

На правах рукописи



Квас Евгений Станиславович

МОДЕЛИ И МЕТОДИКИ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ОРГАНИЗАЦИИ
РОБОТИЗИРОВАННЫХ ЛИНИЙ РОЗЛИВА

Специальность 2.5.22 «Управление качеством продукции. Стандартизация.
Организация производства (технические науки)»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2025

Работа выполнена на кафедре электромеханики и робототехники федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения».

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент
Кузьменко Владимир Павлович

Официальные оппоненты: **Ивахненко Александр Геннадьевич**,
доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Юго-Западный государственный университет», профессор кафедры машиностроительных технологий и оборудования

Щеглов Дмитрий Константинович,
кандидат технических наук, доцент, акционерное общество «Научно-производственное объединение «Северо-Западный региональный центр Концерна ВКО «Алмаз-Антей» - Обуховский завод», научный руководитель расчетно-исследовательского отдела

Ведущая организация: федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), 197022, г. Санкт-Петербург, улица Профессора Попова, дом 5, литера Ф.

Защита состоится «09» декабря 2025 г. в 14:00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.384.02 при Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения» по адресу: 190000, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 67, лит. А.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения» по адресу: 190000, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 67, лит. А. Автореферат и текст диссертации размещены на сайте университета <http://dissov.guap.ru>.

Автореферат разослан «22» октября 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.2.384.02,
кандидат технических наук, доцент



С.А. Назаревич

I. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. На сегодняшний день приоритетным и глобальным вызовом промышленной политики Российской Федерации является обеспечение конкурентоспособности и технологической независимости отечественного производства за счёт внедрения высокотехнологичных решений, отвечающих требованиям национальных и международных стандартов в области промышленной и экологической безопасности. В Послании Федеральному собранию 21 февраля 2023 года Президент России отметил важность внедрения и развития современных производственных технологий для устойчивого развития страны, что особенно важно в условиях реализации национального проекта технологического лидерства «Средства производства и автоматизации», который устанавливает требования по обновлению основных инструментов повышения производительности труда и предполагает внедрение 94 тысяч робототехнических единиц в производство.

Процессы обеспечения технологической независимости в области серийного розлива жидких материальных потоков, соблюдения заданных уровней промышленной и экологической безопасности на таких производствах сталкиваются с научно-практическими проблемами развития средств повышения качества организации производственных процессов, где рационализация производственных потерь, затрат на повышение производительности и контроль качества продукции, при сохранении заданных условий промышленной и экологической безопасности сталкиваются с проблемами шумовых эмиссий и являются критическими задачами.

Возникает следующее противоречие: потребность в увеличении производительности роботизированных линий розлива для повышения скорости выпуска розливной продукции сталкивается с необходимостью преднамеренно снижать скорость производства из-за ограничений промышленной и экологической безопасности, связанных с увеличением генерируемых шумовых эмиссий при увеличении производительности таких линий. При этом классический подход к организации производств данного типа, основанный на локализации и устранении технологических несоответствий путем итерации внутреннего аудита и создания локальных пассивных акустических решений и изменений в организации технологического процесса, не позволяет сохранить прежние показатели производительности линии при ограничении шумовых эмиссий за счет снижения скорости выпуска продукции.

Поэтому особой значимостью и актуальностью обладают процессы повышения качества организации роботизированных линий розлива жидких материальных потоков, направленных на решение задач промышленной и экологической безопасности в области акустического контроля производства, поскольку их реализация устраняет вынужденное ограничение производительности.

Таким образом, актуальность темы диссертационного исследования обусловлена необходимостью научно обоснованного разрешения противоречия между растущими требованиями к повышению производительности роботизированных линий розлива и сопряжённым с этим увеличением шумовых эмиссий. Исследование, разработка и внедрение моделей и методик повышения качества организации роботизированных линий розлива, направленных на обеспечение производительности при выполнении требований промышленной и экологической безопасности, соответствует приоритетам государственной промышленной политики в сфере модернизации производственных систем, является выполнимой и актуальной научно-практической задачей в условиях реализации национального проекта технологического лидерства «Средства производства и автоматизации».

Степень разработанности проблемы.

Значительный научный вклад в разработку процессов управления качеством и организации производства внесли отечественные ученые Ю.П. Адлер, Б.В. Бойцов, В.А. Васильев, А.В. Гличев, М.М. Кане, Е.А. Фролова, Г.И. Коршунов и др. Вопросы

организации производства получили развитие в работах Г.И. Коршунова, Е.А. Фроловой, А.В. Кивелева, А.В. Сидорина, З.М. Селивановой, Б.В. Гнеденко, В.К. Беляева, А.Д. Соколова, Ю.Б. Зубарева, М.Г. Миронова, Е.Ф. Розмировича, В.Д. Шапиро.

Анализ трудов отечественных и зарубежных учёных, а также нормативно-технической базы показал, что в настоящее время не в полной мере исследованы вопросы оценки и управления качеством организации роботизированных производств, особенно с точки зрения обеспечения устойчивой производительности серийной продукции при наличии акустических факторов, ограничивающих допустимый уровень технической эксплуатации оборудования. Недостаточно разработаны научно обоснованные подходы к интеграции методов контроля и снижения шумовых эмиссий в систему управления качеством организации роботизированных линий, что затрудняет принятие обоснованных управленческих решений и ведёт к технологическим потерям при эксплуатации таких производств.

Цель работы: повышение эффективности и качества организации процессов роботизированного розлива с учетом соблюдения растущих требований промышленной и экологической безопасности в области генерации шумовых эмиссий, при постоянно увеличивающихся объемах производства.

Объект исследования: производственные и функциональные процессы розлива жидких материальных потоков на роботизированных линиях розлива.

Предмет исследования: процедуры, методики, направленные на решение задач промышленной и экологической безопасности, в области ограничений шумовых эмиссий и обеспечения акустического комфорта персонала, при сохранении заданной производительности линии.

Для достижения цели исследования в работе поставлены и решены следующие задачи:

1. Разработка квалитетрической модели для совершенствования научных методов оценки и управления качеством роботизированного розлива на основе контрольных функций и коэффициентов.
2. Разработка методики, основанной на эмпирических зависимостях и коэффициентах, позволяющих проводить оценку качества организации технологических процессов роботизированного розлива.
3. Разработка методики организации производства для решения задач промышленной и экологической безопасности в области снижения шумовых эмиссий, возникающих в процессе работы роботизированных линий розлива, с учетом отраслевых требований к акустической безопасности и комфорту персонала на производствах данного типа.
4. Разработка системы управления качеством состояния буферных зон роботизированных линий розлива для обеспечения регулирования шумовых эмиссий и контроля качества выпускаемой продукции.

Методы исследований: элементы унификации, агрегатирования, натурных испытаний, моделирования и статистики, а также современные пакеты прикладных программ: AutoCAD, SolidWorks, MATLAB и Python (с библиотеками NumPy, Pandas, Matplotlib); экспериментальные исследования проводились с использованием оборудования: трёхфазного анализатора С.А 8335 QUALISTAR PLUS, тепловизора FLUKE TiS20, шумомера Benetech GM1356, камеры технического зрения MV-CA016-10UC и люксметра АРГУС-07.

Область исследования: соответствует п. 5, 9, 18, 24 паспорта специальности – 2.5.22. «Управление качеством продукции. Стандартизация. Организация производства».

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Квалитетрическая модель оценки и управления качеством роботизированного розлива на основе контрольных функций и коэффициентов.

2. Методика оценки качества организации технологических процессов роботизированного розлива и эффективности функционирования линии на основе эксплуатационных коэффициентов.

3. Методика организации производства для решения задач промышленной и экологической безопасности в области снижения шумовых эмиссий, возникающих в процессе работы роботизированных линий розлива.

4. Система управления качеством состояния буферных зон транспортеров роботизированных линий розлива для снижения шумовых эмиссий, предотвращения их переполнения, брака и боя тары.

Научная новизна:

1. Квалиметрическая модель оценки и управления качеством роботизированного розлива на основе контрольных функций и коэффициентов, **отличающаяся от известных тем**, что учитывает показатели в виде разработанных эксплуатационных коэффициентов, основанных на экспериментальном анализе параметров производственных операций и технологического состояния узлов линий розлива, **причем** каждый коэффициент формализован через метрически определяемые параметры узлов линии розлива и снабжён шкалой нормализации, что обеспечивает переход от качественных описаний к количественной оценке качества функционирования роботизированных линий розлива.

2. Методика оценки качества организации технологических процессов роботизированного розлива и эффективности функционирования линии на основе эксплуатационных коэффициентов, **отличающаяся от известных тем**, что позволяет преобразовать разрозненные показатели стандартизации, а также параметры надёжности, герметичности, точности дозирования и уровня шума в единую систему взвешенной оценки качества функционирования роботизированных линий розлива.

3. Методика организации производства для решения задач промышленной и экологической безопасности в области снижения шумовых эмиссий, возникающих в процессе работы роботизированных линий розлива, **отличающиеся от известных** комплексным подходом к решению проблемы шумовой нагрузки за счет контроля и оптимизации параметров транспортеров и содержащая алгоритмы бесступенчатого регулирования буферов транспортёров линии.

4. Система управления качеством состояния буферных зон транспортеров роботизированных линий розлива для снижения шумовых эмиссий, предотвращения их переполнения, брака и боя тары, **отличающаяся от известных тем**, что включает запатентованный специализированный светодиодный источник света, алгоритм детекции боя и брака тары и алгоритмы мониторинга и контроля генерации шумовых эмиссий за счет управления скоростью и уровнем заполнения буферных зон транспортеров.

Практическая значимость:

1. Применение предложенной квалиметрической модели оценки и управления качеством роботизированного розлива на основе контрольных функций и коэффициентов **позволяет повысить эффективность подбора узлов линии и их технического обслуживания на предприятии на 3-5%.**

2. Применение разработанной методики оценки качества организации технологических процессов роботизированного розлива и эффективности функционирования линии на основе эксплуатационных коэффициентов **позволяет усовершенствовать многоступенчатую систему контроля и сократить количество дефектов в производстве на 2-4%.**

3. Применение разработанной методики организации производства для решения задач промышленной и экологической безопасности в области снижения шумовых эмиссий, возникающих в процессе работы роботизированных линий розлива, **позволяет снизить уровень шума на 6-8 дБ(А), повысить условия и производительность труда на 1-3% за счёт оптимизации скорости движения конвейеров и минимизации воздействия шума на операторов на производственных объектах.**

4. Применение системы управления качеством состояния буферных зон транспортеров роботизированных линий розлива для снижения шумовых эмиссий, предотвращения их переполнения, брака и боя тары **позволяет снизить повреждение тары и повысить эффективность детекции брака и боя тары на 3-6%.**

5. Результаты исследований, основных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертационном исследовании, нашли практическое применение в главе «Разработка системы управления адаптивным производством космических аппаратов на основе интеллектуальных роботизированных комплексов и цифровых двойников» отчета о проведении научных исследований при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, соглашение № FSRF-2023-0003, «Фундаментальные основы построения помехозащищенных систем космической и спутниковой связи, относительной навигации, технического зрения и аэрокосмического мониторинга» 2025 г.

Степень достоверности результатов диссертационной работы обеспечивается корректностью применения математического аппарата, методов математического моделирования производственных процессов, алгоритмов организации производства, методов регрессионного и факторно-дисперсионного анализа, методов оценки качества функционирования производственных процессов, при этом высокая сопоставимость результатов теоретических исследований, моделирования и экспериментальных данных, а также научные публикации по тематике исследования, подтверждают обоснованность и достоверность выводов диссертационной работы.

Личный вклад автора заключается в непосредственной разработке основных положений, выносимых на защиту.

Реализация работы. Результаты основных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертационном исследовании, нашли практическое применение в методиках управления качеством и оптимизации процессов на предприятиях ООО «Полус», ООО «Валдай Роботы» ООО «Иннотех», ООО «Симертех», обеспечили, снижение материальных и трудовых затрат, улучшения качества и безопасности условий труда на производственных линиях. Математические модели, методики и выводы, полученные в ходе диссертационного исследования, нашли внедрение в образовательном процессе ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения», что подтверждено актами внедрения.

Получено свидетельство о государственной регистрации прав на объект авторского права «Устройство управления светодиодным светильником» рег. №197321 от 21.01.2020 г.

Получено свидетельство о государственной регистрации на объект авторского права «Программа для расчета эксплуатационных коэффициентов контроля качества роботизированной линии розлива» №2024669099 от 14.08.2024 г.

Получено свидетельство о государственной регистрации на объект авторского права «Программа моделирования алгоритма бесступенчатого управления буферами роботизированных линий розлива», №2024684762 от 21.08.2024 г.

Апробация. Основные результаты исследования докладывались и обсуждались на международной научной конференции «Волновая электроника и инфокоммуникационные системы», 2019-2020 гг; международной научной конференции «Advanced technologies in aerospace, mechanical and automation engineering», 2019 г; международной конференции «15th International Conference on Electromechanics and Robotics “Zavalishin’s Readings” (ER(ZR)-2020)», 2020 г; международной конференции «24th International Conference “Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems” (WECNF 2020)», 2020 г; международной научно-практической конференции «Метрологическое обеспечение инновационных технологий», 2020 г; международной научно-технической конференции «Автоматизация технологических объектов и процессов. Поиск молодых», 2020 г; международном форуме, посвящённом 80-летию Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения и 300-летию

Российской академии наук, 2021 г; ежегодной научно-практической конференции «Эра интеллекта», 2024 г; международной научно-технической конференции «Экстремальная робототехника», 2024 г; международном форуме «Digital Innopolis Days & Innopolis AI Conference», 2024 г; основные результаты получены в рамках проведения научных исследований при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, соглашение № FSRF-2023-0003, «Фундаментальные основы построения помехозащищенных систем космической и спутниковой связи, относительной навигации, технического зрения и аэрокосмического мониторинга», в 2025 г.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 22 работы, из них: 8 статей в ведущих рецензируемых научных журналах, в том числе 4 – без соавторов, 3 в научных изданиях Scopus и Web of Science, 1 статья в журнале РИНЦ, 8 статей в сборниках докладов и трудов конференций, 3 свидетельства о государственной регистрации.

Объем и структура диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех разделов, заключения, списка литературы и приложений. Основной текст диссертации представлен на 177 (11,06 п.л.) страницах, включая 15 таблиц и 53 рисунка.

II. ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение содержит обоснование актуальности темы, цель, задачи, объект и предмет исследования, отражена научная новизна и практическая значимость, положения, выносимые на защиту, сведения об апробации и внедрении результатов работы.

Первый раздел содержит анализ проблематики и направлений развития роботизированных линий розлива и упаковки, в рамках которого систематизированы ключевые ограничения, связанные с обеспечением качества организации производственных процессов, соблюдением требований промышленной и акустической безопасности, а также необходимостью повышения эффективности функционирования технологических модулей и обеспечения стабильности контролируемых параметров при их эксплуатации.

На основе проведенного анализа обоснована необходимость унификации подходов к управлению качеством организации роботизированных линий розлива (РЛР), а также разработки моделей и инструментов оценки и управления качеством указанных производственных процессов с использованием контрольных функций и методов эмпирического анализа. Отмечена ограниченность применяемой нормативно-технической документации, положения которой не в полной мере учитывают особенности функционирования современных РЛР в условиях повышенных требований к промышленной и акустической безопасности. Выявлено противоречие между необходимостью увеличения производительности РЛР и тенденцией к снижению качества организации производственного процесса, что проявляется в росте шумовых эмиссий и снижении стабильности показателей качества выпускаемой продукции. В соответствии с установленной проблематикой сформулированы задачи научного исследования, направленные на устранение выявленных ограничений.

Во втором разделе разработан комплексный набор эксплуатационных коэффициентов, сформированных на основе анализа проблем, выявленных в организации процессов роботизированного розлива жидких материальных потоков в тару, а также в операциях упаковки тары в транспортные контейнеры. Предложенные коэффициенты предназначены для интеграции в систему управления качеством организации роботизированных линий розлива. В таблице 1 приведен фрагмент классификации основных проблем управления качеством организации роботизированных линий, а также соответствующие эксплуатационные коэффициенты, позволяющие проводить оценку уровня выраженности указанных проблем и формировать обоснованные управленческие решения.

Таблица 1 – Фрагмент таблицы сопоставления проблем управления качеством роботизированных линий розлива и предлагаемых эксплуатационных коэффициентов

Проблема	Описание	Название коэффициента	Математическое описание коэффициента
Отсутствие универсальных систем контроля	Разнообразие систем управления параметрами роботизированных упаковочных линий затрудняет разработку универсальных решений	Коэффициент универсальности (K_y)	$K_y = \frac{\sum_{i=1}^N U_i}{N} \cdot \frac{C_{\text{универсальных}}}{C_{\text{общие}}},$ где U_i – универсальность i -го компонента, от 0 до 1 где 0 – компонент уникален и его не заменить аналогичным другого производителя, – 1 компонент полностью унифицирован; N – общее количество компонентов; $C_{\text{универсальных}}$ – количество универсальных систем; $C_{\text{общих}}$ – общее количество систем.
Отсутствие общих критериев качества	Нет единых показателей или критериев качества, что приводит к несоответствиям в управлении качеством	Коэффициент согласованности качества ($K_{\text{ск}}$)	$K_{\text{ск}} = \frac{\mu_Q}{\sigma_Q},$ где Q_i – качество i -го критерия; σ_Q – стандартное отклонение качества; μ_Q – среднее значение качества.
Отсутствие стандартизованных требований	Уникальный характер каждой системы усложняет процесс создания стандартизованных требований и процедур	Коэффициент сложности стандартизации ($K_{\text{сс}}$)	$K_{\text{сс}} = \frac{\sum_{i=1}^N U_i(1 - S_i)}{N} \cdot \frac{1}{1 + \alpha D},$ где U_i – уникальность i -го компонента; S_i – стандартность i -го компонента; N – общее количество компонентов; α – коэффициент сложности стандартизации; D – дисперсия уникальности компонентов.
Шумовое загрязнение	Высокий уровень шума на производственных линиях, который может негативно влиять на здоровье операторов и эффективность их работы	Коэффициент шумового загрязнения ($K_{\text{ш}}$)	$K_{\text{ш}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{L_i}{L_{\text{max}}},$ где L_i – уровень шума на i -м участке линии, L_{max} – предельно допустимый или максимальный уровень шума; N – количество точек замера шума на производственной линии.

На основании данных коэффициентов сформирована квалиметрическая модель оценки и управления качеством роботизированного розлива, основанная на эксплуатационном анализе параметров технологических операций роботизированного розлива и учитывающая показатели в виде предложенных эксплуатационных коэффициентов. Модель при этом представляет собой агрегированную интегральную функцию, рассчитываемую на основании эксплуатационных коэффициентов:

$$K_{\text{инт}} = \sum_{i=1}^n w_i \cdot f_i(K_i),$$

где K_i – значение i -го эксплуатационного коэффициента; $f_i(K_i)$ – нормализующая или шкальная функция (если коэффициенты не аддитивны);

$w_i \in [0,1], \sum w_i = 1$ – весовой коэффициент значимости;

n – количество используемых коэффициентов.

Для обеспечения адекватности определения весов модели используется риск-ориентированный подход и представление эксплуатационных коэффициентов через функции нормализации, где это необходимо. Указанные обоснования нормализации по каждому из представленных эксплуатационных коэффициентов сведены в таблицу 2.

Таблица 2 – Фрагмент таблицы обоснования распределение весовых показателей влияния эксплуатационных коэффициентов в квалиметрической модели

Коэфф.	Нормализация	Основание веса	Вес	Значимость
K_y	Без преобразования	позволяет адаптировать модули, снижает стоимость и время на перестройку → <i>высокая стратегическая значимость</i>	0,10	средняя
$K_{\text{ск}}$	$\min(\frac{K_{\text{ск}}}{50}, 1).$	обеспечивает стабильность розлива, влияет на дефект на миллион возможностей (DPMO, Defects per Million Opportunities) → <i>критично для продукта</i>	0,15	высокая
$K_{\text{сс}}$	$1 - K_{\text{сс}}$	усложняет унификацию → <i>уменьшает управляемость</i>	0,10	средняя
$K_{\text{ш}}$	$1 - \min(\frac{K_{\text{ш}}}{10}, 1).$	высокий вклад в отказоустойчивость, безопасность и экологичность	0,15	высокая

Интерпретация итогового значения интегрального квалиметрического показателя $K_{\text{инт}}$ проводится на основании четырехуровневой шкалы, отражающей качественное состояние роботизированной линии розлива с точки зрения стандартизации, универсальности, шумовой безопасности и согласованности её компонентов.

Границы шкалы определяются с опорой на принятые в отрасли уровни допустимых отклонений, риск-ориентированные методы анализа, а также на практические значения, полученные в ходе экспериментальной верификации модели. Шкала, представленная на рис. 1 отражает степень приближения интегрального состояния системы к идеальному (единичному) уровню, где 0.0 – 0.5 – критическое состояние, 0.5 – 0.7 – удовлетворительное, 0.7 – 0.85 – хорошее, 0.85 – 1.0 – отличное.



Рисунок 1 – Шкала интерпретации значений интегрального квалиметрического показателя качества функционирования РЛР

Разработана методика оценки качества организации технологических процессов роботизированного розлива и эффективности функционирования линии, разработанная на основе предложенных эксплуатационных коэффициентов, для применения которой произведено сопоставление влияния параметров функционирования РЛР на изменения разработанных эксплуатационных коэффициентов, которые вне квалиметрической модели могут применяться для оценки отдельных показателей функционирования линии и мониторинга производительности и отклонений в процессах розлива. Алгоритм применения разработанной методики представлен на рисунке 2.

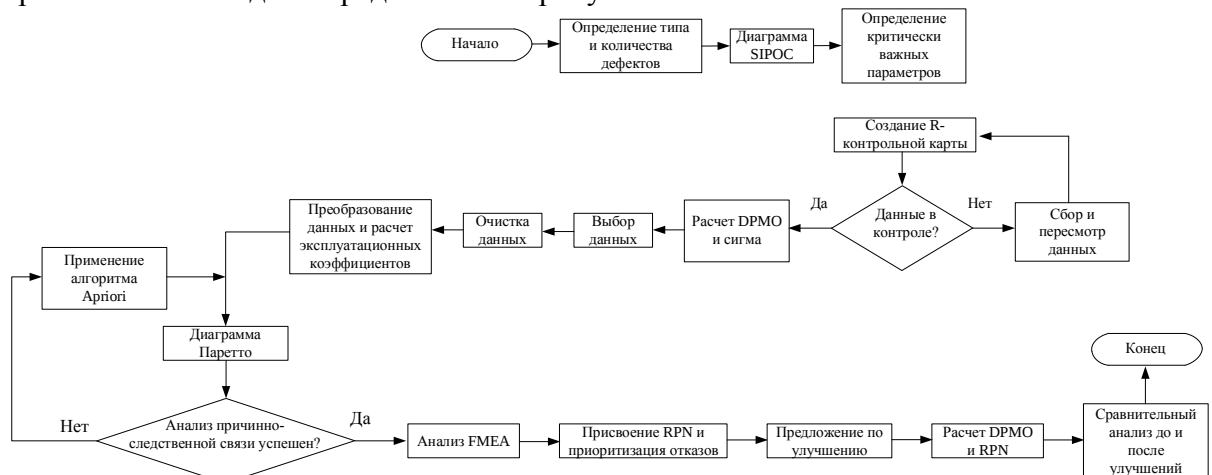


Рисунок 2 – Алгоритм применения разработанной методики комплексной оценки эффективности функционирования и качества организации РЛР

На рисунке 3 представлены результаты экспериментальной верификации разработанной методики на примере экспериментальных данных о недоливах и переливах жидкости в процессе роботизированного розлива в течение 60 дней исследований перелив составил 1461 дефектов, а недолив 1214 дефектов.

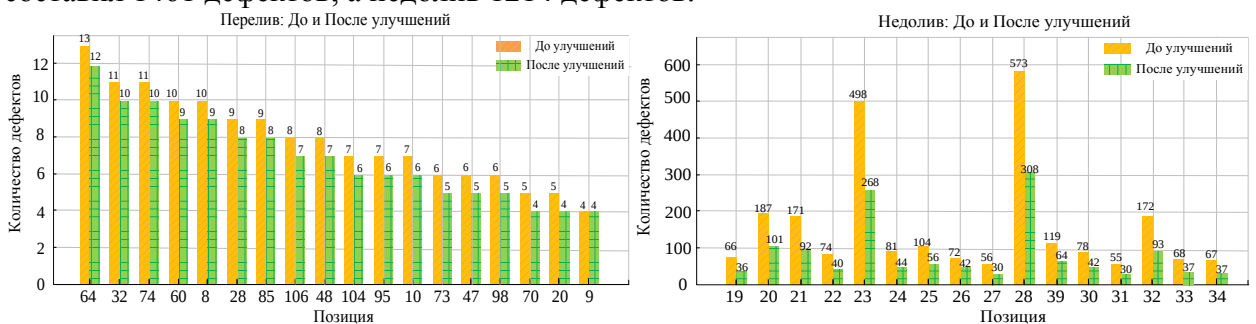


Рисунок 3 – Статистика недоливов и переливов в работе исследуемой РЛР до и после проведения предложенных улучшений по разработанной методике

В ходе экспериментальных исследований РЛР с номинальной производительностью 90 тыс. бут./час исследовалась на шумовые эмиссии и дефекты, связанные с переливами и недоливами жидкости в тару было получено среднее значение дефектов за день. После чего

была составлялся набор отказов с приоритетными номерами риска (RPN) для наиболее часто обнаруживаемых режимов исследуемой РЛР.

В ходе исследования были получены значения коэффициентов: $K_y = 0,7$; $K_{ск} = 0,95$; $K_c = 0,9$. Далее на основании методики и расчетов коэффициентов формировался ряд предлагаемых функциональных корректировок, а также расчет RPN и DPMO до и после их внедрения в процессы организации роботизированного розлива, в результате чего удалось добиться повышения точности дозирования (до $\delta V_d \pm 0,01$ литра, вместо $\delta V_d \pm 0,015$ литра), что подтверждается данными из рис. 3 (значения после функциональных корректировок по разработанной методике) и из рис. 4, на котором представлен расчет RPN для основных режимов отказа: засорения фильтров, неправильное дозирование, протечки при укупорке (гермитизации) и т.д.

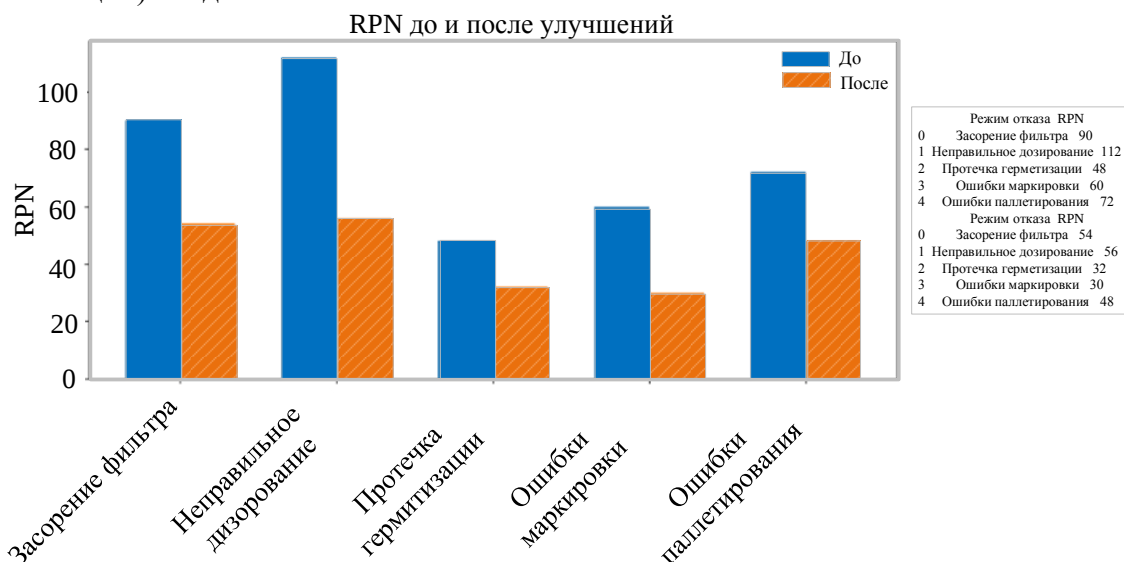


Рисунок 4 – Программный расчет RPN до и после моделируемых улучшений на основе рассчитанных эксплуатационных коэффициентов

Дополнительно была разработана и запатентована программа для ЭВМ, позволяющая производить анализ качества отдельных модулей РЛР по пользовательским параметрам, применяющая предлагаемую методику, программный интерфейс которой представлен на рис. 5

Отгружено	576	2.26%	Нижний световой барьер	0	●
Линия 4	132	0.66%	Ошибка укупорки	1	●
Линия 5	444	1.20%	Отсутствие крышки (аналог)	1	●
Обработано	21882	100%	Отбор проб (общий)	132	●
Произведено	21825	99.7%	Отбор проб - наполнитель	108	●
Безопасность	10	0.00%	Отбор проб - укупорка	24	●
Рентген (ЧС)	0	0.00%	Ошибка наполнителя	465	●
			Остановка	0	●
			Недолив (рентген)	49	●
			Перелив (рентген)	416	●

Сканирование

Заполнение

Тара

Рисунок 5 – Фрагмент интерфейса программы для ЭВМ для применения методики комплексной оценки эффективности функционирования и качества организации РЛР

В данном разделе также разработана методика организации производства для решения задач промышленной и экологической безопасности в области снижения шумовых эмиссий, возникающих в процессе работы роботизированных линий розлива, с учетом отраслевых требований к акустической безопасности и комфорту персонала на производствах данного типа. Методика учитывает взаимосвязь измеряемых и регулируемых параметров, включая

вместимость транспортера (C), производительности ячеек ($q_{вх_max}$, $q_{вых_max}$), длины участков ($l_0, \dots, l_n$), максимальные скорости конвейеров ($v_{вх_max}$, $\dots$, $v_{вых_max}$). Алгоритм применения методики представлен на рисунке 6.

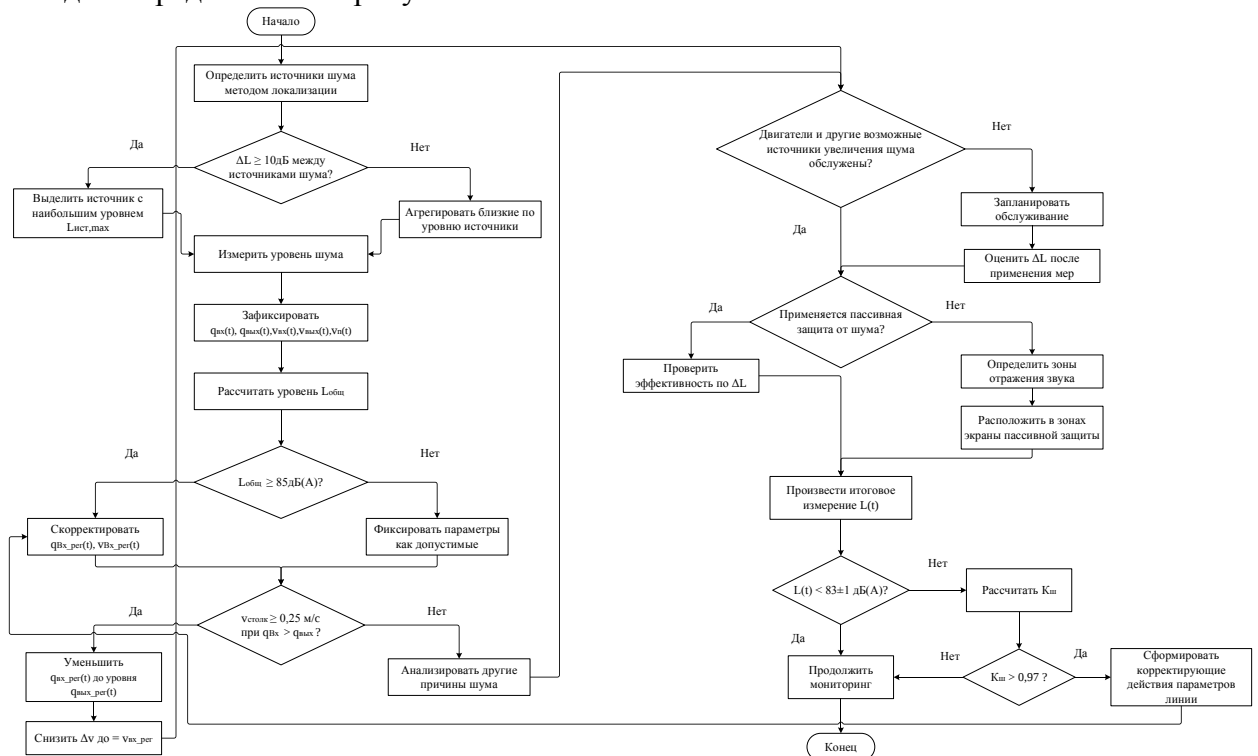


Рисунок 6 – Алгоритм разработанной методики организации производства для решения задач промышленной и экологической безопасности в области снижения шумовых эмиссий

Апробация методики организации производства для решения задач промышленной и экологической безопасности в области снижения шумовых эмиссий производилась на действующей РЛР с параметрами $q_{вх}(t) = 40\,000$ бут./час; $q_{вых}(t) = 40\,000$ бут./час; вместимости транспортера $C = 10\,000$ бут, длиной каждого участка транспортера $l_n = 5$ метров, максимальной скоростью конвейерных лент $v_{вх}$, $v_{вых} = 5$ м/с. На рисунке 7 изображена модель испытательной трассы РЛР с позициями счетчиков скопления от «Поток_1» до «Поток_6», которая включает транспортные модули, сегментированные на элементы, каждый из которых имеет параметры скорости, заполнения и пропускной способности настраиваемые согласно алгоритму методики (рис. 6). Управляющие воздействия рассчитываются исходя из текущих значений входных и выходных потоков тары, а также целевых уровней заполнения буферов.

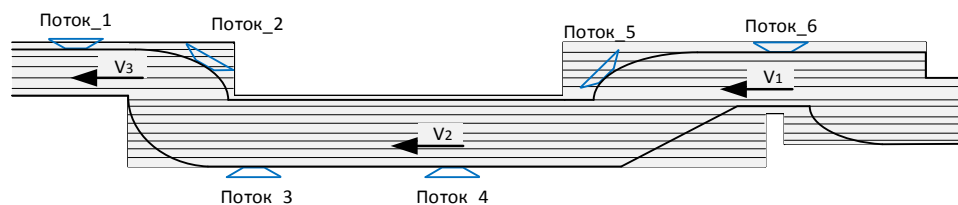


Рисунок 7 – Модель транспортера с счётчиками скопления «Поток_1» – «Поток_6»

На рисунке 8 представлены результаты измерения уровней шума, возникающих в различных точках установки при работе конвейерных систем с использованием различных режимов управления по разработанной методике. При работе без оптимизации управления транспортеров, измеренный уровень шума на входе последующей ячейки показал значения $L_{вых} = 84$ дБ(А) при средней скорости столкновения 0,25 м/с вместо 91 дБ(А).

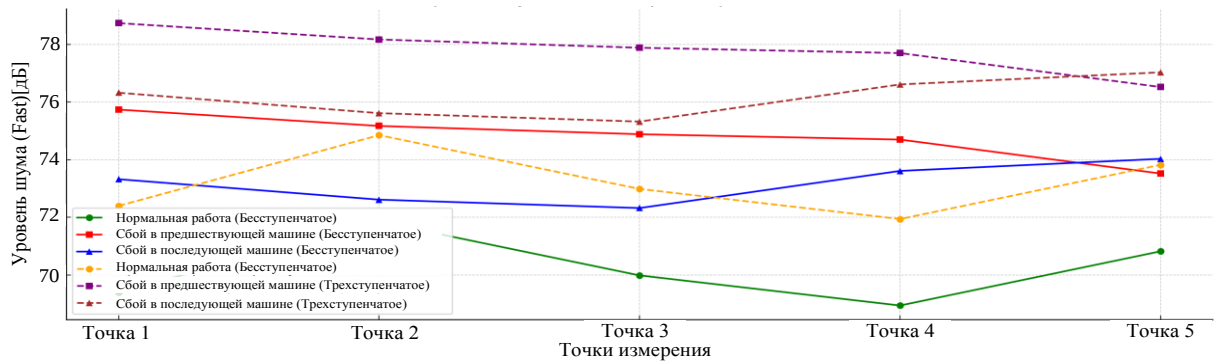


Рисунок 8 – Измеренные уровни шума в стандартном режиме для различных точек измерения и сценариев в РЛР

На рис.8 «Точка 1» – это начало транспортной ленты, где тара подается в систему; «Точка 2» – средняя часть транспортной ленты, где происходит ускорение потоков тары; «Точка 3» – участок, где тара сталкивается при замедлении; «Точка 4» – конечная часть транспортной ленты перед входом в следующую ячейку; «Точка 5» – место на транспортной ленте с повышенным уровнем накопления тары.

Полученные данные подтверждают целесообразность применения предлагаемой методики на производственных линиях с высокой интенсивностью работы и позволяют добиться снижения шумовых эмиссий за счет управления транспортерами на 6-8 дБ(А).

В третьем разделе представлена разработка системы управления качеством состояния буферных зон транспортеров роботизированных линий розлива для снижения шумовых эмиссий, предотвращения их переполнения, брака и боя тары. В основе системы заложена модель непрерывной работы линии и контроля шумовой эмиссии для приведения заполняемости буфера $B(t)$ к целевому значению $B_{\text{цел}}$. Заполняемость буфера в рамках модели определялась из входного ($q_{\text{вх}}$) и выходного ($q_{\text{вых}}$) потоков бутылок по формуле:

$$B(t) = \int (q_{\text{вх}}(t) - q_{\text{вых}}(t))dt.$$

Для того, чтобы описанное выше условие выполнялось, разработана структура подсчета входящей и выходящей тары, при обеспечении отсутствия в потоке и в местах скопления брака и боя тары, для чего и разработана система мониторинга состояния буферных зон с функцией детекции брака и боя тары. При этом внутри системы возникает необходимость задавать моделируемое поведение производительности предшествующей и последующей ячеек, располагаемых между буферных зон, в зависимости от $B(t)$, что показано на рисунке 9.

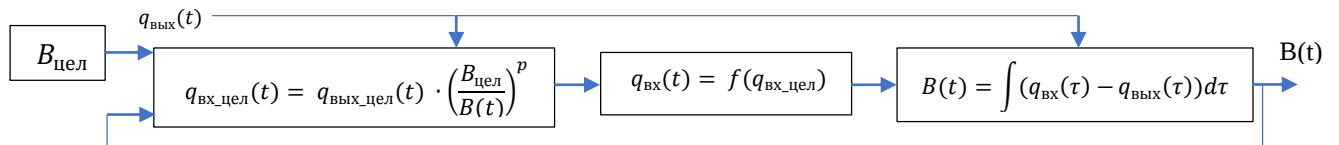


Рисунок 9 – Моделируемый контур управления и математическое описание поведения предшествующей и последующей ячеек, располагаемых между буферных зон

Регулирование производительности происходит с первой средней секции, следующей за входной секцией ($n = 1$), затем выполняется для всех секций до предпоследнего участка транспортной ленты, после чего целевая производительность ($q_{\text{вх_цел}}(t)$) предшествующей ячейки регулируется на основе производительности последующей до остановки ($q_{\text{вых}}(t_{\text{остановки}})$) по модели:

$$q_{\text{вх_цел}}(t) = q_{\text{вых}}(t_{\text{остановки}}) \cdot \left(\frac{B_{\text{цел}}}{B(t)} \right)^p, \text{ при } q_{\text{вх_цел}}(t) \geq q_{\text{вх_мин}}(t).$$

Описанные выше математические условия задают алгоритм и логику работы системы управления качеством состояния буферных зон транспортеров роботизированных линий розлива для снижения шумовых эмиссий, предотвращения их переполнения, брака и

боя тары. На рисунке 10 изображена структура разработанной системы и результаты работы алгоритма подсчета тары и детекции брака и боя.

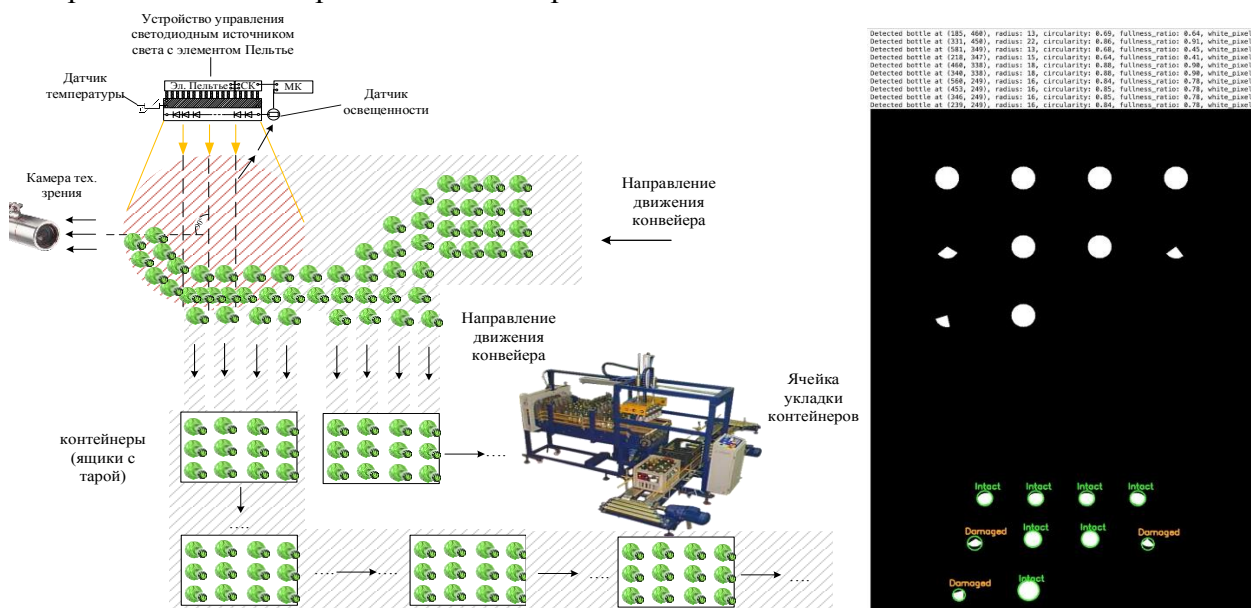


Рисунок 10 – Схематичное изображение системы отражения света от горлышка бутылки и попадания его в камеру с техническим зрением (слева) и демонстрации работы алгоритма детектирования битой тары (справа)

Эффективность данной системы достигается за счет использования камеры технического зрения, которая настроена улавливать свет, отраженный от горлышек бутылок и взаимодействовать с управляющей программой в зависимости от заполнения буферных зон. Для этого разработано и запатентовано специализированное устройство управления светодиодным светильником (номер патента RU197321U1), освещающее зону контроля для обеспечения оптимальных параметров работы системы визуального контроля.

В четвертом разделе представлена верификация предлагаемых алгоритмов, моделей и методик повышения качества организации роботизированных линий розлива на основе компьютерного моделирования и экспериментального анализа. В частности, исследования эффективности предложенных решений для управления качеством состояния буферных зон и системы детекции брака и боя тары проведены на двухбуферной системе с параметрами РЛР, представленными в табл. 3, где имитировался сбой на ячейке Я₀ с 180-й секунды с экспоненциальным восстановлением заполнения (см рис. 11), показали, что в нормальных условиях заполнение транспортеров и производительность ячеек стабилизируются на целевых уровнях, а после сбоя корректно снижаются и затем возвращаются к номиналу.

Таблица 3 – Начальные параметры и условия моделирования РЛР

Параметр	Значение	Описание
Вместимость транспортёра Т _{0.В}	1600 бут.	Целевое значение заполнения в моделировании
Вместимость транспортёра Т _{1.В}	625 бут.	Целевое значение заполнения в моделировании
Производительность ячейки Я ₀	16,000 бут./ч	Начальное значение производительности
Производительность ячейки Я ₁	15,000 бут./ч	Начальное значение производительности
Производительность ячейки Я ₂	14,500 бут./ч	Начальное значение производительности
Время моделирования	600 секунд	Продолжительность эксперимента
Сбой на ячейке М ₀	Начиная с 180-й секунды	Имитация сбоя для анализа поведения системы
Режим заполнения при сбое	Экспоненциальное восстановление	Восстановление после сбоя на ячейке Я ₀

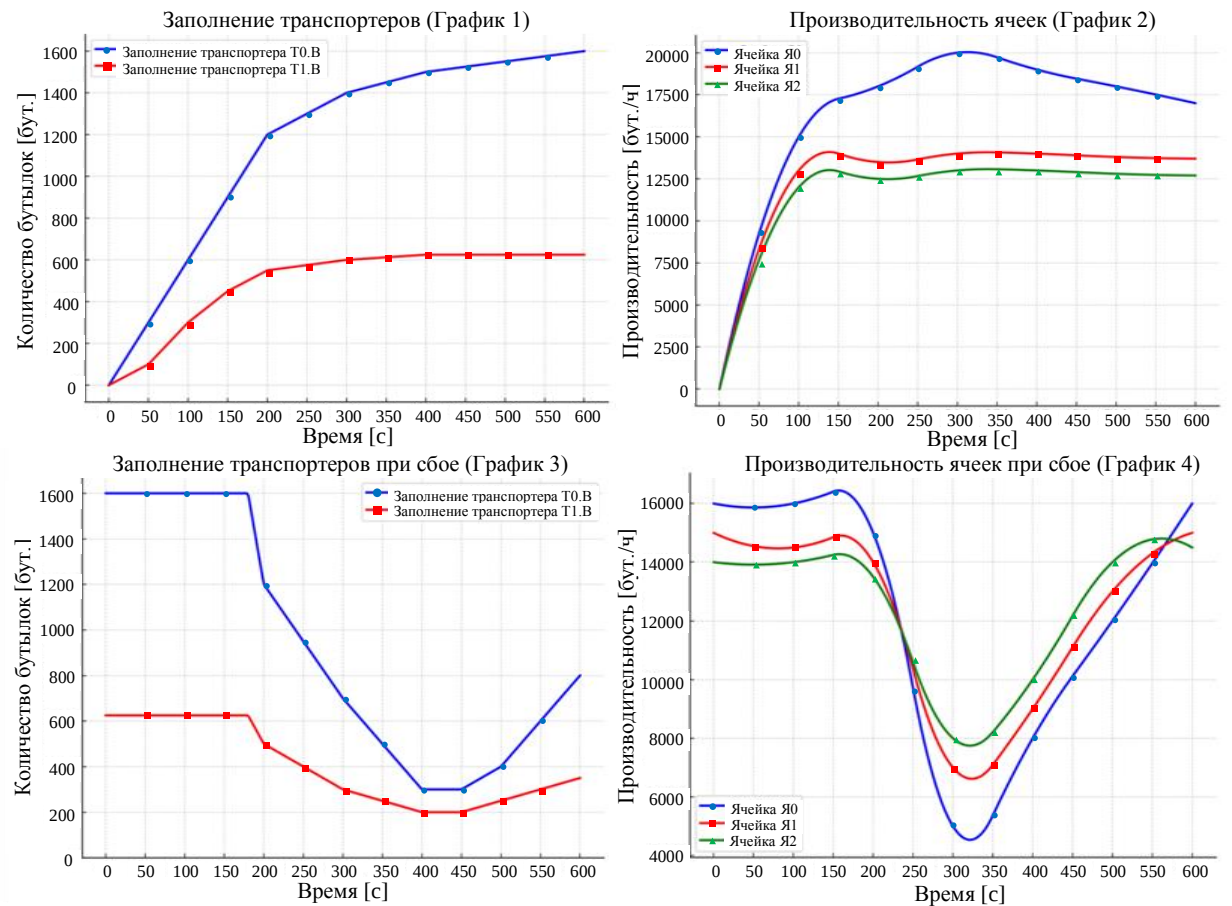


Рисунок 11 – Результаты симуляции работы модели бесступенчатого регулирования с применением разработанной системы визуального контроля

Полученные результаты, отображают изменение заполнения и производительности ячеек в нормальных условиях и при сбое и подтверждают адекватность системы, позволяющей управлять качеством состояния буферных зон для снижения шумовых эмиссий без снижения производительности линии.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

В диссертационной работе достигнута поставленная цель исследования. Полученные в ходе исследования результаты позволяют обеспечить принятие обоснованных решений в области контроля и повышения качества организации за счёт оперативного выявления отклонений и повышения точности оценки состояния процессов и узлов.

Автором достигнуты следующие результаты диссертационного исследования:

1. Квалиметрическая модель оценки и управления качеством роботизированного розлива на основе контрольных функций и коэффициентов, основанная на эксплуатационном анализе параметров технологических операций роботизированного розлива. **Применение предложенной квалиметрической модели позволило повысить эффективность подбора узлов линии и их технического обслуживания на 3-5%.**

2. Методика оценки качества организации технологических процессов роботизированного розлива и эффективности функционирования линии, разработанная на основе предложенных эксплуатационных коэффициентов, что позволяет выявлять отклонения и оперативно внедрять корректирующие меры. **Внедрение методики позволяет усовершенствовать многоступенчатую систему контроля и сократить количество дефектов в производстве на 2-4%.**

3. Методика организации производства для решения задач промышленной и экологической безопасности в области снижения шумовых эмиссий, возникающих в процессе работы роботизированных линий розлива, с учетом отраслевых требований к акустической безопасности и комфорту персонала. **Применение методики на**

производствах розливного и схожего типа позволило снизить уровень шума на 6-8 дБ(А), повысить условия и производительность труда на 1-3% за счёт оптимизации скорости движения конвейеров и минимизации воздействия шума на операторов на производственных объектах.

4. Система управления качеством состояния буферных зон транспортеров роботизированных линий розлива для снижения шумовых эмиссий, предотвращения их переполнения, брака и боя тары **позволила снизить повреждение тары и повысить эффективность детекции брака и боя тары на 3-6%.**

Полученные результаты соответствуют приоритетам государственной промышленной политики, изложенным в Федеральном законе от 31.12.2014 № 488-ФЗ «О промышленной политике в Российской Федерации», а также положениям Федерального закона от 04.08.2023 № 478-ФЗ «О развитии технологических компаний в Российской Федерации» и задачам национального проекта технологического лидерства «Средства производства и автоматизации».

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ИЗЛОЖЕНО В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ:

Публикации в ведущих рецензируемых научных изданиях

1. Квас Е.С. Методика контроля и снижения шума, генерируемого роботизированной линией розлива. / Квас Е.С. // Автоматизация в промышленности. 2025. № 8. С. 3-9.
2. Квас Е.С. Оптимизация роботизированных линий розлива на основе математического моделирования и анализа процессов эффективности. / Квас Е.С. // Вестник Ижевского государственного технического университета имени М. Т. Калашникова. 2025. Т. 28, № 1. С. 46-58.
3. Квас Е. С. Модель управления качеством роботизированных линий розлива на основе локализации неисправностей. / Квас Е.С. // Петербургский экономический журнал. 2025. № 1 С.28-41.
4. Квас Е.С. Прогнозирование срока службы роботизированных линий розлива на основе эксплуатационных коэффициентов. / Квас Е.С. // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2025. № 1. С. 244-258.
5. Квас Е.С. Адаптивный алгоритм определения уровня жидкости в таре на роботизированных линиях розлива. / Квас Е.С., Бобрышов А.П., Кузьменко В.П., Солёный С.В. // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2025. № 2. С.163-178.
6. Квас Е. С. Оценка эффективности роботизированных линий розлива с использованием имитационного моделирования и эксплуатационных коэффициентов. / Квас Е. С., Кузьменко В. П. // Вестник Ижевского государственного технического университета имени М. Т. Калашникова. Т. 27, № 4. С. 31-44. 2024.
7. Квас Е. С. Алгоритм контроля качества и стабилизации параметров потока жидкостей в роботизированных системах розлива. / Квас Е. С., Кузьменко В.П., Солёный С.В. // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. № 1. 2025. С.77-87.
8. Квас Е.С. Исследование адаптивных свойств модели визуального контроля для роботизированных линий розлива. / Квас Е.С., Кузьменко В.П., Солёный С.В. // Петербургский экономический журнал. 2024. № 4. С. 71-86.

Статьи в изданиях индексируемых в реферативных базах

9. Kvas E.S. Robot for inspection and maintenance of overhead power lines. / Kvas E.S. Kuzmenko V.P., Solyonyj S.V., Solenaya O.Ya., Rysin A.V. // Smart Innovation, Systems and Technologies. 2021. T. 187. C. 487-497.
10. Kvas E.S., Modeling of the operation modes of the electric power system to improve its sustainability of functioning. / Kvas E.S., Shishlakov V. F., Solenaya O. Ya., Solyonyj S. V., Kuzmenko V.P., Rysin A.V. // JOP Conference Series: Metrological Support of Innovative Technologies. Vol. 1515. Krasnoyarsk, Russia: Institute of Physics and IOP Publishing Limited, 2020. P. 52083.

11. Kvas E.S. Robotic power line maintenance systems. / Kvas E.S., Shishlakov V. F., Solenaya O. Ya., Solyonyj S. V., Kuzmenko V.P., Rysin A.V. // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations. 2020. С. 12200.

Статьи и материалы конференций

12. Квас Е.С. Симуляционное моделирование управлением емкости буфера как ключевой фактор оптимизации производительности роботизированной линии розлива. / Квас Е.С., Солёный С. В., Кузьменко В. П. // Инновационное приборостроение. 2024. Т. 3. № 5. С. 10-22.

13. Квас Е. С. Организация безопасного доступа к системе промышленной автоматизации и IoT систем. / Квас Е.С., Кузьменко В. П., Сериков С. А., Солёный С. В., Шишляков В. Ф. // Завалишинские чтения 19: Сборник докладов конференции, Санкт-Петербург 17-20 апреля 2019 г. Санкт-Петербург: ГУАП, 2019. С. 215-218.

14. Квас Е.С. Гибриды в машиностроении. / Квас Е.С., Павлюков Д.А., Петрова Л.А., Рысин А.В. // Автоматизация технологических объектов и процессов. Поиск молодых: Сборник научных трудов XX Международной научно-технической конференции аспирантов и студентов (в рамках 6-го Международного научного форума «Инновационные перспективы Донбасса»), Донецк 26-28 мая 2020 г. Донецк: ДонНТУ, 2020. С. 170-173.

Тезисы и доклады на научно-практических конференциях

15. Квас Е.С. Поворотный испытательный одноосевой стенд. / Квас Е.С., Бабчинский С.Г., Сериков С.А. // Волновая электроника и инфокоммуникационные системы. Материалы XXIII международной научной конференции в 2 ч, Санкт-Петербург, 01-05 июня 2020 года. Санкт-Петербург: ГУАП, 2020. С. 248-254.

16. Квас Е.С. Разработка системы мониторинга и быстрого машинного обучения робототехнических комплексов посредством облачных технологий. / Квас Е.С., Горин Н.В., Добрышев Н.К., Рысин А.В., Кузьменко В.П. // Волновая электроника и инфокоммуникационные системы. Сборник статей XXIII международной научной конференции в 2 ч, Санкт-Петербург, 01-05 июня 2020 года. Санкт-Петербург: ГУАП, 2020. С. 255-262.

17. Квас Е.С. Кинематическая схема гибридной платформы. / Квас Е.С., Павлюков Д.А., Карпов Е.И. // Волновая электроника и инфокоммуникационные системы. Сборник статей XXIII международной научной конференции в 2 ч, Санкт-Петербург, 01-05 июня 2020 г. Санкт-Петербург: ГУАП, 2020. С. 353-355.

18. Квас Е.С. Проблемы применения систем автоматики в управлении электромеханическими устройствами. / Квас Е.С., Кузьменко В.П., Рысин А.В., Солёная О.Я., Шишляков В.Ф. // Волновая электроника и инфокоммуникационные системы. Сборник статей XXII Международной научной конференции в 2 ч, Санкт-Петербург, 03-07 июня 2019 г. Санкт-Петербург: ГУАП. 2019. С. 250-253.

19. Квас Е.С. Мониторинг аварий и промежуточного положения исполнительных электромеханических устройств. / Квас Е.С., Кузьменко В. П., Рысин А. В., Солёный С. В., Шишляков В. Ф. // Волновая электроника и инфокоммуникационные системы. Сборник статей XXII Международной научной конференции в 2 ч, Санкт-Петербург, 03-07 июня 2019 г. Санкт-Петербург: ГУАП. 2019. С. 254-256.

Авторские свидетельства, патенты, информационные карты, алгоритмы

20. Квас Е. С. Программа моделирования алгоритма бесступенчатого управления буферами роботизированных линий розлива: свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ / Квас Е. С., Солёный С. В., Кузьменко В. П.// рег. №2024684762 от 21.10.2024 г.

21. Квас Е. С. Программа для расчета эксплуатационных коэффициентов контроля качества роботизированной линии розлива: свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ / Квас Е. С., Солёный С. В., Кузьменко В. П.// рег. №2024669099 от 14.08.2024 г.

22. Квас. Е.С. Устройство управления светодиодным светильником: свидетельство о гос. регистрации патента на полезную модель / Квас Е.С. Кузьменко В.П., Солёный С.В., Солёная О.Я., Рысин А.В., Шишляков В.Ф. // рег. №197321 от 21.04.2020 г.