Формулы расчета выработки в базовом и проектном варианте (для роботизации):

$$W_1 = \frac{V_1}{N_1}. \quad (2.6)$$

$$W_2 = \frac{V_2}{N_2}. \quad (2.7)$$

Формула для расчета роста выработки:

$$I_W = \frac{W_2}{W_1} [\text{индекс}]. \quad (2.8)$$

Далее приведен расчет экономической эффективности.

Формула для расчета годовой экономии:

$$S = c_1 - c_2. \quad (2.9)$$

Формула для расчета прибыли до роботизации:

$$\Pi_1 = P \cdot V_1 - c_1. \quad (2.10)$$

Формула для расчета прибыли после роботизации:

$$\Pi_2 = P \cdot V_2 - c_2. \quad (2.11)$$

Формула для расчета дополнительной прибыли (годовой экономической эффект):

$$\Delta\Pi = \Pi_2 - \Pi_1. \quad (2.12)$$

$$\Delta\Pi = (P \cdot V_2 - c_2) - (P \cdot V_1 - c_1). \quad (2.13)$$

Формула для расчета срока окупаемости:

$$PP = \frac{K}{\Delta\Pi} [\text{лет}]. \quad (2.14)$$

Формула для расчета дисконтированного срока окупаемости (DPP):

$$DPP = \min t \text{ такой, что } \sum_{i=1}^t \frac{\Delta\Pi}{(1+r)^i} \geq K, \quad (2.15)$$

где t – номер года (1, 2, 3, ...), r – ставка дисконтирования.

Формула для расчета чистого приведенного дохода (NPV):

$$NPV = \sum_{i=1}^t \frac{\Delta\Pi}{(1+r)^i} - K. \quad (2.16)$$

Формула расчета упрощенного варианта (при постоянном $\Delta\Pi$):

$$NPV = \Delta\Pi \cdot \frac{1-(1+r)^{-t}}{r} - K. \quad (2.17)$$

В этом случае критерий эффективности: $NPV > 0$.

Формула расчета внутренней нормы доходности (IRR):

$$\sum_{i=1}^t \frac{\Delta\Pi}{(1+IRR)^i} - K = 0. \quad (2.18)$$

В этом случае критерий эффективности: $IRR > r$.

Формула расчета индекса рентабельности (PI):

$$PI = \frac{\sum_{i=1}^t \frac{\Delta\Pi}{(1+r)^i}}{K} \quad (2.19)$$

В этом случае критерий эффективности: $PI > 1$.

Формула расчета коэффициента экономической эффективности (E):

$$E = \frac{\Delta\Pi}{K}. \quad (2.20)$$

В этом случае критерий эффективности: $E > E_n$.

Модель оценки потенциала роботизации:

$$(C_1, V_1, N_1, T_1, P, K, C_2, N_2, V_2, E_n, t, r) = \begin{matrix} \text{Производительность:} \\ TE_1 \\ TE_2 \\ \Delta TE \\ W_1 \\ W_2 \\ G_w \\ \text{Экономика:} \\ \Delta П \\ РР \\ NPV \\ IRR \\ PI \\ E \end{matrix} \quad (2.21)$$

Формула расчета точки безубыточности по объему (ВЕР) – минимальный объем производства после роботизации, при котором проект окупается:

$$V_{2\text{ВЕР}} = \frac{c_2 + \frac{K \cdot r}{1 - (1+r)^{-t}}}{P} \quad (2.22)$$

Модель принятия решений касательно потенциала роботизации конкретного проекта:

$$\text{Решение} = \begin{cases} \text{Внедрять, если } NPV > 0, E > E_n, PI > 1, PP < PP_{\text{max}} \\ \text{Доработать, если } NPV \approx 0 \text{ или есть стратегические выгоды} \\ \text{Отклонить, если } NPV < 0, E < E_n. \end{cases} \quad (2.23)$$

где PP_{max} – максимально допустимый для инвестора срок окупаемости.

Формула скорректированного NPV с учетом риска:

$$NPV_{\text{risk}} = \frac{NPV}{1 + \beta} \quad (2.24)$$

где β – коэффициент риска проекта (0,1 для низкого риска, 0,3 для среднего, 0,5 – для высокого).

Формула расчета требуемой нормы доходности с поправкой на риск:

$$R = r_{\text{risk-free}} + \beta_{\text{project}} \cdot (r_{\text{market}} - r_{\text{risk-free}}) \quad (2.25)$$

При создании обоснования проектов по роботизации также стоит учитывать:

- рынок труда. Возможность найма квалифицированных специалистов для работы с новыми технологиями;
- технологические риски. Возможные сбои в работе автоматизированных систем;
- изменения в спросе. Как внедрение технологий повлияет на спрос на продукцию;
- сроки окупаемости. Важно учитывать не только ROI, но и время, необходимое для полного возврата инвестиций;

Математическая модель для оценки потенциала автоматизации и роботизации позволяет систематически подойти к анализу затрат и выгод от внедрения новых технологий [28, 32-33, 53-54, 57]. Используя данную модель, компании могут принимать более обоснованные решения о целесообразности инвестиций в автоматизацию и роботизацию своих производственных процессов.

2.3 Комплекс показателей технико-экономического обоснования применения автоматизации и роботизации технологических и вспомогательных операций

Оценка эффективности применения автоматизации и роботизации в производственных процессах является ключевым аспектом управления современными предприятиями. Для этого используются различные показатели, которые помогают анализировать как финансовые, так и нефинансовые аспекты внедрения новых технологий [62, 72]. Подробный перечень таких показателей собран и представлен в таблицах 2.8-2.12.

Данные показатели позволяют комплексно оценить эффективность применения автоматизации и роботизации на предприятии, учитывая как финансовые аспекты, так и влияние на производственные процессы, качество продукции и благосостояние работников. Регулярный мониторинг этих показателей помогает выявлять узкие места, оптимизировать процессы и принимать обоснованные решения о дальнейших инвестициях в технологии автоматизации.

Таблица 2.8 – Перечень финансовых показателей оценки эффективности применения автоматизации и роботизации

Показатель	Описание	Методика расчета
1.1. Возврат на инвестиции (ROI)	Показатель, который измеряет прибыль, полученную от инвестиций в автоматизацию и роботизацию, по сравнению с затратами на эти инвестиции	$ROI = ((\text{Прибыль} - \text{Затраты}) / \text{Затраты}) \times 100\%$
1.2. Срок окупаемости (Payback Period)	Время, необходимое для возврата первоначальных инвестиций через сэкономленные затраты или увеличенные доходы	Срок окупаемости = (Первоначальные инвестиции) / (Годовая экономия или доход)
1.3. Чистая приведенная стоимость (NPV)	Разница между приведенной стоимостью доходов и затрат за весь срок службы проекта	$NPV = \sum_{t=0}^n C_t / ((1 + r)^t)$, где C_t – денежные потоки в период t , r – ставка дисконтирования
1.4. Внутренняя норма доходности (IRR)	Ставка дисконтирования, при которой NPV проекта равна нулю	Позволяет оценить эффективность инвестиций в автоматизацию по сравнению с другими проектами
1.5. Уменьшение переменных и фиксированных затрат	Измерение снижения затрат на оплату труда, материалы, энергию и другие ресурсы после внедрения автоматизированных процессов	Сравнение затрат до и после внедрения

Таблица 2.9 – Перечень производственных показателей, характеризующих эффективность применения роботизации

Показатель	Описание	Методика расчета
2.1. Производительность труда	Количество продукции, произведенной на одного работника за единицу времени	Производительность труда = (Объем производства) / (Число работников)
2.2. Уровень автоматизации	Процент производственных процессов, которые были автоматизированы	Уровень автоматизации = (Число автоматизированных процессов) / (Общее число процессов) $\times 100\%$
2.3. Время цикла (Cycle Time)	Время, необходимое для завершения одного цикла производства (от начала до конца)	Сравнение времени цикла до и после автоматизации
2.4. Уровень брака	Процент бракованной продукции в общем объеме производства	Уровень брака = (Число бракованных изделий) / (Общее число произведенных изделий) $\times 100\%$

окончание таблицы 2.9

Показатель	Описание	Методика расчета
2.5. Простой оборудования	Время, в течение которого оборудование не используется из-за технических проблем или плановых ремонтов	Сравнение времени простоя до и после внедрения автоматизации

Таблица 2.10 – Перечень показателей качества, характеризующих эффективность применения роботизации

Показатель	Описание	Методика расчета
3.1. Уровень удовлетворенности клиентов	Оценка удовлетворенности клиентов качеством продукции	Опросы, отзывы клиентов, Net Promoter Score (NPS)
3.2. Степень соответствия стандартам качества	Процент продукции, соответствующей установленным стандартам качества	Степень соответствия = (Число соответствующих изделий)/(Общее число изделий) × 100%

Таблица 2.11 – Перечень нефинансовых показателей, характеризующих эффективность роботизации

Показатель	Описание	Методика расчета
4.1. Безопасность труда	Измерение количества несчастных случаев и травм на производстве	Анализ данных о травмах до и после внедрения автоматизации
4.2. Удовлетворенность работников	Оценка уровня удовлетворенности сотрудников работой и условиями труда после внедрения автоматизации	Опросы, анкетирование
4.3. Гибкость производства	Способность предприятия быстро адаптироваться к изменениям в спросе или ассортименте продукции	Оценка времени, необходимого для перенастройки оборудования или изменения производственного процесса

Таблица 2.12 – Перечень показателей инновационности, характеризующих эффективность роботизации

Показатель	Описание	Методика расчета
5.1. Внедрение новых технологий	Количество новых технологий или решений, внедренных в процессе автоматизации	Анализ списка внедренных технологий и их влияние на производственные процессы
5.2. Исследования и разработки (R&D)	Уровень инвестиций в исследования и разработки новых технологий автоматизации	Сравнение расходов на R&D до и после внедрения автоматизации

Критерии технико-экономического обоснования (далее – ТЭО) представляют собой важнейший инструмент для оценки целесообразности и эффективности реализации разнообразных проектов, в частности, в промышленных, строительных, инфраструктурных и технологических сферах. ТЭО позволяет определить, насколько предложенный проект соответствует стратегическим целям организации, а также его экономическую эффективность и техническую реализуемость.

Один из центральных аспектов ТЭО – это оценка технической осуществимости проекта. Она включает анализ доступности необходимых технологий, оборудования и ресурсов для воплощения проекта в жизнь. Здесь важно провести исследование существующих технологий и определить, отвечают ли они требованиям проекта. Также необходимо оценить наличие требуемого оборудования и квалификацию персонала, который будет занят в реализации проекта. Это поможет исключить ситуации, когда проект окажется невыполнимым из-за нехватки нужных ресурсов или знаний.

Инновационный потенциал проекта также служит важным критерием. Уровень новаторства и уникальности предлагаемых решений способен оказать заметное влияние на успех проекта. Для оценки инновационности можно сопоставить проект с аналогичными решениями на рынке, а также изучить патенты и научные публикации, относящиеся к проекту [87, 103]. Это даст понимание того, насколько проект соответствует современным тенденциям и требованиям рынка.

Надежность и безопасность – ещё один значимый фактор, который нужно учитывать при разработке ТЭО. Оценка рисков, связанных с эксплуатацией оборудования и технологий, помогает распознать возможные угрозы и разработать меры по их минимизации. Анализ рисков включает оценку вероятности возникновения чрезвычайных ситуаций и их последствий, что позволяет заранее подготовиться к возможным проблемам.

Соответствие стандартам и нормам – это тоже важный критерий, играющий значительную роль в ТЭО. Необходимо удостовериться, что проект соответствует действующим стандартам качества, безопасности и экологии. Для этого проводят сравнительный анализ проектных решений с требованиями государственных и международных стандартов. Это предотвратит юридические сложности и гарантирует соответствие проекта современным требованиям.

Экономические критерии также имеют решающее значение для оценки целесообразности проекта. Прежде всего следует рассмотреть стоимость проекта, включающую совокупные капитальные и операционные затраты на его реализацию. Разработка сметных расчетов помогает детально понимать, какие расходы потребуются на приобретение оборудования, материалы, трудозатраты и накладные расходы. Это позволяет точнее оценивать финансовые риски и определять необходимые инвестиционные средства.

Организационные критерии также важны при ТЭО. Управление проектом включает оценку способности команды руководить проектом на всех стадиях: от планирования до исполнения и контроля. Анализ организационной структуры, квалификации персонала и наличия системы управления проектами даёт представление о том, насколько эффективно будет выполняться проект [111].

График выполнения работ – это ещё один значительный аспект организационного планирования. Оценка временных рамок реализации проекта позволяет понять, сколько времени понадобится для завершения каждого этапа работы. Составление графика работ с выделением ключевых этапов и сроков их выполнения помогает избегать задержек и обеспечивать своевременное завершение проекта.

Участие заинтересованных сторон также имеет огромное значение для успешной реализации проекта. Оценка уровня вовлечённости всех заинтересованных сторон позволяет учитывать мнения и ожидания ключевых участников, что может серьёзно повлиять на исход проекта. Проведение опросов

и анализ мнений локальных сообществ помогут выявить потенциальные проблемы и предотвратить конфликты [116, 118].

Социальная ответственность проекта состоит в оценке его влияния на общество и местные сообщества. Это может включать анализ социальных последствий реализации проекта, таких как создание рабочих мест, улучшение инфраструктуры или воздействие на здоровье населения. Проведение опросов среди местного населения поможет понять общественное мнение о проекте и выявить возможные негативные последствия.

Экологическая устойчивость – это ещё один важный критерий, который необходимо учитывать при разработке ТЭО. Оценка воздействия проекта на окружающую среду включает проведение экологической экспертизы, анализ выбросов, потребление ресурсов и воздействие на экосистему. Это поможет гарантировать соблюдение экологических норм и стандартов, а также минимизировать отрицательное влияние на природу [107].

И наконец, оценка рисков – неотъемлемая часть технико-экономического обоснования. Определение возможных рисков, которые могут сказаться на успехе проекта, позволяет заранее готовиться к вероятным проблемам. Проведение анализа рисков с применением методов SWOT-анализа или матрицы рисков поможет выявить уязвимые места проекта и выработать стратегии управления рисками [64, 81].

Стратегии управления рисками предполагают разработку мероприятий по минимизации или устранению выявленных рисков. Создание плана управления рисками с назначением ответственных лиц и установлением сроков выполнения помогает обеспечить успешную реализацию проекта даже в условиях неопределённости.

Таким образом, критерии технико-экономического обоснования охватывают широкий спектр аспектов, включая технические, экономические, организационные, социальные и экологические факторы. Комплексный анализ этих критериев позволяет не только оценить финансовую эффективность проекта,

но и учесть все важные аспекты его реализации, что в конечном счёте способствует успешной реализации проектов в условиях конкуренции и неопределённости.

2.4 Выводы по главе 2

1. Разработана методика оценочного аудита производственных процессов для выявления потенциала автоматизации и роботизации. Методика позволяет выявить технологические и вспомогательные операции производственного процесса, которые целесообразно автоматизировать и роботизировать. Также методика позволяет адекватно оценить эффективность автоматизации и роботизации на основе комплекса технико-экономических показателей. На основании экспертной оценки установлено, что методика позволяет снизить затраты на автоматизацию и роботизацию производственных процессов в среднем на 30% за счет рационального подхода к проектированию и подбору программно-аппаратных средств, применяемых в интеллектуальных роботизированных производственных ячейках. Стандартизированы 8 групп и 20 составляющих объектов оценочного аудита потенциала автоматизации и роботизации. К основным объектам относятся: производственные процессы, технологическое оборудование, человеческий капитал, организационная структура, финансовые аспекты, рынки и конкурентная среда, риски и барьеры, экологические аспекты. Разработаны и стандартизированы исходные данные для проведения оценочного аудита. К исходным данным относятся как количественные, так и качественные критерии. Структурирована программа модернизации производственных процессов, содержащая 7 разделов и являющаяся частью методики оценочного аудита потенциала роботизации.

2. Для расчета количественной оценки потенциала автоматизации и роботизации производственных процессов разработана математическая модель. Входные данные для расчета математической модели определены тремя группами

переменных: базовые переменные (до роботизации), параметры роботизации и экономические параметры. Модель оценки потенциала роботизации позволяет учесть все ключевые параметры и принять решение о потенциале роботизации конкретного производственного процесса.

3. Для повышения результативности и эффективности процессов автоматизации и роботизации разработан комплекс показателей технико-экономического обоснования применения автоматизации и роботизации технологических и вспомогательных операций. Комплекс показателей состоит из пяти групп и 17 единичных показателей. При расчете комплекса показателей результативности и эффективности процессов автоматизации и роботизации учитываются факторы, влияющие на мотивацию и удовлетворенность производственного персонала.

ГЛАВА 3. ПОДХОДЫ К СОЗДАНИЮ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ РОБОТИЗИРОВАННЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ЯЧЕЕК

3.1 Структурно-функциональная модель интеллектуальной производственной ячейки

Ключевым трендом в мировой промышленности является переход к «Индустрии 4.0», объединяющей передовые технологии, создавая взаимосвязанную и интеллектуальную экосистему, которая радикально меняет подходы к производству и потреблению машиностроительной продукции [13].

Различают три типа автоматизации и роботизации машиностроительных «дискретных» производств:

1. Локальная (островная) автоматизация и роботизация производственных процессов. Ей подвергаются отдельные производственные участки, на которых проводят автоматизацию отдельных технологических и вспомогательных операций. При этом технология и технологические процессы практически не изменяются.

2. Комплексная автоматизация и роботизация производственных процессов. При этом происходит кардинальная переработка технологий и технологических процессов, внедряются роботизированные комплексы, автоматизированные системы хранения компонентов и комплектующих, роботизированные транспортные системы. Все автоматизированные и роботизированные комплексы интегрируются с автоматизированной системой управления технологическими процессами (далее – АСУ ТП).

3. Системная интеграция автоматизированных и роботизированных комплексов и интеллектуальных компонентов, которая дополняет комплексную автоматизацию в части применения интеллектуальных методов (машинное зрение, ИИ, IoT, AR инструкции и др.). Кроме этого роботизированные комплексы интегрируются с автоматизированными системами управления «нижнего» уровня (АСУ ТП), автоматизированными информационными

системами управления инженерными данными (PDM/ PLM системы) и автоматизированными информационными системами управления предприятием (MES/ ERP систем) [16, 34].

На основании нашего опыта внедрения автоматизированных и роботизированных комплексов сформированы ключевые этапы создания серийного роботизированного производства машиностроительной продукции (дискретного типа производства), приведенные в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Этапы создания серийного роботизированного производства

№ п/п	Этап	Результат
1	Аудит потенциала автоматизации и роботизации производственных процессов	<ul style="list-style-type: none"> - Текущая и целевая карта потока процесса с участками, требующими автоматизации и роботизации. - Текущие и целевые показатели производственного процесса. - Технико-экономическое обоснование автоматизации и роботизации. - Цели, задачи и результаты автоматизации и роботизации
2	Оценка технологичности конструкции под возможности автоматизации и роботизации	<ul style="list-style-type: none"> - Отчет по ограничениям конструкции изделия. - Стандартизированные конструкторские решения для обеспечения возможности автоматизации и роботизации
3	Имитационное моделирование производственных процессов	Имитационная модель производственного процесса для оптимизации производственных показателей
4	Разработка и внедрение технологий автоматизированного и роботизированного производства	<ul style="list-style-type: none"> - Технологические решения, технологии, технологические процессы серийного автоматизированного и роботизированного производства. - САМ программы для моделирования работы роботизированных комплексов. - Цифровые AR инструкции для выполнения технологических и вспомогательных операций производственным персоналом. - Управляющие программы для роботизированных комплексов
5	Адаптация (перепроектирование) конструкции продукции под возможности автоматизации и роботизации	3D-модели и конструкторская документация на изделие

окончание таблицы 3.1

№ п/п	Этап	Результат
6	Подбор технологического оборудования (роботизированных комплексов)	Технологическое оборудование
7	Проектирование и изготовление технологического оснащения для роботизированных комплексов	<ul style="list-style-type: none"> - 3D-модели и конструкторская документация на технологическое оснащение. - Технологическое оснащение
8	Организация интеллектуальных производственных ячеек	<ul style="list-style-type: none"> - Технологическая планировка. - Интегрированные роботизированные комплексы и цифровые компоненты интеллектуальных производственных ячеек. - Программные и аппаратные средства для оснащения интеллектуальной ячейки. - Стандарт организации и функционирования интеллектуальной ячейки
9	Интеграция роботизированных комплексов с автоматизированными системами управления (SCADA системы) «нижнего» уровня и автоматизированными информационными системами управления инженерными данными (PDM системы) и автоматизированными информационными системами управления предприятием (MES/ERP системы) «верхнего» уровня	<ul style="list-style-type: none"> - Программные средства автоматизированных информационных систем управления. - Регламенты бизнес-процессов. - Руководства для выполнения транзакций в автоматизированных информационных системах
10	Проведение мониторинга и предиктивной диагностики состояния роботизированных комплексов	<ul style="list-style-type: none"> - Цифровая платформа для мониторинга и предиктивной диагностики состояния роботизированных комплексов. - Аналитическая статистика по состоянию роботизированных комплексов. - Стандарты технического обслуживания роботизированных комплексов. - Цифровые AR-инструкции для выполнения операций по обслуживанию роботизированных комплексов

При реализации этапов создания серийного роботизированного производства необходимо использовать проверенный инструментарий. Под инструментарием понимается набор организационно-управленческих и производственно-технологических методик, а также программных средств. Далее приведены примеры применения инструментария создания ценности.

На этапе аудита потенциала роботизации производственных процессов применяются карты потока создания ценности, на которых отражаются ключевые производственные показатели и области для роботизации (рисунок 3.1).

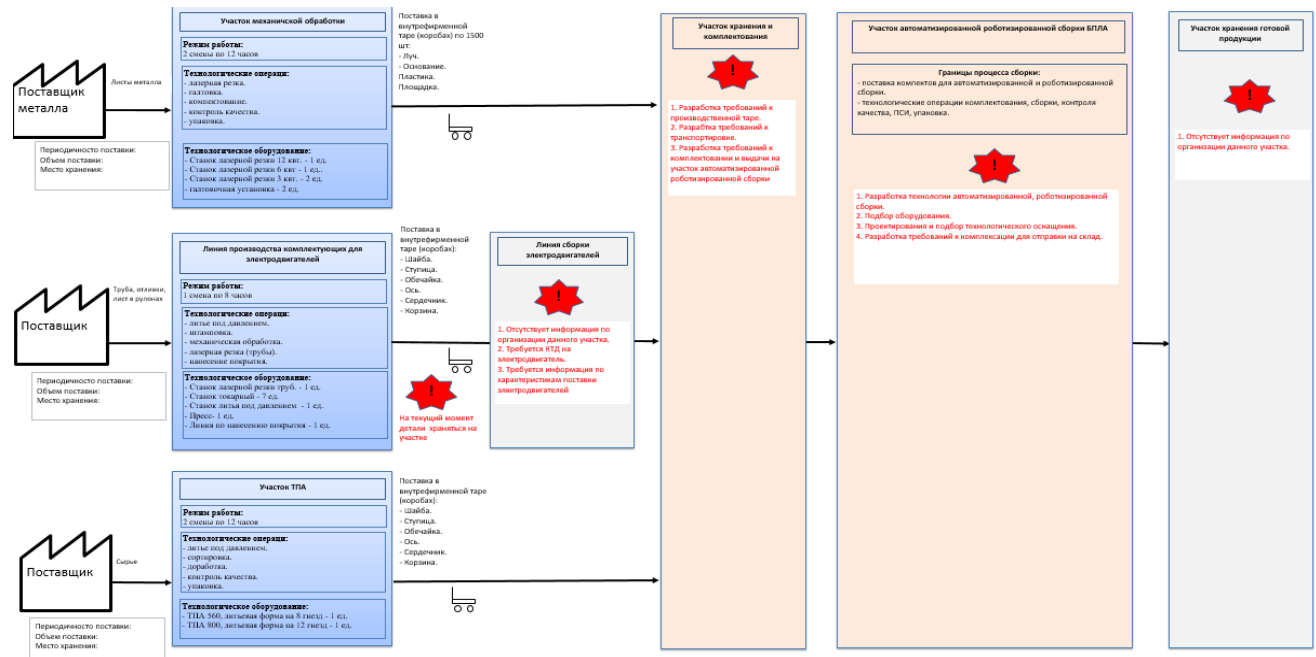


Рисунок 3.1 – Пример карты потока создания ценности

На этапе оценки технологичности конструкции, позволяющей применять технологические операции роботизированного производства, применяется свод требований к конструкции изделия (таблица 3.2).

Таблица 3.2 – Фрагмент свода требований к конструкции изделий, позволяющий применять технологические операции роботизированного производства

Название	Требование
Свод требований к конструкции, позволяющий выполнять роботизированную сборку	<ol style="list-style-type: none"> 1. Следует сокращать число деталей в сборочной единице путём изготовления ряда деталей как единого целого. 2. Детали и их конструктивные элементы должны быть стандартизованы. Следует конструировать группы деталей одного служебного назначения в соответствии с размерным рядом. Детали одной группы различаются только размерами, но имеют одинаковую форму и назначение, будучи составными частями изделий одной гаммы.

окончание таблицы 3.2

Название	Требование
	<p>3. Детали не должны сцепляться друг с другом в процессе хранения, перемещения и подачи на сборочную позицию. Сцепление деталей в бункерах, лотках, магазинах может быть вызвано наличием заусенцев и облоя.</p> <p>4. Детали для удобства ориентации должны быть асимметричными или существенно асимметричными.</p> <p>5. Детали должны иметь заходные фаски. Фаски, как было показано, значительно расширяют допуск отклонения расположения поверхностей или осей устанавливаемой и базовой деталей перед их сборкой. Наличие фасок значительно облегчает попадание в резьбу при свинчивании деталей вручную.</p> <p>6. Детали должны иметь поверхности, удобные для захвата рабочими органами сборочного автомата. Эти поверхности должны иметь достаточно малые отклонения расположения относительно вспомогательных баз для базирующей детали и основных баз для устанавливаемой</p>

На этапе имитационного моделирования применяются специализированные программные средства имитационного моделирования производственных процессов, такие как R-Pro и Anylogic [17, 69-70]. На рисунке 3.2 приведена визуальная модель производственного процесса в среде R-Pro.

На этапе разработки технологии серийного роботизированного производства применяют САМ-системы для разработки управляющих программ (программирования) роботизированных комплексов (рисунок 3.3).

Для выполнения технологических и вспомогательных операций, выполняемых производственным персоналом, применяются цифровые AR-инструкции, позволяющие применять технологии дополненной реальности (рисунок 3.4).

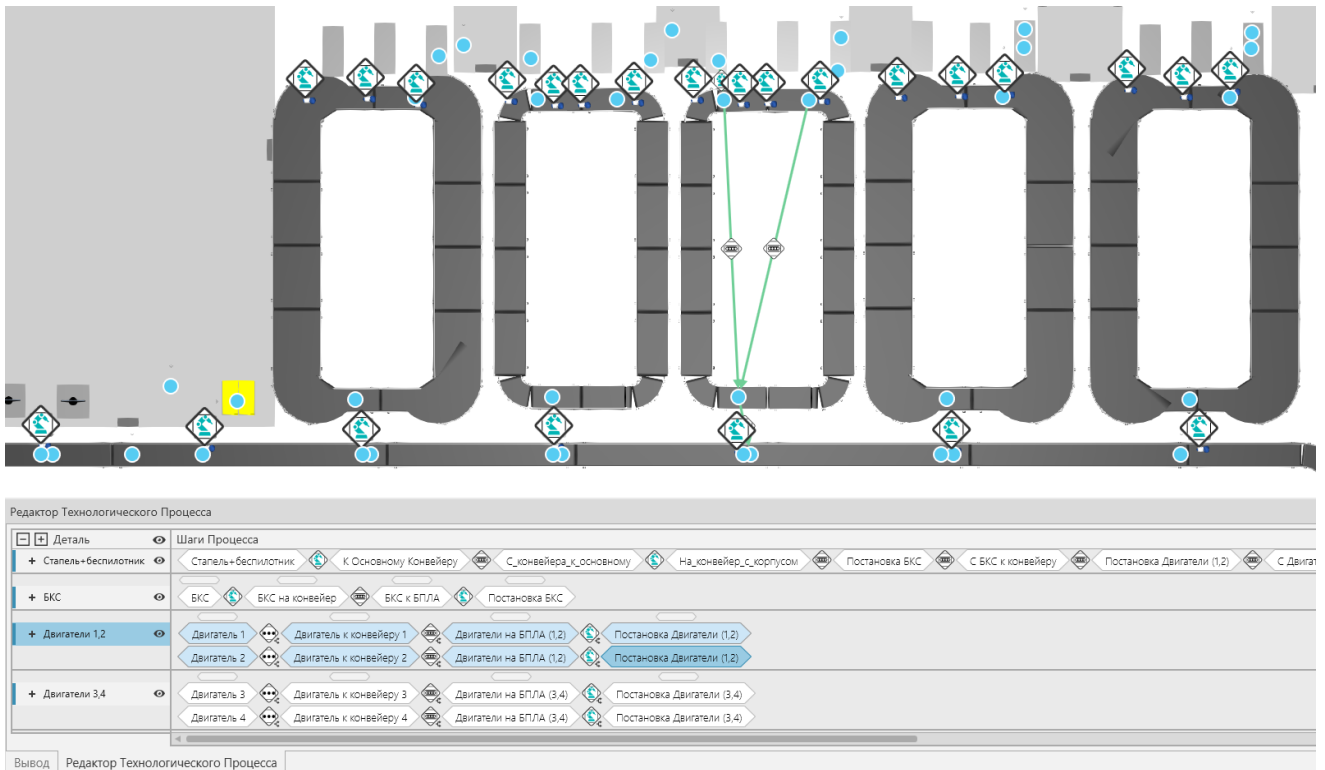


Рисунок 3.2 – Визуальная модель производственного процесса

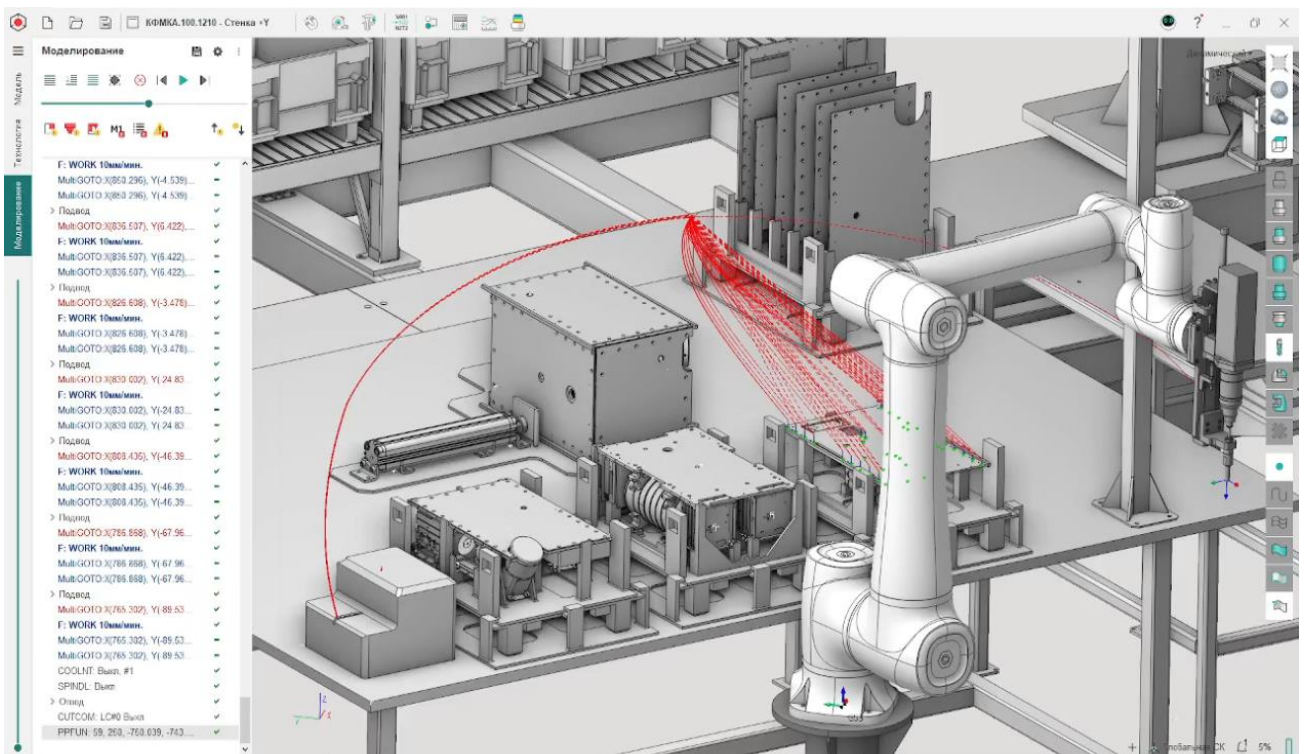


Рисунок 3.3 – Программный продукт SptutCAM для программирования роботизированных комплексов

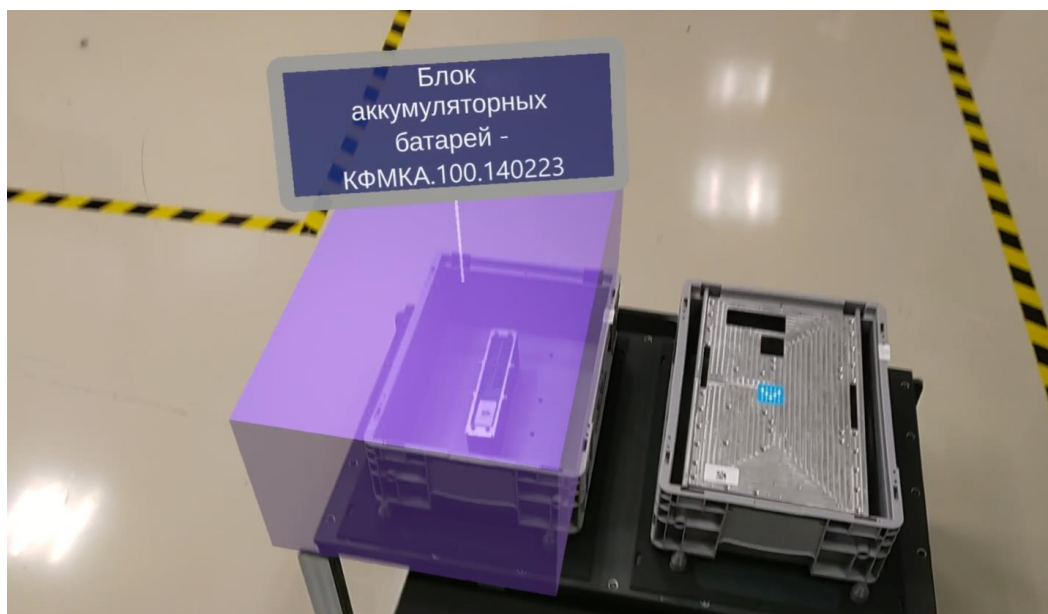


Рисунок 3.4 – Цифровые AR-технологические инструкции для производственного персонала

На этапе адаптации конструкции под возможности автоматизации и роботизации проводятся проектно-конструкторские решения по доработке интерфейсов компонентов, такие как крепежные элементы, формы корпусов компонентов и др.

На этапе подбора технологического оснащения проводится проектирование, производство и закупка технологического оборудования, технологической оснастки и вспомогательного оснащения [119]. С развитием производства роботизированных комплексов все больше в технологии серийного машиностроительного производства внедряются промышленные и коллаборативные роботы, заменяя труд производственного персонала. Роботизированные комплексы становятся все более доступнее, в том числе из-за снижения стоимости их производства и системной интеграции.

В таблице 3.3 приведены основные виды роботов, используемых при выполнении технологических и вспомогательных операций.

Таблица 3.3 – Основные виды роботов

№ п/п	Вид	Описание
1	<p>Роботы-паллетайзеры</p> 	<p>Автоматизированные устройства, предназначенные для укладки товаров на поддоны. Такие роботы могут быть оснащены различными манипуляторами, позволяющими обрабатывать товары разных форматов и размеров. Системы управления позволяют программировать укладку в соответствии с заданными схемами, что делает их гибкими в использовании. Роботы-паллетайзеры также оборудованы датчиками и камерами для контроля качества и точности укладки. В результате они находят широкое применение в различных отраслях, включая пищевую, химическую и фармацевтическую промышленность</p>
2	<p>Шарнирно-сочлененные роботы</p> 	<p>Шарнирно-сочлененные роботы являются одними из самых универсальных и широко используются на сборочных линиях. Они также оснащены вращающимися шарнирами, которые обеспечивают высокую степень гибкости, что позволяет им легко работать в ограниченном пространстве. Они также обычно используются для сварки, покраски и погрузочно-разгрузочных работ. ФанукRobots, ведущий бренд на рынке промышленной робототехники, предлагает широкий ассортимент шарнирных роботов, подходящих для различных областей применения на сборочных линиях</p>
3	<p>SCARA роботы</p> 	<p>Роботы SCARA (Selective Compliance Articulated Robot Arm) предназначены для выполнения высокоскоростных повторяющихся задач, требующих точных и быстрых движений. Эти роботы обычно используются на сборочных линиях электроники, где они отлично справляются с операциями захвата и перемещения и другими сложными задачами, связанными с мелкими деталями</p>
4	<p>Декартовы роботы</p>	<p>Декартовы или линейные роботы движутся по трем перпендикулярным осям (X, Y и Z). Они часто используются на сборочных линиях для упаковки, укладки на поддоны и обслуживания машин, где их линейное перемещение и высокая</p>

окончание таблицы 3.3

№ п/п	Вид	Описание
		<p>точность позиционирования являются преимуществом</p>
5	<p>Коллаборативные роботы</p> 	<p>Коллаборативные роботы, или коботы, предназначены для работы вместе с людьми в общем рабочем пространстве. Эти роботы также оснащены передовыми функциями безопасности, которые позволяют им работать рядом с людьми без риска. Коботы все чаще используются на сборочных линиях для задач, требующих человеческого мастерства и роботизированной точности, таких как работа с мелкими деталями или выполнение задач точной сборки</p>
6	<p>Дельта-роботы</p> 	<p>Дельта-роботы, названные так из-за своей треугольной конфигурации, известны своей высокой скоростью и точностью. Эти роботы часто используются на сборочных линиях для высокоскоростных операций по захвату и перемещению, упаковке и других задач, требующих быстрых и точных перемещений в пределах определенной рабочей зоны</p>

Для эффективного применения промышленных и коллаборативных роботов необходимо создать соответствующую экосистему на производственном участке. Роботизированные комплексы должны быть интегрированы в АСУ ТП и дополняться другими программно-аппаратными средствами производства:

машинное зрение, «умный» склад, автоматизированная система идентификации и прослеживаемости и др.

На этапе проектирования и изготовления технологического оснащения происходит моделирование и разработка конструкторской документации на технологическое оснащение [15,37, 52].

На этапе организации интеллектуальных роботизированных производственных ячеек проводится интеграция всех компонентов в единое целое, что позволит создать интеллектуальную производственную ячейку. Интеллектуальная роботизированная производственная ячейка (далее – ИРПЯ) – это производственный участок, обладающий всеми характеристиками киберфизической производственной системы, являющийся базовой структурной единицей производственного подразделения (цеха) машиностроительного производства, в которой выполняются технологические и вспомогательные операции.

ИРПЯ – ключевая функциональная производственная единица, в состав которой входит автоматизированное производственное оборудование, роботизированные комплексы, средства автоматизации измерения и контроля качества, средства машинного зрения, средства дополненной реальности для обеспечения гибкости и производительности производственных процессов, а также качества выпускаемой продукции [67, 114].

ИРПЯ – это интегрированная система производственных элементов, которая объединяет производственные процессы и интеллектуальные технологии и цифровые компоненты для повышения производительности производственных процессов и качества выпускаемой продукции.

В таблице 3.4 приведены обобщенные элементы интеллектуальной производственной ячейки, характерные для всех создаваемых ИРПЯ.

Интеграция роботизированных комплексов с автоматизированными системами управления (SCADA-системы) «нижнего» уровня проводится на основе программных продуктов, таких как Master SCADA или Simple Scada и др.






Таблица 3.4 – Элементы интеллектуальной роботизированной производственной ячейки

№ п/п	Наименование	Назначение
1	Роботизированные комплекты и их технологическое оснащение	Для выполнения наиболее ответственных, повторяемых и высокотехнологичных технологических операций. Роботизированные комплексы предназначены для минимизации влияния человеческого фактора
2	Автоматизированные системы хранения компонентов и материалов	Для планирования пополнения, организации хранения, комплектования и выдачи компонентов и материалов в производство
3	Автоматизированные системы хранения инструмента и оснастки	Для планирования пополнения, организации хранения, комплектования и выдачи инструмента и оснастки
4	Системы учета идентификации и прослеживаемости	Для регистрации, учета, идентификации и прослеживаемости поступающих ДСЕ
5	Автоматизированные транспортные системы	Для транспортировки компонентов и материалов между производственными ячейками и оптимизации логистических затрат
6	Системы машинного зрения	Для контроля качества сборочных операций и обеспечения точности позиционирования роботов манипуляторов
7	Система автоматизированного контактного и бесконтактного контроля геометрических параметров ДСЕ	Для обеспечения точности и скорости при контроле качества ДСЕ
8	Цифровые графические инструкции с применением технологии дополненной реальности	Для помощи специалистам при выполнении технологических и вспомогательных операций
9	Автоматизированная система управления технологическими процессами SCADA	Для управления параметрами технологических процессов
10	Система мониторинга и предиктивной диагностики производственных процессов и технологического оборудования	Для снижения издержек при ремонте и обслуживания технологического оборудования






Интеграция автоматизированных систем управления (SCADA-системы) «нижнего» уровня с автоматизированными информационными системами (ERP/MES) «верхнего» уровня проводится на основе программных продуктов 1С, SAP и др. [93].

В таблице 3.5 приведены элементы интеллектуальной производственной ячейки, на которой выполняются операции по механической обработке ДСЕ.

Таблица 3.5 – Элементы интеллектуальной производственной ячейки по механической обработке

Элемент	Визуализация	Описание
Станция обработки детали		Выполняет все манипуляции по обработке детали (фрезерование, шлифование, зенкерование и др.)
Робот-манипулятор		Производит все транспортировочные действия детали в комплекс и из комплекса на тележку
Тумба со встроенным шкафом управления		Отвечает за работоспособность манипулятора
Кнопочный пост		Является стоп-краном для всей ячейки, также можно запустить или поставить на паузу всю ячейку в ручном управлении
Система индикации работы комплекса		Отвечает за систему распознавания действий манипулятора в пространстве за счет начальных координат

продолжение таблицы 3.5

Элемент	Визуализация	Описание
Комплект для открытия дверцы станка		Система открытия дверей
Два двухпальцевых пневматических захвата с системой обдува патрона		Зажимает деталь (имеет несколько модификаций)
Пульт управления роботом (доступен в качестве дополнительной опции)		С помощью пульта управления можно быстро скоординировать действия манипулятора
Машинное зрение		Отвечает за достоверность в проделанной работе и фото контроль
Робот-тележка		Производит перемещение детали на пункт выдачи
Система базирования детали на техническом столе		Фиксирует деталь на техническом столе обработки с помощью пневмодержателей
Измерительные приборы		Производит измерительные действия после обработки детали

окончание таблицы 3.5

Элемент	Визуализация	Описание
Автоматизированные системы хранения инструментов		Планирование пополнения, хранение, учет и выдача инструмента и оснастки

Для организации эффективной работы интеллектуальной производственной ячейки нами разработана структурно-функциональная модель (рисунок 3.5), представляющая собой совокупность цифровых и физических компонентов и процессов, которая включает различные элементы и их взаимосвязи, обеспечивающие функционирование интеллектуальной производственной ячейки [105]. В модели выделяются уровни управления, контроля и взаимодействия между элементами системы. Это позволяет оптимизировать производственные процессы и повысить эффективность работы ячейки [20-21, 31, 46-49].

Данная модель демонстрирует организацию производственных процессов с использованием интеллектуальных технологий для повышения эффективности, производительности и гибкости производства. В модели выделяются ключевые элементы, такие как информационные системы, автоматизированные рабочие места и производственные модули, которые взаимодействуют между собой для выполнения технологических и вспомогательных операций. Интеллектуальные технологии обеспечивают оптимизацию производственных процессов, мониторинг состояния оборудования и управление производственными ресурсами в реальном времени. Модель также включает механизмы обратной

связи и адаптации, позволяющие системе адаптироваться к изменяющимся условиям и требованиям производства.

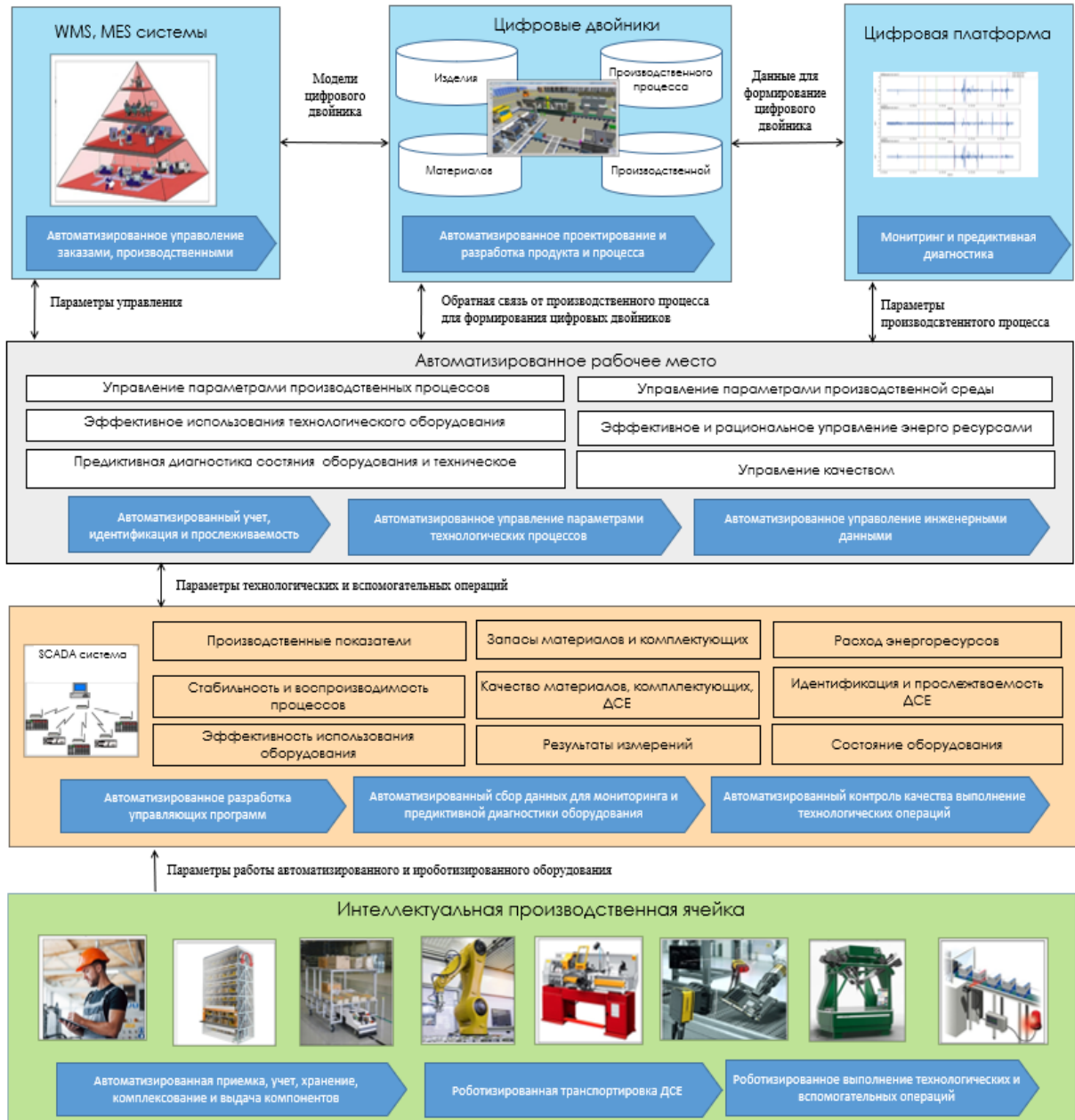


Рисунок 3.5 – Структурно-функциональная модель интеллектуальной производственной ячейки

Использование интеллектуальных производственных ячеек приводит к появлению значительных преимуществ, приведенных в таблице 3.6.

Таблица 3.6 – Преимущества применения интеллектуальных производственных ячеек

№ п/п	Преимущества	Описание
1	Повышение эффективности	Автоматизация рутинных операций и использование рациональных операций позволяют значительно сократить время выполнения задач и повысить общую производительность
2	Снижение затрат	Оптимизация производственных процессов приводит к уменьшению издержек за счет более рационального использования ресурсов, таких как материалы, энергия и трудовые ресурсы
3	Улучшение качества продукции	Системы мониторинга и контроля качества в режиме реального времени помогают оперативно выявлять дефекты и устранять их причины, повышая надежность и качество выпускаемой продукции
4	Гибкость и адаптация	Интеллектуальные системы способны быстро реагировать на изменения требований рынка или производственных условий, позволяя компании быстрее внедрять новые продукты и процессы
5	Безопасность труда	Использование роботизированных комплексов снижает риски охраны труда и безопасности работы работников, минимизируя воздействие опасных факторов на производстве
6	Анализ данных и прогнозирование	Сбор и анализ больших объемов данных позволяет предсказывать возможные сбои оборудования, предотвращать аварии и планировать профилактические мероприятия
7	Интеграция с другими системами	Интеллектуальные технологии легко интегрируются с существующими ИТ-инфраструктурами предприятия, обеспечивая единую систему управления производственными процессами
8	Экологическая устойчивость	Оптимизированное использование ресурсов способствует снижению негативного воздействия на окружающую среду, что соответствует современным экологическим стандартам
9	Конкурентоспособность	Компании, внедряющие передовые технологии, получают конкурентные преимущества на рынке, улучшая свою репутацию и привлекая новых клиентов

Таким образом, применение, создание и внедрение интеллектуальных производственных ячеек ведет к созданию «умных» производств, способных эффективно решать производственные задачи, обеспечивать устойчивое развитие и оставаться конкурентоспособными в долгосрочной перспективе. В заключении стоит отметить, что применение структурно-функциональной модели

обеспечивает ряд значимых преимуществ, которые способствуют повышению эффективности производственных процессов и конкурентоспособности предприятия [58, 84, 89].

3.2 Оценка и анализ рисков появления потенциальных несоответствий и отказов функционирования интеллектуальных производственных ячеек

Ключевым этапом создания и функционирования интеллектуальных производственных ячеек является анализ рисков появления отказов и несоответствий.

Базовой методикой анализа рисков является FMEA (Failure Mode and Effects Analysis) – анализ видов и последствий потенциальных отказов (дефектов), систематический подход к выявлению возможных сбоев в работе ячейки и оценке их влияния на конечный результат. Этот метод позволяет заранее идентифицировать проблемы и разработать меры для их предотвращения, что существенно повышает качество и надежность разрабатываемого изделия или процесса [11-12].

Критериями проведения анализа видов и последствий потенциальных отказов являются ясность, правдивость и точность, т.е. отказы и последствия потенциальных отказов должны быть описаны в технически точных, специфических терминах, доступных специалисту для оценки причин и последствий и быть разумными. FMEA представлен семью этапами, отображенными в таблице 3.7.

Таблица 3.7 – Этапы проведения FMEA

№	Описание
Этап 1	Определение содержания и планирование проекта
Этап 2	Структурный анализ
Этап 3	Функциональный анализ
Этап 4	Анализ характеристик отказов
Этап 5	Анализ рисков
Этап 6	Оптимизация
Этап 7	Документирование

В диссертационном исследовании применен классический подход к проведению FMEA с учетом всех этапов.

Объектом исследования являются типовые сборочные процессы, выполняемые с применением роботизированных комплексов и цифровых технологий, применяемых при функционировании интеллектуальной производственной ячейки.

В соответствии с методикой FMEA, оценка риска может быть проведена либо по уровню риска (в соответствии с 5-й редакцией метода), либо по приоритетному числу риска (далее – ПЧР). Для анализа и оценки рисков реализации производственных процессов в ИРПЯ целесообразнее применять расчет ПЧР, так как значимость отказов элементов ИРПЯ примерно сопоставима у разных компонентов [18, 26, 97].

Для количественной оценки рисков в диссертационном исследовании применена математическая модель расчета уровня риска (приоритетного числа риска):

$$\text{ПЧР} = S \times O \times D, \quad (3.1)$$

где S – значимость влияния риска на производственный процесс; O – вероятность возникновения причины риска D – вероятность обнаружения причины риска.

При анализе рисков ИРПЯ все причины отказов делятся на аппаратные и программные.

Модель оценки рисков должна быть многокритериальной и учитывать весовые коэффициенты для разных типов компонентов.

Математическая модель многокритериальной оценки рисков выглядит следующим образом:

$$\text{ПЧР}_{ij} = S_{ij} \times O_{ij} \times D_{ij}, \quad (3.2)$$

где i – единичный отказ; j – единичная причина отказа.

Управляемые параметры рисков оцениваются с учетом специфики:

S_{ij} – оценивается не только как ущерб оборудованию/продукту, но и простои ячейки, нарушение логистики всего производства, риски кибербезопасности (если риск связан с ПО).

O_{ij} – для аппаратных частей на основе статистики МТВФ (Mean Time Between Failures). Для ПО/ИИ на основе оценки сложности кода, частоты обновлений, качества обучающих данных.

D_{ij} – для классических отказов эффективность встроенного диагностирования (BMS). Для ИИ-моделей возможность объяснимости (XAI) ее решений и мониторинг «уверенности» модели в предсказании.

При необходимости ранжировать значимость рисков и причин их появления можно использовать модель расчета уровня риска с учетом весовых коэффициентов. Для этого необходимо рассчитать общий взвешенный риск, который можно рассчитать по формуле (3.3):

$$\text{ОВР} = \frac{\sum(wk \times \text{ПЧР}_{ij})}{\sum wk}, \quad (3.3)$$

где k – все оценки отказов; wk – вес критичности компонента, к которому относится отказ k .

Интеллектуальная ячейка может накапливать данные по возникающим рискам и отказам. Модель оценки рисков может быть динамической:

$$\text{ДЧВ}(t) = \text{СЧВ}_0 * e^{(-\lambda * N(t))}, \quad (3.4)$$

где ДЧВ (t) – динамическая частота возникновения в момент времени t ; λ – коэффициент обучения системы (скорость устранения причин); $N(t)$ – количество зафиксированных и успешно устраненных инцидентов данного типа к моменту t .

Предложенные модели расширяют классическую экспертную оценку FMEA для киберфизических производственных систем. Ее ключевые особенности:

- учет «интеллектуальной» составляющей, позволяющей оценивать риски, связанные с ошибками ИИ, качеством данных, сетевыми задержками;
- возможность весового подхода и определение критичности компонентов;

- динамичность и возможность корректировки оценок по мере обучения и адаптации системы;
- комплексность и охват всей цепочки: от физического износа до ошибок в алгоритмах.

Предложенная модель позволяет системно выявлять и снижать риски, обеспечивая надежную и устойчивую работу интеллектуальной роботизированной ячейки [24, 30].

Компоненты ячейки приведены в таблице 3.8. Для типовых сборочных процессов определены элементы ячейки и проведен функциональный анализ (таблица 3.9).

Таблица 3.8 – Компоненты интеллектуальной производственной ячейки

Номер	Компоненты интеллектуальной производственной ячейки
1	Роботизированный комплекс
2	Рабочий стол для выполнения сборочных операций
3	Система хранения и логистики
4	Автоматизированная система управления (АСУ)
5	Инфраструктура и системы обеспечения
6	Человеческий фактор (персонал)

Таблица 3.9 – Функциональный анализ элементов типового сборочного процесса, реализуемого в интеллектуальной производственной ячейке

Компоненты интеллектуальной производственной ячейки	Функция компонента
1.1. Робот-манипулятор (механика)	Точное позиционирование и выполнение технологических операций (сверление, нанесение клея, установка компонентов)
1.2. Электрическая система робота	Обеспечение энергией и управлением приводами, контроллерами, датчиками
1.6. Система технического зрения (CV)	Распознавание деталей, контроль их наличия/положения, проверка качества операций (наличие клея, правильность установки)
1.7. Система безопасности (лазерные сканеры, коврики, световые завесы)	Обнаружение проникновения персонала в опасную зону и немедленная остановка оборудования
1.8. Захваты (гребенки, пневмоприсоски, механические)	Надёжный захват, удержание и точное позиционирование детали
1.9. Система смены инструмента (захватов)	Автоматическая быстрая смена инструмента для выполнения различных операций

продолжение таблицы 3.9

Компоненты интеллектуальной производственной ячейки	Функция компонента
1.10. Вендинговый шкаф (шкаф хранения оснастки)	Адресное, защищённое хранение и выдача сменных захватов, адаптеров и специализированного инструмента по запросу системы
1.11. Система дозации и нанесения клея/герметика	Точное дозирование, смешивание компонентов (при необходимости) и автоматическое нанесение клеящих/герметизирующих составов на заданную траекторию
1.12. Система пыле- и стружкоудаления	Локальный отсос аэрозолей, пыли (от композитов) и стружки (от механической обработки) для обеспечения чистоты сборки, пожаробезопасности и сохранности оборудования
2.1. Стол для размещения технологической оснастки	Обеспечение стабильной, виброустойчивой платформы для точной установки сборочной оснастки
2.2. Магазин-накопитель (питатель)	Предоставление компонентов в заданной ориентации для надёжного захвата роботом
2.3. Сборочная оснастка (кондукторы, шаблоны)	Точное базирование и фиксация корпусных элементов во время операций
2.4. Система контрольного взвешивания (встроенные весы)	Послеоперационный контроль массы узла или изделия для выявления отсутствующих или лишних компонентов, косвенный контроль качества сборки
2.5. Система маркировки (лазерная/точечно-ударная)	Нанесение постоянной маркировки (серийный номер, QR-код, дата) на корпус БПЛА для обеспечения трассируемости и учёта
3.1. Стеллажная система	Адресное хранение компонентов и комплектующих с обеспечением сохранности и лёгкости доступа для автоматике
3.2. Роботизированная тележка (AGV/AMR)	Автономное комплектование заказов на сборку и транспортировка компонентов к ячейке
3.3. Ограждение системы хранения	Физическое ограничение доступа персонала в зону движения AGV и работы штабелёров
3.4. Датчики движения (в зоне хранения/логистики)	Обнаружение присутствия человека в автоматизированной зоне для снижения скорости/остановки AGV
3.5. Система штрих-кодирования/RFID	Однозначная идентификация грузовых единиц, паллет, коробов
4.1. SCADA-система (диспетчеризация)	Визуализация техпроцесса, оперативное управление, аларминг, сбор данных
4.2. APM оператора	Удобный интерфейс для взаимодействия с ячейкой: запуск, остановка, ввод параметров
4.3. MES-система (управление производством)	Управление производственными заказами, диспетчеризация, сбор данных об эффективности (OEE), управление материалами
4.4. PDM-система (управление данными об изделии)	Предоставление актуальных конструкторско-технологических данных (3D-модели, чертежи, спецификации, программы для ЧПУ) в MES и на уровень автоматизации

окончание таблицы 3.9

Компоненты интеллектуальной производственной ячейки	Функция компонента
5.1. Система бесперебойного питания (ИБП) и стабилизации	Защита чувствительного электронного оборудования (ПЛК, серверы, системы зрения) от скачков напряжения и обеспечение времени для корректного останова при полном отключении сети
5.2. Система контроля микроклимата и вентиляции	Поддержание стабильной температуры, влажности и чистоты воздуха в зоне прецизионной сборки для обеспечения технологических параметров и сохранности компонентов
5.3. Промышленная сетевая инфраструктура	Обеспечение высоконадёжной, детерминированной и безопасной связи между всеми компонентами ячейки (Ethernet, PROFINET, EtherCAT)
6.1. Оператор-наладчик ячейки	Наблюдение за работой, оперативное реагирование на сбой и аварии, проведение переналадки, выполнение планового ТО, ввод компонентов вручную при необходимости

В диссертационном исследовании в качестве примера анализировался процесс сборки изделия (сборка БПЛА). Функция процесса: сборка корпусных элементов и электронных компонентов для обеспечения тактико-технических показателей.

Для всех элементов интеллектуальной производственной ячейки определены риски и отказы.

Фрагмент перечня рисков и отказов для ключевого элемента ячейки роботизированного комплекса приведен в таблице 3.10 [35, 56, 79].

Таблица 3.10 – Перечень рисков и отказов роботизированного комплекса

Компоненты	Функция компонента	Риск (отказ / опасное событие)
1.1. Робот-манипулятор (механика)	Точное позиционирование и выполнение технологических операций (сверление, нанесение клея, установка компонентов)	1. Механический износ / заклинивание приводов. Снижение точности, полная остановка
		2. Столкновение с препятствием (оборудованием, деталью). Поломка инструмента, робота, повреждение изделия
		3. Потеря калибровки. Смещение нулевых точек, брак сборки
		4. Выход за пределы рабочей зоны. Механическое повреждение конструкций ячейки

продолжение таблицы 3.10

Компоненты	Функция компонента	Риск (отказ / опасное событие)
		5. Отказ датчиков обратной связи (энкодеров). Неконтролируемое движение, опасность для персонала
1.2. Электрическая система робота	Обеспечение энергией и управлением приводами, контроллерами, датчиками	1. КЗ или обрыв в силовой цепи. Остановка, возможное возгорание
		2. Перегрузка по току. Перегрев, повреждение двигателей/контроллеров
		3. Скачки/пропадание напряжения. Некорректная работа, потеря данных, внезапная остановка
		4. Отказ системы аварийного останова (E-stop). Невозможность быстро остановить робота в аварийной ситуации
		5. Электромагнитные помехи. Сбои в работе датчиков и контроллеров
1.3. Пневмосистема робота	Привод захватов, вспомогательных механизмов, обдув	1. Утечка сжатого воздуха. Падение давления, потеря усилия захвата
		2. Загрязнение воздуха (вода, масло). Засорение/отказ пневмоцилиндров и клапанов
		3. Отказ соленоидного клапана. Невозможность открыть/закрыть захват
		4. Разрыв воздушного шланга. Резкое падение давления, неконтролируемое движение механизмов
		5. Образование конденсата и обледенение в магистралях при работе в неотапливаемом помещении или при интенсивном расходе. Закупорка линии, отказ клапанов и цилиндров, коррозия
1.4. Программируемый контроллер (PLC)	Логическое управление последовательностью операций, обработка сигналов от датчиков, взаимодействие с системами верхнего уровня	1. Сбой программы/зависание. Остановка всего процесса
		2. Потеря связи с полевыми устройствами (датчики, приводы). Некорректное управление
		3. Неверная логика программы (ошибка проектирования). Технологический брак, опасные ситуации
		4. Сброс питания/потеря данных. Обнуление программы или параметров
		5. Перегрев или критическое загрязнение электронных компонентов контроллера. Некорректная работа, частые сбои, выход из строя процессора или модулей ввода-вывода
1.5. Система управления	Преобразование команд в траектории, управление	1. Сбой/зависание операционной системы. Потеря управления движением

продолжение таблицы 3.10

Компоненты	Функция компонента	Риск (отказ / опасное событие)
роботизированным комплексом (ЧПУ робота)	сервоприводами, интерполяция движения	2. Ошибка в постпроцессоре/ программе УП. Движение по неверной траектории, столкновение
		3. Отказ сервопривода. Робот «замирает» или движется рывками
		4. Несанкционированный доступ/вирусная атака. Изменение программ, остановка
		5. Потеря или рассинхронизация системного времени / сбой синхронизации с другими компонентами ячейки (PLC или системой зрения). Некорректное выполнение операций «по времени» или «по событию», приводящее к пропуску шагов или попытке выполнить действие над отсутствующим объектом
1.6. Система технического зрения (CV)	Распознавание деталей, контроль их наличия/положения, проверка качества операций (наличие клея, правильность установки)	1. Сбой/зависание ПО обработки изображений. Остановка цикла или работа вслепую
		2. Изменение условий освещения. Ложные срабатывания или пропуск дефектов
		3. Загрязнение/повреждение камеры или объектива. Нечитаемые изображения
		4. Смещение/вибрация камеры. Потеря калибровки, ошибки позиционирования
		5. Недостаточная производительность ВК. Задержки, торможение процесса
1.7. Система безопасности (лазерные сканеры, коврики, световые завесы)	Обнаружение проникновения персонала в опасную зону и немедленная остановка оборудования	1. Ложное срабатывание. Необоснованные остановки, потеря производительности
		2. Несрабатывание (пропуск вторжения). Серьёзная опасность для жизни
		3. Загрязнение/повреждение чувствительного элемента. Потеря функциональности
		4. Обход/блокировка персоналом. Намеренное отключение для «удобства»
		5. Некорректная конфигурация или калибровка защитных полей/зон («мёртвые зоны» у сканеров, высокое расположение световой завесы). Наличие областей, где присутствие человека не обнаруживается, что создаёт скрытую лазейку для проникновения в опасную зону без остановки оборудования
1.8. Захваты (гребенки, пневмоприсоски, механические)	Надёжный захват, удержание и точное позиционирование детали	1. Износ/загрязнение рабочих поверхностей. Проскальзывание детали, падение

продолжение таблицы 3.10

Компоненты	Функция компонента	Риск (отказ / опасное событие)
		<p>2. Неверный выбор/настройка захвата для детали. Повреждение хрупких компонентов</p> <p>3. Отказ датчика наличия детали в захвате. Работа «вхолостую» или попытка взять несуществующую деталь</p> <p>4. Механическая поломка (трещина, изгиб). Падение детали, возможное столкновение</p> <p>5. Потеря усилия захвата из-за внешних факторов: вибрации всей ячейки, удар сопредельной деталью, резкое изменение ориентации/ ускорения при манипуляции. Непреднамеренное высвобождение детали в процессе её переноса или установки</p>
1.9. Система смены инструмента (захватов)	Автоматическая быстрая смена инструмента для выполнения различных операций	<p>1. Неточность стыковки (потеря калибровки). Люфт инструмента, брак операций</p> <p>2. Загрязнение/повреждение контактных поверхностей (пины). Плохой контакт, потеря пневматики/сигнала</p> <p>3. Отказ фиксирующего механизма (защелки). Выпадение инструмента во время движения</p> <p>4. Ошибка в выборе инструмента программой. Применение неверного инструмента, брак/поломка</p> <p>5. Неисправность или занятость ячейки хранения инструмента (вендингового шкафа), где находится требуемый адаптер. Невозможность произвести смену, остановка процесса ожиданием</p>
1.10. Вендинговый шкаф (шкаф хранения оснастки)	Адресное, защищённое хранение и выдача сменных захватов, адаптеров и специализированного инструмента по запросу системы	<p>1. Отказ механизма выдачи/приёмки. Застревание инструмента, остановка процесса</p> <p>2. Сбой системы идентификации (RFID/штрих-код). Выдача неверного инструмента</p> <p>3. Несанкционированный доступ/изъятие инструмента персоналом. Нарушение логистики, простой</p> <p>4. Переполнение/неправильное размещение ячеек. Механические повреждения инструмента</p> <p>5. Потеря связи с головной системой управления (MES/PLC) или сбой внутреннего контроллера шкафа. Невозможность выполнить запрос на выдачу или приёмку, «ослепление» системы</p>

окончание таблицы 3.10

Компоненты	Функция компонента	Риск (отказ / опасное событие)
		учёта
1.11. Система дозации и нанесения клея/герметика	Точное дозирование, смешивание компонентов (при необходимости) и автоматическое нанесение клеящих/герметизирующих составов на заданную траекторию	1. Закупорка/засыхание состава в сопле или смесителе. Прерывание линии нанесения, брак узла
		2. Отклонение в пропорции смешивания двухкомпонентных составов. Неполная полимеризация, потеря прочности соединения
		3. Неисправность датчика давления или расхода. Нанесение недостаточного или избыточного количества клея
		4. Деградация/окончание срока годности клеящего состава. Резкое снижение адгезии после сборки
		5. Загрязнение поверхности детали перед нанесением (масло, пыль). Отсутствие смачивания, непрочное соединение
1.12. Система пыле- и стружкоудаления	Локальный отсос аэрозолей, пыли (от композитов) и стружки (от механической обработки) для обеспечения чистоты сборки, пожаробезопасности и сохранности оборудования	1. Переполнение/засорение фильтров и пылесборника. Резкое падение мощности всасывания
		2. Разрыв или неплотность воздухопроводов. Утечка разрежения, распространение загрязнений по цеху
		3. Искрообразование в системе (при работе с металлом). Пожарная опасность
		4. Повышенный шум и вибрация от вентилятора. Дискомфорт персонала, ослабление креплений
		5. Нарушение работы прецизионного оборудования из-за создаваемого воздушного потока или статического электричества. Сбивание легких деталей со столов, накопление статического заряда на компонентах БПЛА (опасно для электроники), помехи в работе высокочувствительных датчиков (системы технического зрения)

Полный анализ рисков и отказов элементов ячейки с мероприятиями по снижению рисков приведен в Приложении 3.

На основании проведенного анализа и классификации рисков и отказов разработана классификация организационных, технологических и технических

мероприятий по снижению рисков и повышению результативности функционирования производственных процессов (таблица 3.11) [83].

Таблица 3.11 – Классификация организационно-управленческих, конструкторско-технологических и производственно-технических мероприятий по снижению рисков

Группа мероприятий	Мероприятия
Организационно-управленческие	Плановое ППО исполнительных узлов и механизмов роботизированных комплексов. Организационное: регламент чистки объективов. Защитные кожухи для камер. Ежедневный осмотр и очистка. Защитные кожухи. Плановый осмотр и замена расходных элементов (присосок, накладок). Очистка по регламенту. Визуальный осмотр на наличие повреждений. Неразрушающий контроль ответственных деталей
	Регламент уборки рабочей зоны (5S). Очистка перед установкой новой оснастки
	Разработка и соблюдение стандарта на систему крепления для всей оснастки ячейки. Использование столов с модульной системой Т-пазов или предустановленными позиционирующими штифтами. Ведение парка оснастки, соответствующего стандарту
	Регулярные проверки соединений, цепей E-stop (по нормам безопасности), дублирование кнопок. Самодиагностика приводов, горячее резервирование для критичных осей. Регулярные функциональные проверки (раз в смену). Резервирование (коврик + сканер). Регулярная чистка и калибровка патрона и адаптеров. Регулярный осмотр целостности ограждений
	Строгий регламент тестирования и ввода в эксплуатацию новых программ. Верификация логики
	Резервное копирование программы и параметров на внешний носитель, использование EEPROM
	Визуализация траекторий в оффлайн-симуляторе перед загрузкой. Сухой (без инструмента) прогон программ на малой скорости
	Политика информационной безопасности: изоляция сети, запрет съёмных носителей, антивирусы. Инструктаж и контроль дисциплины. Административная ответственность. Ведение журнала отключений
	Резервирование критических инструментов(наличие дублирующего адаптера в другой ячейке или на аварийной стойке). Программная логика обхода (временное использование альтернативного инструмента или пропуск операции с последующим ручным доделыванием). Интеграция состояния шкафа в MES/ SCADA для предиктивного обслуживания и оперативного оповещения о сбое
	Входной контроль качества деталей перед загрузкой в питатель (вт.ч. визуальный с помощью CV). Проектирование и адаптация питателя под конкретную, валидированную номенклатуру. Наличие аварийного

продолжение таблицы 3.11

Группа мероприятий	Мероприятия
	ручного лотка для подачи в случае сбоя автоматике. Чёткое закрепление допусков на детали в ТУ
	Следование стандартам HMI/SCADA (ISA-101) при проектировании мнемосхем. Регулярный пересмотр и актуализация мнемосхем при изменении техпроцесса. Внедрение эффективной системы управления алармами с фильтрацией, приоритизацией и анализом «наводнённости». Периодические тренировки операторов на симуляторе или тестовом стенде для проверки реакции на нештатные ситуации
	Валидация и картографирование защитных полей при вводе в эксплуатацию и после любых перемещений оборудования с помощью тестового объекта (манекена, цилиндра). Строгое следование стандартам безопасности при проектировании и настройке. Периодический аудит конфигурации систем безопасности
Конструкторско-технологические	Регламентная периодическая калибровка с использованием эталонов. Датчики контроля позиции. Регламент чистки объективов. Защитные кожухи для камер
	Использование watchdog-таймера. Регулярный контроль «живимости» сигналов
	Установка аппаратных и программных концевиков, «мягких» границ в ПО
	Резервирование критических датчиков. Самодиагностика при запуске. Настройка синхронизации по промышленному протоколу или через сигналы «Готов» / «Завершено» между системами. Регулярная проверка логов на предмет временных аномалий. Резервирование источников тактовой частоты. Резервирование вычислительных мощностей, оптимизация алгоритмов
	Качественная прокладка сетей, использование промышленных коммутаторов. Жёсткое крепление, периодическая проверка калибровки по эталонным меткам
	Установка контроллера в защищённый шкаф с принудительной вентиляцией и термостатом. Регулярная очистка воздушных фильтров шкафа и радиаторов контроллера от пыли. Монтаж датчиков температуры внутри шкафа с сигнализацией в SCADA при превышении порога
	Проектирование и тестирование захватов под конкретную номенклатуру. Использование адаптивных/универсальных захватов. Расчёт и тестирование захвата с запасом по усилию удержания (коэффициент безопасности 2-4) с учётом максимальных инерционных нагрузок. Использование вакуумных датчиков с аналоговым выходом для непрерывного контроля разрежения на присосках. Амортизация и виброизоляция критического оборудования ячейки. Программное снижение скорости и ускорений робота при переносе особо ответственных или крупногабаритных деталей
	Проектирование ограждения с использованием прозрачных/сетчатых панелей для обеспечения обзора. Стратегическое размещение камер

окончание таблицы 3.11

Группа мероприятий	Мероприятия
	<p>видеонаблюдения внутри зоны с выводом изображения на монитор оператора. Соблюдение безопасных расстояний и конструкции ограждений</p> <p>Установка аварийных кнопок останова с внутренней и внешней стороны ограждения, заблокированных с системой управления AGV и конвейерами. Монтаж световой и звуковой сигнализации, активируемой при открытии дверей/турникетов. Регулярные функциональные проверки цепи безопасности</p>
Производственно-технические	<p>Чёткое зонирование, проверка свободной зоны перед запуском цикла. Программные ограничения скорости вблизи объектов. Установка рабочих столов в зоне с контролируемым температурным режимом. Использование материалов с низким коэффициентом теплового расширения (специальные композиты) для ответственных столов. Периодическая калибровка точных столов в рабочих температурных условиях</p> <p>Использование кабелей в защитной гофре, регулярная инспекция изоляции. Установка автоматических выключателей и предохранителей. Использование армированных шлангов, их правильная укладка в кабель-каналы, защита от перетирания</p> <p>Использование термодатчиков на двигателях, защита от перегрузки в ЧПУ/приводах</p> <p>Использование стабилизаторов напряжения, ИБП для системы управления</p> <p>Экранирование кабелей, правильное заземление, фильтры помех. Правильная настройка зон, защита от случайных помех (пыль, насекомые)</p> <p>Защитные колпачки на неиспользуемых адаптерах. Очистка перед установкой</p> <p>Установка фильтров-влагоотделителей, их регулярная очистка. Установка адсорбционных осушителей сразу после компрессора. Теплоизоляция критических участков магистралей. Регламентный слив конденсата из ресиверов и влагоотделителей</p> <p>Использование качественных клапанов, наличие резервных клапанов на критических операциях</p> <p>Использование промышленных компьютеров с ОС реального времени. Регулярные перезагрузки по графику. Высоконадёжный промышленный компьютер. Контроль «сердцебиения» программы</p> <p>Турникеты или двери с сенсорным доступом (карта) и блокировкой при приближении AGV. Видеонаблюдение, строгий инструктаж, контроль доступа</p> <p>Использование стабилизированного искусственного освещения. Датчики контроля освещённости. Резервирование датчиков (пневмодатчик + оптический). Датчики контроля наличия и правильной фиксации инструмента. Регулярная проверка механизма. Датчики контроля положения ячеек и инструмента. Периодическое ТО механизмов</p>

Проведение FMEA способствует созданию комплексной системы управления качеством и надёжностью, обеспечивая организации инструментом для целенаправленного устранения потенциальных проблем и повышения общей эффективности работы.

Однако для результативной и производительной работы по внедрению технологий серийного роботизированного производства необходимо разработать методику системной интеграции роботизированных комплексов.

3.3 Последовательность адаптивной системной интеграции роботизированных комплексов в производственные процессы машиностроительного предприятия

Автоматизация и роботизация представляют собой процессы, направленные на повышение эффективности и производительности в различных областях человеческой деятельности посредством внедрения современных технологий. Эти процессы характеризуются различной степенью интеграции механизированных и цифровых элементов в рабочие процессы, варьирующиеся от минимального участия человека до полной автономии систем [96, 109]. Рассмотрим подробнее каждый из семи уровней автоматизации и роботизации в таблице 3.12.

Таблица 3.12 – Уровни автоматизации и роботизации

№ п/п	Уровень	Описание
1	«Нулевой» уровень – ручной труд	Подразумевает выполнение всех производственных и иных рабочих операций исключительно силами людей, без привлечения какого-либо автоматического оборудования или компьютерных систем. Здесь работники полагаются исключительно на собственные физические возможности и профессиональные навыки. Трудовые процессы требуют значительных физических затрат, а результативность работы определяется индивидуальными способностями работников. Этот уровень характерен для традиционных ремесленных производств, однако постепенно вытесняется более высокими степенями автоматизации
2	Автоматизация отдельных	На данном этапе внедряются первые элементы механизации труда, что позволяет и частично заменить человеческие усилия

продолжение таблицы 3.12

№ п/п	Уровень	Описание
2	технологических и вспомогательных операций	машинами и инструментами. Примером могут служить простейшие механические устройства, такие как конвейеры или полуавтоматы, выполняющие конкретные повторяющиеся задачи. Использование таких механизмов существенно снижает физическую нагрузку на работника, повышая скорость и точность выполнения операций. Однако вмешательство человека всё ещё остаётся необходимым для выполнения вспомогательных действий, настройки оборудования и общего контроля за процессом
3	Частичная автоматизация	Частично автоматизированный уровень предполагает интеграцию автоматизированных систем для выполнения ряда конкретных задач, но с сохранением роли человека в управлении этими системами. Например, компьютеризованные программы могут использоваться для обработки больших объемов данных, при этом работник осуществляет контроль за корректностью ввода и вывода информации, принимая конечные решения. В этой фазе автоматизация позволяет оптимизировать временные затраты и улучшить качество выполнения стандартных операций, хотя человеческий фактор остается ключевым элементом управления
4	Полная автоматизация	Полностью автоматизированные системы выполняют весь спектр необходимых функций без прямого участия человека. Все процессы запрограммированы заранее и исполняются автоматически. Примерами являются полностью автоматизированные производственные линии, работающие круглосуточно без необходимости постоянного присутствия операторов. Такой подход значительно повышает производительность, снижая вероятность ошибок, связанных с человеческим фактором. Тем не менее, полный контроль над системой всё же необходим для предотвращения сбоев и корректировки настроек в случае изменений условий работы
5	Роботизация	На уровне роботизации применяются высокотехнологичные машины – роботы, способные выполнять сложные задачи, ранее доступные лишь человеку. Промышленные роботы могут заменять человека на сборочных линиях, сварке, покраске и многих других операциях, требующих высокой точности и скорости. Сервисные роботы находят применение в логистике, медицине, обслуживании клиентов и других отраслях. Такие устройства обладают способностью к восприятию окружающей среды и адаптации к её изменениям, что делает их незаменимыми помощниками в динамичных и непредсказуемых ситуациях
6	Интеллектуальная автоматизация	Интеграция технологий искусственного интеллекта (ИИ) и машинного обучения выводит автоматизацию на новый уровень. Системы, использующие ИИ, способны анализировать большие объемы данных, прогнозировать события и принимать решения, аналогичные действиям высококвалифицированных экспертов. Машинное обучение позволяет таким системам постоянно совершенствоваться, адаптируясь к новым условиям и улучшая свою работу. Интеллектуальные системы широко применяются в

окончание таблицы 3.12

№ п/п	Уровень	Описание
		области финансов, здравоохранения, транспортной логистики и других сфер, где необходимы аналитические способности и быстрое принятие решений
7	Автономные системы	Автономия – высший уровень автоматизации, предполагающий полное отсутствие человеческого вмешательства в процесс функционирования системы. Беспилотные транспортные средства, автономные дроны и другие подобные устройства могут самостоятельно выполнять задания, ориентируясь в пространстве, реагируя на изменения внешней среды и принимая решения в режиме реального времени. Такие системы демонстрируют высокую степень надежности и безопасности, а также способность функционировать в экстремальных условиях, где присутствие человека невозможно или нежелательно.

Каждый уровень автоматизации и роботизации обладает своими уникальными преимуществами и ограничениями, что диктует необходимость индивидуального подхода к внедрению тех или иных технологий в зависимости от конкретной сферы деятельности. Тщательное планирование и оценка потребностей предприятия позволяют выбрать оптимальный путь развития, обеспечивающий максимальный экономический эффект и минимизацию рисков [101, 98-99].

Создание интеллектуальной роботизированной производственной ячейки представляет собой многоэтапный процесс, включающий планирование, проектирование, реализацию и эксплуатацию системы. Этот процесс характеризуется необходимостью междисциплинарного подхода, интеграции передовых технологий и глубокого понимания специфики производственного процесса. Представленная в таблице 3.13 последовательность шагов отражает основные этапы проектирования и внедрения роботизированной ячейки.

Создание ИРПЯ – это сложная задача, требующая междисциплинарного подхода и глубокой интеграции современных технологий. Каждая стадия проекта от анализа потребностей до поддержания и обслуживания, имеет решающее значение для успеха внедрения. Эффективное выполнение этих этапов обеспечит

высокую производительность, надежность и гибкость системы, способствуя достижению стратегических целей организации [25, 38-39].

Таблица 3.13 – Последовательность адаптивной системной интеграции роботизированных комплексов в производственные процессы

Этап/ Подэтап	Назначение	Инструментарий
1. Определение целей и требований Результаты: - целевые показатели автоматизации и роботизации; - техническое предложение по автоматизации и роботизации производственного процесса		
1.1. Анализ потребностей	Анализ целей и задач улучшения текущих производственных процессов с целью определения задач, которые будут решаться с помощью роботизированной ячейки	Прогноз производственной программы. Аналитика и дашборды. Экспертная оценка
1.2. Определение функциональных и технических требований	Функциональные требования определяют задачи, которые должна решать ячейка, а технические требования устанавливают параметры производительности (например, количество изделий в час), требуемую точность выполнения операций, уровень автоматизации, а также требования к безопасности и эргономике рабочих мест	Математическое моделирование
1.3 Аудит производственных операций	Анализ производственных показателей, системных ограничений и технических требований к производственной ячейке	Методика оценочного аудита
1.4 Анализ и оценка ограничений в конструкции продукции	Анализ конструктивных несоответствий и недостатков, влияющих на применение киберфизической технологии	Свод требований и ограничений по конструкции производимой продукции
1.5 Анализ и оценка ограничений производственных операций	Анализ существующих ограничений производственных операций	Свод требований и ограничений по выполнению технологических и вспомогательных операций
1.6 Анализ и оценка ограничений производственной системы	Анализ возможных ограничений, влияющих на производственную систему	Классификатор системных ограничений
2. Проектирование производственной ячейки Результаты: - технологическая планировка; - перечень технологического оснащения; - имитационная модель производственного процесса; - перечень ограничений по применению автоматизации и роботизации		

продолжение таблицы 3.13

Этап/ Подэтап	Назначение	Инструментарий
2.1. Выбор компонентов	Процесс выбора компонентов начинается с идентификации основных составляющих роботизированной ячейки: промышленных роботов-манипуляторов, сенсоров (оптических, тактильных), приводов (пневматических, электрических) и контроллеров, управляющих всей системой. Критерии выбора включают совместимость, производительность, надежность и соответствие техническим спецификациям	Система автоматизированного проектирования. Моделирование производственных процессов и ячеек
2.2. Разработка архитектуры	Архитектура системы разрабатывается с учетом модулей, их взаимосвязей и взаимодействия. Применяются методы системного инжиниринга для обеспечения модульности и масштабируемости конструкции. Архитектурное решение должно учитывать будущие расширения и модернизации системы	Система автоматизированного проектирования
2.3. Моделирование	Используя CAD/CAE-системы, создаются виртуальные модели роботизированной ячейки для моделирования ее поведения в различных производственных ситуациях. Такой подход позволяет заранее прогнозировать потенциальные сбои и неэффективности, а также оптимизировать конфигурацию системы до начала физического монтажа	Моделирование производственных процессов и ячеек
3. Программирование и настройка Результаты: - состав интеллектуальной производственной ячейки; - руководство по эксплуатации		
3.1. Разработка программного обеспечения	Для управления роботами создается специализированное программное обеспечение с использованием современных языков программирования, таких как Python, C++ или специализированные языки для программируемых логических контроллеров (ПЛК). Программы включают алгоритмы управления движением робота, обработку сигналов от сенсоров и выполнение логической последовательности операций	Программные средства Python, C++

продолжение таблицы 3.13

Этап/ Подэтап	Назначение	Инструментарий
3.2. Настройка алгоритмов управления	Алгоритмическая настройка включает в себя разработку стратегий маршрутизации движений роботов, обработки сенсорных данных и адаптации логики управления процессом. Могут применяться методы искусственного интеллекта и машинного обучения для повышения адаптивности и автономии системы	Программные средства Python, C++
4. Интеграция систем Результаты: - технологические процессы и режимы		
4.1. Объединение компонентов	На этапе физической интеграции все выбранные компоненты собираются в единое целое. Процесс сборки требует высокой точности и соблюдения строгих стандартов монтажа, чтобы избежать конструктивных дефектов и минимизировать риски сбоев	Модели производственных ячеек
4.2. Интеграция с ERP/MES/ WMS	С целью обеспечения синхронности производственных процессов и эффективного управления ресурсами производится интеграция роботизированной ячейки с корпоративными информационными системами, такими как Enterprise Resource Planning (ERP) и Manufacturing Execution System (MES). Это обеспечивает возможность обмена данными в режиме реального времени и согласованного управления всеми звеньями цепочки поставок	Программные средства ERP/MES/ WMS
5. Тестирование и валидация Результаты: - протоколы валидации процессов		
5.1. Проверка функциональности	Функциональное тестирование направлено на верификацию работоспособности всех подсистем роботизированной ячейки. Тесты проводятся в контролируемой среде для проверки соответствия системы заданным требованиям и обнаружения любых отклонений или неисправностей	Цифровой двойник производственного процесса
5.2. Валидация процессов	Валидационные испытания подтверждают соответствие системы стандартам и нормативам, а также проверяют производительность в	Методики валидации процессов

продолжение таблицы 3.13

Этап/ Подэтап	Назначение	Инструментарий
	реальных эксплуатационных условиях. Этот этап направлен на подтверждение стабильности и предсказуемости работы ячейки	
<p>6. Обучение и адаптация</p> <p>Результаты:</p> <ul style="list-style-type: none"> - матрица компетентности персонала, эксплуатирующих и обслуживающих интеллектуальную ячейку; - программы обучений и протоколы аттестаций 		
6.1. Обучение операторов	Подготовка кадров играет ключевую роль в успешной эксплуатации роботизированной ячейки. Операторы проходят теоретический и практический тренинг, чтобы освоить управление системой, распознавание неполадок и выполнение сервисных операций	Цифровой двойник производственного процесса
6.2. Адаптация к изменениям	Важнейшим аспектом эксплуатации роботизированной ячейки является способность к быстрой адаптации под новые производственные задачи или изменения в технологическом процессе. Система должна обладать достаточной гибкостью для переоснащения и переналадки под различные типы продукции	Цифровой двойник производственного процесса
<p>7. Запуск в эксплуатацию</p> <p>Результаты:</p> <ul style="list-style-type: none"> - протоколы опытного производства; - протоколы анализа стабильности процессов и эффективности использования оборудования 		
7.1. Пилотный запуск	Перед полномасштабным запуском производится пробный пуск на ограниченной партии продукции. Это позволяет оценить работоспособность системы в реальных условиях и внести необходимые корректировки до массового ввода в эксплуатацию	Программа пилотного запуска
7.2. Полномасштабный запуск	После успешного завершения пилотного этапа осуществляется переход к полноценной эксплуатации роботизированной ячейки. Важно организовать скоординированную работу всех подразделений предприятия для обеспечения бесперебойного функционирования системы	Программа модернизации
<p>8. Мониторинг и оптимизация</p> <p>Результаты:</p> <ul style="list-style-type: none"> - программы оптимизации производственных показателей 		

окончание таблицы 3.13

Этап/ Подэтап	Назначение	Инструментарий
8.1. Сбор данных	Система мониторинга устанавливается для непрерывного сбора данных о функционировании ячейки. Данные включают информацию о производительности, времени простоя, потреблении ресурсов и качестве выпускаемой продукции	Цифровой двойник производственного процесса
8.2. Анализ производительности	Собранные данные подвергаются статистическому анализу с применением методов машинного обучения для выявления узких мест и резервов повышения эффективности	Цифровой двойник производственного процесса
8.3. Оптимизация процессов	Основываясь на полученных аналитических выводах, вносятся улучшения в производственный процесс, направленные на повышение производительности, сокращение затрат и улучшение качества продукции	Цифровой двойник производственного процесса
9. Поддержка и обслуживание		
Результаты: - регламенты планового обслуживания; - протоколы мониторинга и предиктивной диагностики состояния оборудования (компонентов) интеллектуальной ячейки		
9.1. Плановое обслуживание	Для обеспечения долгосрочной работоспособности роботизированной ячейки разрабатываются графики планового технического обслуживания. Эти мероприятия включают регулярную диагностику, замену изношенных деталей и профилактику неисправностей	Автоматизированные системы управления ремонтом и техническим обслуживанием (АСУ ТОИР)
9.2. Мониторинг и предиктивное обслуживание программно-аппаратных средств	Для снижения затрат на ремонт и обслуживания технологического оборудования	Цифровая панель мониторинга и предиктивной диагностики
9.3. Обновление программного обеспечения	Актуализация программного обеспечения путем регулярных обновлений и установки патчей гарантирует безопасность и стабильность работы системы, предотвращая ошибки и уязвимости	Программные модули по мониторингу и предиктивной диагностике

Для осуществления процесса проектирования роботизированных линий собирается межфункциональная команда (МФК), в которую входят специалисты, выполняющие четыре функции: инженера по организации производства,

инженера-технолога, инженера по автоматизации и инженера по качеству [44]. Функциональные роли и обязанности, выполняемые МФК, представлены в таблице 3.14.

Таблица 3.14 – Матрица функциональных обязанностей МФК

№ п/п	Инженер по организации производства	Инженер-технолог	Инженер по автоматизации	Инженер по качеству
1	Анализ и определение текущих производственных показателей	Анализ технологичности конструкции	Оценка возможности роботизации	Проверка соответствия стандартам качества
2	Анализ и определение целевых производственных показателей	Разработка технологического процесса	Подбор компонентов роботизации	Контроль точности и повторяемости операций
3	Организация рабочих мест и производственной логистики	Проектирование технологической оснастки	Системная интеграция роботизированных комплексов	Анализ причин дефектов и их устранение
4	Нормирование технологических операций	Разработка технологической документации	Программирование роботизированных систем	Мониторинг брака и отклонений
5	Имитационное моделирование	Отработка технологических операций	Тестирование и отладка оборудования	Разработка методик контроля качества

Предлагаемая методика проектирования ИРПЯ состоит из трех ключевых этапов (рисунок 3.6):

1. Анализ продукта и процесса производства.
2. Разработка процесса автоматизированного и роботизированного производства.
3. Отработка технологических решений.

Первый этап включает в себя анализ текущей конструкции и технологии производства производимой продукции. Последовательные действия каждого из исполнителей представлены на рисунке 3.7.



Рисунок 3.6 – Общий вид

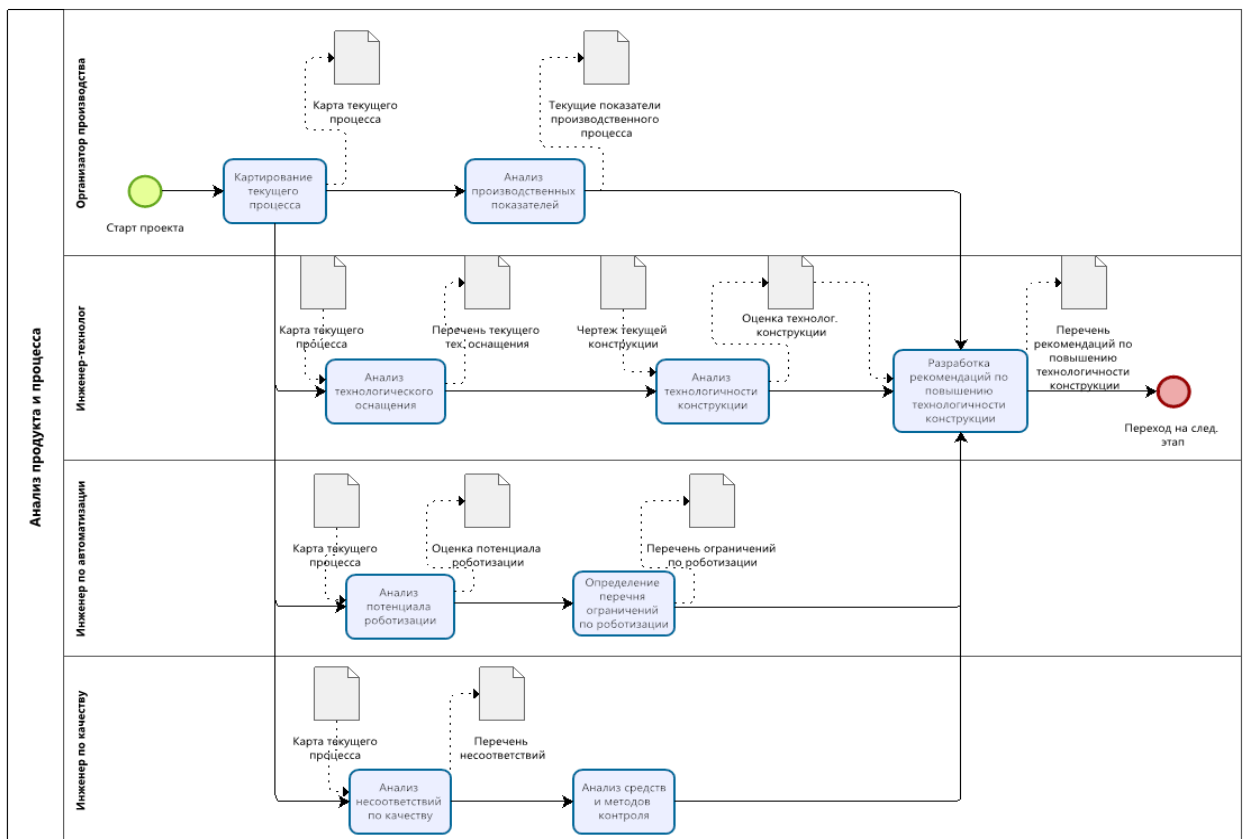


Рисунок 3.7 – Информационный модуль процесса «Анализ продукта и процесса»

Основными результатами первого этапа будут:

- перечень мероприятий по повышению технологичности конструкции изделия с учетом адаптации под технологические операции роботизированной сборки;
- сформированный перечень текущих ограничений по роботизации;
- рассчитанные текущие показатели производственного процесса.

Полученные результаты первого этапа являются входными данными для последующих этапов проектирования, обеспечивая обоснованность принимаемых технических решений и минимизацию проектных рисков.

Следующим ключевым этапом является проектирование технологического процесса роботизированного производства. Данный этап характеризуется формированием комплексной технической документации.

В частности, для разработки технического оснащения технологу требуется целый ряд нормативно-технических документов, представленных в таблице 3.15.

Таблица 3.15 – Документация для разработки технического оснащения

№ п/п	Документ	Ответственный
1	«Карта стандартизированной работы»	Инженер по организации производства
2	«Описание технологии»	
3	«Типовые стандартные решения по роботизации»	Инженер по автоматизации
4	«Перечень рисков и ограничений по роботизации»	
5	«Перечень технологического оснащения»	Инженер-технолог

Подробное описание данного процесса представлено на рисунке 3.8.

Результатами второго этапа являются:

- разработанный технологический процесс роботизированной сборки;
- спроектированное и подобранное технологическое оснащение;
- имитационная модель производственного процесса с расчетом оптимальных производственных показателей;
- перечень технологической документации.

Завершающим элементом выступает апробация и внедрение разработанных технических решений. На данной стадии осуществляется трансформация проектной документации в реальный производственный процесс, обеспечивающая переход от теоретических разработок к их практической реализации.

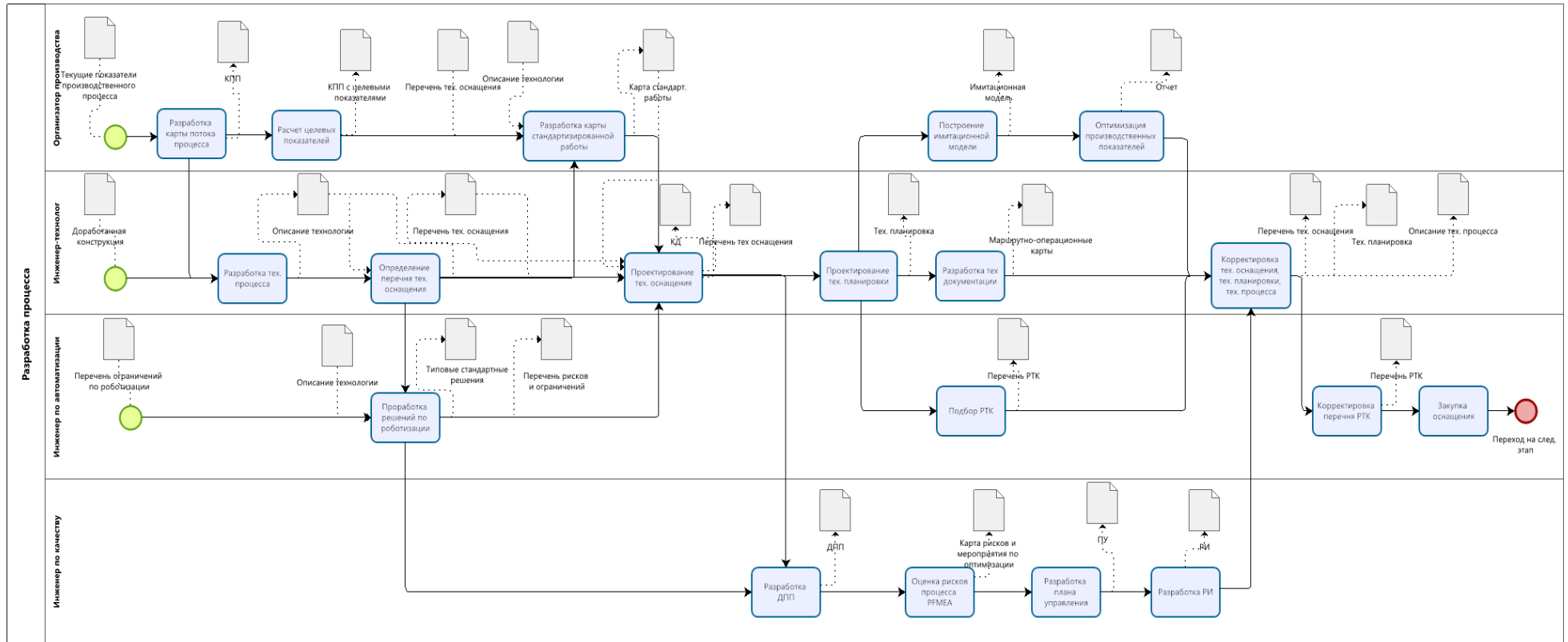


Рисунок 3.8 – Информационный модуль процесса «Разработка процесса»

После отработки МФК проводит финальную оптимизацию технической планировки, оснащения и технологии изготовления продукта. Результатом данного этапа становится комплект технико-технологической документации, прошедшей согласование, а также полностью готовая к эксплуатации роботизированная сборочная линия ИРПЯ [45, 55, 61]. Процесс отработки технологических решений представлен на рисунке 3.9.

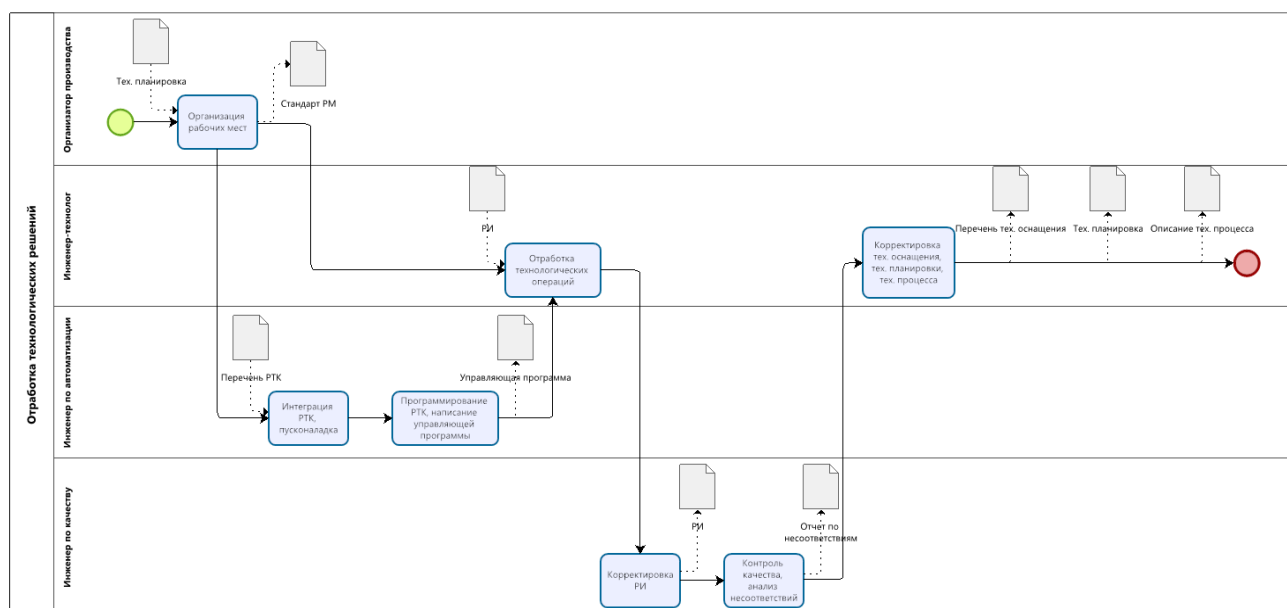


Рисунок 3.9 – Информационный модуль процесса «Обработка технологических решений»

Результатами третьего этапа являются (рисунок 3.10):

- закупленное и изготовленное технологическое оснащение (роботизированные комплексы, технологическая оснастка, системы транспортировки и хранения);
- организованные рабочие места и производственные участки;
- пуско-наладочные работы по системной интеграции роботизированных комплексов и технологической оснастки;
- отработка выполнения технологических операций на стабильность.

Диаграмма SIPOC				
Поставщик	Вход	Процесс	Выход	Заказчик
Производители оборудования	Технологическое оснащение (роботы, оснастка, системы транспортировки)	Организация рабочих мест и участков	Организованные рабочие места	Производственный персонал
Инженер-технолог	Чертежи и конструкторская документация	Пуско-наладочные работы	Интегрированные роботизированные	Инженеры по автоматизации
Инженер по автоматизации	Управляющие программы для роботов	Отработка операций на стабильность	Стабильные технологические операции	Технологи и операторы
Инженер по качеству	Стандарты качества, методики контроля	Контроль соответствия стандартам	Согласованная технологическая	Менеджмент предприятия
МФК (межфункциональная команда)	Результаты предыдущих этапов (КПП, КСР, ИМ и др.)	Финальная оптимизация планировки и технологии	Готовая к эксплуатации роботизированная линия	Заказчик / руководство

Рисунок 3.10 – SIPOC диаграмма для процесса «Отработка технологических решений»

Предлагаемая методика обеспечивает систематизацию и структурирование обширного массива проектной документации, формируемого в процессе разработки, необходимой для обеспечения стабильности выполнения технологических операций.

Разрабатываемые документированные результаты ключевых этапов создания роботизированной линии ИРПЯ приведены в таблице 3.16 [73].

Таблица 3.16 – Перечень итоговых документов каждого этапа

Этап	№ п/п	Документ
Анализ продукта и процесса производства	1	Карта текущего процесса
	2	Текущие показатели производственного процесса
	3	Перечень текущего технологического оснащения
	4	Чертеж текущей конструкции
	5	Оценка технологичности текущей конструкции
	6	Оценка потенциала роботизации
	7	Перечень ограничений по роботизации
	8	Перечень несоответствий по качеству
	9	Перечень рекомендаций по повышению технологичности конструкции
	10	Карта потока процесса
	11	Карта потока процесса с целевыми показателями
	12	Перечень необходимого технологического оснащения
	13	Описание технологии производства
	14	Карты стандартизированных работ
	15	Имитационная модель производства изделий
	16	Отчет об оптимизации производственных показателей

окончание таблицы 3.16

Этап	№ п/п	Документ
Разработка процесса автоматизированного и роботизированного производства	17	Конструкторская документация
	18	Разработанная технологическая планировка
	19	Маршрутно-операционные карты
	20	Типовые стандартные решения по роботизации
	21	Перечень рисков и ограничений по роботизации
	22	Перечень роботизированных технологических комплексов
	23	Диаграмма потока процесса
	24	Карта рисков и мероприятия по их оптимизации
	25	План управления
	26	Рабочие инструкции
Отработка технологических решений	27	Стандарты рабочих мест
	28	Управляющая программа для роботизированных технологических комплексов
	29	Отчет по несоответствиям качества
	30	Согласованный перечень технологического оснащения
	31	Согласованная технологическая планировка
	32	Согласованное описание технологического процесса

Таким образом, последовательность адаптивной системной интеграции позволяет сократить время внедрения решений по автоматизации и роботизации производственных процессов на 40%, обеспечивая поэтапную системную интеграцию роботизированных комплексов.

3.4 Выводы по главе 3

1. Разработана структурно-функциональная модель интеллектуальной роботизированной производственной ячейки, в которую включена классификация из 12 процессов функционирования цифровых и физических компонентов. В модели отражены функциональные связи между компонентами как внутри интеллектуальной производственной ячейки, так и внешние связи с компонентами верхнего уровня. Разработаны 10 этапов создания интеллектуальных роботизированных производственных ячеек, учитывающих уровень технологичности выпускаемой продукции под возможности роботизации. Для повышения результативности роботизации производственных процессов и

создания интеллектуальных роботизированных производственных ячеек разработан свод требований к конструктивным особенностям сборочных единиц. Для уточнения порядка взаимодействия элементов интеллектуальной роботизированной производственной ячейки разработана объектная схема взаимодействия.

2. Для повышения результативности функционирования интеллектуальной роботизированной производственной ячейки проведен анализ рисков потенциальных несоответствий и отказов. Определены основные элементы интеллектуальной роботизированной производственной ячейки для выполнения типовых сборочных процессов. Для основных элементов проведена классификация рисков появления потенциальных несоответствий функционирования интеллектуальной производственной ячейки. Данная классификация разработана на основе методики RFMEA. Разработана математическая модель оценки рисков. На основании математической модели для конкретных интеллектуальных роботизированных производственных ячеек и сборочных процессов можно провести расчет и ранжирование приоритетности рисков. Проведена классификация организационных, технологических и технических мероприятий по снижению рисков появления несоответствий и отказов.

3. Разработана адаптивная последовательность системной интеграции роботизированных комплексов в производственные процессы машиностроительного предприятия. Методика обладает свойством адаптивности, так как предполагает три уровня интеграции роботизированных комплексов и автоматизированных систем. Первый уровень – локальная интеграция предполагает внедрение роботизированных комплексов и автоматизированных систем для снижения трудоемкости выполнения отдельных технологических и вспомогательных операций. Второй уровень – комплексная интеграция – предполагает автоматизацию и роботизацию производственного процесса для получения оптимальных производственных показателей. Третий уровень –

киберфизическая (системная) интеграция – предполагает внедрение проектно-конструкторских решений для адаптации конструкции под особенности серийного роботизированного производства, а также отработку технологических решений для совершенствования технологии серийного роботизированного производства и создания интеллектуальных производственных ячеек.

4. Для повышения результативности внедрения технологий и инструментария роботизированного производства разработана адаптивная методика системной интеграции роботизированных комплексов в производственные процессы интеллектуальной роботизированной производственной ячейки. Определена последовательность создания интеллектуальной роботизированной производственной ячейки. Разработана матрица функциональных обязанностей межфункциональной команды, создающая интеллектуальные роботизированные производственные ячейки. Адаптивность методики обеспечивается за счет включения этапов проектно-конструкторских работ по повышению технологичности конструкции и разработки специализированного технологического оснащения, учитывающего отраслевую и технологическую специфику производственного процесса.

5. Разработана последовательность адаптивной системной интеграции роботизированных комплексов в производственные процессы машиностроительного предприятия. Последовательность обладает свойством адаптивности, поскольку предполагает три уровня интеграции роботизированных комплексов и автоматизированных систем. Первый уровень – локальная интеграция – предполагает внедрение роботизированных комплексов и автоматизированных систем для снижения трудоемкости выполнения отдельных технологических и вспомогательных операций. Второй уровень – комплексная интеграция – предполагает автоматизацию и роботизацию производственного процесса для получения оптимальных производственных показателей. Третий уровень – киберфизическая (системная) интеграция – предполагает внедрение проектно-конструкторских решений для адаптации конструкции под особенности

серийного роботизированного производства, а также отработку технологических решений для совершенствования технологии серийного роботизированного производства и создания интеллектуальных производственных ячеек.

6. Последовательность адаптивной системной интеграции, как показала практическая апробация, позволяет сократить время внедрения решений по автоматизации и роботизации производственных процессов на 40%, обеспечивая поэтапную системную интеграцию роботизированных комплексов.

ГЛАВА 4. ПРАКТИЧЕСКАЯ АПРОБАЦИЯ РАЗРАБОТАННОГО ИНСТРУМЕНТАРИЯ СОЗДАНИЯ РОБОТИЗИРОВАННОГО СБОРОЧНОГО ПРОИЗВОДСТВА

4.1 Методика организационного развития производственной системы для повышения эффективности автоматизации и роботизации производственных процессов

В условиях современной конкурентной среды, характеризуемой кастомизацией спроса и ускорением жизненных циклов продукции, промышленные предприятия нуждаются в непрерывном повышении эффективности, гибкости и качества выпускаемой продукции. Автоматизация и роботизация будучи инструментами оптимизации становятся системообразующими факторами, значительно меняющими архитектуру производственной системы. Однако внедрение передовых технологий, не сопровождающееся организационной трансформацией, зачастую не приводит к ожидаемому экономическому эффекту, при этом порождая системные дисфункции и сопротивление персонала. Для определения влияния автоматизации и роботизации на организационное развитие предприятия необходим комплексный анализ этапов развития производственных систем через призму взаимовлияния технического и организационного аспектов [75, 90-92].

Системное влияние автоматизации и роботизации на организационное управление проявляется в комплексной трансформации всех элементов организации, требуя принципиально новых подходов к управлению и развитию бизнеса. Успех предприятия обуславливается способностью организации к синхронной адаптации технологических и организационных компонентов.

Влияние характеризуется децентрализацией управления, поскольку происходит переход от иерархических структур к сетевым моделям, создаются кросс-функциональные команды, а также формируются проектные структуры управления. За счет автоматизации сквозных процессов, внедрения систем

реального времени и устранения функциональных разрывов происходит значительное изменение бизнес-процессов. Автоматизация и роботизация снижают зависимость от человеческого фактора в принятии рутинных решений, происходит переход от реактивного к предиктивному управлению, внедрение систем предиктивной аналитики и автоматизация оперативных решений. Также влияние проявляется в изменении модели компетенций, появляются новые требования к персоналу. Такие традиционные навыки, как исполнительность, физическая выносливость, узкая специализация и дисциплина заменяются аналитическим мышлением, цифровой грамотностью, кросс-функциональностью, инициативностью и инновационностью. Влияние автоматизации на организационные аспекты можно систематизировать по направлениям (таблица 4.1).

Таблица 4.1 – Влияние автоматизации на организационные аспекты

Организационные аспекты	Влияние автоматизации	Результирующая организационная трансформация
Организационная структура	Децентрализация управления на уровне киберфизической системы, необходимость интеграции ИТ и ОТ-подразделений	Переход от пирамидальных структур к сетевым, платформенным и экосистемным моделям
Бизнес-процессы	Возможность сквозной автоматизации цепочек создания ценности, появление данных в реальном времени	Реинжиниринг процессов на основе данных, повышение гибкости и прозрачности процессов
Управление и контроль	Смещение фокуса контроля с человека на систему, автоматизация оперативных решений	Переход от тотального контроля к управлению по исключениям и стратегическому целеполаганию
Корпоративная культура	Требования к скорости, адаптивности, сотрудничеству человека и машины	Формирование культуры инноваций, экспериментов и непрерывного обучения
Компетенции персонала	Вытеснение рутинного физического труда, рост спроса на цифровые и когнитивные навыки	Массовая переподготовка, появление новых ролей

Успешная интеграция автоматизации и роботизации требует целостного организационного развития, поскольку техническая трансформация должна сопровождаться глубокими изменениями в организационной структуре, процессах, культуре и компетенциях. Организации, способные к такой синхронной трансформации, смогут получить устойчивое конкурентное преимущество [88, 94].

Уровни организационного развития интеллектуальной роботизированной производственной ячейки приведены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Уровни организационного развития

Описание	Критерии и характеристики
1. Производственные участки с автоматизированным оборудованием	
<p>Производственный участок, оснащенный станками с числовым программным управлением (ЧПУ), работающими по жестко заданным программам. Человек-оператор выполняет ключевые функции загрузки, выгрузки, контроля и переналадки.</p> <p><i>Пример: участок из трех фрезерных станков с ЧПУ, где один оператор обслуживает их циклически: подходит к станку, открывает дверцу, снимает готовую деталь, устанавливает новую заготовку, запускает цикл</i></p>	<p>Основной драйвер: стабильность процессов. Тип управления: ручное / полуавтоматическое. Роль человека: оператор является неотъемлемой частью процесса: устанавливает заготовки, снимает детали, поднастраивает инструмент, контролирует качество. Оборудование: отдельные станки с ЧПУ (токарные, фрезерные, шлифовальные), не связанные в единую систему. Программирование: управляющие программы (УП) создаются технологом-программистом и загружаются в станок через локальный носитель или сеть DNC. Связь и данные: отсутствует или минимальна (сбор данных вручную, отдельные DNC-терминалы для передачи управляющих программ для ЧПУ). Нет автоматического сбора данных о состоянии оборудования. Логистика: перемещение заготовок и полуфабрикатов осуществляется вручную в производственной таре. Контроль качество: внешний ОТК. Обслуживание оборудования: реактивное либо плановое по времени/ наработке</p>
2. Роботизированные производственные участки	
<p>К станкам с ЧПУ добавляются промышленные роботы или роботизированные комплексы (роботы-загрузчики, порталные манипуляторы), которые автоматизируют операции загрузки заготовок и выгрузки готовых деталей. Создаются роботизированные технологические комплексы (РТК).</p>	<p>Основной драйвер: снижение трудоемкости. Тип управления: автоматизированный цикл «станок-робот». Роль человека: оператор-наладчик. Человек покидает опасную зону, его задача – следить за работой, пополнять накопители заготовок, забирать паллеты с готовыми деталями, проводить переналадку при смене партии. Оборудование: группа станков, объединенная роботоманипулятором и накопителями (паллеты, магазины).</p>

продолжение таблицы 4.2

Описание	Критерии и характеристики
<p><i>Пример: роботизированная ячейка из двух токарных станков, обслуживаемых одним роботом, который берет заготовки из накопителя (магазина) и укладывает готовые детали в тару</i></p>	<p>Часто используются двухстоечные роботы или коллаборативные роботы. Программирование: требуется синхронизация программ станка и робота. Используются отдельные контроллеры для робота и станка. Связь и данные: реализован обмен дискретными сигналами «Стой, робот в зоне» / «Загрузка завершена, работай». Данные о работе (счетчики деталей) могут фиксироваться, но в целом оборудование работает изолированно. Гибкость: ограниченная. Переналадка на новую деталь требует ручной перенастройки захватов, положения накопителей и синхронизации программ. Логистика: роботизированная (робот + накопитель). Контроль качество: внешний ОТК. Обслуживание оборудования: реактивное либо плановое по времени/ наработке</p>
<p>3. Интеллектуальные роботизированные производственные ячейки</p>	
<p>Ячейка становится «интеллектуальной». Происходит вертикальная интеграция: оборудование (станки, роботы, датчики) подключается к системам управления производством (MES) и диспетчерского контроля (SCADA). Появляется сбор данных в реальном времени и элементы оптимизации. <i>Пример: ячейка, где MES присваивает детали QR-код, станок сам загружает нужную программу, робот ориентируется по метке, SCADA показывает диспетчеру загрузку и предупреждает об отклонениях</i></p>	<p>Основной драйвер: прозрачность и оптимизация. Тип управления: цифровое управление на основе данных (Data-Driven). Роль человека: диспетчер / оператор пульта. Находясь на удаленном рабочем месте (RDC – Remote Dispatch Center), человек наблюдает за процессами на панелях SCADA, анализирует KPI, принимает решения при нештатных ситуациях, выполняет сложные переналадки. Численность персонала сокращается. Оборудование: интеллектуальные станки с ЧПУ и роботы, оснащенные датчиками (вибрация, температура, мощность). Появляются системы машинного зрения для контроля качества прямо в ячейке. Интеграция: SCADA собирает данные в реальном времени: загрузка, состояние, аварии, параметры процесса; MES выдает сменные задания, отслеживает статус заказов, управляет инструментом и материалами; данные анализируются для расчета OEE, выявления узких мест. Программирование: управляющие программы хранятся на сервере и загружаются автоматически по команде MES (по номеру детали/партии). Часть параметров (режимы резания) может адаптироваться под конкретную заготовку на основе данных измерений. Самостоятельность: ячейка выполняет автоматический цикл, но требует внешнего управления для смены номенклатуры и решения нештатных ситуаций. Логистика: роботизированная (робот + накопитель). Контроль качество: внешний ОТК.</p>

продолжение таблицы 4.2

Описание	Критерии и характеристики
	Обслуживание оборудования: предиктивное по текущему состоянию
4. Автономные ячейки закрытого типа	
<p>Высший уровень развития. Ячейка представляет собой полностью автономную, киберфизическую производственную единицу, способную работать без участия человека в течение длительного времени (режим «lights-out» / «безлюдное производство»). Она сама управляет своей работой, контролирует качество, заказывает материалы и обслуживание, взаимодействуя с внешней средой как равноправный агент по принципу «машина-машина» (M2M).</p> <p><i>Пример: ячейка получает сырую отливку, идентифицирует её RFID-метку, по базе данных определяет маршрут обработки, гибко (токарка/фрезеровка) обрабатывает, сканирует результат, маркирует готовую деталь QR-кодом, упаковывает её в тару и вызывает AGV для вывоза – и все это без участия человека, работая 24/7</i></p>	<p>Тип управления: полностью автономное (Self-X свойства: самооптимизация, самодиагностика, самоорганизация).</p> <p>Роль человека: технолог-стратег / аналитик. Человек не вмешивается в процесс, а лишь задает целевые показатели (KPI) и анализирует сводные отчеты, занимаясь совершенствованием системы и решением уникальных нестандартных задач, не описанных в алгоритмах.</p> <p>Ядро обработки: гибридный станок (токарно-фрезерный с возможностью шлифования).</p> <p>Внутренняя логистика: робот-манипулятор (смена инструмента, загрузка деталей, чистка).</p> <p>Встроенный контроль: лазерные сканеры, щупы, системы технического зрения для 100% контроля в процессе (in-situ) и пост-контроля.</p> <p>Автономный склад-накопитель: буфер заготовок, готовых деталей, инструмента и оснастки с RFID-идентификацией. Система подготовки СОЖ и удаления стружки.</p> <p>Ключевые принципы работы:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Самооптимизация (AI/ML): ИИ анализирует данные датчиков в реальном времени (вибрация, сила резания) и корректирует режимы обработки для достижения оптимального баланса скорости и качества. Компенсирует износ инструмента и температурные деформации. - Самодиагностика и предиктивное обслуживание: Ячейка прогнозирует отказ подшипника шпинделя или поломку инструмента и заранее (через M2M) отправляет заявку в сервисную службу или заказывает новый инструмент у поставщика, интегрируя это в свой график работы. - Замкнутый цикл качества: измерения, выполненные встроенными датчиками, автоматически корректируют управляющую программу для следующей детали (адаптивное управление). Замкнутая, автономная система M2M-коммуникация, при которой ячейка общается напрямую с: <ol style="list-style-type: none"> 1. AGV: «Подойди к порту №1, забери готовую партию, привези новые заготовки». 2. Другой ячейкой: «Не могу выполнить заказ, у меня вышел инструмент. Можешь доделать эту операцию?»

окончание таблицы 4.2

Описание	Критерии и характеристики
	<p>3. ERP/MES: «Задание 123 выполнено. Партия 10 шт., годность 100%. Отправляю в склад. Требуется новое задание».</p> <p>4. Системой инструментального хозяйства: «Заканчиваются пластины TNMG-160404, закажи еще 50 штук».</p> <p>Закрытый тип: ячейка имеет физические ограждения и шлюзы, исключающие проникновение человека во время работы. Микроклимат контролируется</p>

Эта четырехуровневая модель позволяет предприятиям четко определить текущее состояние и выстроить дорожную карту развития в направлении до Индустрии 5.0 и полностью «темного» (безлюдного) производства [82, 102]. В таблице 4.3 представлены требования на каждом уровне организационного развития.

Таблица 4.3 – Требования и ограничения на каждом уровне организационного развития

Требования	Ограничения
1. Производственные участки с автоматизированным оборудованием	
<p>Необходимо создать базовый цифровой контур: обеспечение передачи управляющих программ (УП) через сеть DNC (DirectNumericalControl) с центрального сервера.</p> <p>Требуется идентификация: присвоение уникальных идентификаторов единицам оборудования для базового учета.</p> <p>Требуется применение первичной сенсорики: оснащение станков датчиками контроля исполнения (например, счетчики деталей, сигналы «цикл запущен/завершен»).</p> <p>Требуется человеко-машинный интерфейс: наличие панелей оператора для ввода данных о выпуске, браке, простоях (вручную)</p>	<p>Начальный уровень цифровизации. Оборудование существует как отдельные «островки автоматизации», не интегрированные в единую информационную среду.</p> <p>Высокая зависимость от квалификации оператора, простой из-за человеческого фактора (перерывы, ожидание), низкая общая эффективность оборудования (ОЕЕ), невозможность работы в «темном режиме».</p> <p>Станки «немые» – не передают данные о своем состоянии в автоматическом режиме или передают в проприетарных (закрытых) форматах, нечитаемых для других систем.</p> <p>Результаты контроля (ОТК) не возвращаются в станок для автоматической коррекции. Данные о качестве существуют отдельно от данных производства</p>

продолжение таблицы 4.3

Требования	Ограничения
	<p>Оператор физически измеряет детали, записывает результаты в журнал, затем вносит коррективы в программу – это узкое место, где возникают ошибки и задержки.</p> <p>Оборудование не способно общаться ни с другим оборудованием, ни с системами верхнего уровня (кроме примитивных DNC-терминалов)</p>
2. Роботизированные производственные участки	
<p>Требуется обеспечить синхронизацию контроллеров: обеспечение надежного обмена дискретными сигналами (I/O) между контроллером робота и контроллерами станков для безаварийной работы.</p> <p>Требуется наличие автоматизации загрузки: наличие магазинов накопителей и систем позиционирования заготовок.</p> <p>Высокие требования к безопасности: создание физических ограждений, систем блокировки доступа, световых завес для безопасной работы в автоматическом режиме</p>	<p>Уровень автоматизации процессов, но без «интеллекта» и цифровой интеграции. Физическая интеграция (робот обслуживает станки) опережает информационную.</p> <p>РТК и станки обмениваются сигналами, но не <i>данными</i>. Сигнал «деталь готова» не несет информации о качестве или параметрах обработки.</p> <p>Программа РТК жестко привязана к конкретной детали и раскладке. Переналадка требует ручного перепрограммирования и перенастройки захватов.</p> <p>РТК не «видит» искажения заготовки или отклонения в ее положении – работает вслепую, что ведет к сбоям.</p> <p>Данные о работе (количество циклов, время) хранятся локально в контроллерах и не передаются в общую аналитическую систему</p>
3. Интеллектуальные роботизированные производственные ячейки	
<p>Требуется обязательное использование стандартизированных протоколов передачи данных с семантикой (например, OPC UA с Companion Specifications для станков и роботов). Оборудование должно передавать не просто «ток 10А», а структурированные данные: «Шпиндель главный, нагрузка 85%, прогнозируемый остаточный ресурс подшипника – 200 часов».</p> <p>Требуется интеграция с MES/SCADA. Двусторонний обмен данными с MES: получение сменных заданий, отчеты о выполнении, статусы заказов. Передача</p>	<p>Полноценный узел киберфизической производственной системы. Ячейка становится «умной» – она собирает данные, передает их наверх и получает задания сверху, при этом работает в системе «человек-машина».</p> <p>Высокая стоимость внедрения, а также требуются лицензии MES, SCADA.</p> <p>Производители оборудования используют разные стандарты данных, что требует написания сложных «драйверов» – адаптеров (коннекторов).</p>

продолжение таблицы 4.3

Требования	Ограничения
<p>потокowych данных в SCADA в реальном времени (теги OPC UA, Modbus TCP и т.д.). Требуется создание цифрового паспорта оборудования. Наличие цифрового двойника (Digital Twin) на уровне контроллера, который синхронизирован с физическим процессом.</p> <p>Применение программно-аппаратных комплексов машинного зрения для контроля качества и позиционирования внутри ячейки.</p> <p>Требуется система управления данными – сбор и архивация данных для последующего анализа эффективности (ОЕЕ, аналитика простоев)</p>	<p>Ячейка зависит от команд MES и не может самостоятельно принимать стратегические решения (например, изменить план).</p> <p>Необходим оператор-диспетчер для разрешения нестандартных ситуаций и переналадок</p>
4. Автономные ячейки закрытого типа	
<p>Требования к киберфизической системе:</p> <p>1. Самоуправление (Self-X):</p> <ul style="list-style-type: none"> - Самооптимизация: наличие бортового ИИ (edge AI), анализирующего данные сенсоров в реальном времени и корректирующего режимы обработки (подача, скорость) для максимизации качества и производительности. - Самодиагностика: система предиктивной аналитики, прогнозирующая отказы компонентов. <p>2. Горизонтальная M2M-коммуникация (Machine-to-Machine):</p> <ul style="list-style-type: none"> - Ячейка должна напрямую общаться с другими ячейками, AGV (автономными тележками), складскими системами (автономный склад с уровня 3-4) через протоколы реального времени (например, OPC UA Pub/Sub над TSN или 5G). - Пример: ячейка отправляет AGV команду: «Подойди к порту А, забери паллету 123, вес 50 кг, доставь на склад №2» – без участия диспетчера. <p>3. Замкнутый контур качества (In-situ Quality Control):</p> <ul style="list-style-type: none"> - Встроенные измерительные системы (щупы, лазеры, КИМ) должны передавать данные измерений напрямую в ЧПУ для немедленной компенсации отклонений (адаптивное управление) 	<p>Недостаток стандартов M2M: хотя OPC UA развивается, полная семантическая совместимость между оборудованием разных производителей на уровне «агент-агенту» пока не достигнута.</p> <ul style="list-style-type: none"> - Высокая вычислительная сложность: требует мощных бортовых промышленных компьютеров с GPU для работы ИИ в реальном времени, что увеличивает стоимость и энергопотребление. - Доверие к ИИ: сложность верификации и валидации решений, принимаемых нейросетями в нестандартных ситуациях. Проблема «черного ящика». - Зависимость от инфраструктуры: требует сверхнадежных каналов связи (5G, TSN) и стабильного электропитания

окончание таблицы 4.3

Требования	Ограничения
4. Цифровой паспорт детали: - Ячейка должна вести цифровой журнал (Blockchain-подобный лог) для каждой детали: кто обработал, каким инструментом, с какими параметрами, результаты измерений. 5. Кибербезопасность: - Наличие встроенных средств защиты на уровне контроллера (шифрование трафика, аутентификация устройств в сети M2M), так как прямое управление физическими процессами через сеть создает высокие риски	

Данная структура показывает, что движение к уровню 4 – это не только технологический, но и организационно-управленческий вызов, требующий развития стандартизации [36, 43, 50-51].

Для моделирования уровней организационного развития разработана комплексная математическая модель, описывающая уровни развития (зрелости) производственных ячеек в парадигме киберфизических систем.

Будем описывать каждый уровень $L \in \{1,2,3,4\}$ через интегральный показатель зрелости $M \in [0,1]$, который является функцией четырех ключевых показателей:

$$R = w_A \cdot P_A + w_D \cdot P_D + w_i \cdot P_i + w_S \cdot P_S, \quad (4.1)$$

где P_A – показатель автономности, характеризующий способность ячейки функционировать без оператора, на принципах «темное производства»; P_D – показатель цифровизации, характеризующий уровень подключения к информационным системам и M2M-коммуникации; P_i – показатель интеллектуальности, характеризующий способность производственной ячейки самостоятельно воспринимать информацию, обучаться на основе накопленных данных, принимать решения и адаптировать свое поведение в изменяющихся

условиях без участия человека; P_S – показатель самодиагностики – способность к самодиагностике, самоорганизации, самообучению.

Весовые коэффициенты w_A , w_D , w_i , w_S могут адаптироваться под конкретную отрасль и конкретное предприятие. Рассчитать коэффициенты весомости можно с помощью экспертных методов. Для нашей обобщенной задачи коэффициенты весомости примем равными (по 0,25), так как все четыре аспекта одинаково важны для КФПС.

Расчет показателя автономности P_A :

$$P_A = \frac{T_{\text{autonomous}}}{T_{\text{total}}} \times \left(\frac{N_{\text{interventions}}}{N_{\text{cycles}}} \right), \quad (4.2)$$

где $T_{\text{autonomous}}$ – время работы в полностью автоматическом режиме без участия человека (за смену/сутки); T_{total} – общее время работы; $N_{\text{interventions}}$ – количество человеческих вмешательств (пуск, остановка, корректировка, устранение сбоев) за период; N_{cycles} – количество выполненных рабочих циклов (обработанных деталей) [63, 104].

Шкала интерпретации по уровням:

- уровень 1: $P_A \approx 0.3-0.5$ – человек постоянно в контуре, открывает дверцу, ставит заготовки;
- уровень 2: $P_A \approx 0.6-0.8$ – автоматический цикл есть, но человек вмешивается для пополнения накопителей, переналадки;
- уровень 3: $P_A \approx 0.85-0.95$ – человек только наблюдает и вмешивается при отклонениях (диспетчер);
- уровень 4: $P_A \rightarrow 1.0$ – человек не вмешивается в цикл, только задает цели.

Расчет показателя цифровой интеграции P_D , оценивающий качество и глубину подключения ячейки к цифровой платформе организации, представлен в виде модели на основе графов связности:

$$P_D = \frac{1}{|N|} \sum_{i \in N} (\kappa_1 \cdot Q_{\text{data}}(i) + \kappa_2 \cdot B_{\omega}(i) + \kappa_3 \cdot L_{\text{sem}}(i)), \quad (4.3)$$

где N – множество цифровых компонентов, с которыми взаимодействует ячейка (MES, ERP, AGV, другие ячейки, SCADA, облако поставщика); $Q_{\text{data}}(i)$ – качество передаваемых данных с цифровым компонентом i (0 – нет данных; 0,5 – дискретные сигналы I/O; 1 – семантические данные OPC UA); $B_{\omega}(i)$ – пропускная способность (мощность) канала связи (0 – нет связи; 0,5 – промышленная сеть; 1 – 5G/TSN реального времени); $L_{\text{sem}}(i)$ – семантический уровень (0 – разные языки, нужен конвертер; 0,5 – стандартизированные протоколы; 1 – полная семантическая интероперабельность); k_1, k_2, k_3 – коэффициенты весомости, назначаемые экспертным методом и зависящие от типа и назначения ИРПЯ (например, 0,4, 0,3, 0,2) [108, 110].

Ранги интерпретации по уровням:

- уровень 1: $P_D \approx 0.1-0.2$ – только DNC-связь для передачи программ, возможно Modbus с парой регистров;
- уровень 2: $P_D \approx 0.3-0.4$ – дискретные I/O между роботом и станком, связь с верхним уровнем отсутствует или минимальна;
- уровень 3: $P_D \approx 0.7-0.85$ – OPC UA сервер, интеграция с MES/SCADA, обмен данными в реальном времени.
- уровень 4: $P_D \approx 0.95-1.0$ – M2M-коммуникация через OPC UA Pub/Sub над TSN/5G, полная семантика с AGV, складами, другими ячейками.

Расчет показателя интеллектуальности P_i , оценивающего способность ИРПЯ самостоятельно воспринимать информацию:

$$P_i = \frac{1}{3} \times (C_{\text{sense}} + C_{\text{learn}} + C_{\text{decide}}), \quad (4.4)$$

где C_{sense} – сенсорная оснащенность (0 – только базовые концевики; 0,5 – датчики нагрузки/вибрации; 1 – машинное зрение, лазерные сканеры, акустическая эмиссия); C_{learn} – способность к обучению (0 – жесткое программирование; 0,5 – адаптация по заданным алгоритмам; 1 – машинное обучение на истории процессов); C_{decide} – уровень принятия решений (0 – только исполнение команд; 0,5 –

выбор из предустановленных сценариев; 1 – генерация новых стратегий через ИИ).

Ранги интерпретации по уровням:

- уровень 1: $P_i \approx 0.1$ – только базовые датчики, все решает человек;
- уровень 2: $P_i \approx 0.2-0.3$ – датчики для синхронизации, но интеллекта нет;
- уровень 3: $P_i \approx 0.5-0.7$ – машинное зрение для контроля, адаптивные алгоритмы по заданным правилам;
- уровень 4: $P_i \approx 0.9-1.0$ – edge AI, нейросети для прогнозирования износа, самообучение на данных, генерация оптимальных режимов.

Расчет показателя самодиагностики P_S , оценивающего свойства самодиагностики, самооптимизации, самоорганизации:

$$P_S = \frac{1}{3} \times (S_{\text{diag}} + S_{\text{optim}} + S_{\text{reconf}}), \quad (4.5)$$

где S_{diag} – глубина диагностики (0 – только аварийные сигналы; 0,5 – мониторинг параметров; 1 – предиктивная аналитика, прогноз отказов); S_{optim} – уровень самооптимизации (0 – нет; 0,5 – оптимизация по заданным критериям; 1 – многокритериальная оптимизация в реальном времени); S_{reconf} – способность к самореконфигурации (0 – жесткая структура; 0,5 – переключение между режимами; 1 – автономная смена оснастки, переналадка без человека).

Интерпретация по уровням:

- уровень 1: $P_S \approx 0$ – диагностика только по лампочкам;
- уровень 2: $P_S \approx 0.1-0.2$ – есть счетчики моточасов, плановое ТО;
- уровень 3: $P_S \approx 0.4-0.6$ – мониторинг состояния в SCADA, автоматическая остановка при отклонениях;
- уровень 4: $P_S \approx 0.9-1.0$ – предиктивная диагностика, самооптимизация режимов, автономная переналадка [112-113, 120].

Количественно определить каждый уровень как область в пространстве (P_A, P_D, P_i, P_S) можно по таблице 4.4.

Таблица 4.4 – Определение уровня как области в пространстве

Уровень	P_A	P_D	P_i	P_S	R (интегральный)
1	0,3 – 0,5	0,1 – 0,2	0,0 – 0,1	0,0 – 0,1	0,1 – 0,23
2	0,6 – 0,8	0,3 – 0,4	0,2 – 0,3	0,1 – 0,2	0,3 – 0,43
3	0,85 – 0,95	0,7 – 0,85	0,5 – 0,7	0,4 – 0,6	0,61 – 0,78
4	0,95 – 1,0	0,95 – 1,0	0,9 – 1,0	0,9 – 1,0	0,93 – 1,0

Границы уровней могут пересекаться, но в целом наблюдается четкая прогрессия.

Функцию перехода между уровнями можно описать как динамику развития через вероятность перехода от уровня L_i к L_{i+1} за время Δt :

$$P(L_i \rightarrow L_{i+1}) = 1 - e^{-\text{gimel}_i \cdot \Delta t \cdot F(K,R)}, \quad (4.6)$$

где gimel_i – интенсивность перехода (зависит от отрасли, инвестиций в создание киберфизических систем); $F(K, R)$ – функция, зависящая от затрат в развитие K и организационной готовности R :

$$F(K, R) = \left(\frac{K}{K_1}\right)^\alpha \times \left(\frac{R}{R_1}\right)^\beta, \quad (4.7)$$

где K_1 – расчётные затраты для перехода на следующий уровень; R_1 – уровень организационного развития организации (квалификация персонала, готовность к изменениям); α, β – уровень эластичности (обычно $\alpha > \beta$), так как деньги важнее, но без людей не работает).

Для принятия решений о целесообразности перехода можно использовать модифицированную формулу NPV (чистой приведенной стоимости), учитывающую рост эффективности от повышения уровня организационного развития:

$$\text{NPV} = -K + \sum_{t=1}^T \frac{\Delta P_t \cdot V \cdot (M_{L+1} - M_L)}{(1+r)^t}, \quad (4.8)$$

где K – затраты на роботизацию и автоматизацию в переход (оборудование, ПО, обучение, интеграция); ΔP_t – прирост производительности в период t (в единицах продукции); V – добавленная стоимость на единицу продукции; $M_{L+1} - M_L$ – прирост интегрального показателя зрелости; r – ставка дисконтирования; T – горизонт планирования.

Эта формула позволяет оценить, окупается ли переход от уровня 2 к уровню 3 или от 3 к 4 с учетом того, что каждый следующий уровень дает меньший относительный прирост, но требует больших инвестиций.

Опишем граничные условия и ограничения модели:

1. Зависимость показателей – показатели могут быть не полностью независимы. Например, высокий P_i (интеллект) невозможен без достаточного P_D (цифровой интеграции) – данные должны откуда-то поступать.

2. Наличие пороговых эффектов. Для перехода на уровень 4 необходимо одновременное достижение высоких значений по всем показателям. Нельзя иметь $P_A = 0.99$ при $P_D = 0,5$ – это будет уровень 3, так как без M2M-коммуникации автономность неполная.

3. Субъективность весов: (w_A, w_D, w_i, w_S) могут различаться для разных типов производств (например, для аэрокосмической отрасли важнее P_C и P_S , для массового производства – P_A)).

Проведенный анализ позволяет сделать вывод о том, что автоматизация и роботизация являются не просто последовательной сменой технологических укладов, а мощным системным драйвером организационного развития производственных систем. Учитывая взаимосвязь организационных и технических аспектов, автоматизацию и роботизацию можно рассматривать как фактор организационного развития производственной системой, поскольку они способны разрешить внутренние противоречия.

Процессы автоматизации и роботизации оказывают глубокое и многогранное влияние на социальные аспекты и персонал организации, затрагивая различные уровни взаимоотношений между людьми, коллективом и

работодателями, а также трансформируя сам характер трудовой деятельности. Рассмотрим основные социальные эффекты и изменения, вызванные внедрением автоматизированных и роботизированных систем в организациях.

Одним из ключевых социальных эффектов автоматизации и роботизации является изменение характера занятости. Автоматизация и роботизация ведут к перераспределению трудовых функций, исключая некоторые виды деятельности, традиционно выполнявшиеся человеком, и заменяя их машинами. Это касается в основном рутинных, монотонных и физически тяжелых задач, таких как погрузочно-разгрузочные работы, сборка деталей, обработка данных и т.п. В результате меняется сама природа рабочей силы: снижается потребность в неквалифицированном труде, одновременно возрастает спрос на высококвалифицированные кадры, способные обслуживать и программировать автоматизированные системы [77].

Процесс автоматизации неизбежно вызывает необходимость переподготовки и переквалификации значительной части сотрудников. Появление новых технологий требует от работников освоения новых навыков и знаний, что может повлечь за собой возникновение стресса и сопротивления со стороны персонала. Организации, стремящиеся к успешному внедрению автоматизации, должны уделять особое внимание программам профессионального переобучения и адаптации сотрудников к новым условиям труда. Эффективные стратегии управления изменениями, включая психологическую поддержку и активное вовлечение сотрудников в процесс трансформации, становятся важными элементами социального взаимодействия внутри коллектива.

Внедрение автоматизации и роботизации оказывает значительное влияние на социально-психологическую атмосферу в коллективе. Появление новых технологий может вызвать чувство тревоги и неуверенности у сотрудников, опасаящихся потерять работу или столкнуться с необходимостью кардинально изменить привычный уклад профессиональной жизни. Кроме того, автоматизация нередко меняет иерархию внутри организации, создавая новые роли и позиции,

что может привести к изменению баланса сил и возникновению конфликтов. Руководство должно внимательно отслеживать настроение коллектива и своевременно предпринимать шаги по созданию атмосферы доверия и взаимопонимания.

Автоматизация и роботизация приводят к повышению требований к квалификации работников. Если раньше достаточно было владеть базовыми навыками, то теперь от сотрудников требуются глубокие знания в области программирования, инженерии, анализа данных и других высокотехнологичных дисциплин. Это приводит к образованию нового типа работников – профессионалов с высокими компетенциями в области цифровых технологий. Такая тенденция усиливает разрыв между квалифицированными и неквалифицированными работниками, что ставит перед организациями задачу обеспечения равных возможностей для всех сотрудников.

Автоматизация и роботизация меняют традиционные формы трудовых отношений. Появляются новые типы контрактов, основанные на проектной работе, фрилансе и удаленном сотрудничестве. Это связано с тем, что многие автоматизированные процессы требуют лишь временного присутствия людей, а основная работа выполняется машинами. Такие изменения создают новый социальный контекст, в котором традиционные рабочие отношения уступают место более гибким и разнообразным формам сотрудничества [86].

Внедрение автоматизации и роботизации поднимает вопросы социальной справедливости. Одним из негативных эффектов может стать усиление неравенства в доходах и возможностях трудоустройства. Автоматизация преимущественно замещает низкооплачиваемые и низкоквалифицированные профессии, оставляя безработными целые категории работников. Это может привести к социальному напряжению и обострить проблему бедности и маргинализации определенных слоев общества. Для смягчения негативных последствий необходимы государственные и корпоративные программы

поддержки, включая субсидии, программы переквалификации и социальную защиту.

Несмотря на вызовы, автоматизация и роботизация несут в себе огромные перспективы для общества. Новые технологии могут создавать условия для появления новых профессий и карьерных траекторий, которые ранее не существовали. Например, специалисты по искусственному интеллекту, робототехнике и киберфизическим системам становятся востребованными профессиями будущего. Вместе с тем возникает необходимость в формировании новой системы образования и переквалификации, которая бы отвечала требованиям цифровой эпохи.

Влияние процессов автоматизации и роботизации на социальные аспекты и персонал организации многогранно и противоречиво. С одной стороны, они открывают путь к повышению производительности, качеству продукции и улучшению условий труда. С другой стороны, они ставят перед обществом серьезные вызовы, связанные с изменением характера занятости, переквалификацией, социальным неравенством и психологическим стрессом. Для успешного преодоления этих вызовов организациям и обществу в целом необходимо развивать стратегии, направленные на поддержание социальной стабильности, обеспечение справедливого распределения благ и создание условий для непрерывного обучения и адаптации к новым технологиям.

Разработка программы мероприятий, направленных на повышение мотивации и удовлетворенности персонала, представляет собой сложный и многослойный процесс, включающий в себя теоретические и практические аспекты управления человеческими ресурсами. Программа должна учитывать индивидуальные особенности сотрудников, культурные и организационные контексты, а также быть гибкой и адаптивной к изменениям внешних и внутренних условий. Далее представлена развернутая научная концепция разработки такой программы.

Факторы, влияющие на мотивацию и удовлетворенность, можно разделить на внешние (организационные) и внутренние (личностные):

- Внешние факторы включают в себя условия труда, оплату, признание заслуг, возможности для профессионального роста, стиль руководства и корпоративную культуру.

- Внутренние факторы зависят от индивидуальных предпочтений, ценностей, амбиций и личностных качеств сотрудника.

Программа мероприятий должна учитывать оба типа факторов, предлагая сбалансированное сочетание внешних стимулов и поддержки внутреннего саморазвития сотрудников.

Требования к компетентности персонала в условиях автоматизации и роботизации производственных процессов приобретают особую важность ввиду кардинальных изменений, происходящих в промышленной среде. Автоматизация и роботизация, будучи неотъемлемой частью четвертой промышленной революции (Industry 4.0), радикально трансформируют производственные процессы, ставя перед организацией новые вызовы и предоставляя уникальные возможности. Эти изменения требуют пересмотра традиционных представлений о компетенциях и квалификации работников, выдвигая на первый план необходимость формирования нового набора навыков и знаний, которые позволят эффективно взаимодействовать с высокотехнологичным оборудованием и сложными информационными системами.

В условиях повсеместного внедрения автоматизации и роботизации требования к компетентности персонала претерпевают значительные изменения.

Традиционно основным требованием к работникам на производственных предприятиях был высокий уровень владения техническими навыками, связанными с управлением станками, механизмами и другим физическим оборудованием. Однако с приходом автоматизации и роботизации акцент смещается на способность персонала эффективно взаимодействовать с цифровыми системами и умными устройствами. Работники должны уметь не

только эксплуатировать, но и настраивать, диагностировать и обслуживать сложное автоматизированное оборудование, обладающее множеством сенсоров, интерфейсов и программных модулей.

Современный работник в условиях автоматизации и роботизации должен демонстрировать высокую степень гибкости и адаптивности. Быстрое развитие технологий требует от персонала умения оперативно осваивать новые навыки и адаптироваться к изменениям в производственных процессах. Способность к постоянному обучению и самосовершенствованию становится одним из ключевых требований к компетентности.

Цифровая трансформация производственных процессов предъявляет жесткие требования к компьютерной грамотности персонала. Сотрудникам необходимо владеть основами программирования, понимать принципы работы информационных систем и уметь работать с базами данных. Особый акцент делается на знание специализированных программных пакетов, используемых для управления производственными линиями, анализа данных и моделирования производственных процессов [63].

Современные производственные процессы требуют от персонала глубоких междисциплинарных знаний. Каждый сотрудник должен обладать знаниями не только в своей узкой специализации, но и в смежных областях, таких как электроника, механика, программирование, кибербезопасность и управление проектами. Это обусловлено тем, что автоматизированные системы требуют комплексного подхода к обслуживанию и управлению.

Эффективное взаимодействие между членами команды, а также между различными подразделениями организации становится критически важным в условиях автоматизации и роботизации. Работники должны уметь ясно и точно передавать информацию, сотрудничать с коллегами и внешними партнерами, а также решать возникающие конфликты. Особое внимание уделяется развитию навыков работы в кросс-функциональных командах.

Автоматизация и роботизация не только выполняют рутинные задачи, но и освобождают работников для выполнения более творческих и инновационных функций. Персонал должен проявлять инициативу, предлагать новые идеи и находить нестандартные решения возникающих проблем. Способность к инновационному мышлению становится одним из ключевых факторов успеха в условиях стремительно развивающейся промышленной среды.

Для удовлетворения возросших требований к компетентности персонала в условиях автоматизации и роботизации необходимо формировать у работников новые компетенции.

4.2 Разработка технического предложения по созданию и функционированию участка роботизированной сборки БПЛА

Ключевым документом, устанавливающим требования к производственному участку или производственной линии, является техническое предложение (ТП). Цель ТП – разработка требований к созданию роботизированного производственного участка на котором будут выполняться технологические и вспомогательные операции.

ТП основывается:

- на анализе исходной конструкции изделия;
- на анализе и оценке технологичности конструкции;
- на анализе технологии сборки изделия;
- на анализе существующих системных ограничений (организационно-управленческих и производственно-технологических).

Объектом разработки является производственный участок, на котором выполняются технологические и вспомогательные операции с элементами роботизации при производстве установленной конструкции.

ТП содержит ссылки на техническую документацию по технологии производства на роботизированном производственном участке.

Структура ТП приведена в таблице 4.5.

Таким образом, данный документ является базовым по организации производственного участка, в нашем случае интеллектуальной роботизированной производственной ячейки [115].

Таблица 4.5 – Структура ТП

Раздел ТП	Описание
1. Введение	Устанавливаются цели и задачи создания интеллектуальной роботизированной производственной ячейки. Определяется перечень исходных данных для создания интеллектуальной роботизированной производственной ячейки
2. Термины и определения	Указываются термины и определения, применяемые при описании технического предложения по созданию интеллектуальной роботизированной производственной ячейки
3. Анализ исходных требований	Приводится анализ данных продукции предполагаемой для производства, спецификации и перечней комплектации поставки, анализ существующего технологического оснащения. Проводится анализ пропускной способности производственных участков и рабочих мест
4. Производственно-технологическое решение	Указывается перечень системных ограничений. Приводятся описание производственно-технологического решения, принципиальной схемы реализации технологии роботизированного производства продукции, расчет целевых производственных показателей, сравнительный анализ нескольких вариантов реализации производственно-технологических решений
5. Технические требования к производимой продукции	Проводится анализ технологичности конструкции. Приводятся предложения по повышению технологичности конструкции
6. Требование к технологии и технологическому оснащению	Приводится описание операций технологического процесса, перечень технологической документации, применяемый в интеллектуальной роботизированной производственной ячейке, перечень технологического оснащения
7. Требования к организации интеллектуальной роботизированной производственной ячейки	Приводится перечень технологических и вспомогательных операций, перечень документации по организации производства
8. Оценка рисков	Приводится методика оценки рисков появления несоответствий и отказов в интеллектуальной роботизированной производственной ячейке, перечень рисков, в соответствии с классификацией рисков, оценка и ранжирование рисков, перечень мероприятий по снижению рисков
9. Техно-экономическое обоснование	Приводится расчет экономической эффективности от создания интеллектуальной роботизированной производственной ячейки

В качестве примера разработки и применения данного документа в диссертационном исследовании разработано ТП для создания участка роботизированной сборки БПЛА типа ВТ 40. Далее приводятся ключевые выдержки из ТП по созданию участка.

Цель ТП – разработка требований к созданию роботизированного производственного участка по сборке дрона установленной конструкции.

ТП основывается на:

- анализе исходной конструкции FPV-дрона;
- анализе и оценке технологичности конструкции;
- анализе технологии сборки FPV-дрона;
- анализе существующих системных ограничений (организационно-управленческих и производственно-технологических).

Объектом разработки является производственный участок, на котором выполняются технологические и вспомогательные операции с элементами роботизации при сборке FPV-дрона установленной конструкции.

ТП содержит ссылки на техническую документацию по технологии сборки FPV-дрона организации роботизированного производственного участка.

В качестве технического задания (ТЗ) был определён объём выпуска партии FPV-дронов в количестве 37000 ед. в год.

Прототипом конструкции является беспилотный летательный аппарата ВТ-40 (далее – FPV-дрон текущей конструкции). Беспилотный летательный аппарат (БПЛА) ВТ-40 (Владлен Татарский) представляет собой алюминиевую раму собственной разработки, на которой крепится аккумулятор, камера и полезная нагрузка. Внешний облик БПЛА ВТ-40 представлен на рисунке 4.1.

Разработка производственно-технологических решений осуществлялась с учетом существующих системных ограничений.

Системное ограничение – ключевой фактор, влияющий на целевые значения производственных показателей и реализованные производственно-технологические решения [98].

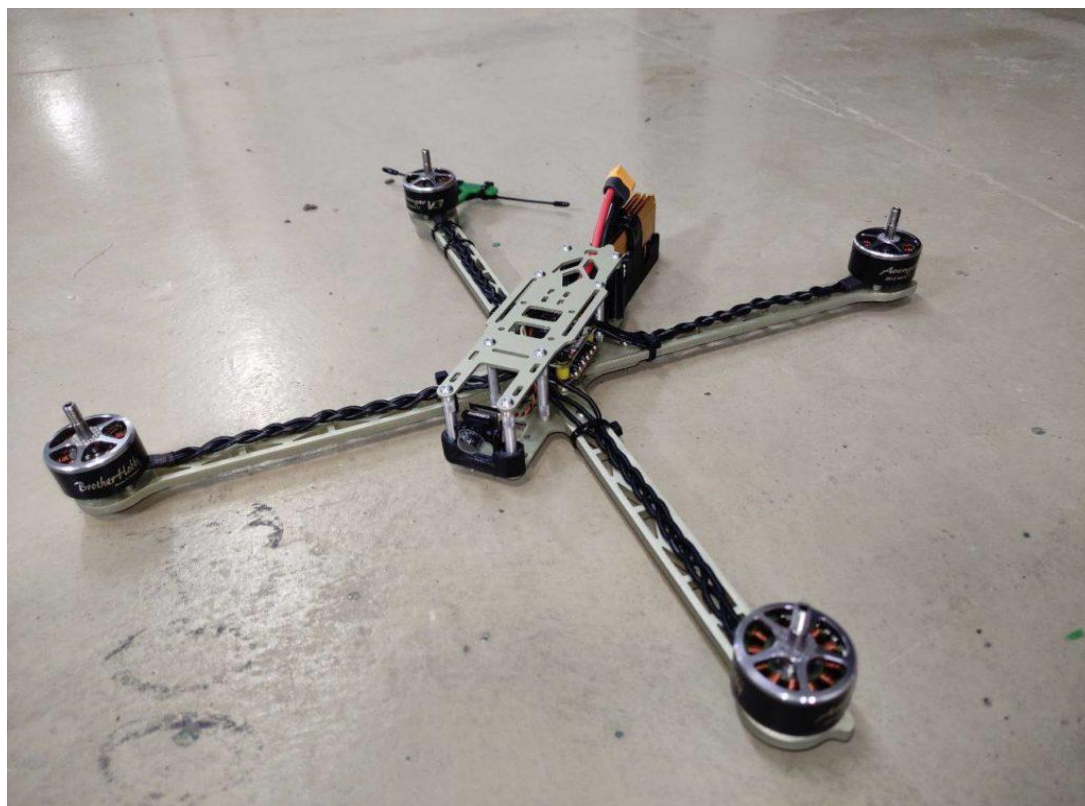


Рисунок 4.1 – Внешний облик VT-40 (текущая конструкция)

Системные ограничения приведены в таблице 4.6.

Таблица 4.6 – Системные ограничения, учитываемые при разработке производственно-технологических решений

Группа ограничений	Описание ограничения
1. Организационные	1.1. Временные ограничения по отработке всех возможных производственных операций (транспортировка, укладка деталей, завинчивание винтов, укладка плат и др.). Длительность реализации проекта по отработке роботизированных операций – 5 месяцев. Фокус проекта на роботизацию повторяемых и ответственных технологические операции: - укладка и позиционирование деталей рамы; - завинчивание винтов
	1.2. Отсутствие сборочных технологических и вспомогательных процессов на рассматриваемом производственном участке роботизированных операций
	1.3. Ограниченное время на закупку, поставку, пуско-наладку роботизированных комплексов

окончание таблицы 4.6

Группа ограничений	Описание ограничения
2. Проектно-конструкторские	2.1. Ограничение по изменению конструкции: - затруднен отказ от операции пайки; - нецелесообразно из-за организованного производства корпусных деталей изменение в конструкции корпусных деталей
3. Производственно-технологические	3.1. Существующие производственные мощности по изготовлению комплектующих (двигатели, винты, детали корпуса) должны быть сбалансированы с участком сборки 3.2. Целесообразность роботизации технологических и вспомогательных операций
4. Экономические	4.1. Экономическая эффективность при внедрении роботизированных комплексов

Описание производственно-технологических решений:

1. Участок сборки организован по принципу поточно-постового производства, обеспечивающего высокую производительность труда с минимальными запасами незавершенного производства.

2. Участками поставщиками участка сборки являются:

- участок механической обработки;
- линия производства комплектующих для электродвигателей;
- линия производства электродвигателей;
- участок производства воздушных винтов;
- участок производства печатных плат.

3. Границами производственного процесса роботизированной сборки FPV-дрона являются: комплектование магазинов и тары деталями и электронными компонентами, подсборка лучей и двигателей, частичная сборка рамы, установка электронных компонентов, окончательная сборка рамы, проверка и прошивка, транспортировка на участок испытания.

4. Контроль качества сборочных роботизированных и ручных операций выполняется производственным персоналом участка при выполнении технологических операций. Каждый собранный FPV-дрон проходит лётные испытания.

5. Прослеживаемость обеспечивается через сменно-суточные задания, в которых отражаются фактические данные по объему произведенной продукции.

6. Фокус проекта:

- организация производственного участка – демонстратора возможностей роботизации процессов сборки дрона;

- повышение производительности труда при сборке дрона существующей конструкции;

- отработка технологических решений по автоматизации и роботизации.

Основные требования, предъявляемые к участку сборки:

- применение стандартизированных компонентов при проектировании сборочной линии;

- возможность быстрой переналадки под новый тип выпускаемой конструкции;

- осуществление быстрых пуско-наладочных работ;

- возможность балансировки ручного труда и производительности робототехнических комплексов;

- соответствие текущим технологиям.

Анализ расчётных производственных показателей проектируемого участка сборки FPV-дронов приведен в таблице 4.7.

Таблица 4.7 – Сравнительный анализ расчётных производственных показателей

№ п/п	Показатель	Создаваемый участок роботизированной сборки
1	Годовой объем производства	37000 ед.
2	Объем производства в смену	150 ед.
3	Объем производства в час	18 ед.
4	Производительность труда/ выработка на 1 рабочего	16 ед.
5	Такт производства	1 ед. каждые 3 мин
6	Тип производства	Поточно-постовая сборка

окончание таблицы 4.7

№ п/п	Показатель	Создаваемый участок роботизированной сборки
7	Численность рабочих на производственном участке	9 человек в смену
8	Количество смен	1 смена
9	Уровень гибкости (возможность выпуска разных моделей)	Возможность выпускать разные комплектации
10	Охват технологических операций роботизацией	1) транспортировка; 2) укладка деталей корпуса; 3) завинчивание винтов
11	Площадь участка	144 м ²
12	Количество технологических операций в производственном процессе (без учета вспомогательных)	8
13	Время производственного цикла (без учета ожиданий) / цикловое время	24 мин
14	Время такта, мин.	3 мин
15	Объем НЗП	50 комплектов
16	Уровень дефектности	5 %

На основании представленной документации FPV-дрона (рисунок 4.2) сформирован ряд технических предложений, который позволяет увеличить уровень автоматизации сборочных операций.

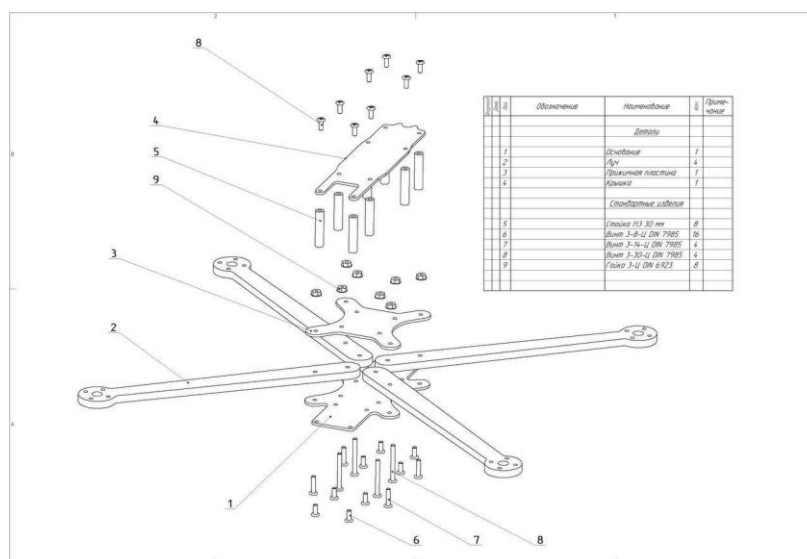


Рисунок 4.2 – Схема членения рамы FPV-дрона

Технические предложения представлены в таблице 4.8.

Таблица 4.8 – Технические предложения изменения конструкции

Текущее состояние	Планируемое состояние	Обоснование
1. Использование винтов под крестовую отвёртку	Использование винтов под шестигранник	Увеличенная площадь зацепления при фиксации крепёжных элементов
2. Использование трех типоразмеров крепёжных элементов, длиной 8, 14 и 30 мм	Оставить два типоразмера крепёжных элементов длиной 8 и 30 мм	Применение роботизированной отвёртки с автоматической подачей винтов
3. Использование для фиксации проводов термоусадки	Использование клейкой термоусадочной ленты	Выполнение процесса с применением технологического оснащения
4. Пайка проводов на регуляторе оборотов и полётном контроллере	Применение разъёмов для соединения электронных компонентов	Уменьшение времени, затрачиваемого на операции пайки
5. Использование круглых стоек	Использование шестигранных стоек	Исключение проворота при базировании в технологическом оснащении
6. Двигатели имеют провода длиной около 200 мм	Выполнение подготовительных операций по формированию петли для пайки к регулятору оборотов	Уменьшение времени, затрачиваемого на подготовку к пайке

Для выполнения сборочных операций с помощью роботизированных комплексов необходимо применение технологической оснастки, являющейся неотъемлемой частью роботизированной сборки и обеспечивающей:

- надёжное базирование и фиксацию деталей;
- точное позиционирование компонентов;
- возможность быстрой переналадки оборудования;
- компенсацию погрешностей сборки.

Перечень оснащения, необходимого для организации производственного участка, представлен в таблице 4.9.

Таблица 4.9 – Перечень оснащения на производственном участке

№ п/п	Рабочие места	Перечень оснащения
1	Вспомогательное рабочее место № 1	<ul style="list-style-type: none"> - стеллаж для хранения комплектующих и магазинов; - тележка для транспортировки магазинов; - сборочный стол
2	Вспомогательное рабочее место № 2	<ul style="list-style-type: none"> - стеллаж для хранения комплектующих; - тележка для транспортировки магазинов; - сборочный стол; - стапель; - кронштейн для системы технического зрения; - ящик с двигателями; - ящик с лучами; - магазин с подборкой (луч и двигатель); - система технического зрения; - электрическая отвёртка; - бункер с винтами
3	Вспомогательное рабочее место № 3	<ul style="list-style-type: none"> - стеллаж для хранения комплектующих и магазинов; - тележка для транспортировки магазинов; - сборочный стол
4	Рабочее место № 1	<ul style="list-style-type: none"> - сборочный стол; - стапель-спутник; - приспособление для быстрой установки гаек; - бункер с гайками
5	Рабочее место № 2	<ul style="list-style-type: none"> - стеллаж для хранения комплектующих; - сборочный стол; - стапель-спутник; - магазин с основаниями; - магазин с площадками; - магазин с подборкой (луч и двигатель); - робот CR5; - электропневматическая система контроля вакуума на основе вакуумного эжектора ARW; - пневматический шкаф; - компрессор; - вакуумная присоска для робота CR5
6	Рабочее место № 3	<ul style="list-style-type: none"> - сборочный стол; - стапель-спутник; - тележка для транспортировки ступеней-спутников; - робот CR5; - отвёртка для робота с автоматической подачей винтов; - бункер с винтами
7	Рабочее место № 4	<ul style="list-style-type: none"> - стеллаж для хранения комплектующих; - сборочный стол;

окончание таблицы 4.9

№ п/п	Рабочие места	Перечень оснащения
7		<ul style="list-style-type: none"> - стاپель стационарный; - магазин с кронштейнами антенны; - электрическая отвёртка; - тара со втулками; - бункер с винтами
8	Рабочее место № 5	<ul style="list-style-type: none"> - стеллаж для хранения комплектующих; - сборочный стол; - стاپель стационарный; - магазин с подборкой регулятора оборотов с силовыми проводами, втулками и конденсаторами; - магазин с подборкой полётного контроллера со втулками; - паяльная станция; - магазин со жгутами; - тара с термоусадочной лентой; - бункер с винтами
9	Рабочее место № 6	<ul style="list-style-type: none"> - стеллаж для хранения комплектующих; - сборочный стол; - стاپель стационарный; - магазин с подборками камер с кронштейнами; - магазин с подборкой приёмо-передающих устройств; - паяльная станция; - магазин с антеннами; - бункер с винтами
10	Рабочее место № 7	<ul style="list-style-type: none"> - стеллаж для хранения комплектующих; - сборочный стол; - стاپель стационарный; - магазин с пластинами; - электрическая отвёртка; - робот CR5; - бункер с винтами
11	Рабочее место № 8	<ul style="list-style-type: none"> - сборочный стол; - персональный компьютер

Производственный участок роботизированной сборки FPV-дронов представляет собой восемь основных и три вспомогательных рабочих места. Перечень работ, выполняемых на рабочих местах, представлен в таблице 4.10.

Таблица 4.10 – Перечень работ на производственном участке

№ п/п	Рабочие места	Перечень работ
1	2	3
1	Вспомогательное рабочее место № 1	Комплектование магазинов деталями рамы
2	Вспомогательное рабочее место № 2	Подбор лучей и двигателей
3	Вспомогательное рабочее место № 3	Комплектование тары с электронными компонентами
4	Рабочее место № 1	Постановка гаек в стапель-спутник
5	Рабочее место № 2	Частичная сборка рамы
6	Рабочее место № 3	Завинчивание винтов
7	Рабочее место № 4	Сборка рамы
8	Рабочее место № 5	Пайка регулятора оборотов с проводами двигателя и сборка полётного контроллера
9	Рабочее место № 6	Сборка и пайка электронных компонентов
10	Рабочее место № 7	Проверка и сборка рамы
11	Рабочее место № 8	Прошивка

Перечень рисков приведен в таблице 4.11.

Таблица 4.11 – Перечень рисков

Группа	Риск
Технические и технологические риски	Недостаточная точность роботизированных комплексов. Риск того, что роботы не смогут работать с мелкими и хрупкими компонентами дрона (например, при пайке платы, установке коннекторов)
	Низкая надежность оборудования. Сбои в работе роботов, конвейеров или систем зрения, приводящие к простоям всей линии
	Сложность интеграции. Проблемы с совместимостью нового роботизированного оборудования с существующими системами (SCADA, ERP, MES)
	Некорректная работа системы технического зрения. Ошибки в распознавании компонентов, их позиции и ориентации, что приводит к браку или повреждениям
Операционные и производственные риски	Падение производительности на этапе внедрения. Снижение выпуска продукции во время отладки, обучения персонала и запуска линии
	Рост процента брака. Автоматика может стабильно и быстро производить брак, если процесс настроен неидеально. Обнаружение таких дефектов может потребовать дополнительных ресурсов
	Недостаточная гибкость линии. Риск, что линия не сможет быстро перенастраиваться под новые модели FPV-дронов или кастомные сборки, что критично для ниши

окончание таблицы 4.11

Группа	Риск
	Зависимость от одного поставщика комплектующих. Риск использовать специализированные компоненты (например, конкретные роботы-манипуляторы), которые сложно заменить аналогами
Риски, связанные с персоналом	Сопротивление персонала. Недовольство и саботаж со стороны сотрудников, которые боятся потерять рабочие места из-за автоматизации
	Дефицит квалифицированных кадров. Отсутствие в команде или на рынке труда инженеров-робототехников, техников и программистов, способных обслуживать и настраивать сложную линию
	Риски знаний. Зависимость от узкого круга специалистов, уход которых может парализовать работу линии
Финансовые риски	Превышение бюджета. Рост стоимости оборудования, ПО или услуг интегратора сверх запланированного
	Недостижение экономического эффекта. Срок окупаемости инвестиций (ROI) может оказаться значительно выше расчетного из-за скрытых затрат на эксплуатацию и низкой загрузки линии
	Непредвиденные эксплуатационные расходы. Высокая стоимость запчастей, лицензий на ПО и технического обслуживания
Внешние риски	Изменение конъюнктуры рынка. Резкий рост или падение спроса на FPV-дроны, из-за которого роботизированная линия окажется недогруженной или не сможет удовлетворить спрос
	Риски цепочки поставок. Срывы поставок как самих роботов и компонентов для линии, так и комплектующих для дронов, останавливающие производство
	Правовые и нормативные риски. Изменение требований к производству или сертификации электронной продукции

Таким образом, разработанное техническое предложение является основой для проектирования и организации интеллектуального роботизированного производственного участка. В диссертационном исследовании было разработано ТП на создание участка роботизированной сборки БПЛА под заданную производственную программу – 37000 ед. в год.

4.3 Апробация производственно-технологических решений по созданию серийного роботизированного производства

Имитационное моделирование – это способ создания модели, которая является симуляцией реальных процессов и систем. После построения с ее помощью проводятся эксперименты над этой системой.

При построении имитационной модели стоит учитывать каждый аспект определенного производства, а также понимать его структуру и работу. Это необходимо для создания более реальной картинки производства.

В данной главе описывается серийное производство БПЛА. Для того чтобы оценить и отработать «узкие места» производства, была построена имитационная модель производственного участка сборки рамы БПЛА.

Построение имитационной модели начинается с выстраивания планировки производственного участка (рисунок 4.3).

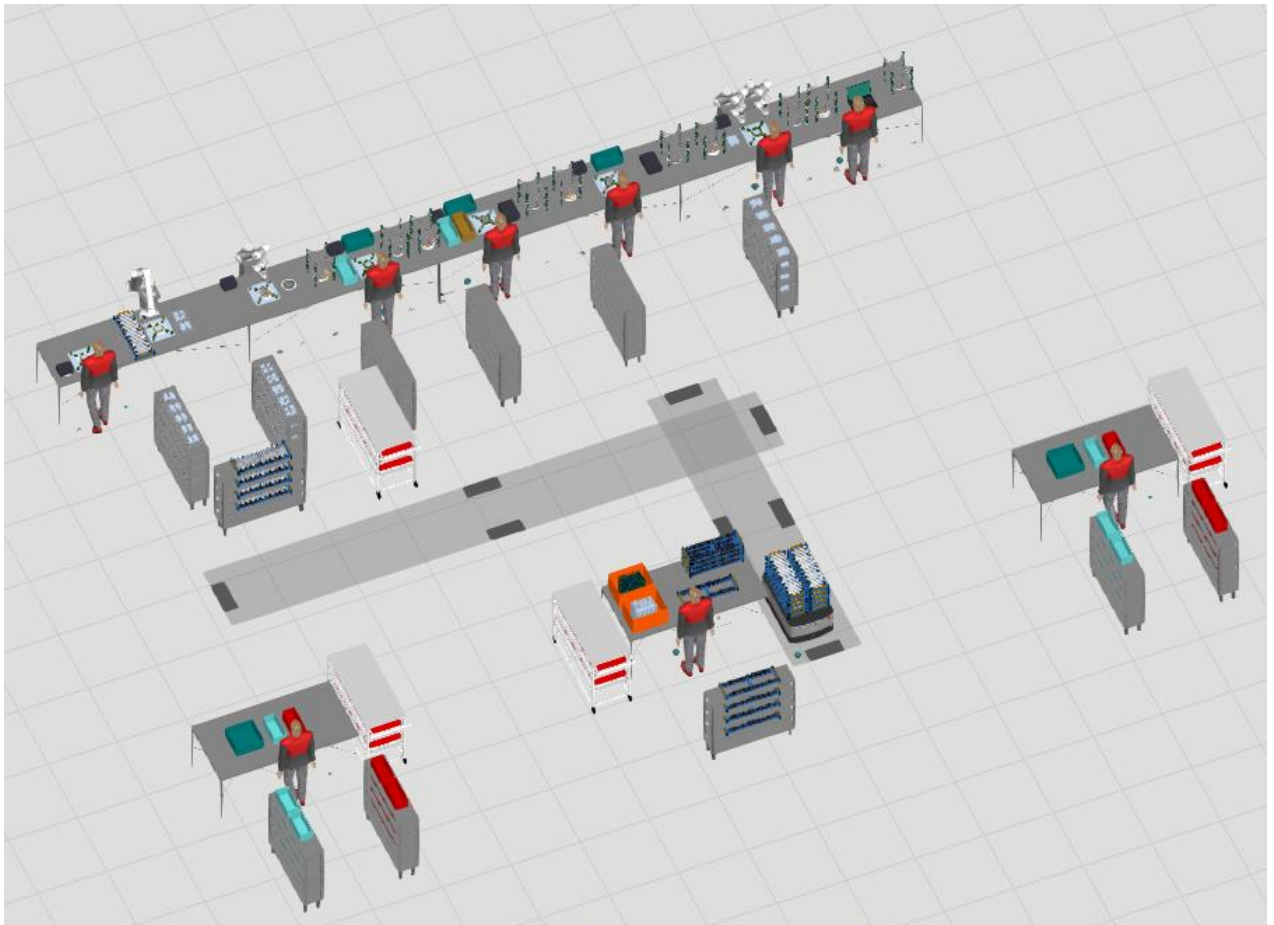


Рисунок 4.3 – Планировка производственного участка

На планировке указаны рабочие столы, а также расставлены роботы и люди, которые производят операции.

На рисунке 4.4 более подробно представлено основное оборудование для каждой технологической операции, исполнители, а также магазины изделия.

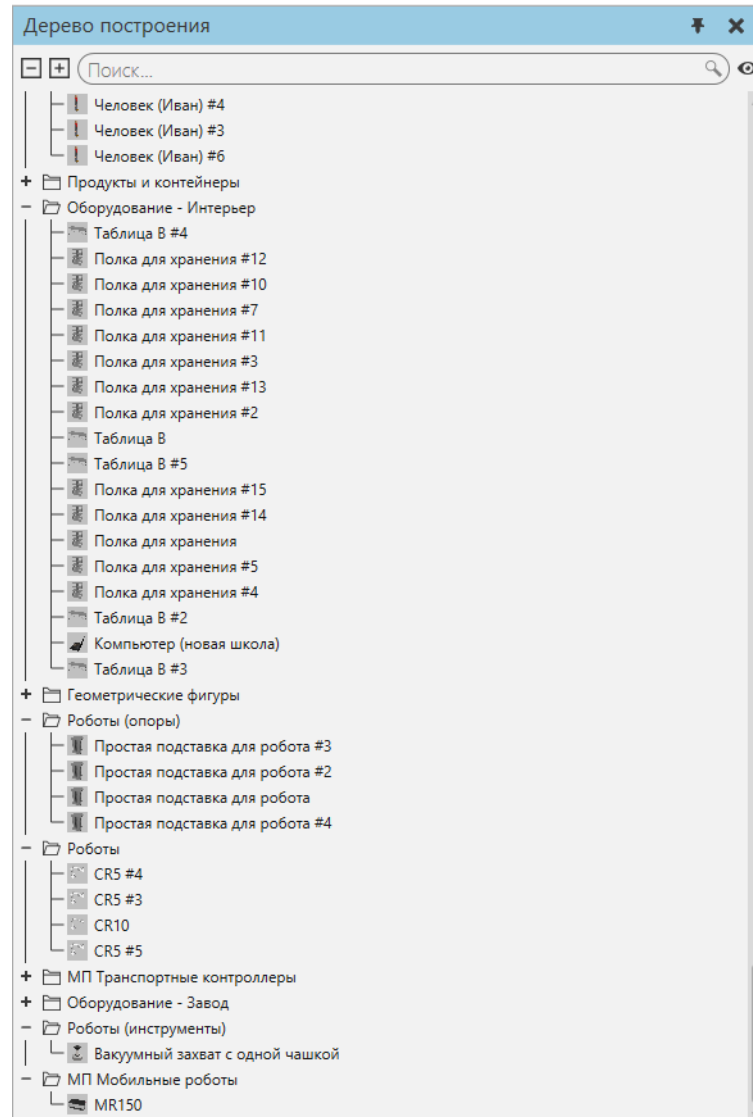


Рисунок 4.4 – Перечень оборудования из R-Про

При разработке имитационной модели определен состав технологического оборудования и технологического оснащения исходя из стандартизированной базы, приведенной в R-Pro [61].

Для задания движения и смены операции на модель всегда ставятся компоненты процесса. На рисунке 4.5 представлены компоненты, которые используются в данной имитационной модели.

Как видно из рисунка 4.5, для каждого действия есть свой компонент. Так, для задания процесса и работы с ним, а также для вывода статистики необходим «Узел процесса». С его помощью появляется возможность задавать параметры процесса. Для того чтобы исполнитель мог взять из магазина компонент и выполнить операцию, необходимо поставить в определенные точки (откуда брать изделие и куда его перекладывать) компоненты «Процесс подачи» и «Узел процесса».

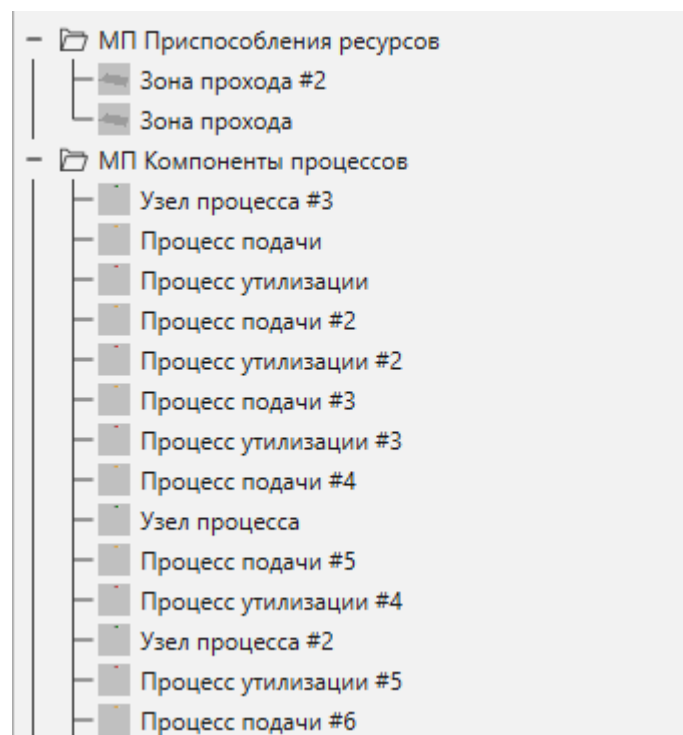


Рисунок 4.5 – Компоненты процессов

Каждому компоненту выставляются определенные задачи, которые они должны выполнять. На рисунке 4.6 представлены задачи, которые заданы компоненту процесса «Узел процесса» на имитационной модели.

Данные задачи выставляются согласно такту выпуска продукции из каждого процесса: «Delay» используется для исполнителя. Благодаря этой задаче,

накопитель двигателей не переполняется и работа протекает в реальном режиме; «TransportIn» и «TransportOut» используются для создания и перемещения деталей в данном компоненте процесса.

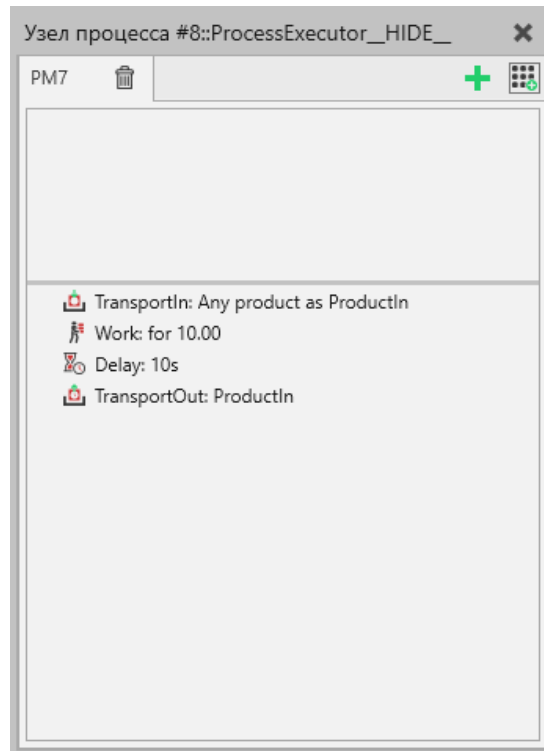


Рисунок 4.6 – Пример задач для компонента процесса «Узел процесса»

После расставления на планировку всех элементов и компонентов процесса выстраивается логистическая цепочка. В данном этапе указывается поочередность действий, а также назначение исполнителей за каждой операцией. На рисунке 4.7 представлена логистическая цепочка одной из операций, которая представляет собой работу на рабочем месте № 4.

Данная имитационная модель является общей, показывающей укрупненную картину производственного процесса. Для большей детализации необходимо запрограммировать движения роботов и смоделировать постановку каждого элемента изделия на ту позицию, на которой он должен стоять.

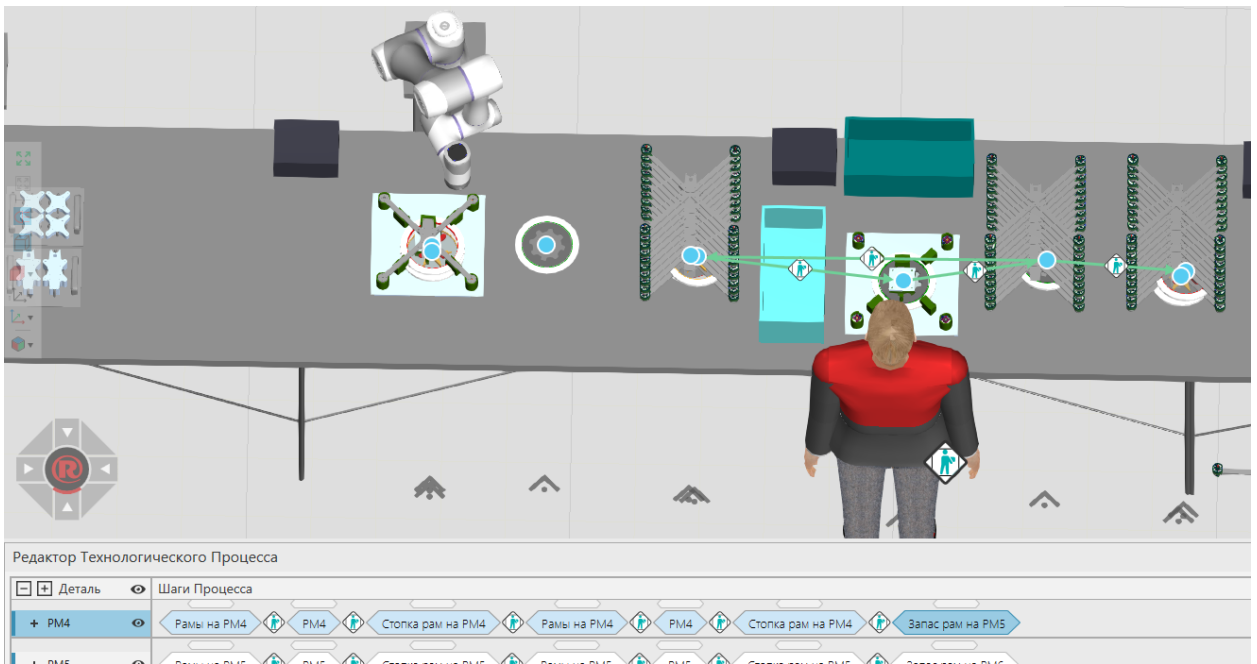


Рисунок 4.7 – Логистическая цепочка перемещения между операциями

На рисунке 4.8 представлено окно «Программирование» с заданным движением робота.

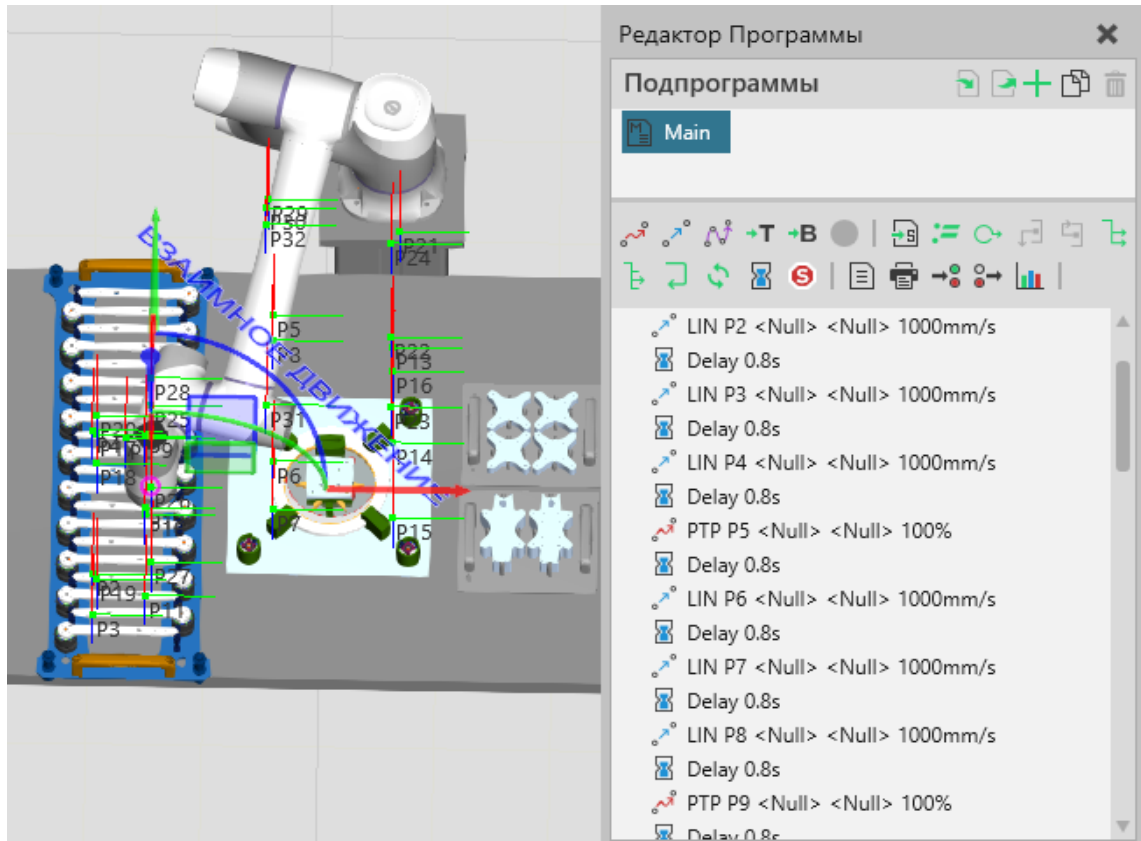


Рисунок 4.8 – Линейное движение робота в окне «Программирование»

На рисунке 4.9 представлено окно «Моделирование», в котором показывается позиция выставления деталей. Данная работа задается именно исполнителю или роботу (ресурсу), так как работу над объектом совершает именно ресурс.

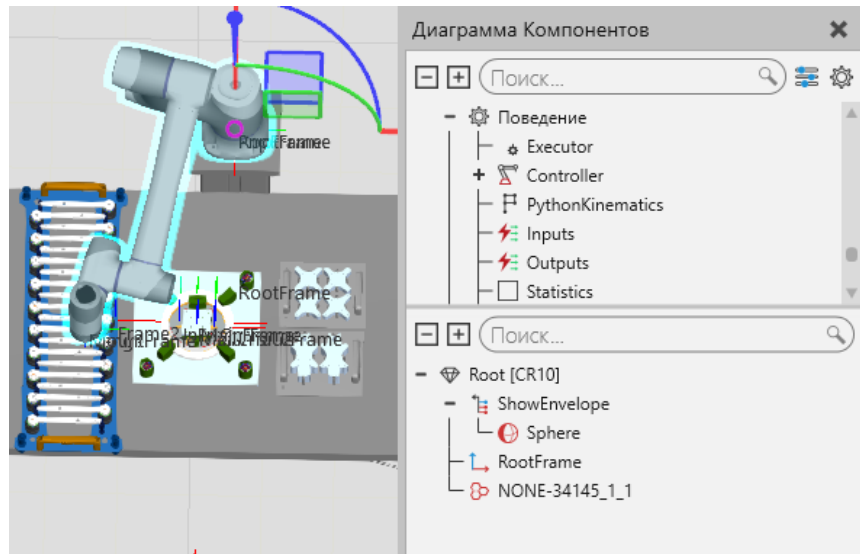


Рисунок 4.9 – Модель выставления деталей в окне «Моделирование»

Благодаря общей имитационной модели определяется досягаемость робота, логичность организации производственного процесса, высчитывается общее время на производство.

По общей имитационной модели производственного процесса создается более точная модель. На данный момент создается движение роботу (программирование робота) и моделируются позиции, которые необходимы для правильной постановки элементов.

Планировка производственного участка разработана с учётом оптимизации рабочих процессов и обеспечения безопасного доступа обслуживающего персонала. На рисунке 4.10 представлена схема расположения основного оборудования, а также на рисунке 4.11 – общий вид участка ВРМ2. В таблице 4.12 дана техническая характеристика основного оборудования.

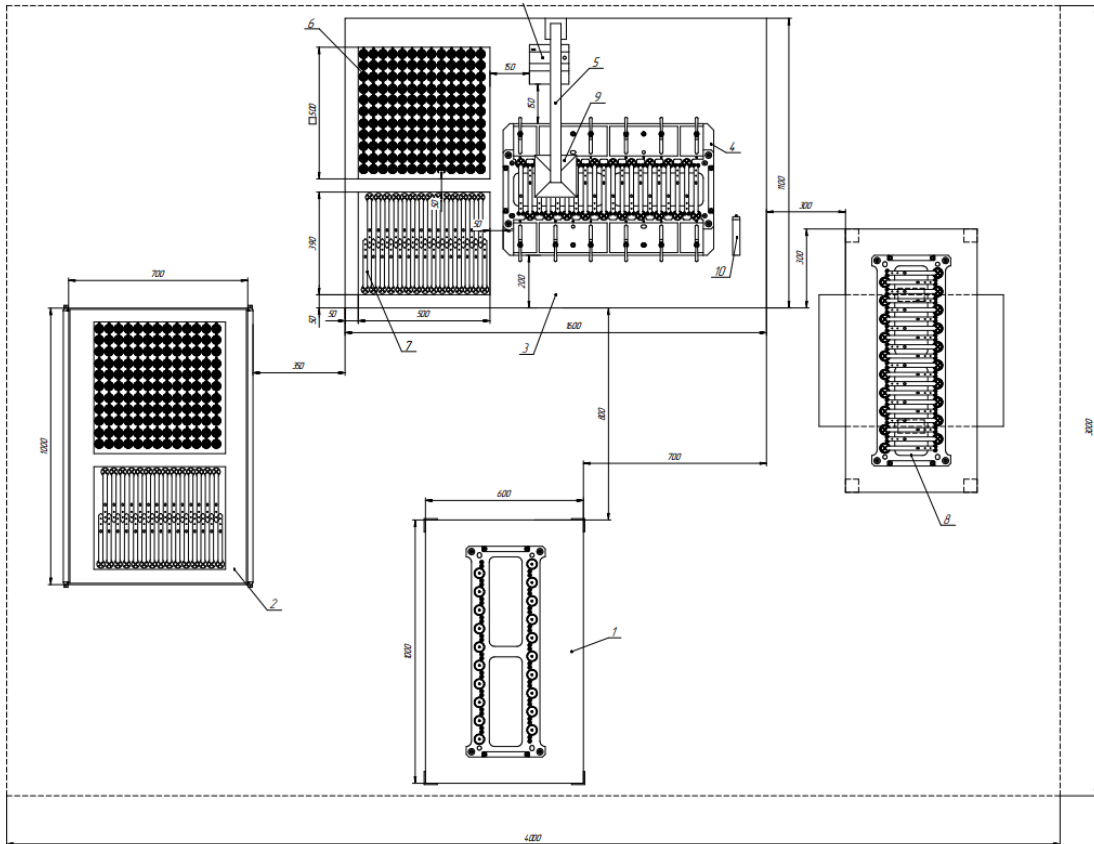


Рисунок 4.10 – Расположение основного оборудования

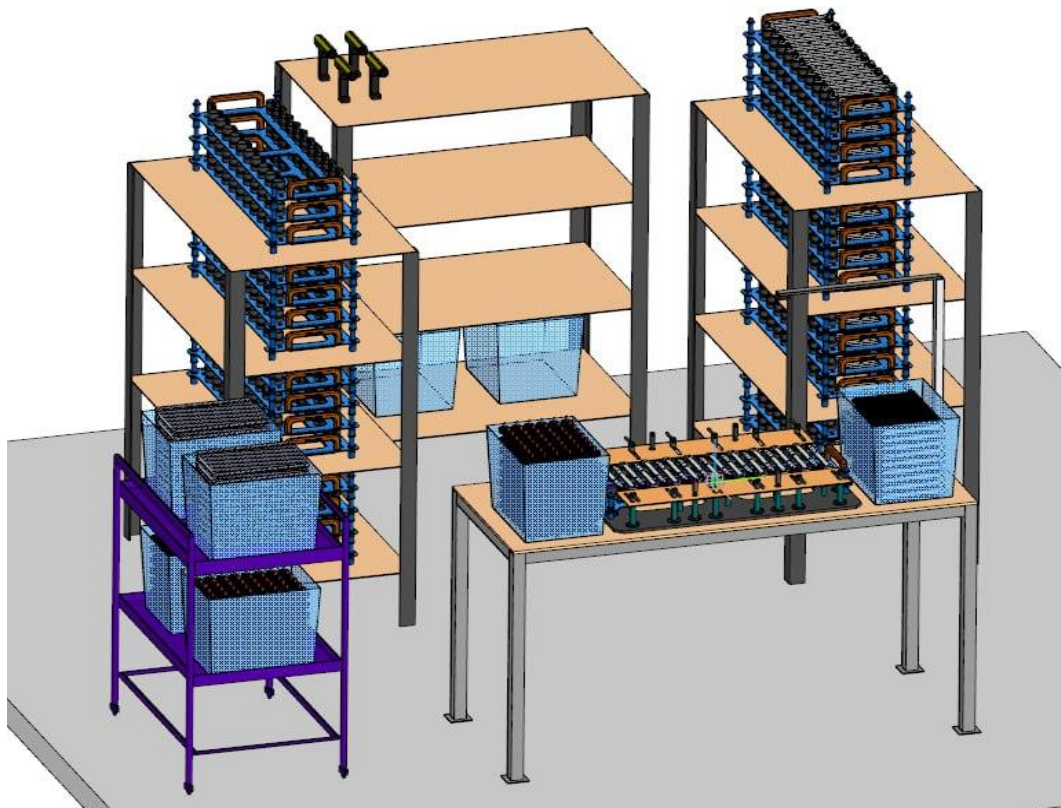


Рисунок 4.11 – Общий вид участка ВРМ2

Таблица 4.12 – Техническая характеристика оборудования

№ п/п	Наименование	Техническая характеристика	Функция
1	2	3	4
1	Стеллаж для хранения пустых магазинов (ТО ВРМ1 01.01.00.000)	<ul style="list-style-type: none"> - Габаритные размеры: 1500×700×300 мм. - Количество полок: 4 шт. - Материал конструкции: сталь. - Покрытие: полимерное (цвет светло-серый, RAL 7035). - Нагрузка на 1 полку: 185 кг - Общая нагрузка на секцию: до 750 кг. - Вес стеллажа: 8,7 кг. - Шаг перфорации стоек: 25 мм 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Размещение пустых магазинов (ТОВРМ1 01.09.00.000) – 16 шт. 2. Систематизация и упорядочивание производственных материалов. 3. Обеспечение удобного доступа к хранимым магазинам. 4. Организация складского хранения производственных компонентов
2	Стеллаж для хранения комплектующих (ТО ВРМ1 01.02.00.000)	<ul style="list-style-type: none"> - Габаритные размеры: 1500×700×300 мм. - Количество полок: 4 шт. - Материал конструкции: сталь. - Покрытие: полимерное (цвет светло-серый, RAL 7035). - Нагрузка на 1 полку: 185 кг. - Общая нагрузка на секцию: до 750 кг. - Вес стеллажа: 8,7 кг. - Шаг перфорации стоек: 25 мм 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Размещение магазинов с комплектующими (ТОВРМ1 01.07.00.000 и ТОВРМ1 01.08.00.000) – 2 шт. Примечание: транспортировка в ящиках и контейнерах на тележке 2 раза за смену. 2. Систематизация и упорядочивание производственных материалов. 3. Обеспечение удобного доступа к хранящимся ящикам
3	Тележка для транспортировки магазинов (ТО ВРМ1 01.03.00.000)	<ul style="list-style-type: none"> - Габаритные размеры: 480×750×920 мм. - Количество полок: 2 шт. - Материал конструкции: сталь. - Покрытие: полимерное (цвет светло-серый, RAL 7035) 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Организация складского хранения производственных компонентов. 2. Размещение магазинов с комплектующими. 3. Систематизация и упорядочивание производственных материалов. 4. Обеспечение удобного доступа к хранимым магазинам. Примечание: роботизированная транспортировка в магазинах 2 раза за смену
4	Сборочный стол (ТО ВРМ1 01.04.00.000)	<ul style="list-style-type: none"> - Габаритные размеры: 1300×600×800 мм. (эргономичная для работы стоя). - Материал каркаса: сталь 3 мм. - Материал столешницы: сталь 6 мм 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Проведение сборочных работ различных узлов и механизмов. 2. Фиксация деталей с помощью струбцин и упоров. 3. Организация рабочего процесса сборки. 4. Размещение комплектующих в процессе сборки

продолжение таблицы 4.12

№ п/п	Наименование	Техническая характеристика	Функция
1	2	3	4
		<ul style="list-style-type: none"> - Покрытие: порошковая краска, устойчивая к механическим воздействиям. - Максимальная нагрузка: 250 кг. - Вес конструкции: 60 кг 	Обеспечение точности позиционирования деталей
5	Стапель (ТО ВРМ1 01.05.00.000)	<ul style="list-style-type: none"> - Тип конструкции: сборно-разборная. - Точность позиционирования: до 0,1 мм. - Количество степеней свободы: 3. - Тип базирования: неподвижное. - Способ управления: ручной 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Обеспечение точного позиционирования компонентов (01.07.00.000 и 01.08.00.000). 2. Лишение деталей степеней свободы для стабильного размещения. 3. Создание правильной геометрической ориентации деталей. Должен правильно взаимно расположить детали
6	Кронштейн для СТЗ (ТО ВРМ1 01.06.00.000)	<ul style="list-style-type: none"> - Максимальная нагрузка: до 10 кг. - Вес штатива: 9,5 кг. - Погрешность позиционирования: не более 0,5 мм. - Стабильность положения: $\pm 0,1$ мм при нагрузке. - Повторяемость установки: $\pm 0,2$ мм. - Способ установки: на ровную поверхность. - Фиксация положения: винтовые зажимы. - Регулировка высоты: телескопические секции. - Устойчивость: регулируемые опоры с контргайками 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Фиксация и позиционирование камеру СТЗ в пространстве. 2. Обеспечение неподвижности камеры при работе. 3. Компенсация вибрации и колебаний. 4. Устойчив при внешних воздействиях. Предотвращение смещения камеры
7	Ящик с двигателями (ТО ВРМ1 01.07.00.000)	<ul style="list-style-type: none"> - Вместимость: 1500 двигателей. - Тип загрузки: фронтальный. - Система хранения: статическая. - Тип конструкции: сборная. - Способ перемещения: ручной/механизированный. - Совместимость со складским оборудованием: да 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Обеспечение безопасности хранения двигателей. 2. Защита компонентов от механических повреждений. <p>Удобство при транспортировке и перемещении</p>

продолжение таблицы 4.12

№ п/п	Наименование	Техническая характеристика	Функция
1	2	3	4
8	Ящик с лучами (ТО ВРМ1 01.08.00.000)	<ul style="list-style-type: none"> - Вместимость: 1500 компонентов. - Система хранения: статическая. - Тип конструкции: сборная. - Способ перемещения: ручной/ механизированный. - Совместимость со складским оборудованием: да 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Обеспечение безопасности хранения двигателей. 2. Защита компонентов от механических повреждений. 3. Удобство при транспортировке и перемещении
9	Магазин с подборкой (лучи и двигатели) (ТО ВРМ1 01.09.00.000)	<ul style="list-style-type: none"> - Вместимость: 16 комплектов по 20 шт. - Тип загрузки: фронтальный. - Система хранения: статическая. - Тип конструкции: сборная. - Способ перемещения: ручной/ механизированный. - Совместимость со складским оборудованием: да. - Максимальная нагрузка: до 100 кг 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Обеспечение безопасного хранения двигателей и лучей. 2. Защита компонентов от механических повреждений. 3. Удобство при транспортировке и перемещении
10	СТЗ (ТО ВРМ1)	<ul style="list-style-type: none"> - Разрешение матрицы: от 2 МП до 16 МП. - Размер пикселя: 3,5 мкм - 14 мкм. - Тип затвора: глобальный или построчный. - Частота кадров: до 25 Гц. - Скорость обработки: 10000-80000 строк/с. - Время отклика: менее 40 мс. - Цветопередача: точная калибровка цветов. - Шумоподавление: встроенное. - Точность определения координат: $\pm 0,1$ мм 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Захват визуальной информации в реальном времени. 2. Выделение значимых объектов на изображении. 3. Определение геометрических параметров. 4. Распознавание форм и размеров. 5. Идентификация по заданным критериям. 6. Определение линейных размеров. 7. Измерение углов и расстояний. 8. Контроль положения объектов. 9. Оценка пространственных характеристик
11	Электрическая отвёртка (ТО ВРМ1)	<ul style="list-style-type: none"> - Диаметр винтов: М1,6 - М5. - Длина винтов: max 20 мм. - Напряжение питания: АС 220В 50 Гц – 60 Гц. - Производительность: 50 шт./мин – 90 шт./мин. - Вместимость: 450 мл. - Максимальный крутящий момент: 0,9 Н/м. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Автоматическое позиционирование инструмента относительно места монтажа. 2. Подача крепежных элементов из магазина. 3. Выполнение операций закручивания с заданным усилием

окончание таблицы 4.12

№ п/п	Наименование	Техническая характеристика	Функция
1	2	3	4
		- Вид хвостовика: шестигранный. - Обороты: 1200 об/мин	
12	Тара с винтами (ТО ВРМ1)	- Размер контейнера: 40×30×60 мм. - Объем: 72 см ³ . - Количество в упаковке: 1000 шт. - Размер резьбы винтов: М3. - Паз: 6 мм. - Материал: сталь. - Покрытие: цинковое. - Шаг резьбы: 0,5 мм	Крепление двигателей к стапелю ТО ВРМ1 01.05.00.000
	Устройство подачи винтов («Бункер») (ТО ВРМ1)	- Бункерный накопитель с вибрационным механизмом. - Производительность: 30-100 винтов в минуту. - Частота вибрации: 25-50 Гц. - Ёмкость буфера: 100-500 гаек. - Размер винтов: М1,6-М5 (регулируется). - Напряжение питания: 220 В/50 Гц. - Потребляемая мощность: 50Вт-150 Вт. - Частота сети: 50 Гц	1. Обеспечение запаса винтов для непрерывной работы. 2. Автоматическая ориентация гаек в нужном положении. 3. Выравнивание деталей по размеру и форме. 4. Поштучная выдача винтов. 5. Регулируемая скорость подачи. 6. Синхронизация с производственной линией

Технологический процесс сборки участка ВРМ1 представляет собой комплексную последовательность операций, выполняемых на сборочном столе, оснащённом необходимым оборудованием и приспособлениями. В первую очередь следует отметить, что рабочее место оператора оборудовано всем необходимым для выполнения сборочных операций: стапелем для точного позиционирования компонентов (двигателей), системой технического зрения, бункером савтоматической подачейвинтов и электрической отвёрткой с программным управлением.

Перед началом сборки оператор подготавливает рабочее место, размещая на нем все необходимые комплектующие, представленные на рисунке 4.12.

В первую очередь устанавливаются два основных контейнера: один с двигателями, второй – с лучами.

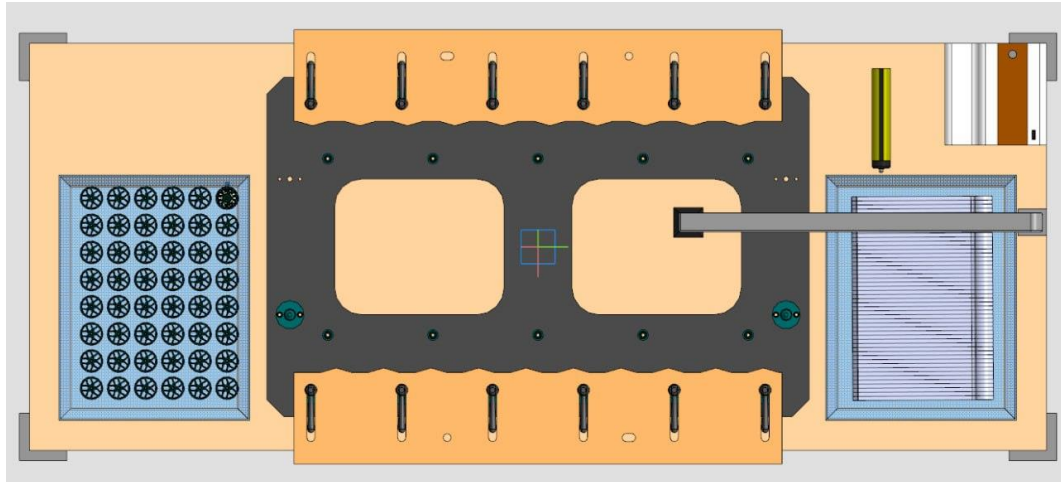


Рисунок 4.12 – Рабочее место оператора

После этого производится монтаж пустого магазина на ступень, который является ключевым элементом сборочного оборудования и представлен на рисунке 4.13, обеспечивающим точное позиционирование всех компонентов в процессе сборки.

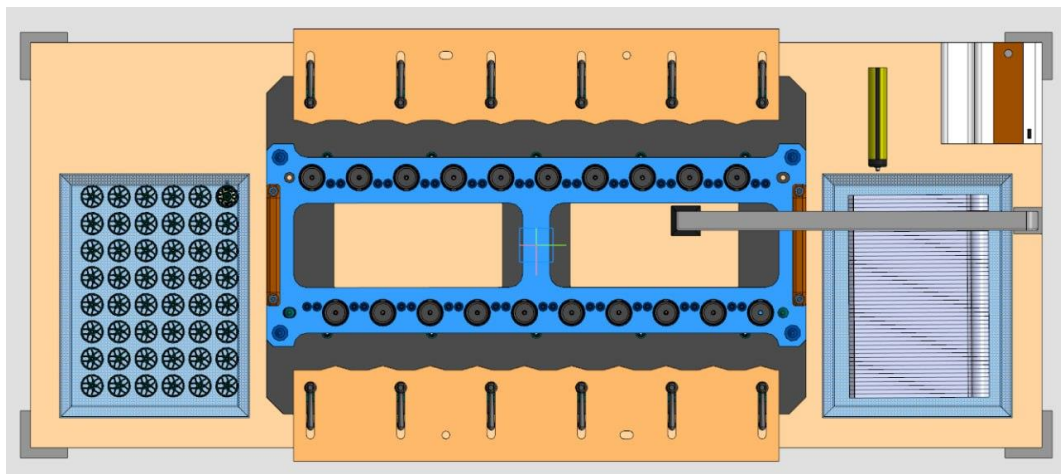


Рисунок 4.13 – Установка пустого магазина

Далее осуществляется непосредственный процесс сборки, который начинается с установки двигателей, представленных на рисунке 4.14. Оператор аккуратно размещает каждый двигатель в специальные стаканчики, предусмотренные конструкцией магазина.

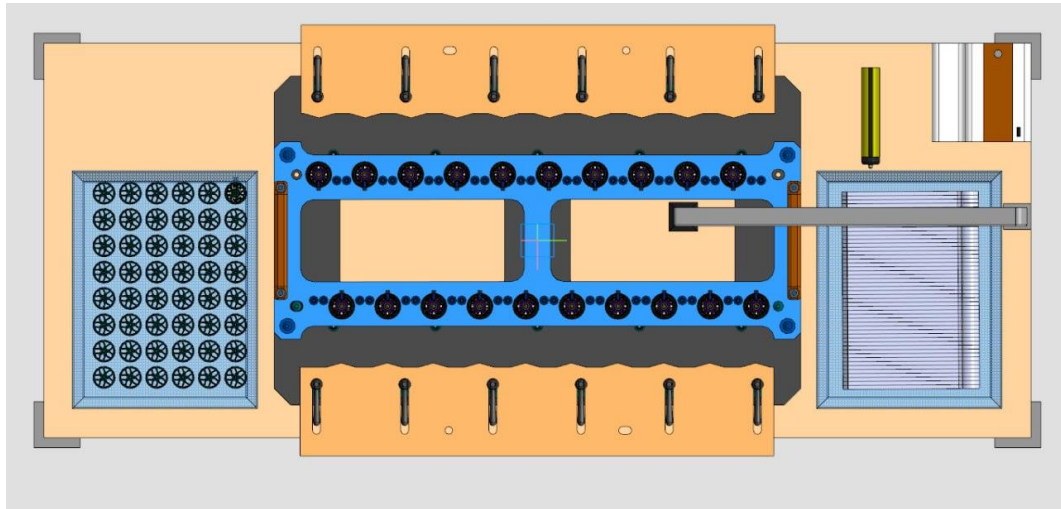


Рисунок 4.14 – Установка двигателей

После этого стапель приводится в движение, выдвигаясь вперёд для обеспечения правильного позиционирования компонентов, которые представлены на рисунке 4.15.

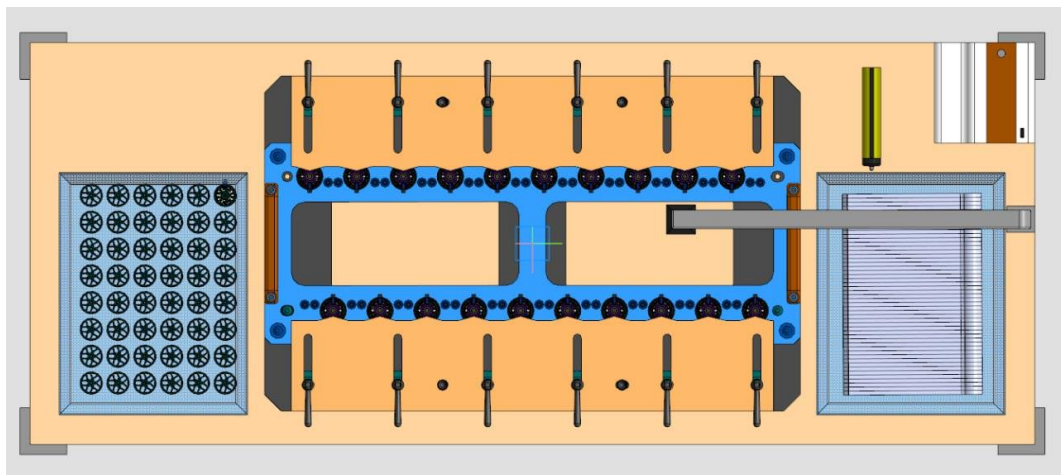


Рисунок 4.15 – Позиционирование двигателей с помощью стапеля

Особое внимание уделяется фиксации положения стапеля с помощью специальных штырей, что гарантирует точность сборки. На этом этапе производится обязательный визуальный контроль правильности установки каждого двигателя.

Следующим важным этапом является монтаж лучей на установленные двигатели, который представлен на рисунке 4.16.

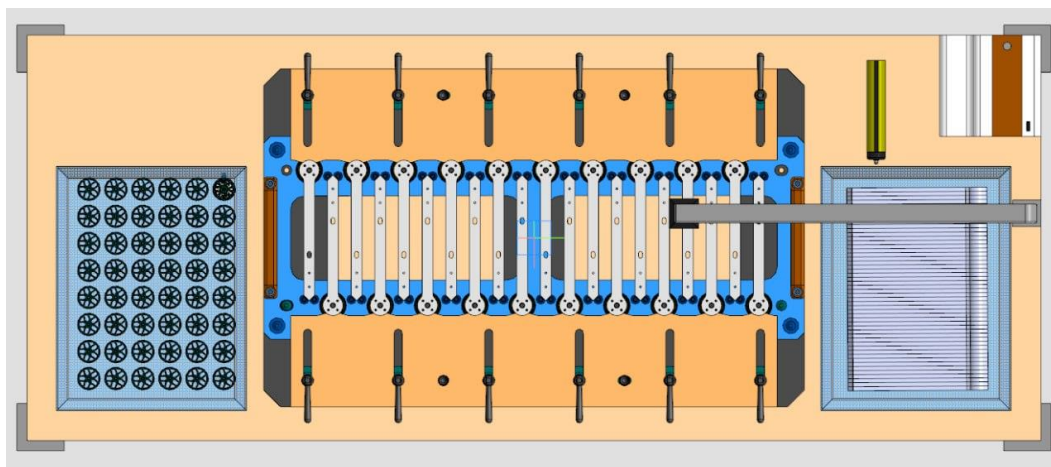


Рисунок 4.16 – Установка лучей

Оператор должен обеспечить точное совпадение отверстий лучей с отверстиями двигателей, что требует внимательности и точности движений. После выравнивания компонентов производится их фиксация с помощью винтов, которые подаются автоматически из специального бункера. В процессе закручивания винтов используется электрическая отвёртка, обеспечивающая необходимое усилие затяжки и качество соединения.

После завершения монтажа стапель возвращается в исходное положение и фиксируется на штыри, которые представлены на рисунке 4.17. На этом этапе производится промежуточный визуальный контроль качества сборки, при котором проверяется надёжность соединений, правильность установки всех компонентов и отсутствие дефектов.

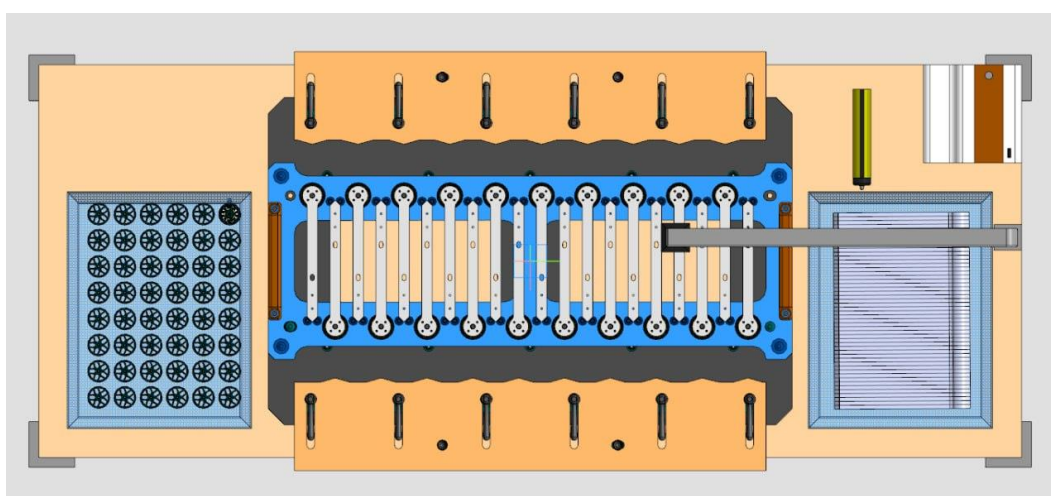


Рисунок 4.17 – Завершение процесса сборки

Система технического зрения в автоматическом режиме осуществляет дополнительный контроль качества выполненных операций, фиксируя возможные отклонения от заданных параметров.

Завершающим этапом является окончательный контроль качества собранного узла и его размещение в специальный стеллаж для дальнейшей транспортировки или хранения. Система технического зрения на протяжении всего процесса сборки осуществляет непрерывный мониторинг правильности выполнения операций, что значительно повышает качество конечного продукта и минимизирует вероятность возникновения дефектов.

Весь технологический процесс построен с учётом эргономических требований и обеспечения максимальной производительности труда оператора. Особое внимание уделяется соблюдению требований безопасности при работе с электрическими инструментами и стапельным оборудованием. Все операции документируются в специальном журнале контроля качества, где фиксируются результаты визуального и автоматизированного контроля на каждом этапе сборки.

Соблюдение данной технологии сборки позволяет получать качественные узлы ВРМ2, соответствующие всем техническим требованиям и стандартам предприятия. Каждый этап сборки тщательно проработан и оптимизирован для обеспечения максимальной эффективности производственного процесса при сохранении высокого уровня качества конечного продукта.

Важным аспектом является также постоянное совершенствование технологического процесса на основе анализа результатов работы и внедрения новых технических решений, направленных на повышение производительности и качества сборки. Система технического зрения, являясь неотъемлемой частью производственного процесса, позволяет своевременно выявлять и устранять возможные отклонения от заданных параметров, что существенно снижает процент брака и повышает надёжность готовой продукции.

В процессе сборки особое внимание уделяется соблюдению временных режимов и последовательности выполнения операций, что обеспечивает стабильность производственного процесса и позволяет поддерживать заданный уровень производительности. Каждый оператор проходит специальное обучение и инструктаж по работе с оборудованием и выполнению технологических операций, что гарантирует высокое качество выполняемых работ.

Таким образом, технологический процесс сборки участка комплектования представляет собой комплексную систему взаимосвязанных операций, направленных на получение качественного конечного продукта при соблюдении всех требований безопасности, эргономики и производственной эффективности.

Планировка рабочего места 1.

Планировка производственного участка разработана с учётом оптимизации рабочих процессов и обеспечения безопасного доступа обслуживающего персонала. На рисунке 4.18 представлена схема расположения основного оборудования. В таблице 4.13 содержится техническая характеристика основного оборудования.

Основное сборочное оборудование включает металлический монтажный стол размерами 1000×600 мм. Конструкция стола выполнена из высокопрочной стали с антикоррозийным покрытием, обеспечивающим долговечность и устойчивость к механическим нагрузкам.

Технологический процесс сборки начинается с рабочего места № 1, где оператор выполняет первичную подготовку компонентов. Сначала он берёт стапель-спутник – специальную платформу для транспортировки и фиксации деталей. С помощью специального приспособления для быстрой установки гаек оператор извлекает гайки из бункера и устанавливает её на стапель-спутник. После этого подготовленный стапель-спутник передаётся на следующее рабочее место.

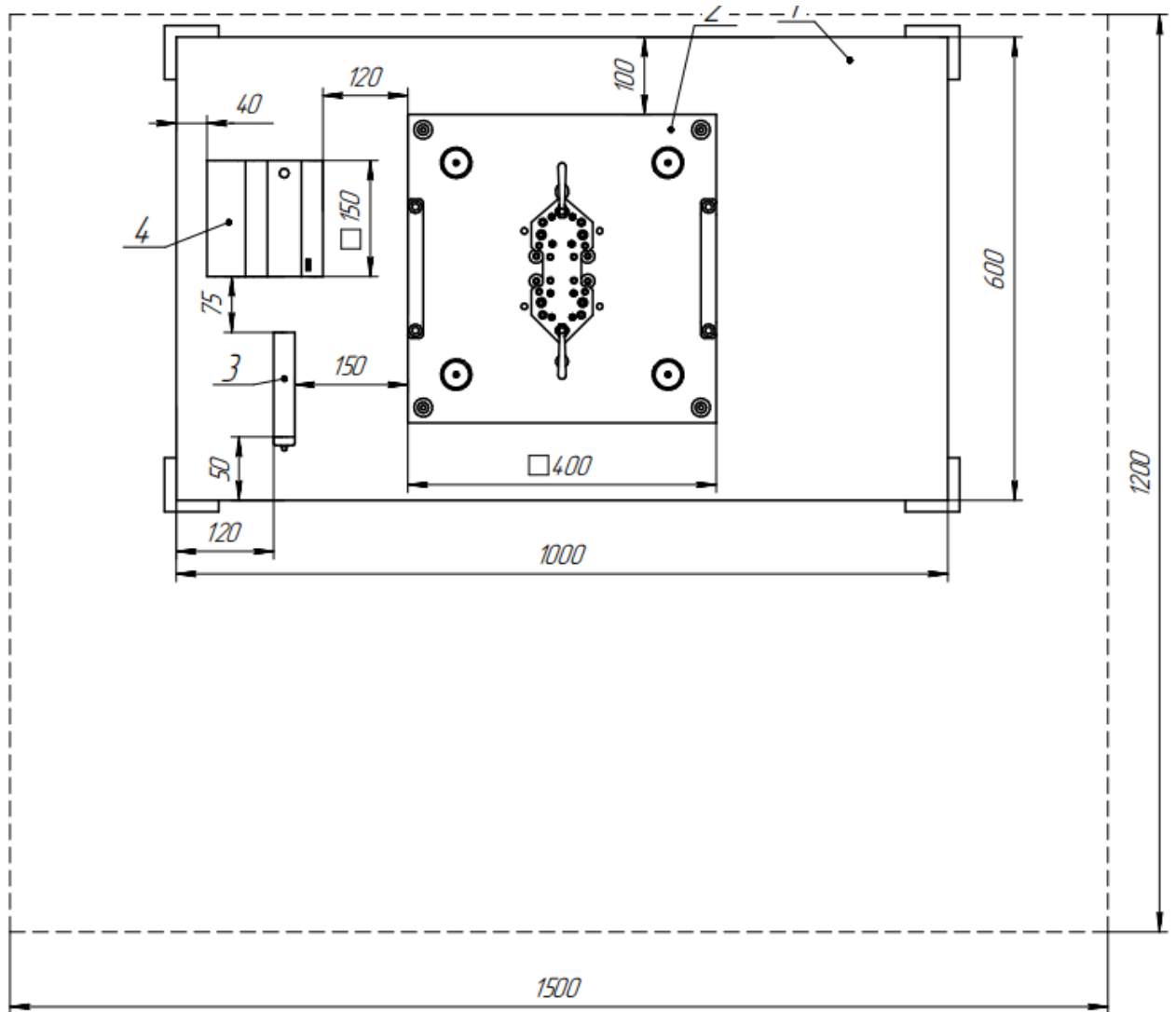


Рисунок 4.18 – Планировка участка РМ1

Таблица 4.13 – Техническая характеристика оборудования

№ п/п	Наименование	Техническая характеристика	Функция
1	2	3	4
1	Сборочный стол (ТО 01.03.00.000)	<ul style="list-style-type: none"> - Габаритные размеры: 1000×600×800 мм (эргономичная для работы стоя). - Материал каркаса: сталь 3 мм. - Материал столешницы: сталь 6 мм. - Покрытие: порошковая краска, устойчивая к механическим воздействиям. - Максимальная нагрузка: 250 кг 	<ul style="list-style-type: none"> 1. Размещение стапеля-спутника. 2. Автоматическое закручивание винтов 3. Заполнение бункера с гайками

окончание таблицы 4.13

№ п/п	Наименование	Техническая характеристика	Функция
1	2	3	4
2	Стапель-спутник (ТО 02.02.00.000)	- Тип конструкции: сборно-разборная. - Точность позиционирования: до 0,1 мм. - Тип базирования: неподвижное. - Способ управления: ручной	Обеспечение точности позиционирования гаек
3	Приспособление для быстрой установки гаек (ТО 02.03.00.000)	- Диаметр гаек: М3. - Вид: шестигранный	Ручное позиционирование инструмента относительно места монтажа. Наличие магнита, для захвата гаек из бункера
4	Бункер с гайками	- Размер контейнера: 40×30×60 мм. - Количество в бункере: 1000 шт. - Размер резьбы гаек: М3	Примечание: загрузка из контейнеров 2 раза за смену

Планировка рабочего места 2.

Планировка производственного участка разработана с учётом оптимизации рабочих процессов и обеспечения безопасного доступа обслуживающего персонала. На рисунке 4.19 представлена схема расположения основного оборудования. В таблице 4.14 содержится техническая характеристика основного оборудования.

Процесс сборки начинается с подготовительного этапа. Оператор извлекает из складского хранения магазины с пластинами, основания с подборкой. Все компоненты устанавливаются на монтажный стол. После оператор получает с предыдущего этапа стапель-спутник с установленными гайками и размещает на монтажном столе. Базирующая система представляет собой комплекс направляющих элементов, основным компонентом которого являются специальные пины, монтируемые непосредственно на поверхность монтажного стола. В основе конструкции лежат направляющие пины, изготовленные из металлического материала. Пины крепятся к столу и создают надёжную систему фиксации для магазинов и других компонентов. После этого активируется промышленный робот № 1, который начинает процесс основной сборки.

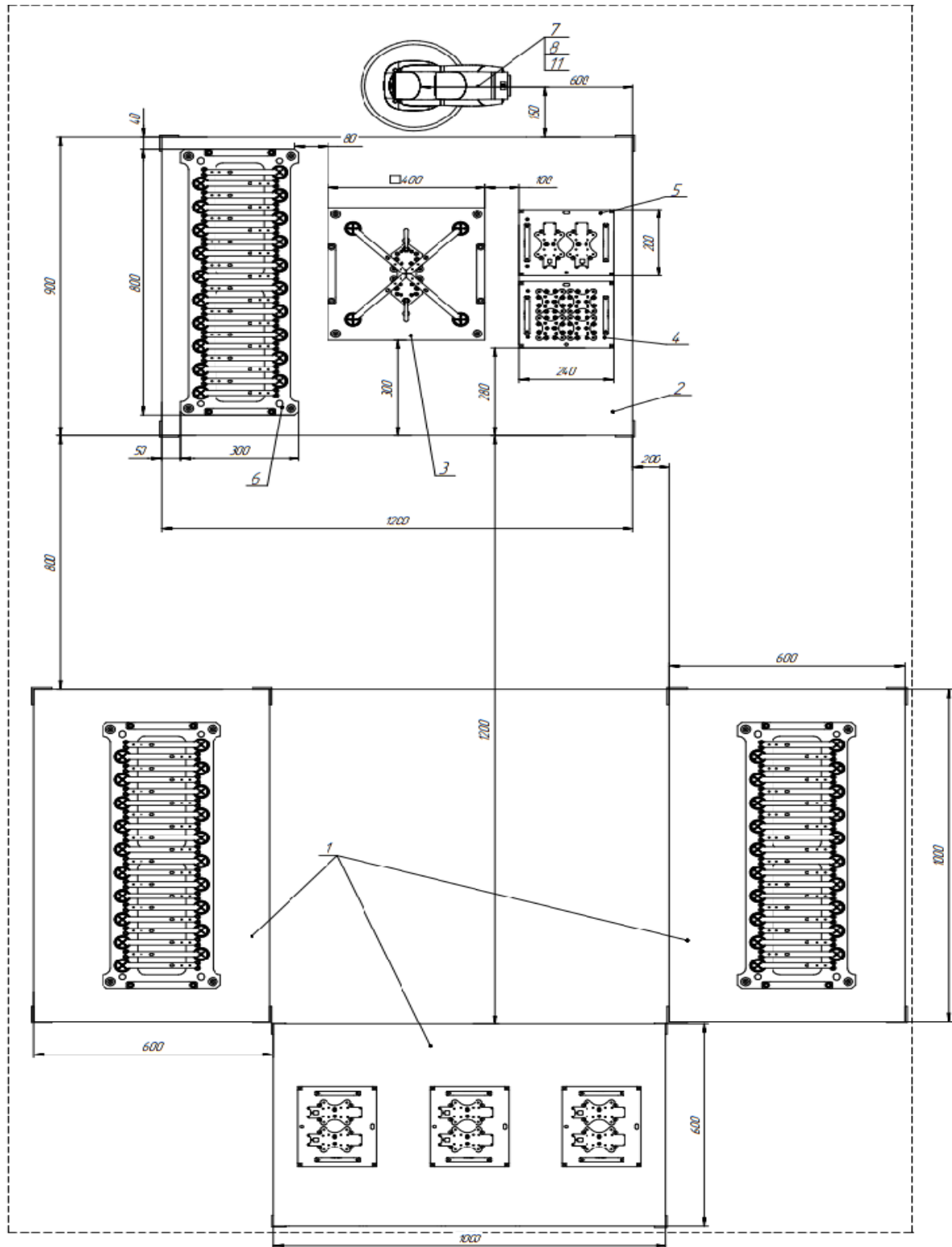


Рисунок 4.19 – Планировка участка РМ2

Таблица 4.14 – Техническая характеристика оборудования РМ2

№п/п	Наименование	Техническая характеристика	Функция
1	2	3	4
1	Стеллаж для хранения комплектующих (ТО 01.01.00.000)	<ul style="list-style-type: none"> - Габаритные размеры: 1000×600×1600 мм. - Количество полок: 4 шт. - Материал конструкции: сталь. - Покрытие: полимерное (цвет светло-серый, RAL 7035). - Нагрузка на 1 полку: 185 кг. - Общая нагрузка на секцию: до 750 кг. - Вес стеллажа: 8,7 кг. - Шаг перфорации стоек: 25 мм 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Размещение магазинов с комплектующими для хранения. 2. Пополнение в ящиках и контейнерах на тележке 2 раза за смену. 3. Обеспечение удобного доступа к хранящимся ящикам
2	Сборочный стол (ТО 03.01.00.000)	<ul style="list-style-type: none"> - Габаритные размеры: 1200×900×800 мм. - Материал каркаса: сталь 3 мм. - Материал столешницы: сталь 6 мм. - Покрытие: порошковая краска, устойчивая к механическим воздействиям. - Максимальная нагрузка: 250 кг 	Размещение комплектующих в процессе сборки
3	Стапель - спутник (ТО 02.02.00.000)	<ul style="list-style-type: none"> - Тип конструкции: сборно-разборная. - Габариты: 400×400 мм. - Точность позиционирования: до 0,1 мм. - Количество степеней свободы: 3. - Тип базирования: неподвижное 	Обеспечение точного позиционирования компонентов изделия между собой
4	Магазин с основаниями (ТО 03.02.00.000)	<ul style="list-style-type: none"> - Вместимость: 40 компонентов. - Тип конструкции: сборная. - Способ перемещения: ручной/механизированный. - Совместимость со складским оборудованием: да 	Обеспечение безопасного хранения и транспортировки «Оснований»
5	Магазин с площадками (ТО 03.03.00.000)	<ul style="list-style-type: none"> - Вместимость: 40 компонентов. - Тип конструкции: сборная. - Способ перемещения: ручной/механизированный. - Совместимость со складским оборудованием: да 	Обеспечение безопасного хранения и транспортировки «Площадок»
6	Магазин с подборкой (лучи и двигатели) (ТО 01.08.00.000)	<ul style="list-style-type: none"> - Вместимость: 20 комплектов. - Габаритные размеры: мм. - Тип загрузки: фронтальный. - Система хранения: статическая. - Тип конструкции: сборная. - Способ перемещения: 	Обеспечение безопасного хранения и транспортировки «Подборки лучей с двигателями»

продолжение таблицы 4.14

№п/п	Наименование	Техническая характеристика	Функция
1	2	3	4
6		ручной/механизированный. - Совместимость со складским оборудованием: да. - Максимальная нагрузка: до 100 кг	
7	Робот CR5	- Грузоподъемность: 5 кг. - Радиус действия: 900 мм. - Количество осей: 6шт. - Масса робота: 25 кг. - Система безопасности: Safe Skin. - Радиус обнаружения: 150 мм. - Защитное отключение: при обнаружении препятствий в рабочей зоне. - Повторяемость: ±0,05 мм. - Точность позиционирования: ±0,1 мм	1. Автоматизация процесса сборки установки компонентов с помощью присосок. 2. Обеспечение точности позиционирования. 3. Интеграция с производственной линией. 4. Извлечение компонентов из магазинов. 5. Последовательное позиционирование(укладывание) компонентов на стпель-спутник
8	Электро-пневматическая система контроля вакуума на основе вакуумного эжектора ARW	- Рабочая среда: сжатый воздух без содержания масла. - Максимальный вакуум: -93 кПа. - Максимальный вакуумный расход: от 13 до 38 л/мин. - Потребление сжатого воздуха: от 23 до 70 л/мин. - Диапазон рабочего давления: от 0,25 МПа до 0,7 МПа. - Утечка в режиме удержания вакуума: не более 1,3 кПа/10 мин. - Присоединение: цанговое, Ø 8 мм, вход сжатого воздуха, выход вакуума, выхлоп. - Питание: 24 В	1. Автоматическое создание необходимого уровня вакуума. 2. Контроль параметров разрежения. 3. Быстрое переключение режимов работы. 4. Защита от аварийных ситуаций
9	Пневматический шкаф (ОТ 03.04.00.000)	- Тип исполнения: монтируемый. - Степень защиты: IP 54. - Материал корпуса: сталь. - Габаритные размеры: 400×300×150 мм. - Вес: 12 кг	1. Размещение пневматических компонентов в корпусе. 2. Защита оборудования от пыли, влаги и механических воздействий. 3. Организация и структурирование пневматической системы. 4. Оптимизация монтажных работи обслуживания

окончание таблицы 4.14

№п/п	Наименование	Техническая характеристика	Функция
1	2	3	4
10	Компрессор	<ul style="list-style-type: none"> - Вакуумное давление: от -0,05 до -0,810 бар. - Поток воздуха: до 12 л/мин. - Мощность: от 600 до 1500 мА. - Источник питания: 24 В (диапазон 20,4 – 28,8 В). - Время захвата: 0,35 с. - Время отпускания: 0,20 с. - Система защиты IP54 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Постоянное обеспечение потока воздуха для работы вакуумного захвата. 2. Создание и поддержание необходимого уровня вакуума для надёжного захвата предметов. 3. Непрерывная подача воздуха на захват. 4. Поддержание постоянного давления в системе для удержания объектов
11	Вакуумная присоска для робота CR5	<ul style="list-style-type: none"> - Диаметр присоски: 80 мм. - Максимальная нагрузка: 15 кг. - Высота: 45 мм. - Вес: 350 г. - Материал: натуральный каучук. - Вакуумное давление: до -0.8 бар. - Время срабатывания: 0,25 с. - Время отпускания: 0,15 с 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Автоматическое срабатывание по сигналу управления. 2. Режим «сжать захват»: создание вакуумного захвата при подаче сигнала. 3. Режим «отпустить захват»: восстановление давления при получении сигнала. 4. Встроенная защита от перегрузки
12	Компрессор	<ul style="list-style-type: none"> - Вакуумное давление: от -0,05 до -0,810 бар. - Поток воздуха: до 12 л/мин. - Мощность: 600 – 1500 мА. - Источник питания: 24 В (диапазон 20,4 – 28,8 В). - Время захвата: 0,35 с. - Время отпускания: 0,20 с. - Система защиты: IP54 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Постоянное обеспечение потока воздуха для работы вакуумного захвата. 2. Создание и поддержание необходимого уровня вакуума для надёжного захвата предметов. 3. Непрерывная подача воздуха на захват. 4. Поддержание постоянного давления в системе для удержания объектов
13	Вакуумная присоска для робота CR5	<ul style="list-style-type: none"> - Диаметр присоски: 80 мм. - Максимальная нагрузка: 15 кг. - Высота: 45 мм. - Вес: 350 г. - Материал: натуральный каучук. - Вакуумное давление: до -0,8 бар. - Время срабатывания: 0,25 с. - Время отпускания: 0,15 с 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Автоматическое срабатывание по сигналу управления. 2. Режим «сжать захват»: создание вакуумного захвата при подаче сигнала. 3. Режим «отпустить захват»: восстановление давления при получении сигнала. 4. Встроенная защита от перегрузки

Робот перемещается к магазину с основаниями и с помощью пневматической присоски извлекает одно основание из комплекта из 40 деталей. Затем точно позиционирует и устанавливает основание на стапель-спутник. Далее последовательно устанавливает четыре луча с двигателями, используя ту же технологию захвата присоской, и завершает сборку установкой пластины. После завершения всех операций робот подаёт сигнал оператору о завершении сборки.

Пошаговая подробная сборка на кассету представлена в таблице 4.15.

Таблица 4.15 – Пошаговая сборка

№ п.п.	Выполняет	Действие
Установка основания на стапель-спутник		
1	Робот	Перемещается к магазину оснований
2		Активирует захват
3		Позиционирует захват над элементом
4		Осуществляет вакуумную фиксацию детали
5		Поднимает деталь
6		Перемещается к стапелю-спутнику
7		Опускается до уровня установки
8		Осуществляет установку основания
9		Возвращается в исходное положение
Установка подборки лучей с двигателями на стапель-спутник		
10	Робот	Перемещается к магазину подборки
11		Активирует захват
12		Позиционирует захват над элементом
13		Осуществляет вакуумную фиксацию детали
14		Поднимает деталь
15		Перемещается к стапелю-спутнику
16		Опускается до уровня установки
17		Осуществляет установку
18		Повторяет процедуру для всех четырёх подборок
19		Возвращается в исходное положение
Установка пластины на стапель-спутник		
20	Робот	Перемещается к магазину пластин
21		Активирует захват
22		Позиционирует захват над элементом
23		Осуществляет вакуумную фиксацию детали
24		Поднимает деталь
25		Перемещается к кассете

окончание таблицы 4.15

№ п.п.	Выполняет	Действие
26		Опускается до уровня установки
27		Осуществляет установку
28		Возвращается в исходное положение

Завершающий этап выполняется оператором, который проводит визуальный контроль качества сборки и передает собранный узел на следующий этап производственного процесса.

Все операции выполняются с соблюдением строгих требований к точности позиционирования и аккуратности монтажа. Особое внимание уделяется защите электронных компонентов от механических повреждений и статического электричества. Такой подход к организации технологического процесса позволяет достичь высокой производительности при сохранении качества сборки на должном уровне.

Проведен анализ производственных показателей (таблица 4.16).

Таблица 4.16 – Динамика улучшения основных производственных показателей

№ п/п	Показатель	Отклонение
1	Годовой объем производства	+ 280%
2	Объем производства в смену	+ 300%
3	Объем производства в час	+300%
4	Производительность труда/ выработка на 1 рабочего	+260%
5	Такт производства	+400%
7	Численность рабочих на производственном участке	-12%
12	Количество технологических операций в производственном процессе (без учета вспомогательных)	+34%
13	Время производственного цикла (без учета ожиданий) / цикловое время	+35%
14	Время такта, мин	+25%
15	Объем НЗП	+1000%
16	Уровень дефектности	+400%

4.4 Выводы по главе 4

1. Разработана методика организационного развития производственной системы для повышения эффективности автоматизации и роботизации производственных процессов. В основе методики лежат факторы, влияющие на уровень зрелости организационной культуры, обеспечивающей эффективное внедрение автоматизации и роботизации производственных процессов. Разработаны показатели оценки уровня зрелости организационной культуры производственного предприятия. Исследовано и установлено влияние автоматизации на организационные аспекты производственной деятельности персонала.

2. Разработаны структура и рекомендации технического предложения на создание и функционирование интеллектуальной роботизированной производственной ячейки. Техническое предложение является ключевым документом для создания ИРПЯ и основывается на анализе исходной конструкции изделия, анализе и оценке технологичности конструкции, анализе технологии производства, анализе существующих системных ограничений (организационно-управленческих и производственно-технологических). Структура технического предложения содержит 9 разделов, включая производственно-технологическое решение и системные ограничения, учитываемые при разработке производственно-технологических решений.

3. Проведена комплексная апробация предложенных решений по созданию и функционированию серийного роботизированного машиностроительного производства. Дана оценка результативности разработанных методики и моделей. Разработана имитационная модель производственного участка роботизированной сборки БПЛА, а так же конструкторско-технологическая документация на создания производственного участка роботизированной сборки БПЛА роторного типа, включая технологические планировки, КД и спецификации на технологическое оснащение. Разработаны 3D-модели технологической оснастки под возможности роботизированной сборки БПЛА, что обеспечивает применение

роботизированных комплексов. Разработан технологический процесс серийной роботизированной сборки БПЛА роторного типа. Произведен расчет основных производственных показателей на примере роботизации сборочного процесса производства БПЛА роторного типа на созданном участке роботизированной сборки. Анализ показал увеличение объёмов производства на 280% и рост производительности труда на 260%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Решена важная задача по комплексному и рациональному подходу к автоматизации и роботизации производственных процессов. Достигнута цель и задачи диссертационного исследования по повышению производительности и эффективности производственных процессов машиностроительного предприятия за счет комплексного и рационального подхода к автоматизации и роботизации.

2. В результате внедрения разработанных методик и моделей в производство предполагается повышение производительности труда на 40%, повышение плотности автоматизации и роботизации производственных процессов на 20%, а также снижение трудоёмкости выполнения технологических операций за счет автоматизации и роботизации производственных процессов на 50%.

3. Проведен теоретический анализ существующих подходов и инструментария по созданию серийного роботизированного производства. Выявлены системные ограничения, влияющие на создание серийного роботизированного производства. Определены подходы к созданию технологии серийного роботизированного производства.

4. Разработана методика оценочного аудита производственных процессов, выявляющая технологические и вспомогательные операции производственного процесса, которые целесообразно автоматизировать и роботизировать. Данная методика позволяет адекватно оценить эффективность автоматизации и роботизации на основе комплекса технико-экономических показателей, а также позволяет снизить затраты на автоматизацию и роботизацию производственных процессов в среднем на 30% за счет комплексного и рационального внедрения интеллектуальных систем и роботизированных комплексов.

5. Разработана структурно-функциональная модель интеллектуальной роботизированной производственной ячейки. В ней отражены функциональные связи между компонентами как внутри интеллектуальной производственной ячейки, так и внешние связи с компонентами верхнего уровня. Также структурно-

функциональная модель интеллектуальной роботизированной производственной ячейки содержит последовательность адаптивной системной интеграции роботизированных комплексов в производственные процессы. Разработана последовательность системной интеграции роботизированных комплексов в производственные процессы машиностроительного предприятия. Данная модель позволила сократить время внедрения решений по автоматизации и роботизации производственных процессов в проекте по роботизации серийного производства БПЛА на 40% по сравнению с аналогичными проектами, обеспечивая поэтапную системную интеграцию роботизированных комплексов.

6. Проведена классификация рисков появления потенциальных несоответствий функционирования интеллектуальной производственной ячейки. Данная классификация разработана на основе методики PFMEA.

7. Разработана методика организационного развития производственной системы для повышения эффективности автоматизации и роботизации производственных процессов, состоящая из 4 уровней. Для каждого уровня определены критерии и характеристики.

8. Проведена комплексная апробация предложенных решений по созданию и функционированию серийного роботизированного машиностроительного производства. Осуществлена оценка результативности разработанных методик и моделей. Получены акты внедрения результатов диссертационной работы на предприятиях ООО «ЧЗСА» (приложение 4) и ООО «Авиатор» (приложение 5), в учебном процессе на кафедре производства летательных аппаратов и управления качеством в машиностроении Самарского университета имени С.П. Королева и кафедре техносферной безопасности, метрологии и технологии материалов, Чувашского государственного университета имени И.Н. Ульянова (приложение 6).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абу-Абед, Ф. Н. Киберфизические системы и человек в контексте интеллектуального производства Индустрии 4.0 / Ф. Н. Абу-Абед // Экономика и управление инновациями. – 2022. – № 3(22). – С. 78-87.
2. Адлер, Ю. П. Управление качеством : учебное пособие для вузов / Ю. П. Адлер, Т. М. Полховская, В. Л. Шпер. – Москва : МИСиС, 2001. – 170 с.
3. Азгальдов, Г. Г. Теория и практика оценки качества продукции. Основы квалиметрии / Г. Г. Азгальдов. – Москва : Экономика, 1982. – 320 с.
4. Алиева, М. В. Роботизированные заводы: как Tesla и BMW автоматизируют производство / М. В. Алиева, А. А. Чагаев // География биологического и ландшафтного разнообразия : материалы Всероссийской научно-практической конференции, Грозный, 28–29 мая 2025 года. – Грозный : ФГБОУ ВО «Чеченский государственный университет им. А.А. Кадырова», 2025.– С. 18-23.
5. Анализ и проектирование средств роботизации и автоматизации : межвузовский сборник научных трудов / Министерство образования и науки Российской Федерации, Воронежский государственный технический университет, Международный институт компьютерных технологий. – Воронеж : Воронежский государственный технический университет, 2004. – 151 с.
6. Арсеньев, Д. Г. Умные фабрики: цифровизация, автоматизация и оптимизация структурно-сложных высокотехнологичных дискретных процессов и производств / Д. Г. Арсеньев, Е. С. Гебель, В. П. Шкодырев // XVIII Всероссийская мультikonференция по проблемам управления (МКПУ-2025) : материалы мультikonференции: в 4 томах, Тула, 15–20 сентября 2025 года. – Тула : Тульский государственный университет, 2025. – С. 139-142.
7. Афанасьев, В. «Умная линия» для повышения эффективности сборочно-монтажного производства / В. Афанасьев // Технологии в электронной промышленности. – 2017. – № 4(96). – С. 69-73.

8. Баркалов, С. А. Производственные системы : учебно-справочное издание : в 2 частях. Часть 1 : Понятия, законы, закономерности, свойства, особенности и принципы построения производственных систем / С. А. Баркалов, М. А. Карпович, Л. Ш. Ахтямова [и др.] ; под общей редакцией С. А. Баркалова ; Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Воронежский государственный технический университет, Кафедра управления. – Москва : РИТМ, 2024. – 514 с.

9. Барсегян, Н. В. Методические подходы к исследованию эффективности внедрения концепции Индустрии 4.0 / Н. В. Барсегян, Р. Р. Зарипова // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2021. – Т. 23, № 6(104). – С. 47-51.

10. Батыршина, А. Р. Системный подход в управлении: особенности, достоинства и ограничения / А. Р. Батыршина, Е. А. Гончарова // Современные экономические и информационные технологии. – 2018. – № 3. – С. 14-16.

11. Безъязычный, В. Ф. Технология машиностроения / В. Ф. Безъязычный, С. В. Сафонов. – Москва ; Вологда : Инфра-Инженерия, 2020. – 336 с.

12. Белобрагин, В. Я. Основы стандартизации / В. Я. Белобрагин, А. В. Зажигалкин, Т. И. Зворыкина. – Москва : Стандарты и качество, 2017. – 515 с.

13. Берсенева, К. А. Гибкая производственная ячейка для роботизированного аддитивного производства / К. А. Берсенева, О. М. Огородникова // Мехатроника, автоматика и робототехника. – 2024. – № 13. – С. 124-127.

14. Бестугин, А. Р. Синергетический эффект от инновационных компетенций в роботизированном производстве / А. Р. Бестугин, И. А. Киршина, Е. М. Ильинская, О. А. Бизина // Компетентность. – 2025. – № 7.

15. Боровков, А. И. Цифровые двойники и цифровая трансформация предприятий ОПК / А. И. Боровков, Ю. А. Рябов, К. В. Кукушкин, В. М. Марусева, В. Ю. Кулемин // Оборонная техника. – 2018. – № 1. – С. 6-33.

16. Ванройе, Н. К. Анализ роли MES-системы в составе киберфизической производственной системы / Н. К. Ванройе, А. И. Власов, Д. И. Денисова //

Информационные технологии в проектировании и производстве. – 2022. – № 4(188). – С. 11-21.

17. Ватаманюк, И. В. Модели и способы взаимодействия пользователя с киберфизическим интеллектуальным пространством / И. В. Ватаманюк, Д. К. Левоневский, Д. А. Малов, Р. Н. Яковлев, А. И. Савельев. – Санкт-Петербург : Лань, 2019. – 304 с.

18. Вумек, Дж. Бережливое производство: Как избавиться от потерь и добиться процветания вашей компании / Дж. Вумек, Д. Джонс. – Москва : Альпина Паблишер, 2021. – 472 с.

19. Глебов, В. В. Автоматизация производственных процессов в машиностроении / В. В. Глебов, М. В. Кангин, Е. М. Кангин, К. А. Щеглетов, А. М. Кангин. – Москва : Ай Пи Ар Медиа, 2026. – 267 с.

20. Гличев, А. В. Основы управления качеством продукции / А. В. Гличев. – 3-е изд., перераб. и доп. – Москва : РИА «Стандарты и качество», 2001. – 424 с.

21. Глухов, В. В. Организация производства. Бережливое производство / В. В. Глухов, Е. С. Балашова. – Санкт-Петербург : Питер, 2007. – 236 с.

22. Голдратт, Э. М. Цель: Процесс непрерывного совершенствования / Э. М. Голдратт, Дж. Кокс. – 3-е изд. – Москва : Попурри, 2021. – 500 с.

23. Гольдштейн, Г. Я. Стратегический инновационный менеджмент / Г. Я. Гольдштейн. – Таганрог : ТРТУ, 2004. – 267 с.

24. Горленко, О. А. Управление качеством в производственно-технологических системах / О. А. Горленко, В. В. Мирошников. – Брянск : БГТУ, 2009. – 312 с.

25. Григорьева, Е. Д. Проектирование системы «Умное производство» / Е. Д. Григорьева // Молодежная неделя науки института промышленного менеджмента, экономики и торговли : сборник трудов всероссийской студенческой научно-учебной конференции. В 6-ти частях, Санкт-Петербург, 27 ноября – 02 декабря 2023 года. – Санкт-Петербург : ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2023. – С. 106-108.

26. Гродзенский, С. Я. Управление качеством / С. Я. Гродзенский. – Москва : Проспект, 2022. – 208 с.
27. Гуртниязов, М. Цифровая экономика и будущее труда: Автоматизация, роботизация и новые вызовы / М. Гуртниязов, А. Сатлыкова // Вестник науки. – 2024. – Т. 4, № 5(74). – С. 188-190.
28. Гурьянов, А. В. Организация цифровых производств Индустрии 4.0 на основе киберфизических систем и онтологий / А. В. Гурьянов, Д. А. Заколдаев, А. В. Шукалов [и др.] // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2018. – Т. 18, № 2. – С. 268-277.
29. Деминг, У. Э. Выход из кризиса: Новая парадигма управления людьми, системами и процессами / У. Э. Деминг ; пер. с англ. Ю. Адлера. – 5-е изд. – Москва : Альпина Паблицер, 2022. – 417 с.
30. Димитров, В. П. Бережливое производство / В. П. Димитров, В. И. Мирный, О. А. Голубева. – Ростов-на-Дону : ДГТУ, 2021. – 68 с.
31. Дмитриев, В. М. Автоматизация моделирования промышленных роботов / В. М. Дмитриев, Л. А. Арайс, А. В. Шутенков. – Москва : Машиностроение, 1995. – 298 с.
32. Дранко, О. И. Оценка синергизма целей при управлении киберфизическими производственными системами машиностроительного предприятия / О. И. Дранко, А. Ф. Резчиков, И. А. Степановская [и др.] // Датчики и системы. – 2024. – № 2(274). – С. 23-29.
33. Дьячко, А. Г. Математическое и имитационное моделирование производственных систем : монография / А. Г. Дьячко. – Москва : Издательство МИСиС, 2007. – 538 с.
34. Егоров, А. А. «Индустрия 4.0», гиперавтоматизация и PLC – умное производство будущего. Часть 3. Современные отечественные промышленные контроллеры для автоматизации производства / А. А. Егоров // Автоматизация и IT в энергетике. – 2021. – № 3(140). – С. 26-39.

35. Жуйкова, А. Э. Модернизация промышленного производства на основе роботизированных систем / А. Э. Жуйкова // Молодежь в науке: Новые аргументы : сборник докладов I Международной молодежной научной конференции, Липецк, 25 декабря 2014 года. Часть I / ответственный редактор А.В. Горбенко. – Липецк : Научное партнерство «Аргумент», 2015. – С. 122-125.

36. Жулега, И. А. Условия внедрения технологий «умного производства» / И. А. Жулега // Информационные технологии по отраслям: вопросы теории, методологии и практики (ИТО-2025) : сборник материалов III Международной научно-практической конференции, Ивангород, 25 марта 2025 года. – Казань : Бук, 2025. – С. 85-89.

37. Замятина, Е. Б. Современные теории имитационного моделирования : специальный курс для магистров второго курса / Е. Б. Замятина. – Пермь : ПГУ, 2007. – 119 с.

38. Иванов, Ю. В. Гибкая автоматизация производства РЭА с применением микропроцессоров и роботов / Ю. В. Иванов, Н. А. Лакота. – Москва : Радио и связь, 1987. – 464 с.

39. Иващенко, А. В. Цифровизация организационной структуры управления производственным предприятием / А. В. Иващенко, Т. В. Никифорова // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2021. – Т. 23, № 2(100). – С. 46-50. – DOI 10.37313/1990-5378-2021-23-2-46-50.

40. Игишев, А. В. Управление роботизированными системами в высокотехнологичных производствах / А. В. Игишев, Е. В. Пикуля, И. В. Романова // Финансовый бизнес. – 2024. – № 12(258). – С. 35-39.

41. Ильин, Н. И. Применение роботизированных систем в производстве / Н. И. Ильин // Информационные ресурсы и системы в экономике, науке и образовании : сборник статей XV Международной научно-практической конференции, Пенза, 24-25 апреля 2025 года. – Пенза : Приволжский Дом знаний, 2025. – С. 37-44.

42. Имаи, М. Кайдзен: Ключ к успеху японских компаний / М. Имаи ; пер. с англ. Т. Гутман. – 9-е изд. – Москва : Альпина Паблишер, 2025. – 328 с.

43. Измайлов, М. К. Проблемы управления производственным процессом для различных типов производств на отечественных рынках и зарубежных крупных промышленных предприятиях / М. К. Измайлов // Актуальные проблемы экономики и управления. – 2020. – № 3 (27). – С. 28-33.

44. Кабалдин, Ю. Г. Управление киберфизическими и механообрабатывающими системами в цифровом производстве на основе искусственного интеллекта и облачных технологий / Ю. Г. Кабалдин, Д. А. Шатагин, П. В. Колчин. – Москва : Инновационное машиностроение, 2019. – 293 с. – ISBN 978-5-907104-17-4.

45. Кагехиро, Т. Роботизация и будущее труда: от массового производства к интеллектуальному / Т. Кагехиро. – Москва : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2020. – 356 с.

46. Каляев, И. А. Принципы организации и функционирования безлюдного роботизированного производства с децентрализованным диспетчером / И. А. Каляев, С. Г. Капустян // XII Мультиконференция по проблемам управления (МКПУ-2019) : материалы XII Мультиконференции по проблемам управления (МКПУ-2019) : в 4 томах, Дивноморское, Геленджик, 23–28 сентября 2019 года. Том 3. – Дивноморское ; Геленджик : Южный федеральный университет, 2019. – С. 16-18.

47. Капустин, Н. М. Автоматизация производственных процессов в машиностроении / Н. М. Капустин. – Москва : Высшая школа, 2004. – 415 с.

48. Капустина, Л. М. К вопросу о понятии «умного предприятия» в цифровой экономике / Л. М. Капустина, Ю. Н. Кондратенко // Вопросы управления. – 2020. – № 4(65). – С. 33-43.

49. Кармишин, А. А. Киберфизические производственные системы / А. А. Кармишин, В. М. Макаров, С. В. Лукина // РИТМ машиностроения. – 2022. – № 9.

50. Келтон, В. Имитационное моделирование. Классика CS / В. Келтон, А. Лоу. – 3-е изд. – Санкт-Петербург : Издательская группа BHV, 2004. – 847 с.

51. Ким, А. В. О преимуществах и недостатках цифровизации промышленных предприятий / А. В. Ким // Кластеризация цифровой экономики: Глобальные вызовы : сборник трудов национальной научно-практической конференции с зарубежным участием: в 2 томах, Санкт-Петербург, 18–20 июня 2020 года / под редакцией Д.Г. Родионова, А.В. Бабкина. – Санкт-Петербург : ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2020. – С. 70-76.

52. Киселева, М. В. Имитационное моделирование систем в среде AnyLogic : учебно-методическое пособие / М. В. Киселева. – Екатеринбург : УГТУ-УПИ, 2009. – 108 с.

53. Клячкин, В. Н. Статистические методы контроля и управления качеством / В. Н. Клячкин. – Москва : Финансы и статистика, 2021. – 192 с.

54. Клокотов, И. Ю. Анализ современных автоматизированных систем управления на промышленных предприятиях и в производстве / И. Ю. Клокотов // Международный журнал прикладных наук и технологий «Integral». – 2020. – № 1.

55. Кобелев, Н. Б. Имитационное моделирование : учебник для разработчиков имитационных моделей и их пользователей / Н. Б. Кобелев, В. А. Половников, В. В. Девятков ; под редакцией Н. Б. Кобелева. – 2-е изд. – Москва : КУРС : НИЦ Инфра-М, 2020. – 368 с.

56. Козырев, Ю. Г. Промышленные роботы : справочник / Ю. Г. Козырев. – Москва : Машиностроение, 1988. – 392 с.

57. Колосов, В. А. Роль автоматизации и роботизации в модернизации производственных предприятий и их экономическое значение / В. А. Колосов, Е. А. Зевелева, К. А. Кокунов // Экономика: вчера, сегодня, завтра. – 2024. – Т. 14, № 5-1. – С. 23-33.

58. Кондо, Й. Управление качеством в масштабах компании: становление и этапы развития / Й. Кондо ; пер. с англ. Е. П. Марковой. – Нижний Новгород : СМЦ «Приоритет», 2002. – 250 с.

59. Корнеева, Е. Н. Менеджмент изменений в современных условиях / Е. Н. Корнеева // Вестник Поволжского государственного университета сервиса. Серия: Экономика. – 2014. – № 6 (38). – С. 117-120.

60. Лапидус, В. А. Всеобщее качество (TQM) в российских компаниях / В. А. Лапидус. – Москва : Новости, 2000. – 432 с.

61. Лащенов, Д. П. Имитационное моделирование сложноструктурированных реконфигурируемых производственных систем на основе программных модулей типовых технологических объектов : диссертация ... кандидата технических наук / Д. П. Лащенов. – 2021. – 176 с.

62. Лайкер, Дж. Дао Toyota: 14 принципов менеджмента ведущей компании мира / Дж. Лайкер. – 11-е изд. – Москва : Альпина Паблишер, 2022. – 400 с.

63. Летучий, В. А. Метод создания цифровых двойников пространственно-распределенных киберфизических производственных систем / В. А. Летучий // Подготовка профессиональных кадров в магистратуре для цифровой экономики (ПКМ-2023) : Всероссийская научно-техническая и научно-методическая конференция магистрантов и их руководителей. Сборник лучших докладов: в 2 томах, Санкт-Петербург, 05-07 декабря 2023 года. – Санкт-Петербург : Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, 2024. – С. 368-371.

64. Лончих, П. А. Менеджмент качества: оценка рисков и конкурентоспособности / П. А. Лончих, Е. Ю. Головина. – Иркутск : ИРНИТУ, 2021. – 210 с.

65. Мартынов, В. В. Формальные основы процесса построения архитектуры предприятия на базе метрик описания ее компонентов / В. В. Мартынов, А. И. Салимова, Д. Н. Шавалеева // Вестник РГРТУ. – 2019. – № 70. – С. 52-64.

66. Марченко, Э. В. Автоматизация посредством роботизации производства / Э. В. Марченко, А. В. Авакьянц, А. А. Сарабашев // Фундаментальные научные исследования: теоретические и практические аспекты : сборник материалов Международной научно-практической конференции, Кемерово, 25–26 мая 2016 года.

Том II / Западно-Сибирский научный центр. – Кемерово : Западно-Сибирский научный центр, 2016. – С. 299-302.

67. Матвеева, Л. Г. Модели «умного производства» в промышленности / Л. Г. Матвеева // Экономика России: институты адаптации и развития в условиях мировой нестабильности : сборник материалов III Всероссийской научно-практической конференции в рамках XLI Научной сессии экономического факультета Южного федерального университета. В 2 томах, Ростов-на-Дону, 15-16 мая 2020 года. Том 1 / Экономический факультет Южного федерального университета. – Ростов-на-Дону : Южный федеральный университет, 2020. – С. 76-83.

68. Мильченко, А. А. Влияние автоматизации и роботизации производства на качество продукции и курс развития бизнеса / А. А. Мильченко, Ю. В. Бородач // Экономика. Менеджмент. Инновации. – 2019. – № 5(23). – С. 67-81.

69. Михайлов, А. Е. Будущее развитие киберфизических производственных систем / А. Е. Михайлов // Студенческий. – 2022. – № 2-1(172). – С. 27-30.

70. Новичкова, В. Н. Влияние автоматизации и роботизации производства на рынок труда / В. Н. Новичкова, К. И. Фальченко // Аллея науки. – 2018. – Т. 1, № 5(21). – С. 803-806.

71. Оборин, М. С. Повышение эффективности промышленного производства на основе наукоемких технологий / М. С. Оборин // Научный вестник: финансы, банки, инвестиции. – 2019. – № 2(47). – С. 160-166.

72. Окрепилов, В. В. Экономика качества / В. В. Окрепилов. – Санкт-Петербург : Наука, 2011. – 432 с.

73. Павловский, Ю. Н. Имитационное моделирование / Ю. Н. Павловский, Н. В. Белотелов, Ю. И. Бродский. – Москва : Академия, 2008. – 236 с.

74. Пашкевич, В. М. Применение искусственного интеллекта для повышения автономности киберфизических систем в машиностроении / В. М. Пашкевич, С. П. Шишов // Перспективные направления развития машиностроения в области мобильных машин, технологического оборудования и энергетических систем : сборник материалов 23-й Международной научно-

технической конференции, Минск, 27–28 ноября 2025 года. – Минск : Белорусский национальный технический университет, 2026. – С. 46-54.

75. Пенкин, Е. Качество: прошлое, настоящее, будущее / Е. Пенкин // Стандарты и качество. – 2006. – № 1. – С. 6-9.

76. Перепечко, С. А. Автоматизированные и роботизированные дискретные производства в России / С. А. Перепечко // Журнал научных публикаций аспирантов и докторантов. – 2016. – № 6(120). – С. 96-98.

77. Подураев, Ю. В. Мехатроника: основы, методы, применение / Ю. В. Подураев. – Москва : Машиностроение, 2006. – 256 с.

78. Пономарев, С. В. Управление качеством продукции. Инструменты и методы менеджмента качества / С. В. Пономарев, С. В. Мищенко. – Москва : РИА «Стандарты и качество», 2005. – 248 с.

79. Пономарева, Л. В. «Умное производство» в условиях перехода к концепции «Индустрия 4.0» / Л. В. Пономарева, И. В. Усачева, А. В. Волкова // Цифровая экономика, умные инновации и технологии : сборник трудов Национальной (Всероссийской) научно-практической конференции с зарубежным участием, Санкт-Петербург, 18–20 апреля 2021 года. – Санкт-Петербург : ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2021. – С. 99-102.

80. Попов, Е. П. Основы робототехники: Введение в специальность / Е. П. Попов, Г. Н. Письменный. – Москва : Высшая школа, 1990. – 222 с.

81. Портер, М. Конкурентное преимущество: Как достичь высокого результата и обеспечить его устойчивость / М. Портер ; пер. с англ. Е. Калининой. – Москва : Альпина Бизнес Букс, 2026. – 716 с.

82. Пудовкина, О. Е. Теоретический взгляд на цифровизацию промышленности / О. Е. Пудовкина // E-Scio. – 2019. – № 11(38).

83. Разработка метода анализа отклонений ключевых показателей эффективности производства под управлением киберфизической системы / С. В. Болотов, Е. С. Гебель, В. В. Потехин, А. С. Жуненков // Наука и технологии в трансформации социально-экономического ландшафта : сборник научных

трудов по материалам 9 Международной научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 29–30 ноября 2023 года. – Санкт-Петербург : Центр научно-информационных технологий «Астерион», 2024. – С. 132-139.

84. Рубцова, Л. Э. Автоматизация процессов в промышленности: от 4.0 до 5.0 / Л. Э. Рубцова // Актуальные исследования. – 2025. – № 1. – С. 1–10.

85. Рудик, Е. Д. Роботизация и автоматизация производства: вызовы и решения / Е. Д. Рудик // Вестник науки. – 2024. – Т. 2, № 1(70). – С. 736-738.

86. Рыжиков, Ю. И. Имитационное моделирование / Ю. И. Рыжиков. – Санкт-Петербург : Питер, 2001. – 288 с.

87. Салмин, П. С. Интеграция системы умного обеспечения ресурсами в концепцию бережливого производства / П. С. Салмин, Н. М. Ильичева, Н. А. Салмина // Век качества. – 2021. – № 4. – С. 139-152.

88. Сафонов, Ю. М. Электроприводы промышленных роботов / Ю. М. Сафонов. – Москва : Энергоатомиздат, 1990. – 175 с.

89. Сергиенко, А. С. Киберфизические производственные системы в рамках концепции «Индустрия 4.0» / А. С. Сергиенко // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика : тезисы докладов Двадцать седьмой Международной научно-технической конференции студентов и аспирантов, Москва, 11-12 марта 2021 года. – Москва : Центр полиграфических услуг "РАДУГА", 2021. – С. 1185.

90. Скрипко, Л. Е. Процессный подход в управлении качеством / Л. Е. Скрипко. – Санкт-Петербург : СПбГЭУ, 2019. – 121 с.

91. Смышляева, А. А. Современные технологии в Индустрии 4.0 – киберфизические системы / А. А. Смышляева, К. М. Резникова, Д. В. Савченко // Отходы и ресурсы. – 2020. – № 3. – DOI: 10.15862/02INOR320.

92. Соколов, Ю. А. Технологии цифрового производства / Ю. А. Соколов // Металлообработка. – 2020. – № 4(118). – С. 38-49.

93. Спиридонов, О. Б. Киберфизические системы : учебное пособие для вузов / О. Б. Спиридонов, Л. П. Милешко. – Москва :Юрайт, 2025. – 126 с. – ISBN 978-5-534-21310-2.

94. Справочник по промышленной робототехнике : в 2 книгах / под редакцией Ш. Нофа. – Москва : Машиностроение, 1989-1990.

95. Столбова, В. С. Возможности и угрозы роботизации и автоматизации производства / В. С. Столбова // Молодой исследователь: от идеи к проекту : материалы VIII студенческой научно-практической конференции, Йошкар-Ола, 30 мая 2024 года. – Йошкар-Ола : Марийский государственный университет, 2024. – С. 462-463.

96. Стороженко, В. В. Создание современной стратегии энергоэффективного управления производством / В. В. Стороженко // Актуальные проблемы социально-экономических наук : материалы II Международной научно-практической конференции, Таганрог, 29 февраля 2016 года. – Москва : Перо, 2016. – С. 42-48.

97. Суслов, А. Г. Технологическое обеспечение качества машин / А. Г. Суслов. – Москва :КноРус, 2020. – 336 с.

98. Сучков, А. К. Выявление системных ограничений применения методов менеджмента в условиях российской экономики / А. К. Сучков, А. Н. Милькова, Р. П. Сигаева [и др.] // Финансовые рынки и банки. – 2024. – № 10.

99. Тарасов, В. Б. Технологии Индустрии 4.0: от цифрового производства и интернета вещей до коллаборативных роботов и интеллектуального имитационного моделирования / В. Б. Тарасов // Экономика и управление: проблемы, решения. – 2018. – № 12.

100. Тарасов, И. В. Технологии Индустрии 4.0.: влияние на повышение производительности промышленных компаний / И. В. Тарасов // Стратегические решения и риск-менеджмент. – 2018. – № 2 (105). – С. 62-69.

101. Татаринев, К. А. Индустрия 4.0: новая производственная структура и человекоориентированный дизайн / К. А. Татаринев, Н. Н. Аникиенко,

И. А. Савченко, С. М. Музыка // Экономика и предпринимательство. – 2023. – № 9(158). – С. 26-28.

102. Ташматова, Ш. С. Компьютерное моделирование и автоматизация технологических процессов производства в машиностроении / Ш. С. Ташматова, Т. И. Ганиева, К. Э. Курбонова // Вестник науки и образования. – 2023. – № 5-2 (136). – С. 27-34.

103. Тейлор, Ф. У. Принципы научного менеджмента / Ф. У. Тейлор. – Москва : Социум, 2021. – 386 с.

104. Ткаченко, И. С. Концептуальная модель цифрового завода серийного производства малых космических аппаратов / И. С. Ткаченко, Д. В. Антипов // Известия Самарского научного центра РАН. – 2023. – Т. 25, № 3(113). – С. 90-106.

105. Ткаченко, С. С. Современное роботизированное оборудование в автоматическом производстве / С. С. Ткаченко, В. О. Емельянов, К. В. Мартынов // Металлургия машиностроения. – 2021. – № 4. – С. 37-38.

106. Трофимова, Н. Н. Цифровые инновации и машинное обучение в производстве: переход к умным фабрикам / Н. Н. Трофимова // Вестник Академии. – 2025. – № 1. – С. 18-28.

107. Уилер, Д. Статистическое управление процессами: Оптимизация бизнеса с использованием контрольных карт Шухарта / Д. Уилер, Д. Чамберс. – Москва : Альпина Паблицер, 2026. – 410 с.

108. Устюгов, Е. В. Новая архитектура кубсата без бортовой кабельной сети / Е. В. Устюгов, С. В. Шафран, А. А. Соболев // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2018. – Т. 61, № 5. – С. 423-429.

109. Фокина, Д. А. Ключевые компоненты киберфизической системы управления производственной кооперацией в промышленности / Д. А. Фокина, О. В. Слинцына // Индустрия 5.0, цифровая экономика и интеллектуальные экосистемы (ЭКОПРОМ-2021) : сборник трудов IV Всероссийской (Национальной) научно-практической конференции и XIX сетевой конференции с международным участием, Санкт-Петербург, 18–20 ноября 2021 года. – Санкт-Петербург : ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2021. – С. 217-221.

110. Фу, К. Робототехника / К. Фу, Р. Гонсалес, К. Ли ; пер. с англ. – Москва : Мир, 1989. – 624 с.
111. Харина, О. С. «Умные» инструменты организации эффективного управления производством / О. С. Харина, Э. Р. Жданов, Л. М. Червяков, А. В. Олейник // Наука и бизнес: пути развития. – 2025. – № 10(172). – С. 123-128.
112. Чалова, М. С. Разработка имитационной модели производственного цеха с использованием программного обеспечения AnyLogic / М. С. Чалова, О. В. Железнов // Ученые записки УлГУ. Серия «Математика и информационные технологии». – 2022. – № 1. – С. 80-85.
113. Шаранов, И. М. Имитационное моделирование управленческих процессов в производственных системах / И. М. Шаранов, Е. С. Петрова // Вестник ВУиТ. – 2011. – № 18. – С. 5-10.
114. Шваб, К. Четвертая промышленная революция / К. Шваб. – Москва : Эксмо, 2016. – 230 с.
115. Шиянов, А. И. Автоматизация и роботизация технологических процессов / А. И. Шиянов, Д. А. Ефремов // Наука - производству. – 2006. – № 4. – С. 62-63.
116. Шпенглер, О. Закат Европы / О. Шпенглер. – Москва : Мысль, 1993. – 663 с.
117. Ющенко, А. С. Интеллектуальное планирование в деятельности роботов / А. С. Ющенко // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2005. – № 3. – С. 5-18.
118. Яблочников, Е. И. Роль и задачи имитационного моделирования на этапе перехода от цифрового производства к «умным фабрикам» / Е. И. Яблочников // Имитационное моделирование. Теория и практика : материалы VIII Всероссийской научно-практической конференции по имитационному моделированию и его применению в науке и промышленности (ИММОД-2017), Санкт-Петербург, 18-20 октября 2017 года. – Санкт-Петербург : НП «НОИМ», 2017. – С. 219–227.

119. Ягопольский, А. Г. Имитационное моделирование производственных систем машиностроительных производств / А. Г. Ягопольский, Н. Д. Андрюхин, Д. Г. Тутукин // Инновации и инвестиции. – 2020. – № 11. – С. 142-146.

120. Ягопольский, А.Г. Металлорежущее технологическое оборудование / А.Г. Ягопольский, Л.И. Вереина. – Москва, 2019. – 151 с.

ПРИЛОЖЕНИЯ

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

ТЕРМИНОЛОГИЯ В ОБЛАСТИ РОБОТИЗАЦИИ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ

Автоматизация – это процесс внедрения технологий, призванных выполнять задачи с минимальным участием человека. Цель – оптимизировать рабочие процессы, повысить производительность и снизить вероятность ошибок, связанных с человеческим фактором.

Автоматизация полная – процесс, в котором человек полностью исключен из производственного процесса. Все операции выполняются автономными машинами и системами, управляемыми сложным программным обеспечением. Классический пример – полностью автоматизированные линии по розливу напитков или сбору электронных компонентов. Преимущества очевидны: максимальная производительность, круглосуточная работа, отсутствие человеческой ошибки. Однако такой подход требует значительных первоначальных инвестиций и сложной интеграции систем.

Автоматизация частичная – процесс, в котором человек и машина работают совместно. Автоматизированные системы берут на себя рутинные, повторяющиеся задачи, освобождая человека для выполнения более сложных операций, требующих принятия решений, творческого подхода и контроля качества. Например, на конвейере роботы могут выполнять сварку, а человек – проверять качество сварного шва и исправлять дефекты. Этот подход является более гибким и экономически выгодным для многих компаний.

Роботизация – это часть процесса автоматизации, подразумевающего внедрение роботов в производство. Роботы выполняют разнообразные задачи, значительно повышая эффективность и безопасность труда. Выделяют несколько типов роботов: промышленные, служебные, коботы.

Роботы промышленные – высокоточные машины, предназначенные для выполнения задач на производственных линиях. Они используются для сварки, покраски, сборки, упаковки и других операций, требующих высокой точности и повторяемости движений.

Роботы служебные – роботы в сфере обслуживания, выполняют опасные или слишком трудоемкие для человека задачи. Примеры: роботы-уборщики, роботы-охранники, роботы для доставки товаров.

Коботы (коллаборативные роботы) – новая категория роботов, разработанных для безопасной совместной работы с людьми. Они оснащены специальными датчиками и

системами безопасности, предотвращающими травмы. Коботы гибкие и легко перенастраиваются для выполнения различных задач, что делает их идеальным решением для небольших и средних предприятий.

Системы управления – это комплекс программных и аппаратных средств, предназначенных для управления, мониторинга и оптимизации процессов в различных сферах деятельности, включая производственные, бизнес-процессы, транспорт, энергетику и другие области. Они помогают организовать и автоматизировать управление ресурсами, данными и операциями.

Система управления производственными процессами (SCADA) – комплекс программного обеспечения и оборудования для мониторинга и управления производственными процессами в реальном времени. SCADA позволяет операторам отслеживать параметры работы оборудования, выявлять отклонения и оперативно реагировать на них.

Программируемый логический контроллер (PLC)– специализированный компьютер, используемый для автоматизации процессов управления в промышленных системах. PLC контролирует работу различных устройств и механизмов, обеспечивая их синхронную работу.

Системы управления производством (MES) – программные системы, обеспечивающие планирование, контроль и управление производственными процессами на уровне цеха. MES собирает данные со всего производства, анализирует их и предоставляет информацию для принятия управленческих решений.

Интернет вещей (IoT) – это сеть физических объектов (машин, датчиков, сенсоров), оснащенных программным обеспечением и способных обмениваться данными друг с другом и с централизованной системой управления. IoT позволяет собирать данные о состоянии оборудования, производительности процессов и других важных параметрах, что позволяет оптимизировать работу всего производства и принимать более обоснованные управленческие решения.

Автоматизация и роботизация – это неотъемлемые составляющие современного производства. Правильное внедрение этих технологий позволяет компаниям существенно повысить эффективность, снизить издержки и улучшить качество продукции, оставаясь конкурентоспособными на рынке. Выбор оптимального подхода зависит от специфики производства, масштаба бизнеса и финансовых возможностей компании. Однако вне зависимости от масштаба, инвестиции в автоматизацию и роботизацию – это инвестиции в будущее.

Интеллектуальная роботизированная производственная ячейка – это производственный участок, обладающий всеми характеристиками киберфизической производственной системы, являющейся базовой структурной единицей производственного подразделения (цеха) машиностроительного производства, в которой выполняются технологические и вспомогательные операции.

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

КЛАССИФИКАЦИЯ РИСКОВ И ОТКАЗОВ ЭЛЕМЕНТОВ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ РОБОТИЗИРОВАННОЙ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ ЯЧЕЙКИ ПРОЦЕССОВ СБОРКИ БПЛА

Процесс: Процесс сборки изделия (сборка БПЛА)
 Функция процесса:
 Сборка корпусных элементов и электронных компонентов для обеспечения тактико-технических показателей

Компоненты интеллектуальной производственной ячейки	Функция компонента	Риск (отказ / опасное событие)	Мероприятие по снижению риска
1. Роботизированный комплекс			
1.1. Робот-манипулятор (механика)	Точное позиционирование и выполнение технологических операций (сверление, нанесение клея, установка компонентов)	1. Механический износ/ заклинивание приводов. Снижение точности, полная остановка	1. Плановое ТО по регламенту, мониторинг вибрации и тока приводов
		2. Столкновение с препятствием (оборудованием, деталью). Поломка инструмента, робота, повреждение изделия	2. Чёткое зонирование, проверка свободной зоны перед запуском цикла. Программные ограничения скорости вблизи объектов
		3. Потеря калибровки. Смещение нулевых точек, брак сборки	3. Регламентная периодическая калибровка с использованием эталонов. Датчики контроля позиции
		4. Выход за пределы рабочей зоны. Механическое повреждение конструкций ячейки	4. Установка аппаратных и программных концевиков, «мягких» границ в ПО
		5. Отказ датчиков обратной связи (энкодеров). Неконтролируемое движение, опасность для персонала	5. Резервирование критических датчиков. Самодиагностика при запуске
1.2. Электрическая система работа	Обеспечение энергией и управлением приводами, контроллерами, датчиками	1. КЗ или обрыв в силовой цепи. Остановка, возможное возгорание	1. Использование кабелей в защитной гофре, регулярная инспекция изоляции. Установка автоматических выключателей и предохранителей
		2. Перегрузка по току. Перегрев, повреждение двигателей/контроллеров	2. Термодатчики на двигателях, защита от перегрузки в ЧПУ/приводах
		3. Скачки/пропадание напряжения. Некорректная работа, потеря данных, внезапная остановка	3. Стабилизаторы напряжения, ИБП для системы управления
		4. Отказ системы аварийного останова (E-stop). Невозможность быстро остановить робота в аварийной ситуации	4. Регулярные проверки цепи E-stop (по нормам безопасности), дублирование кнопок
		5. Электромагнитные помехи (ЭМП). Сбои в работе датчиков	5. Экранирование кабелей, правильное заземление, фильтры

Компоненты интеллектуальной производственной ячейки	Функция компонента	Риск (отказ / опасное событие)	Мероприятие по снижению риска
		и контроллеров	помех
1.3. Пневмо-система робота	Привод захватов, вспомогательных механизмов, обдув	1. Утечка сжатого воздуха. Падение давления, потеря усилия захвата	1. Регулярная проверка соединений мильным раствором, датчики контроля давления в линии
		2. Загрязнение воздуха (вода, масло). Засорение/ отказ пневмоцилиндров и клапанов	2. Установка фильтров- влагоотделителей, их регулярная очистка
		3. Отказ соленоидного клапана. Невозможность открыть/ закрыть захват	3. Использование качественных клапанов, наличие резервных клапанов на критических операциях
		4. Разрыв воздушного шланга. Резкое падение давления, неконтролируемое движение механизмов	4. Использование армированных шлангов, их правильная укладка в кабель-каналы, защита от перетиранья
		5. Образование конденсата и обледенение в магистралях при работе в неотапливаемом помещении или при интенсивном расходе. Закупорка линии, отказ клапанов и цилиндров, коррозия	5. Установка адсорбционных осушителей срезом после компрессора. Теплоизоляция критических участков магистралей. Регламентный слив конденсата из ресиверов и влагоотделителей
1.4. Программируемый контроллер (PLC)	Логическое управление последовательностью операций, обработка сигналов от датчиков, взаимодействие с системами верхнего уровня	1. Сбой программы/ зависание. Остановка всего процесса	1. Использование watchdog- таймера. Регулярный контроль «живимости» сигналов
		2. Потеря связи с полевыми устройствами (датчики, приводы). Некорректное управление	2. Качественная прокладка сетей, использование промышленных коммутаторов
		3. Неверная логика программы (ошибка проектирования). Технологическ ий брак, опасные ситуации	3. Строгий регламент тестирования и ввода в эксплуатацию новых программ. Верификация логики
		4. Сброс питания/потеря данных. Обнуление программы или параметров	4. Резервное копирование программы и параметров на внешний носитель, использование EEPROM
		5. Перегрев или критическое загрязнение электронных компонентов контроллера Некорректная работа, частые сбои, выход из строя процессора или модулей ввода-вывода	5. Установка контроллера в защищенный шкаф с принудительной вентиляцией и термостатом. Регулярная очистка воздушных фильтров шкафа и радиаторов контроллера от пыли. Монтаж датчиков температуры внутри шкафа с сигнализацией в SCADA при превышении порога
1.5. Система управления роботизированным комплексом (ЧПУ робота)	Преобразование команд в траектории, управление сервоприводами, интерполяция движения	1. Сбой/зависание операционной системы. Потеря управления движением	1. Использование промышленных компьютеров с ОС реального времени. Регулярные перезагрузки по графику
		2. Ошибка в постпроцессоре/программе УП. Движение по неверной траектории, столкновение	2. Визуализация траекторий в оффлайн-симуляторе перед загрузкой. Сухой (без инструмента) прогон программ на малой скорости

Компоненты интеллектуальной производственной ячейки	Функция компонента	Риск (отказ / опасное событие)	Мероприятие по снижению риска
		3. Отказ сервопривода. Робот «замирает» или движется рывками	3. Самодиагностика приводов, горячее резервирование для критичных осей
		4. Несанкционированный доступ/ вирусная атака. Изменение программ, остановка	4. Жёсткая политика информационной безопасности: изоляция сети, запрет съёмных носителей, антивирусы
		5. Потеря или рассинхронизация системного времени / сбой синхронизации с другими компонентами ячейки (PLC или системой зрения). Некорректное выполнение операций «по времени» или «по событию», приводящее к пропуску шагов или попытке выполнить действие над отсутствующим объектом	5. Настройка синхронизации по промышленному протоколу или через сигналы «Готов» / «Завершено» между системами. Регулярная проверка логов на предмет временных аномалий. Резервирование источников тактовой частоты
1.6. Система технического зрения (CV)	Распознавание деталей, контроль их наличия/положения, проверка качества операций (наличие клея, правильность установки)	1. Сбой/зависание ПО обработки изображений. Остановка цикла или работа вслепую	1. Высокнадёжный промышленный компьютер. Контроль «сердцебиения» программы
		2. Изменение условий освещения. Ложные срабатывания или пропуск дефектов	2. Использование стабилизированного искусственного освещения (световых куполов). Датчики контроля освещённости
		3. Загрязнение/повреждение камеры или объектива. Нечитаемые изображения	3. Регламент чистки объективов. Защитные кожухи для камер
		4. Смещение/вибрация камеры. Потеря калибровки, ошибки позиционирования	4. Жёсткое крепление, периодическая проверка калибровки по эталонным меткам
		5. Малая производительность ВК. Задержки, торможение процесса	5. Резервирование вычислительных мощностей, оптимизация алгоритмов
1.7. Система безопасности (лазерные сканеры, коврики, световые завесы)	Обнаружение проникновения персонала в опасную зону и немедленная остановка оборудования	1. Ложное срабатывание. Необоснованные остановки, потеря производительности	1. Правильная настройка зон, защита от случайных помех (пыль, насекомые)
		2. Несрабатывание (пропуск вторжения). Серьёзная опасность для жизни	2. Регулярные функциональные проверки (раз в смену). Резервирование (коврик + сканер)
		3. Загрязнение/повреждение чувствительного элемента. Потеря функциональности	3. Ежедневный осмотр и очистка. Защитные кожухи
		4. Обход/блокировка персоналом. Намеренное отключение для «удобства»	4. Жёсткий инструктаж и контроль дисциплины. Административная ответственность. Ведение журнала отключений
		5. Некорректная конфигурация или калибровка защитных полей/ зон («мёртвые зоны» у сканеров, высокое расположение световой завесы). Наличие областей, где	5. Валидация и картографирование защитных полей при вводе в эксплуатацию и после любых перемещений оборудования с помощью тестового объекта (манекена,

Компоненты интеллектуальной производственной ячейки	Функция компонента	Риск (отказ / опасное событие)	Мероприятие по снижению риска
		присутствие человека не обнаруживается, что создаёт скрытую лазейку для проникновения в опасную зону без остановки оборудования	цилиндра). Строгое следование стандартам безопасности при проектировании и настройке. Периодический аудит конфигурации систем безопасности
1.8. Захваты (гребенки, пневмоприсоски механические)	Надёжный захват, удержание и точное позиционирование детали	1. Износ/загрязнение рабочих поверхностей. Проскальзывание детали, падение	1. Плановый осмотр и замена расходных элементов (присосок, накладок). Очистка по регламенту
		2. Неверный выбор/настройка захвата для детали. Повреждение хрупких компонентов	2. Проектирование и тестирование захватов под конкретную номенклатуру. Использование адаптивных/ универсальных захватов
		3. Отказ датчика наличия детали в захвате. Работа «вхолостую» или попытка взять несуществующую деталь	3. Резервирование датчиков (пневмодатчик + оптический)
		4. Механическая поломка (трещина, изгиб). Падение детали, возможное столкновение	4. Визуальный осмотр на наличие повреждений. Неразрушающий контроль ответственных деталей
		5. Потеря усилия захвата из-за внешних факторов: вибрации всей ячейки, удар соприкасающейся деталью, резкое изменение ориентации/ускорения при манипуляции. Непреднамеренное высвобождение детали в процессе её переноса или установки	5. Расчёт и тестирование захвата с запасом по усилию удержания (коэффициент безопасности 2-4) с учётом максимальных инерционных нагрузок. Использование вакуумных датчиков с аналоговым выходом для непрерывного контроля разрежения на присосках. Амортизация и виброизоляция критического оборудования ячейки. Программное снижение скорости и ускорений робота при переносе особо ответственных или крупногабаритных деталей
1.9. Система смены инструмента (захватов)	Автоматическая быстрая смена инструмента для выполнения различных операций	1. Неточность стыковки (потеря калибровки). Люфт инструмента, брак операций	1. Регулярная чистка и калибровка патрона и адаптеров
		2. Загрязнение/повреждение контактных поверхностей (пины). Плохой контакт, потеря пневматики/сигнала	2. Защитные колпачки на неиспользуемых адаптерах. Очистка перед установкой
		3. Отказ фиксирующего механизма (защелки). Выпадение инструмента во время движения	3. Датчики контроля наличия и правильной фиксации инструмента. Регулярная проверка механизма
		4. Ошибка в выборе инструмента программой. Применение неверного инструмента, брак/поломка	4. Введение проверок в УП (код инструмента, датчик подтверждения)
		5. Неисправность или занятость ячейки хранения инструмента (вендингового шкафа), где	5. Резервирование критических инструментов (наличие дублирующего адаптера в другой

Компоненты интеллектуальной производственной ячейки	Функция компонента	Риск (отказ / опасное событие)	Мероприятие по снижению риска
		находится требуемый адаптер. Невозможность произвести смену, остановка процесса ожиданием	ячейке или на аварийной стойке). Программная логика обхода(временное использование альтернативного инструмента или пропуск операции с последующим ручным доделыванием). Интеграция состояния шкафа вMES/SCADA для предиктивного обслуживания и оперативного оповещения о сбое
1.10. Вендинговый шкаф (шкаф хранения оснастки)	Адресное, защищённое хранение и выдача сменных захватов, адаптеров и специализированного инструмента по запросу системы	<p>1. Отказ механизма выдачи/приёмки. Застревание инструмента, остановка процесса</p> <p>2. Сбой системы идентификации (RFID/ штрих-код). Выдача неверного инструмента</p> <p>3. Несанкционированный доступ/изъятие инструмента персоналом. Нарушение логистики, простой</p> <p>4. Переполнение/ неправильное размещение ячеек. Механические повреждения инструмента</p> <p>5. Потеря связи с головной системой управления (MES/PLC) или сбой внутреннего контроллера шкафа. Невозможность выполнить запрос на выдачу или приёмку, «ослепление» системы учёта</p>	<p>1. Датчики контроля положения ячеек и инструмента. Периодическое ТО механизмов</p> <p>2. Резервирование считывателей, ручной ввод кода как аварийный протокол</p> <p>3. Организационное: учёт доступа (ключ/карта), ведение электронного журнала операций. Интеграция с MES для отслеживания оснастки</p> <p>4. Организационное: чёткий регламент загрузки и инвентаризации. Сенсорные весы в ячейках для контроля наличия</p> <p>5.Резервирование каналов связи(например, второй сетевой порт). Автономный режим работы контроллера шкафа с буферизацией команд и локальной логикой. Регулярный пинг и контроль «живимости» соединения из SCADA. Наличие ручного интерфейса на панели шкафа для аварийного управления и просмотра состояния</p>
1.11. Система дозации и нанесения клея/герметика	Точное дозирование, смешивание компонентов (при необходимости) и автоматическое нанесение клеящих/герметизирующих составов на заданную траекторию	<p>1. Закупорка/засыхание состава в сопле или смесителе. Прерывание линии нанесения, брак узла</p> <p>2. Отклонение в пропорции смешивания двухкомпонентных составов. Неполная полимеризация, потеря прочности соединения</p> <p>3. Неисправность датчика давления или расхода. Нанесение недостаточного или избыточного количества клея</p> <p>4. Деградация/окончание срока годности клеящего состава. Резкое снижение адгезии после сборки</p>	<p>1. Регламентная промывка системы растворителем после смены. Использование герметичных картриджей</p> <p>2. Регулярная калибровка дозаторов и смесительных головок. Датчики контроля соотношения компонентов</p> <p>3. Периодическая проверка датчиков. Контроль веса наносимого состава за цикл</p> <p>4. Учёт FIFO (первым пришёл – первым ушёл). Ведение базы данных сроков годности в MES.</p>

Компоненты интеллектуальной производственной ячейки	Функция компонента	Риск (отказ / опасное событие)	Мероприятие по снижению риска
		5. Загрязнение поверхности детали перед нанесением (масло, пыль). Отсутствие смачивания, непрочное соединение	5. Предварительная операция обдува или очистки поверхности. Контроль чистоты зоны сборки
1.12. Система пыле- и стружкоудаления	Локальный отсос аэрозолей, пыли (от композитов) и стружки (от механической обработки) для обеспечения чистоты сборки, пожаробезопасности и сохранности оборудования	1. Переполнение/засорение фильтров и пылесборника. Резкое падение мощности всасывания	1. Регламентная замена/очистка фильтров по показаниям датчика перепада давления
		2. Разрыв или неплотность воздухопроводов. Утечка разрежения, распространение загрязнений по цеху	2. Регулярный визуальный осмотр воздухопроводов. Использование гофрированных армированных шлангов
		3. Искрообразование в системе (при работе с металлом). Пожарная опасность	3. Применение антистатических воздухопроводов, взрывозащищённых вентиляторов для зон обработки металла. Искроуловители
		4. Повышенный шум и вибрация от вентилятора. Дискомфорт персонала, ослабление креплений	4. Установка виброопор и шумоглушителей. Размещение силового блока вне основной зоны
		5. Нарушение работы прецизионного оборудования из-за создаваемого воздушного потока или статического электричества. Сбивание легких деталей со столов, накопление статического заряда на компонентах БПЛА (опасно для электроники), помехи в работе высокочувствительных датчиков (системы технического зрения)	5. Правильное позиционирование воздухозаборных раструбов и регулировка мощности всасывания для минимизации побочных потоков. Использование заземленных воздухопроводов и антистатических материалов. Установка ионизаторов воздуха в зоне сборки для нейтрализации статического заряда. Экранирование чувствительных датчиков от воздушных потоков
2. Рабочий стол для выполнения сборочных операций			
2.1. Стол для размещения технологической оснастки	Обеспечение стабильной, виброустойчивой платформы для точной установки сборочной оснастки	1. Виброрасшатывание креплений. Смещение оснастки, потеря точности	1. Использование виброопор, периодическая проверка и подтяжка крепёжных элементов
		2. Деформация/ искривление столешницы. Неправильное базирование всей оснастки	2. Использование массивных, стабилизированных (отпущенных) столешниц из гранита или композита
		3. Загрязнение монтажных поверхностей (стружка, клей). Неточная установка оснастки	3. Регламент уборки рабочей зоны (5S). Очистка перед установкой новой оснастки
		4. Несовместимость или отсутствие унифицированной системы крепления (Т-пазы, резьбовые отверстия) с устанавливаемой оснасткой. Невозможность корректно и жёстко зафиксировать оснастку, необходимость нестандартных переходников, снижение	4. Разработка и соблюдение стандарта на систему крепления для всей оснастки ячейки. Использование столов с модульной системой Т-пазов или предустановленными позиционирующими штифтами. Ведение парка оснастки, соответствующего стандарту

Компоненты интеллектуальной производственной ячейки	Функция компонента	Риск (отказ / опасное событие)	Мероприятие по снижению риска
		точности и надёжности	
		5. Термическое расширение/сжатие столешницы или всей конструкции стола из-за колебаний температуры в цеху. Изменение геометрических размеров и положения установочных плоскостей, ведущее к неучтённым погрешностям базирования	5. Установка стола в зоне с контролируемым температурным режимом. Использование материалов с низким коэффициентом теплового расширения (специальные композиты) для ответственных столов. Периодическая калибровка точных столов в рабочих температурных условиях
2.2. Магазин-накопитель (питатель)	Предоставление компонентов в заданной ориентации для надёжного захвата роботом	1. Застревание/ перекося детали в лотке. Сбой подачи, остановка	1. Датчики наличия детали в зоне захвата. Вибрационные питатели для расклинивания
		2. Ошибка счётчика деталей. Пустой запуск цикла или переполнение	2. Фотоэлектрические датчики подсчёта на входе/выходе
		3. Загрязнение лотков (пыль, стружка). Заклинивание, повреждение поверхности деталей	3. Регламентная чистка. Использование закрытых или продуваемых лотков
		4. Износ направляющих. Неправильная ориентация детали	4. Плановый осмотр и замена изношенных элементов
		5. Несоответствие поступающих деталей параметрам питателя (геометрия, материал, наличие облоя). Постоянные заклинивания, повреждение как деталей, так и механизмов питателя, невозможность автоматической подачи	5. Входной контроль качества деталей перед загрузкой в питатель (в т.ч. визуальный с помощью CV). Проектирование и адаптация питателя под конкретную, валидованную номенклатуру. Наличие аварийного ручного лотка для подачи в случае сбоя автоматики. Чёткое закрепление допусков на детали в ТУ
2.3. Сборочная оснастка (кондукторы, шаблоны)	Точное базирование и фиксация корпусных элементов во время операций	1. Механический износ базирующих элементов (упоров, пальцев). Накопление ошибки базирования	1. Регламентный контроль геометрии оснастки (калибровка). Замена изношенных деталей
		2. Накопление загрязнений в пазах. Неточная установка детали	2. Обязательная очистка после каждой смены или партии
		3. Поломка зажимных механизмов. Недостаточная фиксация, смещение при обработке	3. Датчики контроля состояния зажимов (зажато/разжато)
		4. Ошибка установки оснастки на стол. Смещённая система координат	4. Использование конструктивных элементов (штыри, базы) для однозначной установки. Датчики подтверждения правильной установки
		5. Использование несоответствующей или устаревшей ревизии оснастки	5. Маркировка оснастки чётким, machine-readable кодом (QR, RFID) с указанием номера

Компоненты интеллектуальной производственной ячейки	Функция компонента	Риск (отказ / опасное событие)	Мероприятие по снижению риска
		из-за ошибки персонала или неучтённых изменений в конструкции изделия (БПЛА).Сборка по старым геометрическим параметрам, приводящая к нестыковке компонентов, внутренним напряжениям или полному браку партии	изделия и ревизии. Интеграция данных PDM-системы (актуальная ревизия чертежа) с системой управления ячейкой (MES/PLC). Внедрение процедуры сканирования кода оснастки перед запуском в работу для автоматической проверки соответствия запускаемому заказу. Физическое изъятие устаревшей оснастки из производственной зоны
2.4. Система контрольного взвешивания (встроенные весы)	Послеоперационный контроль массы узла или изделия для выявления отсутствующих или лишних компонентов, косвенный контроль качества сборки	<p>1. Неверная калибровка/дрейф нуля. Ложное срабатывание на брак</p> <p>2. Влияние вибраций и воздушных потоков. Нестабильные показания, остановка процесса</p> <p>3. Механическое повреждение платформы или тензодатчиков. Полный выход из строя</p> <p>4. Программная ошибка в установке допусков. Принятие брака или браковка годного изделия</p> <p>5. Неспособность выявить качественный брак при сохранении количественной комплектности (установка неправильной, но аналогичной по массе детали; недостаточное количество клея; неправильная сборка, не влияющая на массу).Ложное ощущение контроля, пропуск критических дефектов сборки</p>	<p>1. Автоматическая калибровка по встроенному эталону по расписанию</p> <p>2. Установка антивибрационных ножек, защитных кожухов от сквозняков</p> <p>3. Запрет на размещение на весах посторонних предметов. Контроль на предмет перегрузки</p> <p>4. Валидация и утверждение допусков технологом. Аудит принятых решений системой</p> <p>5. Осознание того, что взвешивание один из инструментов контроля. Обязательное дополнение взвешивания другими методами контроля: визуальный контроль CV (наличие меток, положение деталей), функциональное тестирование электрических цепей, контроль момента затяжки резьбовых соединений. Статистический анализ (SPC) данных о массе для выявления трендов, указывающих на процессные проблемы (постепенное уменьшение массы из-за усыхания клея)</p>
2.5. Система маркировки (лазерная/точно-ударная)	Нанесение постоянной маркировки (серийный номер, QR-код, дата) на корпус БПЛА для обеспечения трассируемости и учёта	<p>1. Смещение/расфокусировка луча лазера. Нечитаемая, слишком глубокая/слабая маркировка</p> <p>2. Износ ударной иглы. Нечёткие символы</p> <p>3. Сбой в передаче данных из MES/PDM. Нанесение неверного кода или дублирование номеров</p> <p>4. Загрязнение поверхности</p>	<p>1. Регулярная чистка линз, проверка фокуса по тестовым образцам. Автоматическая фокусировка</p> <p>2. Плановый осмотр и замена иглы как расходного материала</p> <p>3. Валидация данных перед нанесением (проверка контрольной суммы, уникальности номера). Локальный буфер номеров</p> <p>4. Предварительная операция</p>

Компоненты интеллектуальной производственной ячейки	Функция компонента	Риск (отказ / опасное событие)	Мероприятие по снижению риска
		перед маркировкой. Плохое качество нанесения	очистки/ обезжиривания зоны маркировки
		5. Нанесение маркировки, которую невозможно автоматически или визуально считать на следующих этапах (брак маркировки), но факт нанесения системой зафиксирован как успешный. Потеря трассируемости изделия, необходимость ручного выяснения и перенанесения, сбой логистики	5.Интеграция в линию немедленного последующего контроля с помощью камеры считывания (CV-верификатор). Система должна автоматически считать нанесённый код, сверить его с эталоном из MES и принять решение о допуске изделия дальше по процессу или его отбраковке в зоне ремонта. Запрет на учёт изделия в системе как успешно промаркированного без положительного верифицирующего сигнала
3. Система хранения и логистики			
3.1. Стеллажная система	Адресное хранение компонентов и комплектующих с обеспечением сохранности и лёгкости доступа для автоматики	1. Падение паллеты/короба со стеллажа. Разрушение груза, блокировка зоны	1. Ограничители, защитные сетки. Датчики контроля нахождения паллеты в ячейке
		2. Ошибка в системе учёта (WMS). «Потеря» или неверное указание местоположения	2. Регулярная инвентаризация с помощью RFID/штрих-кодов. Синхронизация WMS-MES
		3. Механическое повреждение стеллажа тележкой (AGV). Деформация, риск обрушения	3. Защитные ограждения по периметру, датчики приближения на AGV
		4. Несоблюдение весовых норм. Перегруз, деформация	4. Закрепление ответственного за размещение. Маркировка максимальной нагрузки
		5. Блокировка доступа к соседним ячейкам хранения из-за неправильного размещения габаритных грузов или поломки механизма выдвижения. Простой AGV или штабелёра, нарушение логистических маршрутов, срыв графиков комплектации	5.Чёткие правила размещения грузов(габариты, ориентация) и резервирование проходов/зон обслуживания в цифровой модели WMS. Мониторинг состояния механизмов(если есть выдвижные ярусы) и своевременное ТО. Наличие аварийных процедур и ручных средств для извлечения груза в случае сбоя. Программная логика в WMS, предотвращающая назначение заданий к заблокированным ячейкам
3.2. Роботизированная тележка (AGV/AMR)	Автономное комплектование заказов на сборку и транспортировка компонентов к ячейке	1. Потеря навигации (LIDAR, магнитная лента). Остановка в неполюженном месте, блокировка путей	1. Резервная система навигации (например, инерциальная). Чёткая разметка, регулярная чистка сенсоров
		2. Разряд/ отказ аккумулятора. Прерывание поставок	2. Регламент подзарядки по графику, наличие сменных АКБ
		3. Столкновение с препятствием (предмет, человек). Повреждение груза, оборудования, травма	3. Многоуровневая система безопасности (сканеры, бамперы, звуковое/ световое оповещение)
		4. Сбой ПО управления флотом. Хаотичное движение или остановка всех AGV	4. Резервирование сервера управления флотом

Компоненты интеллектуальной производственной ячейки	Функция компонента	Риск (отказ / опасное событие)	Мероприятие по снижению риска
		5. Механическая поломка (привод, подшипник). Выход из строя	5. Плановое ТО по регламенту
3.3. Ограждение системы хранения	Физическое ограничение доступа персонала в зону движения AGV и работы штабелёров	1. Несанкционированное открытие/вход. Риск столкновения с AGV	1. Турникеты или двери с сенсорным доступом (карта) и блокировкой при приближении AGV
		2. Постоянное открытие для «удобства». Фактическое устранение защиты	2. Видеонаблюдение, строгий инструктаж, контроль доступа
		3. Механическое повреждение (вмятины, сдвиг). Потеря прочности, возможность проникновения	3. Регулярный осмотр целостности ограждений
		4. Отсутствие или неисправность заблокированных с ограждением аварийных выключателей и предупреждающей сигнализации (световой, звуковой). Невозможность быстро остановить оборудование при проникновении, отсутствие предупреждения для персонала	4. Установка аварийных кнопок остановки с внутренней и внешней стороны ограждения, заблокированных с системой управления AGV и конвейерами. Монтаж световой и звуковой сигнализации, активируемой при открытии дверей/турникетов. Регулярные функциональные проверки цепи безопасности
		5. Нарушение зон видимости и создания «слепых зон» из-за конструкции ограждения, мешающих оператору или системе видеонаблюдения контролировать обстановку внутри зоны. Затруднённое обнаружение людей, оказавшихся внутри, или нештатных ситуаций (падение груза, возгорание)	5. Проектирование ограждения с использованием прозрачных/сетчатых панелей для обеспечения обзора. Стратегическое размещение камер видеонаблюдения внутри зоны с выводом изображения на монитор оператора. Соблюдение на безопасные расстояния и конструкции ограждений
3.4. Датчики движения (в зоне хранения/логистики)	Обнаружение присутствия человека в автоматизированной зоне для снижения скорости/остановки AGV	1. Ложное срабатывание (пыль, птицы). Неоправданные остановки логистики	1. Настройка зон чувствительности, защитные кожухи от случайных помех
		2. Несрабатывание (пропуск человека). Высокий риск травмы	2. Ежедневная функциональная проверка
		3. Загрязнение линз/сенсоров. Снижение чувствительности	3. Регламент чистки
		4. Потеря питания или обрыв сигнального кабеля датчика. «Немая» зона, полная потеря функции обнаружения	4. Резервирование питания датчиков (отдельный источник ИБП для системы безопасности). Прокладка кабелей в защитных гофрах и кабель-каналах. Мониторинг состояния «живимости» датчиков в SCADA-системе с генерацией аварийного сигнала при потере связи
		5. Неадекватная реакция системы AGV на сигнал датчика (задержка, игнорирование) из-за	5. Интеграция датчиков в общую, отказоустойчивую систему безопасности (Safety PLC), а не

Компоненты интеллектуальной производственной ячейки	Функция компонента	Риск (отказ / опасное событие)	Мероприятие по снижению риска
		программной ошибки в контроллере флота или недостаточной производительности сети. Остановка происходит слишком поздно или не происходит вообще, несмотря на исправный датчик	только прямое подключение к AGV. Тестирование и валидация логики реакции при вводе в эксплуатацию и после изменений. Использование детерминированных промышленных сетей (PROFIsafe, CIP Safety) для передачи сигналов безопасности
3.5. Система штрих-кодирования/RFID	Однозначная идентификация грузовых единиц, паллет, коробов	1. Нечитаемый/ повреждённый код/ метка. Потеря идентичности груза, остановка	1. Правила нанесения и защиты этикеток. Резервный ручной ввод кода
		2. Сбой считывателя. Невозможность подтвердить операцию (взять/ положить)	2. Резервирование считывателей, их регулярная очистка и проверка
		3. Ошибка в базе данных (несоответствие кода и содержимого). Подвоз неверных компонентов на сборку	3. Контрольная перепроверка при приёмке на склад и выдаче в производство. Принцип «двойной проверки»
		4. Плохие условия для считывания: блики, недостаточная контрастность, неправильный угол, расстояние, радиочастотные помехи (для RFID). Пропуск операции, необходимость многократных попыток, снижение скорости логистики	4. Проектирование и тестирование рабочих зон считывания с учётом освещённости, углов и расстояний. Использование специализированных считывателей (с подавлением бликов, с регулируемой мощностью для RFID). Защита от ЭМ-помех для RFID-антенн
		5. Умышленная или случайная подмена метки/этикетки на грузе. Доставка на сборку совершенно иного компонента под «правильным» кодом, приводящая к грубому браку и возможной поломке оборудования	5. Физическая защита меток (разрушающиеся при снятии этикетки, вшитые RFID-метки). Контроль целостности логистической цепочки (видеонаблюдение в зонах комплектации). Внедрение технологий, связывающих метку с самим объектом (уникальный код, нанесённый лазером непосредственно на деталь)
4. Автоматизированная система управления (АСУ)			
4.1. SCADA-система (диспетчеризация)	Визуализация техпроцесса, оперативное управление, аларминг, сбор данных	1. Сбой сервера/ компьютера SCADA. Потеря мониторинга и ручного управления	1. Резервирование серверов. Регулярное архивирование проектов
		2. Потеря связи с контроллерами (PLC). «Ослепление» системы, невозможность управлять	2. Резервирование сетевых путей (кольцевая топология)
		3. Человеческая ошибка оператора. Неверная команда, отключение не того оборудования	3. Разграничение прав доступа, подтверждение критических команд (двойной клик, пароль). Тренинг операторов
		4. Кибератака (вирус, ransomware). Остановка, повреждение данных, шпионаж	4. Изоляция промышленной сети от интернета, межсетевые экраны, регулярное обновление ПО, политика информационной

Компоненты интеллектуальной производственной ячейки	Функция компонента	Риск (отказ / опасное событие)	Мероприятие по снижению риска
			безопасности
		5. Некорректная или устаревшая визуализация (мнемосхема), отсутствие ключевых индикаторов или «замыливание» аварийной сигнализации (алармов). Оператор не видит реального состояния процесса, пропускает критические события или неверно интерпретирует ситуацию, что ведёт к запоздалому или ошибочному вмешательству	5. Следование стандартам HMI/SCADA (ISA-101) при проектировании мнемосхем. Регулярный пересмотр и актуализация мнемосхем при изменении техпроцесса. Внедрение эффективной системы управления алармами с фильтрацией, приоритизацией и анализом «наводнённости». Периодические тренировки операторов на симуляторе или тестовом стенде для проверки реакции на нестандартные ситуации
4.2. АРМ оператора	Удобный интерфейс для взаимодействия с ячейкой: запуск, остановка, ввод параметров	1. Аппаратный сбой (отказ ПК, монитора, клавиатуры). Потеря точки управления	1. Резервный терминал или планшет для управления. Использование промышленных ПК
		2. Неэргономичный интерфейс. Провоцирование ошибок оператора	2. Тестирование интерфейса с операторами, следование стандартам HMI (ISA-101)
		3. Несанкционированный доступ к терминалу. Риск вредительства или ошибки	3. Выход из учётной записи при простое, пароли, физический контроль доступа к АРМ
		4. Работа в несоответствующих условиях (запылённость, влажность, перегрев, вибрация). Ускоренный износ оборудования, частые сбои, дискомфорт оператора	4. Установка АРМ в защищённом промышленном корпусе (IP54 и выше) с фильтрацией входящего воздуха. Обеспечение нормативных условий труда (кондиционирование, освещение). Крепление на виброизолирующие стойки
		5. Отсутствие или нечитаемость физических дублирующих органов аварийной остановки (кнопки E-stop, грибки) в непосредственной близости от АРМ. В критической ситуации оператор тратит время на поиск кнопки в интерфейсе или бежит к другому месту, что увеличивает время реакции и риск развития аварии	5. Обязательное наличие физических, легко доступных и промаркированных кнопок аварийного останова в зоне видимости и досягаемости от каждого АРМ, жёстко заблокированных с системой безопасности (Safety PLC). Регулярные тренировки операторов на отработку действий при аварии с использованием этих кнопок
4.3. MES-система (управление производством)	Управление производственными заказами, диспетчеризация, сбор данных об эффективности (OEE), управление материалами	1. Интеграционные сбои с ERP и уровнями автоматизации. Обрыв информационных потоков	1. Надёжное middleware для интеграции, мониторинг состояния обменов
		2. Некорректные данные в системе (нормы времени, состав заказа). Бракованные партии, простой	2. Регламент внесения изменений в MES, проверка данных ответственными технологами
		3. Отказ сервера БД MES. Остановка планирования и учёта	3. Кластерная или зеркальная организация серверов и БД. Регулярное резервное

Компоненты интеллектуальной производственной ячейки	Функция компонента	Риск (отказ / опасное событие)	Мероприятие по снижению риска
			копирование
		4. Сложность или неинтуитивность интерфейса для диспетчеров и мастеров. Низкая вовлечённость пользователей, ошибки при вводе данных, игнорирование системных предупреждений, работа «в обход» системы (на бумаге)	4.Активное вовлечение конечных пользователей на этапе выбора и настройки MES. Проведение полноценного обучения и создание понятных инструкций. Назначение внутренних супервайзеров из числа персонала. Постоянный сбор обратной связи и адаптация рабочих процессов в системе
		5. Система используется только как «электронный табель», без глубокого анализа данных (OEE, причины простоев, отклонения) для принятия управленческих и оперативных решений. Упущенные возможности для повышения эффективности, Kaizen и предиктивного обслуживания	5.Формирование культуры, основанной на данных.Внедрение регулярных отчётных встреч, где анализируются данные MES. Создание автоматизированных дашбордов KPI для разных уровней управления. Постановка конкретных целей по улучшению показателей(снижение времени переналадки, повышение OEE) и использование MES для контроля их достижения
4.4. PDM-система (управление данными об изделии)	Предоставление актуальных конструкторско-технологических данных (3D-модели, чертежи, спецификации, программы для ЧПУ) в MES и на уровень автоматизации	1. Загрузка неверной/неактуальной ревизии чертежа или программы. Сборка по старым/неправильным данным, брак	1. Чёткий регламент выпуска изменений (ECN) с обязательной верификацией данных для производства. Контрольные суммы файлов
		2. Потеря связи с сервером PDM. Невозможность получить данные для нового заказа	2. Резервирование сервера, локальные кэши критических данных на уровне ячейки
		3. Несоответствие данных в PDM и MES (номенклатура, коды). Ошибки комплектации	3. Синхронизация справочников PDM и MES при каждом обновлении. Назначение ответственного за консистентность данных
		4. Утечка или несанкционированное изменение конфиденциальных конструкторских данных (интеллектуальной собственности).Промышленный шпионаж, саботаж, выпуск контрафактной продукции	4.Жёсткое разграничение прав доступа на основе ролей. Ведение логов всех действий с файлами (кто, что, когда скачал/изменил).Шифрование данных на сервере и в каналах передачи. Регулярные аудиты системы безопасности. Физическая защита серверов
		5. Отсутствие в PDM данных, критичных для автоматизации, или их нечитаемый для систем формат (например, отсутствие 3D-моделей в легковесном формате, спецификаций в machine-readable виде).Невозможность автоматической генерации программ для роботов, необходимость ручного	5.Внедрение сквозного цифрового процесса. Разработка и соблюдение стандартов на выходные данные из PDM для производства (обязательное наличие файлов в STEP, JT, PDF с определёнными слоями). Тесное взаимодействие отделов конструкторской подготовки производства (КПП) и автоматизации на ранних этапах

Компоненты интеллектуальной производственной ячейки	Функция компонента	Риск (отказ / опасное событие)	Мероприятие по снижению риска
		перевода данных, ошибки	проектирования изделия
5. Инфраструктура и системы обеспечения			
5.1. Система бесперебойного питания (ИБП) и стабилизации	Защита чувствительного электронного оборудования (ПЛК, серверы, системы зрения) от скачков напряжения и обеспечение времени для корректного останова при полном отключении сети	1. Деградация/внезапный отказ аккумуляторных батарей (АКБ). Потеря функции резервирования	1. Регулярное тестирование АКБ под нагрузкой (самотестирование ИБП). Плановое групповое обслуживание батарей.
		2. Перегрузка ИБП при включении всего оборудования. Срабатывание защиты, мгновенное отключение	2. Корректный расчёт мощности с запасом. Последовательный (каскадный) запуск оборудования
		3. Отказ силовой электроники (инвертора) ИБП. Прекращение подачи качественного напряжения даже при наличии сети	3. Мониторинг параметров ИБП (температура, нагрузка) из SCADA. Наличие резервного модуля (N+1)
		4. Отсутствие/неисправность байпасного статического переключателя. Невозможность обслуживания ИБП без остановки производства	4. Проектирование схемы с автоматическим байпасом. Регламентное обслуживание только при остановке ячейки
		5. Неспособность ИБП обеспечить аварийное питание для систем безопасности (Safety PLC, аварийные стопы, освещение аварийной эвакуации) в течение необходимого времени. Потеря контроля над оборудованием в опасной ситуации при отключении основной сети, невозможность безопасной остановки и эвакуации персонала	5. Выделение отдельного, независимого ИБП повышенной надёжности или системы аварийного электроснабжения (ДГУ) специально для цепей безопасности. Проведение расчёта необходимого времени автономной работы систем безопасности и обеспечение соответствующей ёмкости АКБ. Регулярные комплексные проверки с имитацией отключения сети и проверкой функционирования всех систем безопасности в автономном режиме
5.2. Система контроля микроклимата и вентиляции	Поддержание стабильной температуры, влажности и чистоты воздуха в зоне прецизионной сборки для обеспечения технологических параметров и сохранности компонентов	1. Выход из строя чиллера или осушителя. Превышение допустимой температуры/влажности	1. Резервирование критических агрегатов. Мониторинг параметров среды с аварийной сигнализацией в SCADA
		2. Загрязнение фильтров приточной вентиляции. Снижение воздухообмена, рост концентрации пыли/аэрозолей	2. Регламентная замена фильтров по расписанию и по показаниям датчика перепада давления
		3. Образование конденсата на холодных поверхностях. КЗ, окисление контактов	3. Плавное регулирование температуры, контроль точки росы. Термоизоляция трубопроводов и воздухопроводов
		4. Неравномерное распределение температуры по зоне. Локальные перегревы/охлаждения, тепловые деформации	4. Правильное проектирование системы (расположение диффузоров, вытяжек). Использование локенных вентиляторов для перемешивания воздуха
		5. Создание некомфортных или вредных условий для персонала	5. Проектирование с учётом эргономических норм и

Компоненты интеллектуальной производственной ячейки	Функция компонента	Риск (отказ / опасное событие)	Мероприятие по снижению риска
		(сквозняки, духота, шум от вентиляторов, распространение запахов от технологических процессов).Снижение концентрации и производительности операторов, рост числа ошибок, ухудшение здоровья, повышение текучести кадров	стандартов охраны труда. Проведение регулярного мониторинга параметров среды на рабочих местах(температура, влажность, скорость воздуха, уровень шума). Использование систем зонального комфортного климата и шумоглушителей. Организация перерывов и зон отдыха с оптимальным микроклиматом
5.3. Промышленная сетевая инфраструктура	Обеспечение высоконадёжной, детерминированной и безопасной связи между всеми компонентами ячейки (Ethernet, PROFINET, EtherCAT)	<p>1. Отказ ключевого коммутатора. Полная или частичная потеря связи, остановка ячейки</p> <p>2. Физическое повреждение кабельной линии (перебит, перетёрт).Обрыв связи с критическим оборудованием</p> <p>3. Киберинцидент (вирус, атака) из-за плохой сегментации сети. Распространение по всей ячейке, утечка данных, остановка</p> <p>4. Перегрузка сетевого трафика (широковещательный шторм).Задержки в передаче данных, сбой в синхронизации</p> <p>5. Накопление проблем с качеством сигнала (затухание, наводки, плохие контакты) и «плавающие» сетевые ошибки. Периодические, трудно диагностируемые сбой связи, потеря пакетов данных, приводящие к случайным остановкам оборудования и сложности в локализации неисправности</p>	<p>1. Использование управляемых промышленных коммутаторов с резервированием по кольцевой топологии (MRP)</p> <p>2. Прокладка кабелей в защитных коробах/трубах. Регулярная проверка целостности физического уровня</p> <p>3. Жёсткая сегментация сети (IT/OT). Установка промышленных фајрволов (демилитаризованная зона). Политика информационной безопасности</p> <p>4. Настройка VLAN, приоритизация трафика (QoS), отключение неиспользуемых портов</p> <p>5.Использование кабелей и разъёмов промышленного класса, соответствующих категории. Регулярный профилактический мониторинг сетевых параметров (коллизии, ошибки CRC) через SNMP и диагностические функции коммутаторов. Применение оптического волокна для критических магистралей и участков с высоким уровнем ЭМ-помех. Проведение аудита и сертификации кабельной системы при вводе в эксплуатацию</p>
6. Человеческий фактор (персонал)			
6.1. Оператор-наладчик ячейки	Наблюдение за работой, оперативное реагирование на сбой и аварии, проведение переналадки, выполнение планового ТО, ввод компонентов вручную при необходимости	<p>1. Нарушение правил безопасности (вход в зону без отключения, обход защитных ограждений). Высокий риск травматизма</p> <p>2. Ошибка при переналадке или вводе параметров. Настройка на неверную деталь, приводящая к столкновениям или браку</p>	<p>1. Жёсткий инструктаж и аттестация по ТБ. Контроль доступа (ключи, карты). Видеонаблюдение. Административные взыскания</p> <p>2. Использование электронных чек-листов переналадки, сканирование штрих-кода новой оснастки для автоматической подгрузки программ. Подтверждение критических шагов.</p>

Компоненты интеллектуальной производственной ячейки	Функция компонента	Риск (отказ / опасное событие)	Мероприятие по снижению риска
		3. Несвоевременное или некачественное проведение регламентных работ (ТО).Накопление предотказных состояний оборудования	3. Ведение цифрового журнала ТО в MES/CMMS с напоминаниями и подписью исполнителя
		4. Неверная диагностика причины сбоя. Неправильные действия, усугубляющие проблему и увеличивающие время простоя	4. Разработка и доступность детальных пошаговых алгоритмов диагностики. Наличие горячей линии поддержки от инженеров.
		5. Усталость, невнимательность. Пропуск тревожных сигналов, медленная реакция	5. Нормирование рабочего времени, регулярные перерывы. Ротация персонала. Эргономичная организация АРМ

ПРИЛОЖЕНИЕ 3**ПРОЕКТ ТЕХНИЧЕСКОГО ПРЕДЛОЖЕНИЯ НА УЧАСТОК
РОБОТИЗИРОВАННОЙ СБОРКИ БПЛА****СОДЕРЖАНИЕ**

ВВЕДЕНИЕ	212
ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ	212
1 Анализ исходных требований	212
2 Производственно-технологическое решение	215
3 Требования к конструкции FPV-дрона, адаптированного под возможности роботизированной сборки.....	220
4 Требования к технологии и технологическому оснащению участка сборки	221
5 Требования к организации производственного участка.....	233
6 Оценка рисков.....	234
7 Техничко-экономическое обоснование	236
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	236

ВВЕДЕНИЕ

Настоящее техническое предложение (ТП) разработано на основании запроса производственного предприятия и устанавливает требования к созданию производственного участка роботизированной сборки FPV-дрона текущей конструкции.

Цель технического предложения – разработка требований к созданию роботизированного производственного участка сборки дрона установленной конструкции.

Технического предложения ТП основывается на:

- анализе исходной конструкции FPV-дрона;
- анализе и оценке технологичности конструкции;
- анализе технологии сборки FPV-дрона;
- анализе существующих системных ограничений (организационно-управленческих и производственно-технологических).

Объектом разработки является производственный участок, на котором выполняются технологические и вспомогательные операции с элементами роботизации при сборке FPV-дрона установленной конструкции.

ТП содержит ссылки на техническую документацию по технологии сборки FPV-дрона организации роботизированного производственного участка.

ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Системное ограничение – внутренний или внешний фактор, наиболее влияющий на выполнение производственных показателей, в первую очередь на выполнение заданной производственной программы.

Производственный участок сборки FPV-дронов текущей конструкции (далее – Участок сборки) – производственный участок на котором выполняются операции по подсборке и сборке рамы дрона, операции установки электронных компонентов (полетного контролера, камеры, антенны), тестирование ПО.

1 Анализ исходных требований

В качестве технического задания (ТЗ) был определён объём выпуска партии FPV-дронов в количестве 37000 ед. в год.

В качестве прототипа конструкции рассматривался беспилотный летательный аппарат ВТ-40 (далее – FPV-дрон текущей конструкции). Беспилотный летательный аппарат (БПЛА) ВТ-40 (Владлен Татарский) представляет собой алюминиевую раму собственной разработки, на

которой крепится аккумулятор, камера и полезная нагрузка. Внешний облик БПЛА ВТ-40 представлен на рисунке 1.1.



Рисунок 1.1 – Внешний облик ВТ-40 (текущая конструкция)

Спецификация на FPV-дрон текущей конструкции приведена в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Спецификация комплектующих FPV-дрон текущей конструкции

Наименование элемента ЛА	Кол-во на изделие	Кол-во всего на ЛА	Ед. изм.
Дрон ФПВ 10			
<u>Рама 10</u>	1	1	шт.
<u>Детали</u>			
Луч	4	4	шт.
Основание	1	1	шт.
Площадка	1	1	шт.
Пластина	1	1	шт.
<u>Стандартные изделия</u>			
Винт М3х8 ISO 10642	24	24	шт.
<u>Электродвигатель</u>	1	4	
<u>Детали</u>			
Шайба	1	4	шт.
<u>Стандартные изделия</u>			
Винт с потайной головкой ISO 10642-М3 х 8	1	4	шт.
<u>Прочие изделия</u>			
Подшипник MR126-2Z SKF	2	8	шт.
<u>Сборочные единицы</u>			
Ротор	1	4	шт.
<u>Детали</u>			
Ступица	1	4	шт.
Обечайка	1	4	шт.

Наименование элемента ЛА	Кол-во на изделие	Кол-во всего на ЛА	Ед. изм.
Магнит	14	56	шт.
Ось	1	4	шт.
<u>Сборочные единицы</u>			
Статор	1	4	шт.
<u>Детали</u>			
Сердечник	1	4	шт.
Корзина	1	4	шт.
Обмотка	1	4	шт.
<u>Материалы</u>			
Проволока медная 0,6 мм	1,4	5,6	м
Провод 18AWG	0,6	2,4	м
Термоусадка 3 мм	0,07	0,28	м
Термоусадка 20 мм	0,02	0,08	м
<u>Установка электродвигателей и воздушных винтов</u>			
<u>Детали</u>			
Воздушный винт 9x5x3 (правый)	2	2	шт.
Воздушный винт 9x5x3 (левый)	2	2	шт.
<u>Стандартные изделия</u>			
Винт с потайной головкой ISO 7380-1-M3 x 10	16	16	шт.
Гайка M5 ISO 7043	4	4	шт.
<u>Оборудование и авионика</u>			
<u>Прочие изделия</u>			
АКБ HRB Lipo 6S 6Aч	1	1	шт.
Камера CADXX FPV Ratel 2 2.1мм	1	1	шт.
Видеопередатчик AMPF 1200	1	1	шт.
Антенна видеопередатчика (всенаправленная, 5 Дцб)	1	1	шт.
Стабилизатор напряжения L7812CV	1	1	шт.
Драйвер	1	1	шт.
Полетный контроллер F4	1	1	шт.
Резиновая втулка D=6мм (внутр. D-3мм)	4	4	шт.
Ремешок для крепления АКБ (20x200мм)	1	1	шт.
Передатчик TBS	1	1	шт.
Барометр (микросхема)	1	1	шт.
<u>Стандартные изделия</u>			
Гайка M3 DIN 934 (пластиковая)	4	4	шт.
Гайка M3 DIN 985	1	1	шт.
<u>Жгуты</u>			
<u>Материалы</u>			
Припой ПОС-61, 1мм	0,05	0,05	кг.

Наименование элемента ЛА	Кол-во на изделие	Кол-во всего на ЛА	Ед. изм.
Флюс для пайки СК	0,065	0,065	кг.
Тканевая изолента (ширина 15 мм)	2	2	м
<u>Жгут АКБ</u>	1	2	шт.
<u>Провода</u>			
12AWG	0,15	0,15	м
<u>Разъёмы и прочие изделия</u>			
Разъём XT60 Female	1	1	м
<u>Жгут луч</u>	1	4	шт.
<u>Провода</u>			
24AWG	0,2	0,8	м

Расчётный анализ пропускной способности обеспечивающих участков – участков поставщиков деталей и компонентов приведен в таблице 1.2.

Таблица 1.2 – Расчётный анализ пропускной способности обеспечивающих участков

№ п/п	Наименование участка	Пропускная способность, ед. в год	Примечание
1.	Участок механической обработки	276000	Кол-во смен – 2. Кол-во часов в смене – 12 часов
2.	Линия производства комплектующих для электродвигателей	49400	Кол-во смен – 1. Кол-во часов в смене – 8 часов
3.	Участок производства воздушных винтов	3086000	Кол-во смен – 2. Кол-во часов в смене – 12 часов
4.	Участок сборки электродвигателей	1000000	Кол-во смен – 2. Кол-во часов в смене – 8 часов

2 Производственно-технологическое решение

Разработка производственно-технологических решений осуществлялась с учетом существующих системных ограничений.

Системное ограничение – ключевой фактор, влияющий на целевые значения производственных показателей и реализованные производственно-технологические решения.

Системные ограничения приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Системные ограничения, учитываемые при разработке производственно-технологических решений

№ п/п	Группа ограничений	Описание ограничения
1	Организационные	1.1 Временные ограничения по отработке всех возможных производственных операций (транспортировка, укладка деталей, завинчивание винтов, укладка плат и др.). Длительность реализации проекта по отработке роботизированных операций составила 5 месяцев. Фокус проекта на роботизацию повторяемых и ответственных технологических операций: - укладка и позиционирование деталей рамы; - завинчивание винтов
		1.2 Отсутствие в сборочных участках технологических и вспомогательных процессов на рассматриваемом производственном участке роботизированных операций
		1.3 Ограниченное время на закупку, поставку, пуско-наладку роботизированных комплексов
2	Проектно-конструкторские	2.1 Ограничение по изменению конструкции: - затруднен отказ от операции пайка; - нецелесообразно из-за организованного производства корпусных деталей изменение в конструкции корпусных деталей
3	Производственно-технологические	3.1 Существующие производственные мощности по изготовлению комплектующих (двигатели, винты, детали корпуса) должны быть сбалансированы с участком сборки
		3.2 Целесообразность роботизации технологических и вспомогательных операций
4	Экономические	4.1 Экономическая эффективность при внедрении роботизированных комплексов

Описание производственно-технологических решений:

1. Участок сборки организован по принципу поточно-постового производства, обеспечивающего высокую производительность труда с минимальными запасами незавершенного производства.

2. Поставщиками участка сборки являются:

- участок механической обработки;
- линия производства комплектующих для электродвигателей;
- линия производства электродвигателей;
- участок производства воздушных винтов;
- участок производства печатных плат.

3. Границами производственного процесса роботизированной сборки FPV-дрона являются: комплектование магазинов и тары деталями и электронными компонентами,

подборка лучей и двигателей, частичная сборка рамы, установка электронных компонентов, окончательная сборка рамы, проверка и прошивка, транспортировка на участок испытания.

4. Контроль качества сборочных роботизированных и ручных операций выполняется производственным персоналом участка при выполнении технологических операций. Каждый собранный FPV-дрон проходит летные испытания.

5. Прослеживаемость обеспечивается через сменно-суточные задания, в которых отражаются фактические данные по объему произведенной продукции.

6. Фокус проекта:

- Организация производственного участка – демонстратора возможностей роботизации процессов сборки дрона.

- Повышение производительность труда при сборке дрона существующей конструкции.

- Отработка технологических решений по автоматизации и роботизации.

Особенности поточно-постового производства приведены в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Особенности поточно-постового производства

№ п/п	Особенность	Описание
1	Признаки поточно-постового производства	<ul style="list-style-type: none"> - расположение рабочих мест в соответствии с процессом и временем; - ритмичное выполнение производственных операций; - согласованность и одновременность выполнения операций; - высокая степень непрерывности производственного процесса; - параллельность осуществления операций технологического процесса
2	Преимущества поточного производства	<ul style="list-style-type: none"> - повышение производительности труда; - сокращение длительности производственного цикла; - уменьшение заделов незавершённого производства; - повышение качества изделий; - специализация выполнения технологических операций на рабочих местах; - снижение себестоимости изделий
3	Недостатки поточного производства	<ul style="list-style-type: none"> - узкая номенклатура выпускаемых изделий; - необходимость переналадки поточной линии для внесения модификаций; - окупаемость при высоких объёмах выпуска

Основные требования, предъявляемые к участку сборки:

- применение стандартизированных компонентов при проектировании сборочной линии;
- возможность быстрой переналадки под новой тип выпускаемой конструкции;

- осуществление быстрых пуско-наладочных работ;
- возможность балансировки ручного труда и производительности робототехнических комплексов;
- соответствие текущим технологиям.

Расчет целевых показателей проектируемого участка сборки проводился с учетом пропускной способности участка механической обработки и участка сборки двигателей. Пропускная способность участка механической обработки – 276000 комплектов в год. Пропускная способность участка сборки двигателей – 250000 комплектов в год (4 эл. двигателя в комплекте).

Целевые производственные показатели участка сборки приведены в таблице 2.3.

Таблица 2.3 – Целевые производственные показатели

№ п/п	Показатель	Целевое значение	Комментарий
1	Годовой объем производства	37000 ед.	При штате 9 человек на участке (8-часовая смена)
2	Объем производства в смену	150 ед.	При штате 9 человек на участке (8-часовая смена)
3	Объем производства в час	18 ед.	Объем производства в смену разделен на 8 часов
4	Производительность труда/выработка на 1 рабочего	16 ед.	Объем производства за смену поделен на количество рабочих на участке
5	Такт производства	1 ед. каждые 3 мин	
6	Тип производства	Поточно-постовая сборка	Компоненты и полуфабрикаты перемещаются последовательно по рабочим местам, выстроенным в виде потока
7	Численность рабочих на производственном участке	9 человек в смену	8 человек на рабочих местах, выполняющих технологические операции, 1 человек на вспомогательной (комплекточной) операции
8	Количество смен	1 смена	
9	Уровень гибкости (возможность выпуска разных моделей)	Возможность выпускать разные комплексации	
10	Охват технологических операций роботизацией	1) Транспортировка. 2) Укладка деталей	Рациональный охват повторяемых

№ п/п	Показатель	Целевое значение	Комментарий
		корпуса. 3) Завинчивание винтов	технологических операций
11	Площадь участка	144 м ²	Длина участка – 18 м Ширина участка – 8 м
12	Количество технологических операций в производственном процессе (без учета вспомогательных)	8	-
13	Время производственного цикла (без учета ожиданий) / Цикловое время	24 мин	Суммарное время цикла всех технологических операций
14	Время такта, мин	3 мин	Операция с максимальным временем цикла
15	Объем НЗП	50 комплектов	Суммарное количество подсортированных комплексов после 1 тех. операции
16	Уровень дефектности	5 %	Уровень дефектности обеспечивается за счет: - установления требований к поставляемым компонентам; - самоконтролю выполнения технологических операций; - видеорегистрации выполнения технологических операций

Анализ расчётных производственных показателей проектируемого участка сборки FPV-дронов приведен в таблице 2.4.

Таблица 2.4 – Сравнительный анализ расчётных производственных показателей

№ п/п	Показатель	Создаваемый участок роботизированной сборки
1.	Годовой объем производства	37000 ед.
2.	Объем производства в смену	150 ед.
3.	Объем производства в час	18 ед.
4.	Производительность труда/ выработка на 1 рабочего	16 ед.
5	Такт производства	1 ед. каждые 3 мин
6.	Тип производства	Поточно-постовая сборка

№ п/п	Показатель	Создаваемый участок роботизированной сборки
7.	Численность рабочих на производственном участке	9 человек в смену
8.	Количество смен	1 смена
9.	Уровень гибкости (возможность выпуска разных моделей)	Возможность выпускать разные комплексации
10.	Охват технологических операций роботизацией	1) Транспортировка. 2) Укладка деталей корпуса. 3) Завинчивание винтов
11.	Площадь участка	144 м ²
12.	Количество технологических операций в производственном процесса (без учета вспомогательных)	8
13.	Время производственного цикла (без учета ожиданий) / Цикловое время	24 мин.
14.	Время такта, мин	3 мин.
15.	Объем НЗП	50 комплектов
16.	Уровень дефектности	5 %

3 Требования к конструкции FPV-дрона, адаптированного под возможности роботизированной сборки

На основании представленной документации FPV-дрона (рисунок 3.1) сформирован ряд технических предложений, который позволяет увеличить уровень автоматизации сборочных операций.

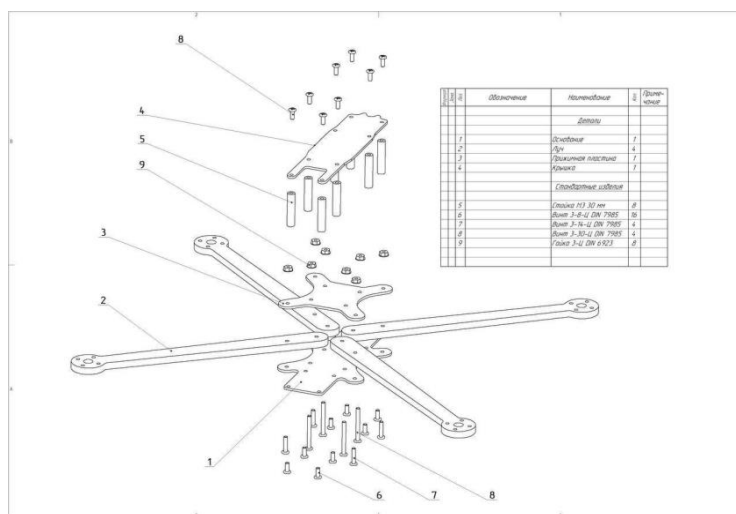


Рисунок 3.1 – Схема членения рамы FPV-дрона

Технические предложения представлены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Технические предложения изменения конструкции

№ п/п	Текущее состояние	Планируемое состояние	Обоснование
1	2	3	4
1	Использование винтов под крестовую отвёртку	Использование винтов под шестигранник	Увеличенная площадь зацепления при фиксации крепёжных элементов
2	Используется три типоразмера крепёжных элементов, длиной 8, 14 и 30 мм	Оставить два типоразмера крепёжных элементов, длиной 8 и 30 мм	Применение роботизированной отвёртки с автоматической подачей винтов
3	Использование для фиксации проводов термоусадки	Использование клейкой термоусадочной ленты	Выполнения процесса с применением технологического оснащения
4	Пайка проводов на регуляторе оборотов и полётном контроллере	Применение разъёмов для соединения электронных компонентов	Уменьшение времени, затрачиваемого на операции пайки
5	Использование круглых стоек	Использование шестигранных стоек	Исключение проворота при базировании в технологическом оснащении
6	Двигатели имеют провода длиной около 200 мм	Выполнять подготовительные операции по формированию петли для пайки к регулятору оборотов	Уменьшение времени, затрачиваемого на подготовку к пайке

4 Требование к технологии и технологическому оснащению участка сборки

Описание технологического процесса роботизированной сборки FPV-дрона текущей конструкции приведено в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Описание технологического процесса

№ опер	Наименование РМ, операции и содержание переходов	Оборудование и приспособление	Технологическая оснастка
015	Комплектование магазинов с деталями рамы <i>Транспортировочные</i> 1. Доставить со склада коробку с пластинами, коробку с основаниями,		1. Тележка для транспортировки коробок, контейнеров и магазинов

№ опер	Наименование РМ, операции и содержание переходов	Оборудование и приспособление	Технологическая оснастка
	<p>коробку с площадками, коробку с кронштейнами антенн, контейнер с гайками, контейнер с винтами, контейнер со втулками на стеллаж.</p> <p><i>Сборочные</i></p> <ol style="list-style-type: none"> 2. Взять со стеллажа коробку с основаниями, перенести на стол. 3. Взять со стеллажа магазины под основания, перенести на стол. 4. Укомплектовать магазины основаниями. 5. Поставить магазины с основаниями на тележку для транспортировки магазинов. 6. Взять со стеллажа коробку с площадками, перенести на стол. 7. Взять со стеллажа магазины под площадки, перенести на стол. 8. Укомплектовать магазины площадками. 9. Поставить магазины с площадками на тележку для транспортировки магазинов. 10. Взять со стеллажа коробку с кронштейнами антенн, перенести на стол. 11. Взять со стеллажа магазины под кронштейнами антенн, перенести на стол. 12. Укомплектовать магазины кронштейнами антенн. 13. Поставить магазины с кронштейнами антенн на тележку для транспортировки магазинов. 14. Взять со стеллажа коробку с пластинами, перенести на стол. 15. Взять со стеллажа магазины под пластины, перенести на стол. 16. Укомплектовать магазины пластинами. 17. Поставить магазины с пластинами на тележку для транспортировки магазинов. 18. Взять контейнер с винтами, контейнер с гайками, контейнер со втулками, поставить на тележку для транспортировки магазинов. <p><i>Транспортировочные</i></p> <ol style="list-style-type: none"> 19. Доставить винты на двигатель на ВРМ 		

№ опер	Наименование РМ, операции и содержание переходов	Оборудование и приспособление	Технологическая оснастка
	<p>2, переместить в бункер для винтов.</p> <p>20. Доставить гайки на РМ 1, переместить в бункер для гаек.</p> <p>21. Доставить магазины с основаниями и магазины с площадками на РМ 2, установить на стеллажи.</p> <p>22. Доставить винты М3-30 на РМ 3, заполнить бункер робота.</p> <p>23. Доставить магазины с кронштейнами антенн на РМ 4, установить на стеллаж.</p> <p>24. Доставить втулки на РМ 4, переместить в тару для втулок.</p> <p>25. Доставить винты М3-8 на РМ 4, переместить в бункер для винтов.</p> <p>26. Доставить магазины с пластинами на РМ 7, установить на стеллаж.</p> <p>27. Доставить винты М3-8 на РМ 7, переместить в бункер для винтов.</p> <p>28. Отправиться на склад</p>		
025	<p>Подбор лучей и двигателей</p> <p><i>Транспортировочные</i></p> <p>1. Доставить со склада коробку с лучами и коробку с двигателями на ВРМ 2.</p> <p>2. Переместить лучи в ящик на рабочем столе.</p> <p>3. Переместить двигатели в ящик на рабочем столе.</p> <p><i>Сборочные</i></p> <p>4. Взять со стеллажа магазины, перенести на стол.</p> <p>5. Установить магазин в стапель.</p> <p>6. Установить двигатели в магазин.</p> <p>7. Установить лучи в магазин.</p> <p>8. Установить винты из бункера, произвести завинчивание.</p> <p>9. Осуществить визуальный контроль качества.</p> <p>10. Поставить магазины на роботизированную тележку для транспортировки магазинов.</p> <p><i>1. Транспортировочные</i></p> <p>11. Накопить 16 магазинов, подать сигнал роботизированной тележке о начале работы.</p> <p><i>Роботизированная тележка</i></p> <p>12. Получить сигнал оператора о начале работы.</p> <p>12. Доставить магазины на РМ 2.</p>	<p>1. Электрическая отвертка.</p> <p>2. Роботизированная тележка для перемещения магазинов.</p> <p>3. Машинное зрение</p>	<p>1. Стапель.</p> <p>2. Тележка для транспортировки коробок</p>

№ опер	Наименование РМ, операции и содержание переходов	Оборудование и приспособление	Технологическая оснастка
085	<p>Комплектование магазинов с электронными компонентами <i>Транспортировочные</i></p> <p>1. Доставить со склада коробку с подборками регуляторов оборотов с проводами, втулками и конденсаторами, коробку с подборками полетных контроллеров со втулками, коробку с подборками камер с кронштейнами, коробку с подборками приемо-передающих устройств, коробку с антеннами, коробку со жгутами, контейнер с термоусадочной лентой, контейнер с гайками на стеллаж для комплекующих.</p> <p><i>Сборочные</i></p> <p>2. Взять со стеллажа коробку с подборками регуляторов оборотов с проводами, втулками и конденсаторами, перенести на стол.</p> <p>3. Взять со стеллажа магазины под подборки регуляторов оборотов с проводами, втулками и конденсаторами, перенести на стол.</p> <p>4. Укомплектовать магазины подборками регуляторов оборотов с проводами, втулками и конденсаторами.</p> <p>5. Поставить магазины с подборками регуляторов оборотов с проводами, втулками и конденсаторами на тележку для транспортировки магазинов.</p> <p>6. Взять со стеллажа коробку с подборками полетных контроллеров со втулками, перенести на стол.</p> <p>7. Взять со стеллажа магазины под подборки полетных контроллеров со втулками, перенести на стол.</p> <p>8. Укомплектовать магазины подборками полетных контроллеров со втулками.</p> <p>9. Поставить магазины с подборками полетных контроллеров со втулками на тележку для транспортировки магазинов.</p> <p>10. Взять со стеллажа коробку с подборками камер с кронштейнами,</p>		1. Тележка для транспортировки коробок, контейнеров и магазинов

№ опер	Наименование РМ, операции и содержание переходов	Оборудование и приспособление	Технологическая оснастка
	<p>стеллажи.</p> <p>29. Доставить гайки на РМ 5, переместить в бункер для гаек.</p> <p>28. Доставить контейнер с термоусадочной лентой на РМ 5, переместить в тару для термоусадочной ленты.</p> <p>29. Доставить магазины с подборками камер с кронштейнами, магазины с подборками приемо-передающих устройств, магазины с антеннами на РМ 6, установить на стеллажи.</p> <p>30. Отправиться на склад</p>		
035	<p>Постановка гаек <i>Сборочные</i></p> <p>1. Установить гайки из бункера в стапель.</p> <p>2. Осуществить визуальный контроль качества.</p> <p><i>Транспортировочные</i></p> <p>3. Переместить стапель-спутник на РМ 2.</p>		<p>1. Стапель-спутник.</p> <p>2. Оснастка для быстрой установки гаек</p>
050	<p>Частичная сборка рамы (установка деталей и узлов в стапель) <i>Сборочные</i> <i>Оператор</i></p> <p>1. Взять со стеллажа магазины с основаниями, перенести на стол.</p> <p>2. Взять со стеллажа магазины с подборками лучей и двигателей, перенести на стол.</p> <p>3. Взять со стеллажа магазины с площадками, перенести на стол.</p> <p>4. Подать сигнал РТК о начале работы.</p> <p><i>Робот</i></p> <p>5. Получить сигнал оператора о начале работы.</p> <p>6. Переместиться к магазину с основаниями и извлечь одно основание из магазина.</p> <p>7. Запозиционироваться и установить основание на стапель-спутник.</p> <p>8. Переместиться к магазину с подборками лучей и двигателей.</p> <p>9. Запозиционироваться и последовательно установить четыре луча с двигателями.</p> <p>10. Переместиться к магазину с площадками.</p> <p>11. Запозиционироваться и установить площадку.</p> <p>12. Возвратиться в исходное положение.</p>	<p>1. Коллаборативный робот CR5</p>	<p>1. Стапель-спутник.</p> <p>2. Оснастка для робота (присоска)</p>

№ опер	Наименование РМ, операции и содержание переходов	Оборудование и приспособление	Технологическая оснастка
	<p>13. Подать сигнал оператору о завершении операции. <i>Оператор</i></p> <p>14. Получить сигнал РТК о завершении работы.</p> <p>15. Осуществить визуальный контроль качества сборки. <i>Транспортировочные</i></p> <p>16. Переместить стапель-спутник на РМ 3</p>		
065	<p>Завинчивание винтов <i>Сборочные</i> <i>Оператор</i></p> <p>1. Подать сигнал РТК о начале работы. <i>Робот</i></p> <p>2. Получить сигнал оператора о начале работы.</p> <p>3. Переместиться к положению крепежным элементом.</p> <p>4. Запозиционироваться над первым крепежным элементом, активировать инструмент-отвертку.</p> <p>5. Последовательно выполнить закручивание с заданным моментом всех винтов.</p> <p>6. Возвратиться в исходное положение.</p> <p>7. Подать сигнал оператору о завершении операции. <i>Оператор</i></p> <p>8. Получить сигнал РТК о завершении работы.</p> <p>9. Осуществить визуальный контроль качества.</p> <p>10. Достать подсорку из стапель-спутника и переместить в стопку для накопления.</p> <p>11. Поставить стапель-спутник на тележку для транспортировки. <i>Транспортировочные</i></p> <p>12. Накопить 10 ед. подборок и передать на РМ 4.</p> <p>13. Накопить 10 шт. стапель-спутников и переместить на РМ 1</p>	1. Коллаборативный робот CR5	<p>1. Стапель-спутник.</p> <p>2. Тележка для хранения и транспортировки стапелей-спутников</p>
080	<p>Сборка рамы <i>Сборочные</i></p> <p>1. Взять со стеллажа магазины с кронштейнами антенн, перенести на стол.</p> <p>2. Установить втулки из тары в стапель стационарный.</p> <p>3. Получить подсорки с РМ 3.</p> <p>4. Разместить подсорку в стапеле</p>	1. Электрическая отвертка	1. Стапель стационарный

№ опер	Наименование РМ, операции и содержание переходов	Оборудование и приспособление	Технологическая оснастка
	<p>стационарном.</p> <p>5. Установить винты из бункера во втулки, выполнить завинчивание.</p> <p>6. Установить кронштейн антенны в стапель стационарный.</p> <p>7. Выполнить завинчивание винтов кронштейна на луче.</p> <p>8. Достать подборку из стапеля стационарного и переместить в стопку для накопления.</p> <p><i>Транспортировочные</i></p> <p>9. Накопить 10 ед. подборок и передать на РМ 5</p>		
100	<p>Сборка и пайка</p> <p><i>Сборочные</i></p> <p>1. Взять со стеллажа магазины с подборкой регуляторов оборотов с проводами, втулками и конденсаторами, перенести на стол.</p> <p>2. Взять со стеллажа магазины с подборкой полетных контроллеров со втулками, перенести на стол.</p> <p>3. Взять со стеллажа магазины со жгутами, перенести на стол.</p> <p>4. Получить подборки с РМ 4.</p> <p>5. Разместить подборку на рабочей зоне.</p> <p>6. Установить подборку регулятора оборотов с проводами, втулками и конденсаторами на втулки рамы.</p> <p>7. Обрезать провода двигателя, выполнить пайку проводов двигателей к плате.</p> <p>8. Установить на раму подборку полётного контроллера с проводами, втулками и конденсаторами.</p> <p>9. Установить жгут, соединяющий регулятор оборотов и полётный контроллер.</p> <p>10. Установить гайки из бункера.</p> <p>11. Выполнить фиксацию проводов двигателя с лучами с помощью термоусадочной ленты.</p> <p>12. Переместить подборку в стопку.</p> <p><i>Транспортировочные</i></p> <p>13. Накопить 10 ед. подборок и передать на РМ 6</p>	1. Паяльная станция	
115	<p>Сборка и пайка электронных компонентов</p> <p><i>Сборочные</i></p> <p>1. Взять со стеллажа магазины с</p>	1. Паяльная станция	

№ опер	Наименование РМ, операции и содержание переходов	Оборудование и приспособление	Технологическая оснастка
	<p>антеннами, перенести на стол.</p> <p>2. Взять со стеллажа магазины с подборками камер с кронштейнами, перенести на стол.</p> <p>3. Взять со стеллажа магазины с подборками приемо-передающих устройств, перенести на стол.</p> <p>4. Получить подборки с РМ 5.</p> <p>5. Разместить подборку на рабочей зоне.</p> <p>6. Установить на втулки подборку камеры с кронштейном.</p> <p>7. Установить на втулки приемо-передающее устройство с кронштейном.</p> <p>8. Выполнить пайку проводов камеры и приемо-передающего устройства с полётным контроллером.</p> <p>9. Установить антенну на кронштейн антенны, зафиксировать стяжками провод антенны к лучу.</p> <p>10. Выполнить пайку проводов антенны с полётным контроллером.</p> <p>11. Выполнить очистку поверхности полетного контроллера.</p> <p>12. Осуществить визуальный контроль качества.</p> <p>13. Переместить подборку в стопку.</p> <p><i>Транспортировочные</i></p> <p>14. Накопить 10 ед. подборок и передать на РМ 7</p>		
130	<p>Проверка и сборка рамы</p> <p><i>Сборочные</i></p> <p><i>Оператор</i></p> <p>1. Взять со стеллажа магазины с пластинами, перенести на стол.</p> <p>2. Получить подборки с РМ 6.</p> <p>3. Разместить подборку на стапеле стационарном.</p> <p>4. Извлечь пластину из магазина, запозиционировать её в стапеле стационарном.</p> <p>5. Подать сигнал РТК о начале работы.</p> <p><i>Робот</i></p> <p>6. Получить сигнал оператора о начале работы.</p> <p>7. Переместиться к положению крепежным элементом.</p> <p>8. Запозиционироваться над первым крепежным элементом, активировать инструмент-отвертку.</p>	1. Коллаборативный робот CR5	

№ опер	Наименование РМ, операции и содержание переходов	Оборудование и приспособление	Технологическая оснастка
	9. Выполнить закручивание с заданным моментом всех винтов. 10. Возвратиться в исходное положение. 11. Подать сигнал оператору о завершении операции. <i>Оператор</i> 12. Получить сигнал РТК о завершении работы. 13. Осуществить визуальный контроль качества. 14. Переместить сборку из стапеля стационарного в стопку. <i>Транспортировочные</i> 15. Накопить 10 ед. подборок и передать на РМ 8		
140	Прошивка 1. Получить сборку с РМ 7. 2. Разместить подборку на рабочей зоне. 3. Выполнить подключение сборки к стационарному аккумулятору. 4. Выполнить подключение сборки к компьютеру, произвести прошивку полётного контроллера. 5. Произвести запуск двигателей. 6. Выполнить проверку работоспособности дрона. 7. Отключить сборку от компьютера. 8. Переместить сборку в стопку. <i>Транспортировочные</i> 9. Накопить 10 ед. сборок и передать на ЛИК.	1. Орг. техника 2. ПО	

В рамках отработки технологических процессов будут разрабатываться разные виды технологической документации, приведённые в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Виды технологической документации, разрабатываемой при отработке технологии

№ п/п	Виды технологической документации	Описание
1	Диаграмма потока процесса	Документ описывает последовательность технологических и вспомогательных операций, контролируемые параметры продукции и процесса
2	Маршрутно-операционные карты	Документ описывает последовательность технологических и вспомогательных операций, используемое технологическое

№ п/п	Виды технологической документации	Описание
		оснащение, технологические режимы, требования по охране труда и техники безопасности
3	Технологические планировки производственных участков/ рабочих мест	Документ описывает расстановку технологического оснащения на рабочих местах производственного участка
4	Перечень технологического оснащения	Документ описывает перечень технологического оснащения

Для выполнения сборочных операций с помощью роботизированных комплексов необходимо применение технологической оснастки. Технологическая оснастка является неотъемлемой частью роботизированной сборки, обеспечивающей:

- надёжное базирование и фиксацию деталей;
- точное позиционирование компонентов;
- возможность быстрой переналадки оборудования;
- компенсацию погрешностей сборки.

Перечень оснащения, необходимого для организации производственного участка представлен в таблице 4.3.

Таблица 4.3 – Перечень оснащения на производственном участке

№ п/п	Рабочие места	Перечень оснащения
1	Вспомогательное рабочее место № 1	- стеллаж для хранения комплектующих и магазинов; - тележка для транспортировки магазинов; - сборочный стол
2	Вспомогательное рабочее место № 2	- стеллаж для хранения комплектующих; - тележка для транспортировки магазинов; - сборочный стол; - стапель; - кронштейн для системы технического зрения; - ящик с двигателями; ящик с лучами; - магазин с подборкой (луч и двигатель); - система технического зрения; - электрическая отвёртка; - бункер с винтами
3	Вспомогательное рабочее место № 3	- стеллаж для хранения комплектующих и магазинов; - тележка для транспортировки магазинов; - сборочный стол
4	Рабочее место № 1	- сборочный стол; - стапель-спутник; - приспособление для быстрой установки гаек;

№ п/п	Рабочие места	Перечень оснащения
		- бункер с гайками
5	Рабочее место № 2	<ul style="list-style-type: none"> - стеллаж для хранения комплектующих; - сборочный стол; - стапель-спутник; - магазин с основаниями; - магазин с площадками; - магазин с подборкой (луч и двигатель); - робот CR5; - электропневматическая система контроля вакуума на основе вакуумного эжектора ARW; - пневматический шкаф; - компрессор; - вакуумная присоска для робота CR5
6	Рабочее место № 3	<ul style="list-style-type: none"> - сборочный стол; - стапель-спутник; - тележка для транспортировки ступеней-спутников; - робот CR5; - отвёртка для робота с автоматической подачей винтов; - бункер с винтами
7	Рабочее место № 4	<ul style="list-style-type: none"> - стеллаж для хранения комплектующих; - сборочный стол; - стапель стационарный; - магазин с кронштейнами антенны; - электрическая отвёртка; - тара со втулками; - бункер с винтами
8	Рабочее место № 5	<ul style="list-style-type: none"> - стеллаж для хранения комплектующих; - сборочный стол; - стапель стационарный; - магазин с подборкой регулятора оборотов с силовыми проводами, втулками и конденсаторами; - магазин с подборкой полётного контроллера со втулками; - паяльная станция; - магазин со жгутами; - тара с термоусадочной лентой; - бункер с винтами
9	Рабочее место № 6	<ul style="list-style-type: none"> - стеллаж для хранения комплектующих; - сборочный стол; - стапель стационарный; - магазин с подборками камер с кронштейнами; - магазин с подборкой приёмо-передающих устройств; - паяльная станция; - магазин с антеннами; - бункер с винтами
10	Рабочее место № 7	<ul style="list-style-type: none"> - стеллаж для хранения комплектующих; - сборочный стол; - стапель стационарный; - магазин с пластинами; - электрическая отвёртка;

№ п/п	Рабочие места	Перечень оснащения
		- робот CR5; - бункер с винтами
11	Рабочее место № 8	- сборочный стол; - персональный компьютер

5 Требования к организации производственного участка

Производственный участок по роботизированной сборке FPV-дронов представляет собой восемь основных и три вспомогательных рабочих места. Перечень работ, выполняемых на рабочих местах, представлен в таблице 5.1.

В рамках организации рабочих мест на участки роботизированной сборки будут разрабатываться разные виды технологической документации, приведённые в таблице 5.2.

Таблица 5.1 – Перечень работ на производственном участке

№ п/п	Рабочие места	Перечень работ
1	2	3
1	Вспомогательное рабочее место № 1	Комплектование магазинов деталями рамы
2	Вспомогательное рабочее место № 2	Подсбор лучей и двигателей
3	Вспомогательное рабочее место № 3	Комплектование тары с электронными компонентами
4	Рабочее место № 1	Постановка гаек в ступель-спутник
5	Рабочее место № 2	Частичная сборка рамы
6	Рабочее место № 3	Завинчивание винтов
7	Рабочее место № 4	Сборка рамы
8	Рабочее место № 5	Пайка регулятора оборотов с проводами двигателя и сборка полётного контроллера
9	Рабочее место № 6	Сборка и пайка электронных компонентов
10	Рабочее место № 7	Проверка и сборка рамы
11	Рабочее место № 8	Прошивка

Таблица 5.2 – Виды технологической документации, разрабатываемой при организации рабочих мест на участке сборки

№ п/п	Виды технологической документации	Описание
1	Карта потока процесса	Документ, описывающий порядок организации производственного процесса, содержащих производственные показатели
2	Карты стандартизированной работы (КСР)	Документ описывает производственную логистику на рабочих местах с расчетом

№ п/п	Виды технологической документации	Описание
		временных параметров выполнения технологических и вспомогательных операций
3	Имитационная модель	Электронный документ, описывающий динамическую модель выполнения технологических и вспомогательных операций

6 Оценка рисков

Цель раздела заранее выявить потенциальные угрозы и негативные события (риски), которые могут помешать достижению целей проекта, и определить меры по их минимизации.

Оценка риска проводится через расчет произведения вероятности возникновения риска (негативного события) и значимости на ход проекта и результаты проекта.

Шкала вероятности возникновения риска приведена в таблице 6.1.

Таблица 6.1 – Шкала вероятности возникновения риска

Уровень	Описание	Ранг
Низкий (Н)	Риск маловероятен. Шанс реализации менее 30%	1
Средний (С)	Риск может произойти. Шанс реализации между 30% и 60%	2
Высокий (В)	Риск, скорее всего, произойдет. Шанс реализации более 60%	3

Шкала значимости влияния риска на проект и его результаты приведен в таблице 6.2

Таблица 6.2 – Шкала значимости влияния риска

Уровень	Описание	Ранг
Низкий (Н)	Незначительные последствия. Небольшое увеличение бюджета/сроков. Не влияет на ключевые цели	1
Средний (С)	Заметные последствия. Существенное увеличение бюджета/сроков. Требуется корректировок в плане	2
Высокий (В)	Критические последствия. Срыв сроков, серьезное превышение бюджета, отказ от ключевых функций или полный провал проекта	3

Перечень рисков приведен в таблице 6.3.

Таблица 6.3 – Перечень рисков

Группа	Риск
Технические и технологические риски	Недостаточная точность роботизированных комплексов. Риск того, что роботы не смогут работать с мелкими и хрупкими компонентами дрона (например, при пайке платы, установке коннекторов)
	Низкая надежность оборудования. Сбои в работе роботов, конвейеров или систем зрения, приводящие к простоем всей линии
	Сложность интеграции. Проблемы с совместимостью нового роботизированного оборудования с существующими системами (SCADA, ERP, MES)
	Некорректная работа системы технического зрения. Ошибки в распознавании компонентов, их позиции и ориентации, что приводит к браку или повреждениям
Операционные и производственные риски	Падение производительности на этапе внедрения. Снижение выпуска продукции во время отладки, обучения персонала и запуска линии
	Рост процента брака. Автоматика может стабильно и быстро производить брак, если процесс настроен неидеально. Обнаружение таких дефектов может потребовать дополнительных ресурсов
	Недостаточная гибкость линии. Риск, что линия не сможет быстро перенастраиваться под новые модели FPV-дронов или кастомные сборки, что критично для ниши
	Зависимость от одного поставщика комплектующих. Риск использовать специализированные компоненты (например, конкретные роботы-манипуляторы), которые сложно заменить аналогами
Риски, связанные с персоналом	Сопrotивление персонала. Недовольство и саботаж со стороны сотрудников, которые боятся потерять рабочие места из-за автоматизации
	Дефицит квалифицированных кадров. Отсутствие в команде или на рынке труда инженеров-робототехников, техников и программистов, способных обслуживать и настраивать сложную линию
	Риски знаний. Зависимость от узкого круга специалистов, уход которых может парализовать работу линии
Финансовые риски	Превышение бюджета. Рост стоимости оборудования, ПО или услуг интегратора сверх запланированного
	Недостижение экономического эффекта. Срок окупаемости инвестиций (ROI) может оказаться значительно выше расчетного из-за скрытых затрат на эксплуатацию и низкой загрузки линии
	Непредвиденные эксплуатационные расходы. Высокая стоимость запчастей, лицензий на ПО и технического обслуживания
Внешние риски	Изменение конъюнктуры рынка. Резкий рост или падение спроса на FPV-дроны, из-за которого роботизированная линия окажется недогруженной или не сможет удовлетворить спрос
	Риски цепочки поставок. Срывы поставок как самих роботов и

Группа	Риск
	компонентов для линии, так и комплектующих для дронов, останавливающие производство
	Правовые и нормативные риски. Изменение требований к производству или сертификации электронной продукции

7 Технико-экономическое обоснование

При проведении технико-экономического обоснования проекта по внедрению роботизированных комплексов учитывались следующие аспекты:

- Создание участка роботизированной сборки позволит увеличить производительность в 3 раза (с 50 ед. в смену до 150).

- Прирост выпуска в месяц: $(150 - 50) \times 22 \text{ дн.} = 2\,200 \text{ ед./мес.}$

- Дополнительная прибыль (при марже 2000 руб./ед.): $2200 \times 2000 = 4\,400\,000 \text{ руб./мес.}$

- Годовая дополнительная прибыль: $4\,400\,000 \times 12 = 52\,800\,000 \text{ руб.}$

- Применение роботизированных операций позволит повысить стабильность качества выпускаемой продукции и снизить дефектность и дополнительную трудоемкость на доработку продукции.

- Стоимость закупки компонентов для внедрения роботизированных комплексов составляет 9839000 руб.

- Стоимость проекта по отработке технологии роботизированной сборки составила 18000000 руб.

- Годовые затраты на текущее функционирование роботизированных комплексов составят примерно 2000000 руб.

- Годовой экономический эффект проекта составит – 22961000 руб.

- Коэффициент экономической эффективности проекта

$52\,800\,000 \text{ руб.} / 29\,839\,000 \text{ руб.} = 1,7.$

- Срок окупаемости – 6 месяцев.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Данное техническое предложение определяет технические требования, количественные и качественные показатели для создания участка роботизированной сборки FPV-дронов.

В данном ТП отражены анализ исходных данных, описание производственно-технологического решения, требования к повышению технологичности конструкции,

требования к технологии и технологическому оснащению, требования к организации сборочного участка.

В данном ТП приведен раздел анализа рисков реализации проекта, а также проведено технико-экономическое обоснование внедрения технологии роботизированного производства.

Перечень технической документации, необходимой для организации участка роботизированной сборки FPV-дронов текущей конструкции

№ п/п	Вид документа	Техническая документация
1	Конструкторская документация на средства технологического оснащения	Отчет по анализу технологичности конструкции под возможность роботизированной сборки
		КД (Чертежи и спецификации) на технологическое оснащение для сборки FPV-дрона текущей конструкции pdf формат + компас
		КД (Чертежи и спецификации) на технологическое оснащение для сборки FPV-дрона новой конструкции
2	Технологическая документация на сборку текущей конструкции с элементами роботизации	001.0002. Описание технологии сборки БПЛА текущей конструкции
		001.0008. ДПП Сборка FPV-дрона текущей конструкции
		001.0010. Перечень технологического оснащения
		001.0013. Описание планировки производственного участка
		Технологические планировки рабочих мест: ТО 01.00.00.000 ТО 02.00.00.000 ТО 03.00.00.000 ТО 04.00.00.000 ТО 05.00.00.000 ТО 06.00.00.000 ТО 07.00.00.000 ТО 08.00.00.000 ТО 09.00.00.000 ТО 10.00.00.000 ТО 11.00.00.000
		001.0009. Маршрутно-операционная карта текущей конструкции
		001.0001. КПП «Сборка FPV-дрона текущей конструкции»
3	Документация по организации участка сборки	001.0003. КСР Карты стандартизированной работы на рабочих местах участка сборки
		001.0001 Имитационная модель «Сборка FPV-дрона текущей конструкции»
4	Имитационная модель спроектированной роботизированной линии	001.0020 Описание имитационной модели «Сборка FPV-дрона текущей конструкции»
		003.0005 Имитационная модель «Сборка FPV-дрона новой конструкции»

Справка о внедрении

СПРАВКА

о внедрении результатов диссертационной работы
Голубцова Николая Сергеевича

Настоящей справкой подтверждается, что результаты диссертационной работы Голубцова Николая Сергеевича на тему «Разработка инструментария организации роботизированного сборочного производства машиностроительного предприятия» будут внедрены в производственную деятельность ООО «ЧЗСА».

В рамках внедрения результатов диссертационного исследования были апробированы методика оценочного аудита производственных процессов для выявления потенциала автоматизации и роботизации, структурно-функциональная модель интеллектуальной роботизированной производственной ячейки, а также методика организационного развития производственной системы для повышения эффективности автоматизации и роботизации производственных процессов.

Применение данных решений позволит обеспечить повышение производительности производственных процессов изготовления вилочных погрузчиков за счет применения технологий серийного роботизированного производства.

Практический эффект от внедрения выражается в:

- повышении производительности труда на производстве на 40% за счет повышения скорости выполнения технологических операций;
- снижении трудоёмкости выполнения технологических операций за счет автоматизации и роботизации производственных процессов на 50%.

Разработанные и реализованные технические решения обеспечивают эффективное внедрение различных подходов автоматизации и роботизации производственных процессов с учетом рисков появления потенциальных несоответствий при внедрении и функционировании интеллектуальной производственной ячейки. Общий полученный экономический эффект составит 7 млн. руб.

Справка не является финансовым документом.

Генеральный директор



А.В. Дмитриев

Справкао внедрении



ООО «Авиатор»

ИНН 2130199782, КПП 213001001, ОГРН 1182130003967
Юр. адрес: 429965, Россия, Чувашская Республика,
г. Новочебоксарск, ул. Промышленная, 69

Сайт: aviamaf.ru
Почта: info@aviamaf.ru
Телефон: (8352) 37-22-67

СПРАВКА

о внедрении результатов диссертационной работы
Голубцова Николая Сергеевича

Настоящей справкой подтверждается, что результаты диссертационной работы Голубцова Николая Сергеевича на тему «Разработка инструментария организации роботизированного сборочного производства машиностроительного предприятия» будут внедрены в производственную деятельность ООО «Авиатор».

В рамках внедрения диссертационных результатов были апробированы: методика оценочного аудита процессов (для выявления потенциала автоматизации и роботизации), структурно-функциональная модель интеллектуальной роботизированной ячейки и методика организационного развития производственной системы, повышающая эффективность автоматизации и роботизации.

Применение указанных решений способствует повышению производительности производственных процессов изготовления детского игрового и спортивного оборудования за счет использования технологий серийной роботизации.

Практический эффект от внедрения выражается в:

- рост производительности труда на производстве более чем на 40% благодаря увеличению скорости выполнения технологических операций;
- сокращение трудоёмкости технологических операций более чем на 50% за счёт автоматизации и роботизации производственных процессов.

Разработанные и реализованные технические решения способствуют эффективному внедрению различных подходов к автоматизации и роботизации производственных процессов, а также позволяют учесть риски возникновения потенциальных несоответствий в процессе внедрения и функционирования интеллектуальной производственной ячейки. Общий полученный экономический эффект составит 5 млн. руб.

Справка не является финансовым документом.


Генеральный директор ООО «Авиатор»



М.Е. Григорьев

Справка о внедрении

УТВЕРЖДАЮ

Директор института авиационной и
ракетно-космической техники Гкаченко И.С.

« 10 » 06 2026 г.

СПРАВКА

о внедрении (использовании) результатов диссертационного исследования
в учебный процесс

Результаты диссертационного исследования на тему «Разработка инструментария организации роботизированного сборочного производства машиностроительного предприятия» Голубцова Николая Сергеевича в виде:

- Методика оценочного аудита потенциала автоматизации и роботизации производственных процессов;

- Математическая модель оценки потенциала автоматизации и роботизации.

- Классификация рисков появления потенциальных несоответствий и отказов функционирования интеллектуальных производственных ячеек.

внедрены в учебный процесс кафедры производства летательных аппаратов и управления качеством в машиностроении (ПЛАиУКМ) института авиационной и ракетно-космической техники Самарского университета на основании решения кафедры (протокол № 16 от « 9 » 06 2026 г.).

Указанные результаты включены в курс «Передовые производственные технологии» образовательной программы бакалавриата по направлению 27.03.02 Управление качеством.

Заведующий кафедрой ПЛАиУКМ



/Антипов Д.В./