

ГОЛУБЦОВ НИКОЛАЙ СЕРГЕЕВИЧ

**РАЗРАБОТКА ИНСТРУМЕНТАРИЯ ОРГАНИЗАЦИИ И УПРАВЛЕНИЯ
СЕРИЙНЫМ РОБОТИЗИРОВАННЫМ ПРОИЗВОДСТВОМ
МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОЙ ПРОДУКЦИИ**

2.5.22. Управление качеством продукции. Стандартизация.
Организация производства

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова» на кафедре техносферной безопасности, метрологии и технологии материалов.

Научный руководитель:

Семенов Владислав Львович, кандидат экономических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова», кафедра техносферной безопасности, метрологии и технологии материалов, заведующий кафедрой.

Официальные оппоненты:

Айдаров Дмитрий Васильевич, доктор технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Самарский государственный технический университет», кафедра «Теоретическая и общая электротехника», профессор;

Наркевич Михаил Юрьевич, доктор технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Магнитогорский государственный технический университет имени Г.И. Носова», кафедра «Промышленное и гражданское строительство», заведующий кафедрой.

Ведущая организация:

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тульский государственный университет», г. Тула.

Защита состоится 7 октября 2026 года в 10:00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.379.05, созданного на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева», по адресу: 443086, г. Самара, Московское шоссе, 34.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева»: https://ssau.ru/storage/pages/6985/file_6a33e0db126fd0.36306031.pdf.

Автореферат разослан _____ 2026 года.

Учёный секретарь
диссертационного совета 24.2.379.05,
доктор технических наук, доцент

Я.А. Ерисов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

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. Основой организации серийного роботизированного производства является создание интеллектуальных роботизированных производственных ячеек – это производственный участок, обладающий всеми характеристиками киберфизической производственной системы, являющийся базовой структурной единицей производственного подразделения (цеха) машиностроительного производства, в котором выполняются технологические и вспомогательные операции. В его состав 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.

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 счёт 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 счёт обоснованного применения инструментария создания и функционирования серийного роботизированного производства.

Степень разработанности темы

Научно-практические направления работы задаются на основе трудов выдающихся отечественных ученых: 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. Клочкова, В.Н. Клячкина, В.Н. Козловского, П.А. Лонцих, 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. Суслова, 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 внесли ученые, как В.А. Васильев, И.Н. Омельченко, Д.В. Антипов, И.Н. Хаймович, А.И. Хаймович, Г.М. Гришанов, А.Е. Бром, И.С.Ткаченко, В.А.Звягинцев и др.

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

Целевыми показателями, характеризующими степень достижения поставленной 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.

Область исследования соответствует п. 13. Научные основы цифровых, автоматизированных комплексных систем управления производством и качеством работ на базе технических регламентов и стандартов п. 16. Моделирование и оптимизация организационных структур и производственных процессов, вспомогательных и обслуживающих производств. Экспертные системы в организации производственных процессов, п. 22. Разработка методов и средств организации производства в условиях организационно-управленческих, технологических и технических рисков, п. 25. Разработка моделей описания, методов и алгоритмов решения задач проектирования производственных систем, организации производства и принятия управленческих решений в цифровой экономике паспорта специальности 2.5.22 Управление качеством продукции. Стандартизация. Организация производства.

Объект исследования: производственные процессы роботизированного сборочного производства машиностроительной продукции.

Предмет исследования: инструментарий организации и управления роботизированного сборочного производства.

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.

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, распределенная по шести 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 четыре 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).

Теоретическая значимость работы заключается в создании научно-обоснованных подходов к повышению производительности производственных процессов, включающих в себя модели и методики развития потенциала роботизации за счет создания и функционирования интеллектуальных производственных роботизированных ячеек.

Практическая значимость заключается в разработке инструментария повышения производительности производственных процессов за счет применения технологий серийного роботизированного производства.

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.

Степень достоверности и апробация работы. Результаты диссертационного исследования нашли свое отражение в сборниках научных трудов и были доложены автором на международных и всероссийских научно-практических конференциях. Получена справка о внедрении результатов диссертационного исследования на предприятиях ООО «ЧЗСА» и ООО «Авиатор». Получены справки о внедрении результатов диссертационного исследования в учебном процессе Самарского национального исследовательского университета имени академика С.П. Королева и Чувашского государственного университета имени И.Н. Ульянова.

Публикации. Содержание диссертационной работы опубликовано в 8 работах; в том числе 6 работ опубликованы в ведущих рецензируемых журналах, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Российской Федерации.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и семи приложений. Общий объем диссертации - 241 страница, включая 40 рисунков, 67 таблиц, список литературы из 120 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования, сформулирована цель и задачи исследования, определены объект и предмет исследования, указана научная новизна положений, выдвигаемых на защиту, а также практическая ценность и достоверность полученных результатов.

В первой главе проведены анализ теоретических подходов к созданию серийного роботизированного производства в машиностроении, классификация системных ограничений, влияющих на создание и функционирование серийного машиностроительного производства, а также проведен выбор и обоснование модели матричного производства для повышения производительности производственных процессов.

Для разработки и рационального применения инструментария организации и управления серийным роботизированным производством машиностроительной продукции определены и обоснованы основные элементы и процессы структурной модели киберфизической системы, проведен анализ и разработана классификация системных ограничений – факторов, влияющих на появление «узких» мест, на производительность производственных процессов и несоответствий, и производственных проблем. Выделено шесть групп и 17 системных ограничений (таблица 1).

Таблица 1 – Классификация системных ограничений

№	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
		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	Требуются специализированные программно-аппаратные комплексы для контроля качества выполнения роботизированных операций
		Для эффективной работы роботизированных производственных участков требуется 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
		Требуется организация производственных участков для использования роботизированных транспортных систем

Во второй главе разработана методика оценочного аудита потенциала роботизации производственных процессов, предложена математическая модель оценки потенциала роботизации, а также приведен комплекс показателей технико-экономического обоснования применения инструментария роботизации производственных процессов машиностроительного предприятия.

Методика оценочного аудита, описывающая подробный порядок оценки, включая ключевые этапы и методы, представлена в таблице 2. Она содержит оригинальную последовательность и новые результаты, которые являются научной новизной для теории организации производства.

Таблица 2 – Описание методики оценочного аудита производственных процессов для выявления потенциала автоматизации и роботизации

Теоретическая база и инструментарий	Процедурная часть
- Принципы автоматизации и роботизации производственного процесса. - Классификация системных ограничений. - Целеполагание и целевые показатели автоматизированного и роботизированного производственного процесса. - РИДы и результаты НИОКР в области автоматизации и роботизации. - Научные публикации в области автоматизации и роботизации производственных процессов. - Сбор данных по производственным показателям. - Реестр системных ограничений. - Методика оценки рисков. - Картирование производственного процесса. - Имитационное моделирование производственного процесса. - Лучшие практики в отрасли в области	Этап 1. Планирование аудита. Сбор и структурирование данных. Формирование системы целей и целевых показателей автоматизированного и роботизированного производственного процесса Результаты: - План и программа аудита. - Чек-листы аудита. - Целевые показатели
	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 Результаты: - Собранные и зарегистрированные данные по критериям оценочного аудита. - Системные ограничения. - Реестр проблем. - Реестр рисков
	Этап 3. Построение карты потока производственного процесса текущего состояния. Выявление потенциальных областей для автоматизации Результаты: - Карты потока производственного процесса. - Производственные показатели
	Этап 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 Результаты: - Классификация требований и ограничений. - Карта потока создания ценностей роботизированного процесса
	Этап 5. Уточнение перечня ограничений (законодательных, ресурсных, кадровых, финансовых, организационных, технологических, технических) и требований к автоматизированному и роботизированному производственному процессу Результаты: - Перечень требований к роботизированному производственному процессу

Теоретическая база и инструментарий	Процедурная часть
автоматизации и роботизации. - Техничко-экономическое обоснование проекта по роботизации производственных процессов	Этап 6. Построение карты потока производственного процесса целевого состояния. Имитационное моделирование. Расчет целевых производственных показателей Результаты: - Карта потока идеального состояния. - Имитационная модель производственного процесса
	Этап 7. Разработка мероприятия по автоматизации и роботизации. Техничко-экономическое обоснование проекта. Оценка рисков проекта по автоматизации и роботизации. Расчет затрат на автоматизацию и роботизацию Результаты: - Программа модернизации производства. - Техничко-экономическое обоснование. - Оценка рисков проекта

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.

По результатам оценочного аудита разрабатывается программа модернизации производственной системы. Структура программы модернизации производственных процессов состоит из 7 разделов: Проектно-конструкторские решения под задачи автоматизации и роботизации производственных процессов; Подбор технологического оборудования для автоматизации и роботизации; Проектирование и обеспечение технологической оснасткой; Интеграция с автоматизированными системами управления «нижнего» уровня; Интеграция с автоматизированными информационными системами «верхнего» уровня; Разработка технологической документации; Отработка технологических операций.

Для количественной оценки потенциала роботизации производственных процессов разработана математическая модель:

1. Расчет трудоемкости в базовом и проектном варианте (для роботизации):

$$Tr_1 = \frac{N_1 \times T_1}{V_1},$$

$$Tr_2 = \frac{N_2 \times T_2}{V_2},$$

где N_1, N_2 – численность рабочих до и после роботизации; T_1, T_2 – годовой фонд времени одного рабочего до и после роботизации; V_1, V_2 – объем производства до и после роботизации.

2. Расчет изменения трудоемкости:

$$\Delta Tr = Tr_1 - Tr_2 \left[\frac{\text{чел.} \times \text{час}}{\text{ед.}} \right].$$

3. Расчет производительности (выработки) – объем продукции на одного рабочего в год:

$$W_1 = \frac{V_1}{N_1},$$

$$W_2 = \frac{V_2}{N_2}.$$

4. Формула для расчета роста производительности (выработки):

$$I_W = \frac{W_2}{W_1} [\text{индекс}].$$

5. Модель оценки потенциала роботизации:

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

где C_1 , C_2 – годовые производственные затраты до и после роботизации; P – цена единицы продукции; K – капитальные затраты на роботизацию; E_n – нормативный коэффициент эффективности; t – срок жизни проекта; r – ставка дисконтирования; $\Delta П$ – дополнительная прибыль (экономическая эффективность); PP – срок окупаемости; NPV – численный приведённый доход; PI – индекс рентабельности; E – коэффициент ресурсной эффективности.

6. Расчет точки безубыточности по объему (ВЕР) – минимальный объем производства после роботизации, при котором проект окупается:

$$V_{2\text{ВЕР}} = \frac{C_2 + \frac{K \cdot r}{1 - (1+r)^{-t}}}{P}.$$

7. Модель принятия решений касательно потенциала роботизации конкретного проекта:

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

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

Для практической реализации методики оценки потенциала роботизации производственных процессов разработан комплекс показателей, состоящий из пяти групп показателей: финансовых; производственных; показателей качества; ресурсной эффективности; инновационных показателей.

В таблице 3 приведен перечень производственных показателей, характеризующих рациональность применения роботизации, и перечень показателей качества.

Таблица 3 – Перечень производственных показателей и показателей качества

Производственные показатели	Показатели качества
1. Производительность труда	5. Уровень брака
2. Уровень автоматизации	6. Уровень удовлетворенности клиентов
3. Время цикла	7. Степень соответствия стандартам качества
4. Простой оборудования	

Всего предложено 17 количественных показателей. При расчете комплекса показателей результативности и эффективности процессов автоматизации и роботизации учитываются факторы, влияющие на мотивацию и удовлетворенность производственного персонала.

В третьей главе разработана структурно-функциональная модель интеллектуальной роботизированной производственной ячейки, проведены анализ и классификация рисков появления потенциальных несоответствия и отказов функционирования интеллектуальных роботизированных производственных ячеек, а также разработана адаптивная методика системной интеграции роботизированных комплексов в производственные процессы машиностроительного предприятия.

Разработана проектная модель по созданию серийного роботизированного производства с оригинальными ключевыми этапами. (таблица 4).

Таблица 4. – Последовательность этапов проектной модели по созданию серийного роботизированного производства

№ этапа	Этап
1	Аудит потенциала автоматизации и роботизации производственных процессов
2	Оценка технологичности конструкции под возможности автоматизации и роботизации
3	Имитационное моделирование производственных процессов
4	Разработка и внедрение технологий автоматизированного и роботизированного производства
5	Адаптация (перепроектирование) конструкции продукции под возможности автоматизации и роботизации
6	Подбор технологического оборудования (роботизированных комплексов)
7	Проектирование и изготовление технологического оснащения для роботизированных комплексов
8	Организация интеллектуальных производственных ячеек
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
10	Проведение мониторинга и предиктивной диагностики состояния роботизированных комплексов

Данная последовательность 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.

Для организации эффективной работы интеллектуальной производственной ячейки разработана структурно-функциональная модель (рисунок 1), представляющая собой совокупность цифровых и физических компонентов и процессов, которая включает различные элементы и их взаимосвязи, обеспечивающие функционирование интеллектуальной производственной ячейки. В модели выделяются уровни управления, контроля и взаимодействия между элементами системы. Это позволяет оптимизировать производственные процессы и повысить эффективность работы ячейки.

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

Математическая модель многокритериальной оценки рисков выглядит следующим образом:

$$ПЧР_{ij} = S_{ij} \times O_{ij} \times D_{ij},$$

где i – единичный отказ; j – единичная причина отказа; S_{ij} – оценивается не только ущерб оборудованию/продукту, но и простой ячейки, нарушение логистики всего производства, риски кибербезопасности (если риск связан с ПО); O_{ij} – для аппаратных частей на основе статистики MTBF (MeanTimeBetweenFailures); D_{ij} – для классических отказов эффективность встроенного диагностирования (BMS).

Проведен структурный и функциональный анализ технологических процессов (на примере сборочного) и описаны функции 28 элементов. Проведена классификация организационных, технологических и технических мероприятий по снижению рисков появления несоответствий и отказов.

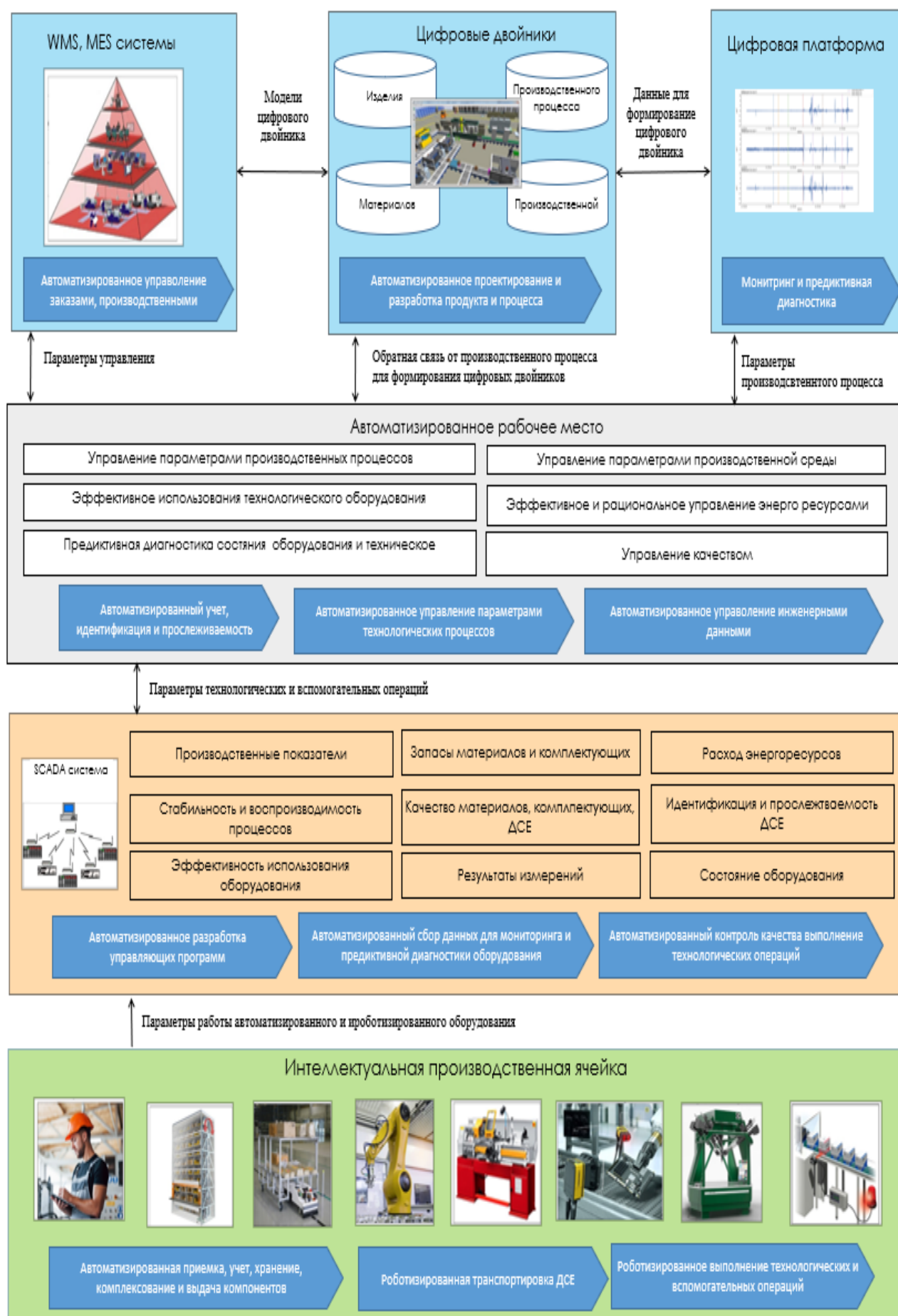


Рисунок 1 – Структурно-функциональная модель интеллектуальной производственной ячейки

Фрагмент разработанной классификации рисков приведен в таблице 5.

Таблица 5 – Фрагмент классификации рисков появления несоответствий функционирования интеллектуальной роботизированной производственной ячейки

Компоненты	Функция компонента	Риск (отказ / опасное событие)
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
		5. Отказ датчиков обратной связи (энкодеров). Неконтролируемое движение, опасность для персонала
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 (ЭМП). Сбои в работе датчиков и контроллеров
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

Для обеспечения результативности функционирования структурно-функциональной модели интеллектуальной производственной ячейки разработана последовательность системной интеграции роботизированных комплексов в производственные процессы машиностроительного предприятия (таблица 6). Предложенная последовательность является адаптивной, 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.

Таблица 6 – Визуализация последовательности системной интеграции роботизированных комплексов в производственные процессы машиностроительного предприятия

Этап	Подэтап
1. Определение целей и требований	1.1. Анализ потребностей
	1.2. Определение функциональных и технических требований
2. Проектирование системы	2.1. Выбор компонентов
	2.2. Разработка архитектуры
	2.3. Моделирование
3. Программирование и настройка	3.1. Интеграция компонентов интеллектуальной производственной ячейки
	3.2. Настройка алгоритмов управления
	3.3 Интеграция компонентов со SCADA
	3.4. Интеграция компонентов с ERP/MES
4. Интеграция систем	4.1. Объединение компонентов
	4.2. Интеграция с ERP/MES/ WMS
5. Тестирование и валидация	5.1. Проверка функциональности
	6.2. Валидация процессов
	7.3 Отработка технологических процессов и операций
6. Обучение и адаптация	6.1. Обучение операторов
	6.2. Адаптация к изменениям
7. Запуск в эксплуатацию	7.1. Пилотный запуск
	7.2. Полномасштабный запуск
8. Мониторинг и оптимизация	8.1. Сбор данных
	8.2. Анализ производительности
	8.3. Оптимизация процессов
9. Поддержка и обслуживание	9.1. Плановое обслуживание
	9.2. Обновление программного обеспечения

Перечень из 32 организационно-технологических документов, необходимых для создания интеллектуальной роботизированной производственной ячейки, приведен в таблице 7.

Таблица 7 – Перечень итоговых документов каждого этапа

№	Название документа	№	Название документа
1	Карта текущего процесса	17	Конструкторская документация
2	Текущие показатели производственного процесса	18	Разработанная технологическая планировка
3	Перечень текущего технологического оснащения	19	Маршрутно-операционные карты
4	Чертеж текущей конструкции	20	Типовые стандартные решения по роботизации
5	Оценка технологичности текущей конструкции	21	Перечень рисков и ограничений по роботизации
6	Оценка потенциала роботизации	22	Перечень роботизированных технологических комплексов
7	Перечень ограничений по роботизации	23	Диаграмма потока процесса
8	Перечень несоответствий по качеству	24	Карта рисков и мероприятия по их оптимизации
9	Перечень рекомендаций по повышению технологичности конструкции	25	План управления
10	Карта потока процесса	26	Рабочие инструкции
11	Карта потока процесса с целевыми показателями	27	Стандарты рабочих мест

12	Перечень необходимого технологического оснащения	28	Управляющая программа для роботизированных технологических комплексов
13	Описание технологии производства	29	Отчет по несоответствиям качества
14	Карты стандартизированных работ	30	Согласованный перечень технологического оснащения
15	Имитационная модель производства изделий	31	Согласованная технологическая планировка
16	Отчет об оптимизации производственных показателей	32	Согласованное описание технологического процесса

Адаптивность методики обеспечивается за счет включения этапов проектно-конструкторских работ по повышению технологичности конструкции и разработки специализированного технологического оснащения, учитывающую отраслевую и технологическую специфику производственного процесса. Практическая апробация показала, что реализация методики позволяет сократить время внедрения решений по автоматизации и роботизации производственных процессов в среднем на 40%, обеспечивая поэтапную системную интеграцию роботизированных комплексов.

В четвертой главе разработана методика организационного развития производственной системы для повышения эффективности роботизации производственных процессов, создана структура системного документа, описывающего организацию интеллектуальной роботизированной производственной ячейки, а также приведены результаты апробации.

Определены четыре уровня организационного развития производственной системы:

1. Производственные участки с автоматизированным оборудованием.
2. Роботизированные производственные участки.
3. Интеллектуальные роботизированные производственные ячейки.
4. Автономные ячейки закрытого типа.

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 $R \in [0,1]$, который является функцией четырех ключевых показателей:

$$R = w_A \cdot P_A + w_D \cdot P_D + w_i \cdot P_i + w_S \cdot P_S,$$

где P_A – показатель автономности, характеризующий способность ячейки функционировать без оператора, на принципах «темное производство»; P_D – показатель цифровизации, характеризующий уровень подключения к информационным системам и М2М-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. Математическая модель содержит критерии для каждого уровня организационного развития. Определены граничные значения для каждого уровня (таблица 8).

Таблица 8 – Границы уровней организационного развития

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

Апробация разработанного инструментария проводилась на ряде предприятий приборостроения и производства БПЛА.

В заключении изложены основные результаты и выводы исследования, подтверждающие положения, выносимые на защиту, определены перспективы дальнейшего изучения проблемы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Решена важная задача по комплексному и рациональному подходу к автоматизации и роботизации производственных процессов. Достигнуты 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 предполагается повышение производительности труда на производстве 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 для выявления потенциала автоматизации и роботизации. Методика позволяет выявить технологические и вспомогательные операции производственного процесса, которые целесообразно автоматизировать и роботизировать. Также с ее помощью можно адекватно оценить эффективность автоматизации и роботизации на основе комплекса технико-экономических показателей. Методика 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. Разработанная 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. Методика организационного развития производственной системы для повышения эффективности автоматизации и роботизации производственных процессов, состоящая из четырех уровней. Для каждого уровня определены критерии и характеристики.

8. Проведена комплексная апробация предложенных решений по созданию и функционированию серийного роботизированного машиностроительного производства. Выполнена оценка результативности разработанных методики и моделей. Получены акты внедрения результатов диссертационной работы на предприятиях ООО «ЧЗСА» и ООО «Авиатор». Получены справки о внедрении результатов диссертационной работы в учебном процессе на кафедре производства летательных аппаратов и управления качеством в

машиностроении Самарского национального исследовательского университета имени академика С.П. Королева и кафедре техносферной безопасности, метрологии и технологии материалов Чувашского государственного университета имени И.Н. Ульянова.

СПИСОК НАУЧНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, рецензируемых ВАК России:

1. **Голубцов, Н.С.** Подходы и инструментарий создания серийного роботизированного производства / **Н.С. Голубцов**, Д.В. Антипов, В.Л. Семенов // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2025. – Т. 27, № 3 (125). – С. 24-33.
2. **Голубцов, Н.С.** Разработка принципиальной структурной схемы системы управления роботизированным комплексом для обслуживания станков с ЧПУ / Д.В. Антипов, М.А. Михеев, А.А. Ибятулина, А.Р. Рахматуллин, И.С. Клепак, **Н.С. Голубцов** // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2025. – Т. 27, № 3 (125). – С. 34-39.
3. **Голубцов, Н.С.** Структурно-функциональная модель интеллектуальной производственной ячейки / Д.В. Антипов, **Н.С. Голубцов**, В.Л. Семенов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2025. – № 8. – С. 57-65.
4. **Голубцов, Н.С.** Методика проектирования линии роботизированной сборки изделий аэрокосмической техники / **Н.С. Голубцов**, Д.В. Антипов, П.С. Гвоздева // III Научно-практическая конференция «Стандартизация: траектория науки», приуроченная ко Всемирному дню стандартов / Москва, 15 октября 2025 г. // Информационно-экономические аспекты стандартизации и технического регулирования. – 2025. – № 6 (87). – С. 128-132.
5. **Голубцов, Н.С.** Методика сбора данных для построения типовой имитационной модели производственного участка / **Н.С. Голубцов**, А.К. Лыкова // III Научно-практическая конференция «Стандартизация: траектория науки», приуроченная ко Всемирному дню стандартов / Москва, 15 октября 2025 г. // Информационно-экономические аспекты стандартизации и технического регулирования. – 2025. – № 6 (87). – С. 417-423.
6. **Голубцов, Н.С.** Разработка методики проектирования интеллектуальной роботизированной производственной ячейки // **Н.С. Голубцов** // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2026. – № 5. – С.241-249.

Публикации в материалах конференций:

7. **Голубцов, Н.С.** Разработка технологических решений функционирования «умного склада»/ **Н.С. Голубцов**, Д.В. Антипов, М.А. Михеев, А.А. Ибятулина, А.Р. Рахматуллин, М.В. Дудников // XXIX Международная научно-практическая конференция, посвященная памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика Михаила Федоровича Решетнева. – 2025. – Ч. 1. – С. 447-450.
8. **Голубцов, Н. С.** Автоматизация и роботизация как фактор организационного развития производственной системы / **Н.С. Голубцов**, А.А. Галынская // IV Национальная научно-практическая конференция «Цифровые технологии: настоящее и будущее». – 2025. – С.223-229.