

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
АЭРОКОСМИЧЕСКОГО ПРИБОРОСТРОЕНИЯ»

На правах рукописи



Квас Евгений Станиславович

Модели и методики повышения качества организации роботизированных
линий розлива

2.5.22 – Управление качеством продукции. Стандартизация. Организация
производства (технические науки)

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель
кандидат технических наук, доцент
Кузьменко Владимир Павлович

Санкт-Петербург – 2025

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	6
1 ТЕХНИЧЕСКИЙ ОБЗОР И АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ПРОБЛЕМЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ И КАЧЕСТВА ОРГАНИЗАЦИИ РОБОТИЗИРОВАННЫХ ЛИНИЙ.....	18
1.1 Анализ развития технологий роботизированных линий и их проблем в области управления качеством продукции и организации производства	18
1.2 Анализ типовых принципов построения систем роботизированного розлива напитков	19
1.2.1 Структура и эксплуатация конвейеров для перемещения тары и контейнеров с тарой	20
1.2.2 Использование буферов для повышения эффективности систем розлива	22
1.2.3 Текущий уровень технологий в управлении конвейерами роботизированных линий	27
1.3 Текущие тенденции и проблемы развития систем контроля параметров роботизированных линий розлива	30
1.3.1 Проблемы обеспечения требуемой акустической обстановки в зоне роботизированных линий розлива	31
1.4 Анализ действующей нормативной документации в области управления качеством организации роботизированных линий розлива	35
Результаты и выводы по разделу 1	40
2 РАЗРАБОТКА И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ НАУЧНЫХ ИНСТРУМЕНТОВ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ОРГАНИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ РОБОТИЗИРОВАННОГО РОЗЛИВА	42
2.1 Разработка квалитетической модели оценки и управления качеством роботизированного розлива.....	42
2.2 Методика оценки качества организации технологических процессов роботизированного розлива и эффективности функционирования линии.....	53
2.2.1 Практическое применение методики оценки качества организации технологических процессов роботизированного розлива	62

2.3 Апробация методики оценки качества организации технологических процессов роботизированного розлива и эффективности функционирования линии.....	73
2.4 Контроль уровней шума, генерируемого роботизированной линией розлива.....	81
2.4.1 Разработка методики организации производства для решения задач промышленной и экологической безопасности в области снижения шумовых эмиссий, возникающих в процессе работы роботизированных линий розлива	85
2.4.2 Алгоритм применения методики организации производства для решения задач промышленной и экологической безопасности в области снижения шумовых эмиссий, возникающих в процессе работы роботизированных линий розлива.....	86
2.4.2.1 Практический пример использования разработанной методики организации производства для решения задач промышленной и экологической безопасности в области снижения шумовых эмиссий, возникающих в процессе работы роботизированных линий розлива.....	90
Результаты и выводы по разделу 2	94
3 РАЗРАБОТКА СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ СОСТОЯНИЯ БУФЕРНЫХ ЗОН РОБОТИЗИРОВАННЫХ ЛИНИЙ РОЗЛИВА.....	96
3.1 Принципы организации системы управления качеством состояния конвейера и буфера на линии розлива	96
3.1.1 Стабилизация заполнения буфера	99
3.2 Концепция и модель системы управления качеством состояния буферных зон транспортеров роботизированных линий розлива	101
3.2.1 Разработка алгоритма функционирования системы управления качеством состояния буферных зон	105
3.2.2 Структура алгоритма управления качеством состояния буферных зон транспортеров роботизированных линий розлива	107
3.2.3 Структура алгоритма управления качеством состояния буферов в рабочем состоянии I	108
3.2.4 Структура алгоритма управления качеством состояния буферов в рабочем состоянии II	111
3.2.5 Структура алгоритма управления качеством состояния буферов в рабочем состоянии III.....	115

3.3 Разработка требований подсчета тары для реализации управления качеством состояния буферных зон	123
3.3.1 Требования к системе датчиков для подсчета тары в группе	124
3.3.2 Конструкция предлагаемой системы управления качеством состояния буферных зон транспортеров роботизированных линий розлива	126
3.3.2.1 Описание способа расчета углов преломления света при реализации визуального контроля в системе управления качеством состояния буферных зон.....	131
3.4 Симуляция алгоритма бесступенчатого регулирования буфера в системе управления качеством состояния буферных зон	138
3.4.1 Допущения и требования к симуляции	139
3.4.2 Описание элементов симуляции системы.....	140
3.4.3 Построение симуляционной модели применения разработанной системы управления качеством состояния буферных зон.....	146
Результаты и выводы по разделу 3	150
4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ И ОБОБЩЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ПРИМЕНЕНИЯ РАЗРАБОТАННЫХ МЕТОДОЛОГИЧЕСКИХ И СИСТЕМОТЕХНИЧЕСКИХ ПРИНЦИПОВ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ОРГАНИЗАЦИИ ПРОЦЕССОВ РОБОТИЗИРОВАННОГО РОЗЛИВА	152
4.1 Валидация алгоритма регулирования буфера с разработанной системой управления качеством состояния буферных зон транспортеров роботизированных линий розлива.....	152
4.2 Сравнительный анализ эффективности различных концепций регулирования буферов на основе параметров отказов и времени восстановления модулей линии.....	157
4.3 Оценка эффективности предложенной методики организации производства для контроля шумовых эмиссий на роботизированных линиях розлива	160
Результаты и выводы по разделу 4	162
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	163
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ.....	165
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	167
ПРИЛОЖЕНИЕ А. Диаграмма внедрения разработанных коэффициентов специализированных критериев показателей качества в СМК РЛР	178

ПРИЛОЖЕНИЕ Б. Программа расчета эксплуатационных коэффициентов стандартизации качества для роботизированной линии розлива на языке Python	179
ПРИЛОЖЕНИЕ В. Состояния переключателей и параметры управления на основе счётчиков скопления для буферной системы	183
ПРИЛОЖЕНИЕ Г. Программа симуляции работы алгоритма распознавания и визуального контроля наличия битой тары в роботизированной линии розлива.....	188
ПРИЛОЖЕНИЕ Д. Программа моделирования алгоритма бесступенчатого управления буферами роботизированных линий розлива	192
ПРИЛОЖЕНИЕ Е. Описание параметров модели транспортного модуля используемые в симуляции управления буферами	198
ПРИЛОЖЕНИЕ Ж. Свидетельства о государственной регистрации патента на полезную модель и программ ЭВМ	200
ПРИЛОЖЕНИЕ З. Акт о внедрении результатов диссертационной работы в ФГАОУ ВО ГУАП	203
ПРИЛОЖЕНИЕ И. Акт внедрения о внедрении результатов диссертационной работы в ООО «Иннотех».....	205
ПРИЛОЖЕНИЕ К. Акт внедрения о внедрении результатов диссертационной работы в ООО «Симертех».....	206
ПРИЛОЖЕНИЕ Л. Акт внедрения о внедрении результатов диссертационной работы в ООО «Валдай Роботы»	207
ПРИЛОЖЕНИЕ М. Акт внедрения о внедрении результатов диссертационной работы в ООО «Полюс».....	208

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы.

Приоритетными направлениями промышленной политики Российской Федерации являются повышение конкурентоспособности производства и эффективное продвижение наукоемкой продукции на внутреннем и внешнем рынках. В Послании Федеральному собранию 21 февраля 2023 года Президент России отметил важность внедрения и развития современных технологий для экономического роста и устойчивого развития страны, подчеркнув их ключевую роль в государственной политике России [1].

Федеральный закон от 4 августа 2023 года № 478-ФЗ "О развитии технологических компаний в Российской Федерации" также подчеркивает значимость инновационных технологий и поддержку технологических компаний, что способствует созданию благоприятных условий для их развития и внедрения передовых технологий в производственные процессы [1].

Реализация национальных проектов технологического лидерства, запланированная министерством промышленности и торговли Российской Федерации на период с 2025 по 2030 год, играет ключевую роль в достижении поставленных целей. Одним из наиболее приоритетных направлений, а данных инициативах отмечен проект «Средства производства и автоматизация», включающий три федеральных инициативы: развитие средств производства и инструментальной промышленности, робототехники, а также подготовку квалифицированных кадров.

По данным аналитических отчетов объем производства серийной продукции, поставляемой в стеклянных бутылках, в России в 2025 году может вырасти на 4% год к году, превысив 13 млрд штук, причем по итогам 2024 года показатель оценивался в 12,5 млрд штук, что на 5% больше, чем годом ранее.

Улучшение характеристик упаковочной продукции, совокупно определяющих её качество, а также повышение эффективности

производственных процессов в целом или отдельных их частей, достигаются внедрением цифровых технологий таких как промышленный интернет вещей, машинное обучение и искусственный интеллект, которые позволяют не только автоматизировать операции, но и обеспечить более глубокую аналитическую поддержку для оптимизации производственных цепочек, прогнозирования отказов оборудования и повышения общей производительности производственных линий. Применение данных цифровых технологий особенно актуально для роботизированных линий розлива или упаковочных роботизированных линий, где требуется гибкость и точность управления процессами, что помогает более эффективно внедрять функциональные процессы бесступенчатого регулирования материальных потоков линии, которые являются ключевым необходимым элементом современных роботизированных линий для обеспечения их эффективности и безопасности [3].

С введением в России Федерального закона от 31.12.2014 N 488-ФЗ «О промышленной политике в Российской Федерации» [2], направленного на стимулирование развития промышленного производства и внедрения современных технологий, обеспечение безопасности и повышения качества продукции и услуг, все больше происходит внедрения моделей и методов управления качеством производственных операций и функциональных процессов роботизированных линий розлива. Это способствует повышению эффективности производства, улучшению качества продукции и повышению конкурентоспособности на внутреннем и внешнем рынках. Однако использование таких высокотехнологичных систем требует значительных инвестиций в оборудование и обучение персонала, а также строгого соблюдения технических стандартов и регламентов для обеспечения бесперебойной работы и безопасности производственных процессов [3-4].

Национальными стандартами определено, что эффективность любого производственного оборудования в течение заявленного срока службы не должна снижаться более чем на 20%. В то время как конец срока службы

определяется как полный отказ устройства. При этом шумовые эмиссии являются второй по величине проблемой в отрасли роботизированного розлива, о чем свидетельствуют многочисленные данные мировых консалтинговых компаний, наряду с усложняющимися требованиями отраслевых международных стандартов, таких как ISO 9001, ISO 45001.

Таким образом, актуальность темы диссертационного исследования обусловлена необходимостью разрешения противоречия между растущей потребностью повышения производительности линий розлива и увеличением генерируемых при этом шумовых эмиссий, а существующие подходы к организации роботизированного розлива не в полной мере удовлетворяют действующим нормативно-техническим требованиям промышленной и экологической безопасности.

Данное противоречие в настоящий момент решается только снижением производительности и при попытках организовать пассивную акустически защищенную производственную среду. В связи с чем формируется научно-техническая проблема управления качеством организации роботизированных линий розлива для контроля и снижения шумовых эмиссий без потери производительности линии.

Дополнительно актуальность темы подтверждается отсутствием комплексного научно-методического инструментария по созданию унифицированных подходов управления качеством организации производственных процессов роботизированного розлива.

Степень разработки проблемы. Значительный научный вклад в разработку процессов управления качеством внесли отечественные ученые Ю.П. Адлер, Б.В. Бойцов, В.А. Васильев, А.Г. Варжапетян, А.В. Гличев, М.М. Кане, и др.

Вопросы организации производства получили развитие в работах Г.И. Коршунова, 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, М.В. Радлевского, А.Ш. Галиева, В.В. Мироненко, Г.И. Загорского, С.А. Курилова, В.Д. Шапиро.

Для обеспечения качества и надежности автоматизированных производственных процессов, включая упаковочные и розливные линии, разработан ряд стандартов, охватывающих различные аспекты метрологии, надежности и безопасности систем. Например, ГОСТ 16299-2022 устанавливает основные термины и определения в области упаковки, что важно для стандартизации процессов на производственных линиях.

Нормативные документы ГОСТ 27.002-2015 и ГОСТ 27.003-2016 определяют термины и правила задания требований по надежности в технике, охватывая как производственные процессы, так и эксплуатацию оборудования на производственных линиях. Также важным является ГОСТ Р 34.003-90, который устанавливает основные положения для автоматизированных систем, включая их проектирование и эксплуатацию, что напрямую влияет на эффективность производственных процессов. Для обеспечения качества продукции и организации производственных процессов применяется ГОСТ Р ИСО 9001-2015, который регулирует системы менеджмента качества на предприятиях, включая автоматизированные производственные линии.

Несмотря на наличие множества отечественных и международных стандартов, результаты анализа показывают, что точные модели и процедуры контроля и обеспечения качества на автоматизированных упаковочных и розливных линиях требуют дальнейшего развития и уточнения, а существующие нормативные документы не обеспечивают необходимой полноты информации для эффективного управления качеством данных объектов.

Проблема обеспечения качества и надежности автоматизированных производственных систем также активно обсуждается в научных кругах. В частности, исследования показывают, что внедрение современных технологий автоматизации часто сопровождается вызовами, связанными с надежностью и стабильностью работы систем в условиях повышенных требований к

производительности и точности [3, 4, 5]. Отмечается, что «широкое использование автоматизированных систем управления на производственных линиях может привести к усложнению задач по поддержанию стабильного качества продукции и безопасности технологических процессов» [3, 5, 6].

Сравнивая описанные существующие требования к стандартизации производства, его безопасности, а также к минимально возможной скорости транспортной ленты для снижения шумовых эмиссий, с требованием высокой производительности регулируемых производственных ячеек и необходимого увеличения скорости транспортеров для сокращения времени задержек и увеличения эффективности производства, возникает конфликт целей, заложенный в требованиях к системе организации управления производством и контроля качества производства с целью обеспечения его заданного качества и безопасности рабочих мест. Это противоречие между эффективным и при этом малозумным и безопасным управлением производствами с конвейерными линиями необходимо разрешить.

Таким образом, проблема обеспечения качества и надежности автоматизированных производственных линий, определили выбор темы, цели и задач диссертационной работы.

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 квалиметрической 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 исследования. В ходе исследования использованы методы унификации, агрегатирования, натурных испытаний, моделирования и статистики. В качестве инструментов моделирования применялись современные пакеты прикладных программ: AutoCAD, SolidWorks для 3D моделирования и анализа конструкций, MATLAB для моделирования и оптимизации алгоритмов, а также Python с использованием библиотек NumPy, Pandas, и Matplotlib для проведения численных вычислений, статистического анализа, обработки и визуализации данных.

Экспериментальные исследования проводились с использованием современных электроизмерительных и электронных приборов: трехфазный анализатор параметров электросетей, качества и количества электроэнергии С.А 8335 QUALISTAR PLUS для измерения и анализа показателей электрической сети, тепловизор FLUKE TiS20 для проведения теплового анализа и диагностики тепловых характеристик оборудования,

профессиональный шумомер Benetech GM1356 для измерения уровня шума, камера технического зрения типа MV-CA016-10UC для визуального контроля и анализа, а также люксметр типа АРГУС-07 для измерения освещенности, необходимой для корректной работы камеры технического зрения.

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

Положения, выносимые на защиту:

1. Квалиметрическая 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.

Научной новизной обладают следующие результаты исследования:

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 полученных научных результатов состоит в следующем:

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 управления и регулирования скорости приводных механизмов конвейерных систем, оценки качества функционирования роботизированных линий розлива, 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.

Внедрение результатов диссертационного исследования

Результаты основных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертационном исследовании, нашли практическое применение в методиках управления качеством и оптимизации процессов на предприятиях ООО «Полюс», 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.

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.

Апробация результатов работы. Основные результаты исследования докладывались и обсуждались на различных конференциях, семинарах и круглых столах:

- Ежегодная научно-практическая конференция о цифровых технологиях в промышленности «Эра интеллекта» 2024 г.
- 35-я Международная научно-техническая конференция «Экстремальная робототехника», 2024 г.
- Международный форум Digital Innopolis Days 2024 & Innopolis AI Conference, 2024 г.;
- Metrological support of innovative technologies: III Международный форум в рамках празднования 80-летия Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения, 300-летия Российской академии наук, Санкт-Петербург, 2021 г.;
- XX Международная научно-техническая конференция аспирантов и студентов (в рамках 6-го Международного научного форума «Инновационные перспективы Донбасса»). 2020 г.;
- JOP Conference Series: Metrological Support of Innovative Technologies. Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations. Krasnoyarsk, Russia, 2020 г.;
- IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations. 2020 г.;

– The priorities of the world science: experiments and scientific debate
Proceedings of the XXIII International scientific conference At: Morrisville, NC,
USA 2020;

– XXIII Международная научная конференции «Волновая электроника и
инфокоммуникационные системы» 2020 г.;

– 2020 Wave Electronics and its Application in Information and
Telecommunication Systems, WECONF 2020;

– 14th International Conference on Electromechanics and Robotics
«Zavalishin's Readings» (ER(ZR)-2019);

– I Международный форум «Метрологическое обеспечение
инновационных технологий». г. Санкт-Петербург, (ГУАП) 2019 г.;

– XXII Международная научная конференции «Волновая электроника и
инфокоммуникационные системы» 2019 г.;

Публикации. Основные результаты диссертационной работы
докладывались и обсуждались на 11 международных научных конференциях.

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, 3
статьи в сборниках докладов, 3 в сборниках трудов конференций, 3
свидетельства о государственной регистрации.

Структура диссертационной работы. Диссертация состоит из
введения, четырех глав, заключения, списка источников и приложений.
Основной текст диссертации представлен на 177 страницах, включая 15
таблиц и 53 рисунка и список используемых источников. Общий объем
диссертационной работы с учетом приложений составляет 208 страниц.

1 ТЕХНИЧЕСКИЙ ОБЗОР И АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ПРОБЛЕМЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ И КАЧЕСТВА ОРГАНИЗАЦИИ РОБОТИЗИРОВАННЫХ ЛИНИЙ

1.1 Анализ развития технологий роботизированных линий и их проблем в области управления качеством продукции и организации производства

Упаковка товаров, особенно в пищевой промышленности, представляет собой многоступенчатый процесс. Упакованный товар проходит множество производственных этапов, пока не будет готов к продаже. Линия розлива напитков, представляющая собой особую форму упаковочной системы, состоит из большого количества отдельных узлов, выполняющих отдельные производственные операции от заполнения упаковочного материала (например, бутылки) до формирования готовой упаковки (например, наполненной бутылки) и погрузочных устройств (например, паллеты) [5, 6, 7]. Их структура может сильно варьироваться в зависимости от требований, но центральным элементом всегда является процесс розлива напитка в упаковку (филлер). Все предшествующие и последующие этапы производства координируются с этим процессом, чтобы избежать потери качества упакованных товаров, вызванной газообменом с окружающей атмосферой [8].

Простои на этапе розлива также приводят к значительным экономическим потерям, а увеличение эффективности использования упаковочного оборудования хотя бы на 1%, на пример за счет использования функции быстрого перезапуска для сокращения времени простоя роботизированной ячейки производственной линии увеличивает эффективность системы с 86,81% до 90,29%. [9].

На рисунке 1 представлено структурное представление и обобщенная классификация выявленных проблем в области стандартизации и управления качеством роботизированных линий упаковки и розлива.

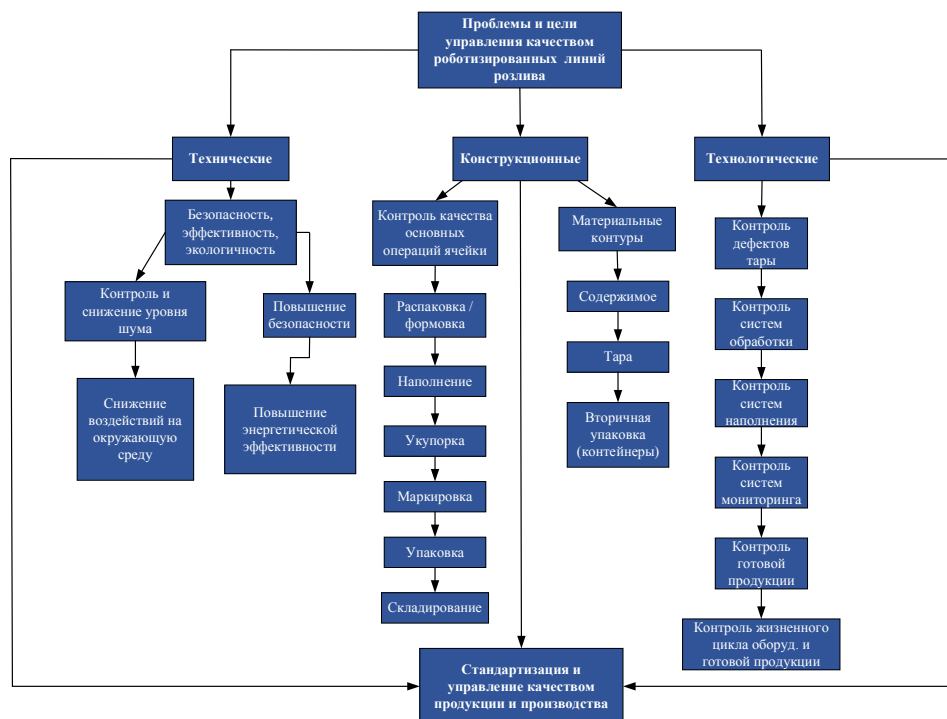


Рисунок 1 – Структурное представление и обобщенная классификация выявленных проблем стандартизации и управления качеством роботизированных упаковок линий розлива

Учитывая, что розлив и упаковка напитков составляют почти треть производственных затрат, эта область производства предлагает большой потенциал для экономии. При этом конвейеры являются одним из основных источников шума на таких упаковочных линиях, что особенно важно в связи с ужесточением законодательных требований по защите работников от шумовых рисков, вступивших в силу в 2022 году [10].

1.2 Анализ типовых принципов построения систем роботизированного розлива напитков

В зависимости от требований к конечному продукту, конструкция линий розлива напитков может значительно различаться. Она варьируется от линейных систем для использования одноразовой упаковки до систем с тремя материальными циклами для розлива и упаковки вторичной тары и так далее.

На рисунке 2 представлен обобщенный состав системы розлива.

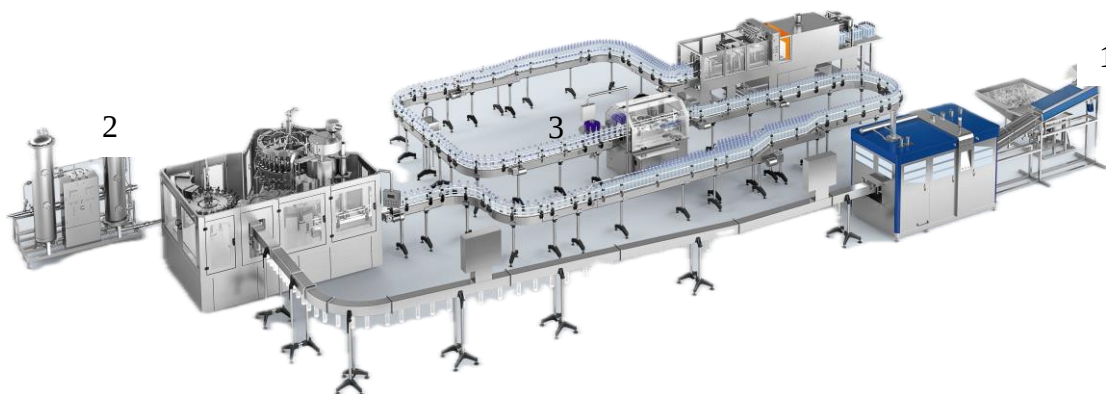


Рисунок 2 – Обобщенный состав роботизированной установки розлива напитков в стеклянную тару, где 1 – ячейка для выдува ПЭТ тары, 2 – ячейка для водоподготовки, миксер и филлер, 3 – ячейка для маркировки, 4 – ячейка для формирования групповой упаковки (кистерс)

Здесь блок выдува бутылок - эта установка используется для выдувания ПЭТ-преформ в готовые бутылки (бломакс); этикетировочный блок – здесь бутылки маркируются этикетками; блок мойки бутылок – секция для промывки бутылок перед розливом; блок наполнения и укупорки – здесь бутылки наполняются продуктом и закрываются крышками; блок инспекции качества – секция для проверки заполненных и укупоренных бутылок на предмет утечек или других дефектов; блок упаковки – этот блок используется для групповой упаковки бутылок в коробки или на поддоны.

Другие типы систем и функции отдельных ячеек описаны в более узконаправленных работах: [11], [12], [13], где в целом предлагаются методы повышения экономичности автоматизированных систем упаковки бутылок с использованием датчиков и исполнительных механизмов, предназначенная для повышения эффективности малых производств. Неправильное наполнение бутылок вынуждает производителей отбраковывать целые партии продукции, что ведет к значительным финансовым потерям [14, 15].

1.2.1 Структура и эксплуатация конвейеров для перемещения тары и контейнеров с тарой

Конвейеры интегрированы практически между всеми ячейками на РЛР (Рисунок 3). Их основная задача – это обеспечение транспортировки

материальных потоков между отдельными ячейками, тем самым обеспечивая их взаимодействие. Помимо этой задачи, контейнерные линии служат для разделения ячеек, предотвращая тем самым остановку всей системы из-за сбоев в работе отдельных ячеек. Данная функция, как правило, называется буфером, и является особенно важной, учитывая подверженность отдельных ячеек сбоям в работе.

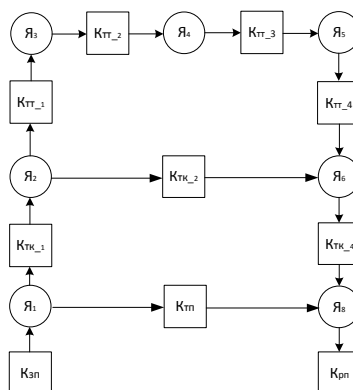


Рисунок 3 – Блок-схема многоразовой линии розлива напитков

На рисунке 3 приняты следующие обозначения: Я₁ – ячейка для разгрузки поддонов; Я₂ – ячейка для распаковки; Я₃ – ячейка для очистки тары; Я₄ – ячейка для проверки пустой тары; Я₅ – ячейка для наполнения и укупорки тары; Я₆ – ячейка для нанесения этикетов (этикетирования); Я₇ – ячейка для проверки и упаковки; К_{зп} – конвейер загрузки поддонов; К_{тп} – конвейер транспортировки поддонов; К_{тт} – конвейер разгрузки поддонов; К_{тк1-4} – конвейеры транспортировки контейнеров с тарой; К_{тт1-4} – конвейеры транспортировки тары.

Конвейерные ленты обычно выполняются в виде ленточных конвейеров. Как правило, они состоят из металлических плоских цепей, по которым перемещаются контейнеры. Цепи движутся по рамам и приводятся в движение электродвигателями. Сами бутылки перемещаются по рельсам на конвейерах (см. Рисунок 4) [16].

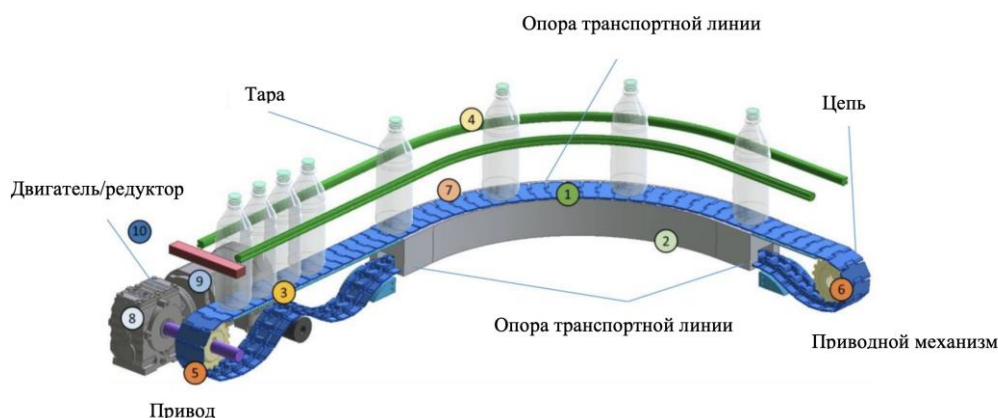


Рисунок 4 – Схема ленточного цепного конвейера для ПЭТ-бутылок, где 1 – рама, 2 – основание калотты (опорный элемент регулирования высоты конвейера) 3 –держатель рельса (фиксированный), 4 – борта, 5 – приводная звездочка, 6 – натяжитель 7 – направляющая лента, 8 – мотор-редуктор, 9 – соединение CIP (CIP (Clean-In-Place) connection – система для автоматической очистки внутренней поверхности полостей, 10 – ленточный конвейер.

1.2.2 Использование буферов для повышения эффективности систем розлива

Буферы используются не только на заводах по розливу напитков, но и на многих промышленных предприятиях, состоящих из нескольких технологических станций, для разъединения ячеек [17 - 25]. Множество исследований также было посвящено разработке конкретных подходов для предприятий по розливу напитков на основе решения общих математических подходов на основе решения задачи оптимизации [26, 27, 28, 29, 30].

Здесь основная проблема часто возникает из-за отсутствия или недостаточного внимания времени простоя. Согласно [31], распределение времени простоя отдельных ячеек является основным фактором, влияющим на проектирование буферов. Гарантированный КПД большинства ячеек, используемых в технологии розлива напитков, составляет от 92 до 98% [32]. Однако эффективность зависит от многих факторов, таких как используемые упаковочные материалы, фасуемый продукт и даже нанятый обслуживающий

персонал. Это было продемонстрировано в ходе многочисленных приемочных испытаний, проведенных кафедрой электромеханики и робототехники и лабораторией робототехники инженерной школы ГУАП, где установки для розлива были протестированы в соответствии с DIN 8783 [33].

Создавать слишком большие буферы неэкономично. Поэтому предлагается, чтобы время буферизации соответствовало, по крайней мере, MTTR, (аббр. от mean time to repair – среднее время, необходимое для восстановления работоспособности оборудования или системы после отказа) но по экономическим соображениям не превышало это время вдвое [34]. Определенная корреляция между эффективностью линии розлива, временем буферизации и средним временем необходимым для восстановления работоспособности задействованного оборудования линии показана на рисунке 5. Однако проблема, при проектировании новой системы еще неизвестно распределение времени простоя, что делает невозможным планирование буферных секций на основе MTTR. Поэтому на практике буферные секции обычно проектируются с учетом времени буферизации от 60 до 300 секунд или основаны на эмпирически определенных значениях [35].

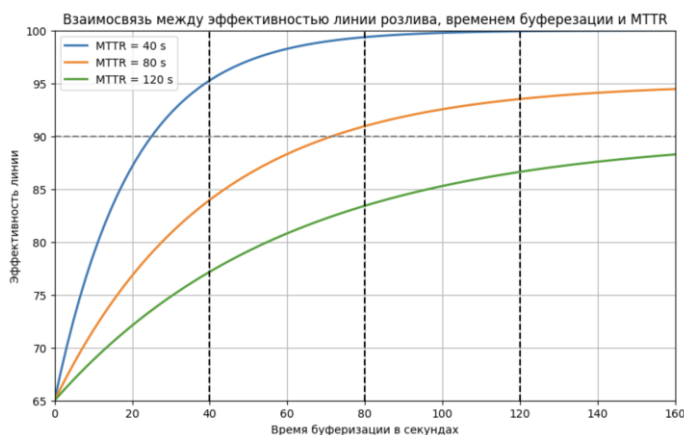


Рисунок 5 – Взаимосвязь между эффективностью линии розлива, временем буферизации и MTTR

В дополнение к MTTR наработка на отказ также влияет на эффективность буферов.

Основная задача буферов на заводах по розливу - защитить центральный блок от простоев, вызванных работой соседних блоков [36]. На рисунке 6 изображены возможные состояния конвейерной линии.

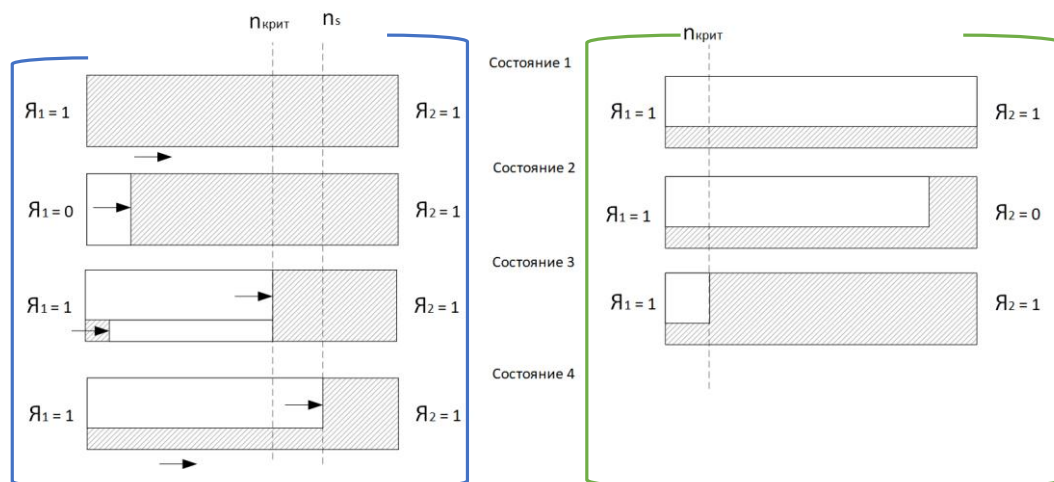


Рисунок 6 – Буферный режим для предотвращения блокировок и простоев

Левая часть рисунка 6, выделенная синими скобками представляет собой буфер защиты от истощения, где в состоянии 1 буфер полностью заполнен. Если предыдущая ячейка ($Я_1 = 0$) выходит из строя, буфер начинает опустошаться. Остаток бутылки перемещается в следующую ячейку. Предыдущая ячейка должна быть перезапущена до достижения критического количества тары на конвейере ($n_{\text{крит}}$), чтобы предотвратить остановку следующей ячейки ($Я_2$) (при количестве тары, меньшем, чем n_s).

Правая часть рисунка 6 (зеленые скобки) представляет собой антиблокировочный буфер. В своем целевом состоянии он пуст, за исключением основного потока тары. Основной поток служит только для транспортировки и, следовательно, для подачи бутылок в расположенную ниже ячейку ($Я_2$). Если последующая ячейка выходит из строя ($Я_2 = 0$), предыдущая ячейка может продолжать работать до тех пор, пока не будет достигнуто критическое количество тары или контейнеров $n_{\text{крит}}$. Оставшееся пространство в буфере используется для очистки предыдущей ячейки ($Я_1$).

Буферную емкость (С) можно рассчитать с хорошим приближением, если известна доступная площадь конвейера. Для этого необходимо доступную площадь (А) разделить на требуемое пространство для тары [38]:

$$C = 0,9 \cdot \frac{A}{e \cdot d},$$

где A – свободное пространство на конвейере; d – диаметр цилиндрической тары; e – расстояние между центрами бутылок в цилиндрической упаковке.

Бутылки идеально укладываются в наиболее плотную цилиндрическую упаковку, для этого необходимо добиваться максимальной плотности расстановки на конвейере (см. рис. 7).

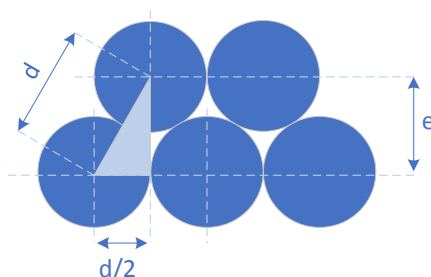


Рисунок 7 – Расположение бутылок в плотнейшем варианте расположения на конвейере

Требуемое для них пространство определяется расстоянием между центрами тары (e), умноженным на диаметр используемой тары:

$$e = \sqrt{3} \cdot d.$$

Коэффициент 0,9 является эмпирическим поправочным коэффициентом, который учитывает тот факт, что бутылки обычно не укладываются в наиболее плотную цилиндрическую упаковку, но статистически значимые нарушения в таком расположении имеют место.

Время простоя буфера ($t_{\text{простоя}}$) – это время, необходимое для свободного перемещения бутылок из ячейки, расположенной выше по потоку, в ячейку, расположенную ниже по потоку, включая задержку запуска ячейки.

Время простоя буфера можно рассчитать с хорошим приближением, аналогично емкости буфера. Для этого необходимы скорость движения конвейерных лент (v) и длина конвейера (L):

$$t_{\text{простоя}} = \frac{L}{v} + t_v,$$

где $t_{\text{простоя}}$ – время, необходимое для перемещения бутылок от предыдущей ячейки к последующей, включая время задержки на запуск ячейки; v – скорость конвейерных лент; L – длина транспортера; t_v – время задержки на запуск ячейки (если не равно 0).

С помощью времени простоя буфера можно определить, насколько эффективно рассчитан размер буфера. Длительное время простоя буфера указывает на неэффективный размер буфера, который либо имеет неблагоприятное соотношение длины к ширине (очень длинный), либо работает на очень низкой скорости. И то, и другое отрицательно влияет на эффективность буферизации [39].

Время буферизации указывает на время, в течение которого буфер способен создавать мосты.

Время буферизации может задаваться следующим образом:

$$t_{\text{компенсации}} = \frac{C}{q} + t_{\text{простоя}},$$

$t_{\text{компенсации}}$ – время, в течение которого буфер может компенсировать остановку предыдущей или последующей ячейки;

q – номинальная производительность предыдущей (для буферов режима ожидания (РО)) или последующей (для антиблокировочных (АБ) буферов) ячейки;

C – емкость буфера.

Таким образом, для конвейеров с тарой можно установить следующие взаимосвязи: 1) чем больше время ожидания, тем эффективнее можно разъединить ячейки, работающие на входе и на выходе, или тем дольше можно не допускать сбоев в работе центрального блока; 2) время буферизации может быть увеличено за счет увеличения емкости буфера или уменьшения времени простоя буфера; 3) время простоя буфера может зависеть от размеров конвейера и скорости движения конвейерных лент.

1.2.3 Текущий уровень технологий в управлении конвейерами роботизированных линий

Режимы работы буферов РЛР, как правило, имеют характеристики, которые описаны ниже.

- 1) Режим предотвращения застревания – заданный уровень заполнения.
- 2) Режим защиты от блокировки – заданный уровень заполнения.

Чтобы установить конкретное целевое состояние, сначала необходимо определить параметр, который система управления должна регулировать. Этот параметр – уровень заполнения конвейера. В современных системах уровень заполнения может быть определен с помощью переключателей заклинивания с ограниченной точностью и определенными ограничениями. Датчик затора обычно состоит из индуктивного датчика и подвижного металлического кронштейна и устанавливается на направляющих рельсах конвейера. Если тара скапливается в зоне рельса, где установлен датчик заедания, он активируется. Металлический кронштейн выталкивается из зоны транспортера накапливающимися бутылками. Это действие перемещает флажок подтверждения в магнитное поле датчика или из него (см. рис. 8), в результате чего переключатель меняет свое состояние. Затем информация о состоянии передается в систему управления, которая распознает занятость соответствующей секции конвейера. Однако датчик затора может контролировать только ту часть конвейера, которая непосредственно закрыта металлическим кронштейном.

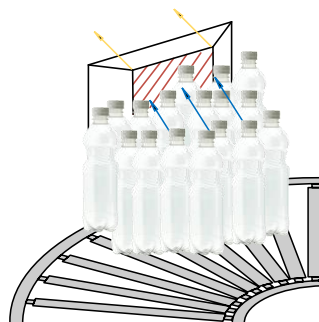


Рисунок 8 – Пояснение работы датчика застоя (накопительного переключателя), используемого для определения состояния заполненности транспортера для ПЭТ-тары

При этом, чем больше количество переключателей, тем точнее определяется уровень заполнения конвейера. Однако большее количество датчиков также приводит к увеличению затрат. Это связано с самими переключателями, а также с трудоемкостью подключения, большим количеством цифровых входов, необходимых для системы управления, и более сложным алгоритмом управления. Поэтому для каждого конвейера необходимо найти компромисс между технически необходимой точностью обнаружения и экономической целесообразностью используемого оборудования.

Увеличенные производительности ячеек многофазовой линии розлива напитков показаны на рисунке 9. Эта диаграмма представляет собой диаграмму Берга или V-диаграмму [38]. Все производительности ячеек задаются по отношению к центральному агрегату установки, в данном случае - к ячейке розлива. Увеличенные производительности позволяют восстанавливать целевое заполнение транспортёра после сбоев.

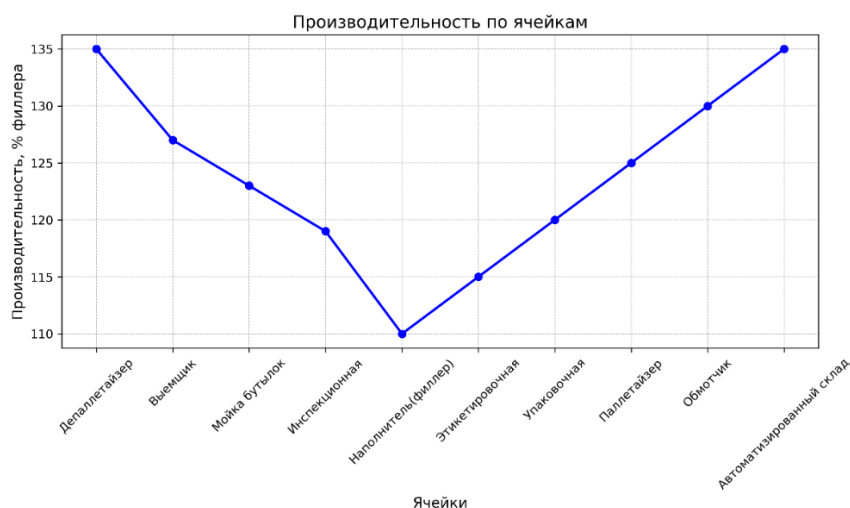


Рисунок 9 – V-диаграмма по Бергу для представления градации производительности отдельных ячеек линии розлива напитков

Параллельные буферные системы являются наиболее часто используемыми системами хранения в линиях розлива напитков для

транспортировки бутылочной тары. Их наиболее часто используемые функциональные возможности показаны на рисунке 10. Синяя зона используется для транспортировки тары, в то время как красная зона предназначена для буферизации. Однако эти системы существуют во многих вариантах как с точки зрения механической конструкции, так и с точки зрения эксплуатации.

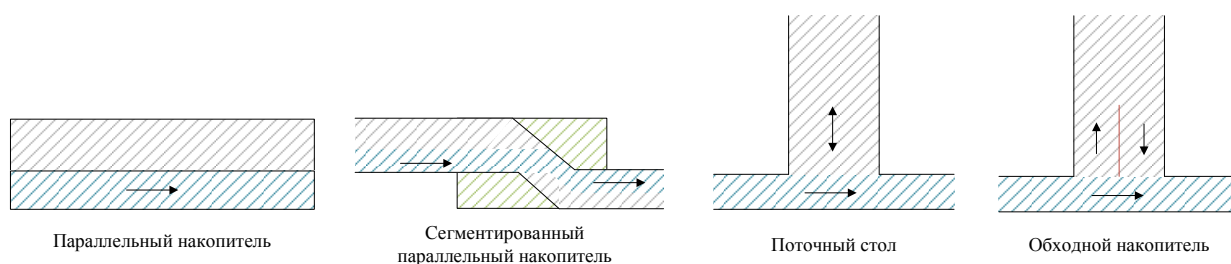


Рисунок 10 – Варианты транспортеров с буферной системой

Проблема с этими системами хранения заключается в том, что они работают по принципу «первым пришел, последним вышел», что может привести к тому, что тара или контейнеры будут оставаться на транспортере в течение длительного времени.

В последние годы в дополнение к транспортерам этого типа часто используются транспортеры, которые могут работать на разных скоростях. Основной поток тары проходит через буферную зону на конвейерных лентах с более быстрым ходом, в то время как пограничные зоны, используемые для буферизации, работают с меньшей скоростью. Эта операция показана на рисунке 11.

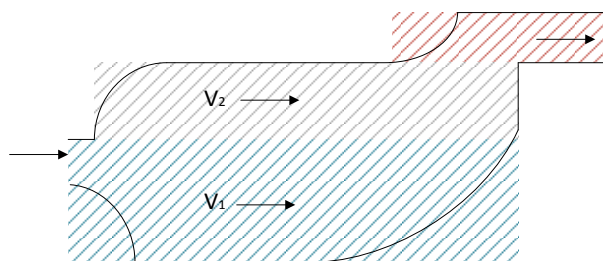


Рисунок 11 – Буферный транспортер, работающий на двух разных скоростях

Синяя область посередине работает с большей скоростью, чем красные зоны по краям ($v_1 > v_2$). Таким образом, основной поток тары проходит через

транспортёр с относительно высокой скоростью, что приводит к короткому времени простоя буфера и меньшему объёму пространства, требуемому для выполнения транспортной функции буфера. Граничные зоны (показаны здесь красным цветом) работают значительно медленнее или даже могут быть полностью отключены, если нет необходимости направлять через них основной поток.

Ещё одним, более новым вариантом является буферный стол переменной длины с гибким элементом. Схематическое изображение буфера этого типа показано на рисунке 12.

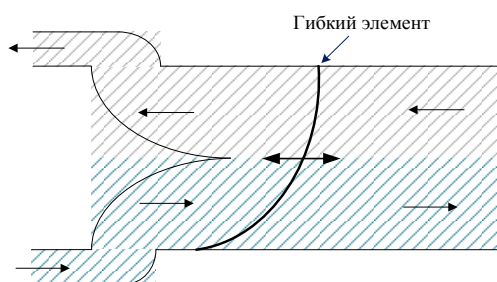


Рисунок 12 – Буферный транспортер с переменной длиной и перенаправлением тары с помощью гибкого элемента

Помимо буферизации, большое значение имеет перенос контейнеров (ящиков, заполненных тарой) из ячейки в буфер и из буфера на следующую ячейку. Это требование не всегда легко выполнить из-за высокой производительности ячеек. Проблема заключается в том, что большинство ячеек на линии розлива в бутылки обрабатывают бутылки по отдельности, и поэтому их также необходимо загружать и выгружать единым потоком.

1.3 Текущие тенденции и проблемы развития систем контроля параметров роботизированных линий розлива

Существует значительное количество отличающихся между собой систем контроля и управления параметрами РЛР, которые при этом не имеют общих конкретных критериев или показателей качества, имеют различный состав и используют различные технологии при построении этих систем

контроля. Данный факт усложняет процессы разработки универсальных или типовых стандартизированных требований и процедур к данным системам.

На рисунке 13 показаны основные этапы контроля розлива бутилированной продукции, который способны производить описываемые системы технического зрения.



Рисунок 13 – Основные этапы контроля розлива бутилированной продукции системой технического зрения

Важным достоинством применяемых систем технического зрения (СТЗ) на РЛР является возможность реализации функции автоидентификации меток, акцизов, QR-кодов или штрих-кодов или других графических кодов, что позволяет защищать продукцию от подделки контрафакта, а также может способствовать упрощению логистики. Как правило, такие системы при реализации функции автоидентификации могут обеспечить производительность приблизительно 60 – 70 тысяч бутылок в час при среднем времени считывания до 35 мс, однако здесь возникают требования по дистанции считывания – она должна быть до 400 мм, а также камера должна быть оснащена объективом 6,2 мм с автофокусом и строенной подсветкой.

1.3.1 Проблемы обеспечения требуемой акустической обстановки в зоне роботизированных линий розлива

В последние годы были ужесточены требования по охране труда, касающиеся защиты работников от вредных воздействий, в том числе шумовых. В России и других странах СНГ это ужесточение нашло отражение в принятии нормативных актов, приведенных в соответствие с

международными руководящими принципами, такими как ГОСТ Р ИСО 45001-2020 «Системы менеджмента безопасности труда и охраны здоровья. Требования и руководство по применению». Данный стандарт устанавливает максимальный уровень ежедневного воздействия шума в 85 дБ (А) и минимальный порог в 80 дБ (А). Ежедневное воздействие шума – это уровень шума, с которым сталкивается работник в течение восьмичасовой рабочей смены. Эти значения были снижены на 5 дБ(А) по сравнению с предыдущими нормативами. Новые ограничения считаются безопасными для слуха человека и аналогичным образом применяются в других промышленно развитых странах. При превышении верхнего порогового значения работодатель должен разработать программу снижения уровня шума. Эта программа должна в первую очередь определять меры по первичному и вторичному снижению шума.

Звук всегда проявляется одинаково: это локальное изменение статического давления воздуха. Это изменение давления воздуха распространяется в виде продольных волн, называемых звуковым давлением (p), которое накладывается на статическое давление окружающей среды. Статическое давление окружающей среды обычно равно атмосферному давлению, приблизительно 10^5 Па. При этом скорость частиц (v) не следует путать со скоростью звука. Она описывает скорость, с которой молекула воздуха перемещается вокруг своего исходного положения во время звукового воздействия. В ближнем поле звуковое давление и скорость частиц часто имеют фазовый сдвиг. Только в дальнем поле эти две величины совпадают по фазе. Дальнее поле обычно начинается на расстоянии одной длины волны от источника звука. Поэтому большинство измерений звука проводится в дальнем поле.

Энергия, излучаемая источником звука, уменьшается с удалением от источника, поскольку часть энергии преобразуется в тепловую энергию в результате трения в воздухе. Это сопротивление называется акустическим импедансом (Z), а для дальнего поля это может быть описано формулой:

$$Z = \frac{p}{v} = \rho c$$

где Z – акустическое сопротивление, $\text{Н} \cdot \text{с} \cdot \text{м}^{-3}$;

v – скорость частиц, $\text{м} \cdot \text{с}^{-1}$;

c – скорость звука, $\text{м} \cdot \text{с}^{-1}$;

p – текущее звуковое давление, Па ;

ρ – плотность воздуха, $\text{кг} \cdot \text{м}^{-3}$.

Мощность звука (P) определяется исходя из интенсивности звука I , излучаемого через закрытую поверхность A , окружающую источник звука.

$$P = \int I dA,$$

где P – мощность звука, Вт ;

I – интенсивность звука, $\text{Вт}/\text{м}^2$;

A – площадь поверхности, м^2 .

Высокоэффективным методом снижения интенсивности звука, воздействующего на оператора, является увеличение расстояния от источника звука. Это увеличивает площадь излучения и уменьшает воздействие звука на оператора. Например, если предположить, что точечный источник звука излучает свою звуковую мощность в пустое пространство, то соотношение между I и P определяется:

$$I = \frac{P}{4\pi r^2},$$

где P – мощность звука, Вт ;

I – интенсивность звука, $\text{Вт}/\text{м}^2$;

r – расстояние от источника звука до точки наблюдения, м .

Увеличение расстояния приводит к увеличению площади излучаемой сферы пропорционально квадрату радиуса, что значительно снижает интенсивность звука. Кроме того, также происходит снижение интенсивности звука из-за акустического сопротивления. На практике удвоение расстояния обычно приводит к снижению уровня звукового давления на 6 дБ.

Кроме того, шум, создаваемый роботизированными линиями розлива, является одним из важнейших факторов, влияющих на безопасность и комфорт работников. Согласно российским санитарным нормам (СанПиН 1.2.3685-21), допустимый уровень шума в производственных помещениях не должен превышать 80 дБА в течение 8-часового рабочего дня [50]. Однако уровень шума от промышленного оборудования, включая роботизированные системы розлива, часто превышает этот предел, достигая 85-100 дБА [49], что требует использования средств индивидуальной защиты и других мер по снижению уровня шума. Неспособность контролировать уровень шума может привести к повышенному стрессу, потере слуха и снижению эффективности работы, что еще раз подчеркивает необходимость регулярной оценки уровня шума и внедрения технологий по борьбе с ним.

Как показано на Рисунке 14, частотный диапазон от 1000 до 4000 Гц в измерениях учитывается больше, чем другие частотные диапазоны.

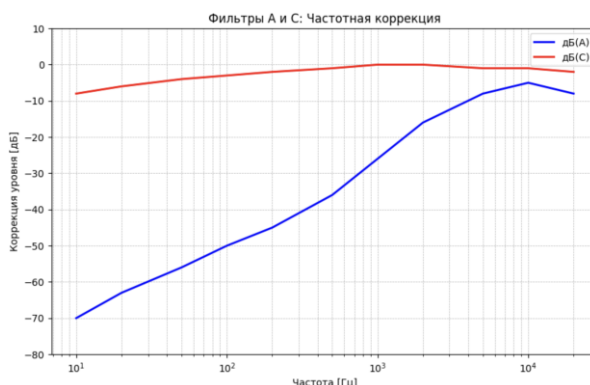


Рисунок 14 – Частотная коррекция через частотное взвешивание А- и С-фильтров

Помимо частоты, на восприятие влияет также характер звука. Импульсные шумы воспринимаются как более раздражающие, чем постоянные шумы. Этот тип шума особенно значим на линиях розлива напитков, которые заполняют стеклянные бутылки. Столкновение стеклянных бутылок создает сильно импульсный шум. Это необходимо учитывать при измерениях. Большинство измерительных устройств предлагают различные настройки временного взвешивания звука. Две наиболее распространённые настройки – это Быстрое («F») и Импульсное («I»). Они различаются по

времени реакции на звуковое событие. Настройка «I» (35 мс) реагирует примерно в четыре раза быстрее на звуковое событие, чем настройка «F» (125 мс), таким образом, значительно выше оценивая импульсные звуковые события [35].

Если разница между измерениями в настройках «F» и «I» превышает 3 дБ, текущие стандарты для определения шумового воздействия на рабочем месте требуют добавления импульсного коэффициента к измерению. Надбавки до 6 дБ добавляются к уровню звукового давления, измеренному в настройке «F» (при разнице более 6 дБ) [34]. Эти меры по корректировке оценок особенно применимы к шумовым воздействиям на оператора на линии розлива бутылок.

Таким образом, для дальнейшего повышения контроля и управления качеством РЛР необходимо не только применять проверенные методики, но и адаптировать и развивать их в соответствии с современными требованиями и условиями производства [44 - 49].

1.4 Анализ действующей нормативной документации в области управления качеством организации роботизированных линий розлива

Рассмотрим основные действующие нормативные стандарты, относящиеся к организации РЛР.

ГОСТ 16299-2022 «Упаковывание. Термины и определения», устанавливает основные термины и определения, связанные с упаковкой продукции. Преимуществом данного стандарта является его всесторонний подход к описанию упаковочных процессов и оборудования, что позволяет охватить практически все возможные сценарии и варианты упаковки [51].

ГОСТ Р 50-54-93-88 «Классификация, разработка и применение технологических процессов» представляет рекомендации и указания по классификации и разработке технологических процессов в приборостроении. В стандарте описываются единичные, типовые и групповые процессы, а также их влияние на оптимизацию производства. В стандарте приводятся

рекомендации по классификации процессов на единичные, типовые и групповые, что помогает систематизировать и оптимизировать производственные операции [52].

Однако, данный стандарт имеет общий характер и не учитывает специфические требования различных отраслей, включая пищевую промышленность, а отсутствие отраслевой специфики может ограничивать его применение в специализированных производствах.

Вероятность отказа ячеек РЛР можно определить с помощью критериев надежности, установленных в ГОСТ 27.002-2015 «Надежность в технике. Термины и определения» [53]. Конкретные ключевые показатели для систем розлива и отдельных ячеек также определены в ГОСТ 27.003-2016 «Надежность в технике. Состав и общие правила задания требований по надежности» [54].

Показатели надежности включают в себя следующие параметры: вероятность безотказной работы $P(t)$, которая определяется как вероятность того, что система будет работать без отказов в течение заданного времени t при заданных условиях эксплуатации.

Вероятность безотказной работы ($P(t)$):

$$P(t) = e^{-\lambda t}$$

где $P(t)$ – вероятность безотказной работы в течение времени t ;

λ – интенсивность отказов (постоянная для экспоненциального распределения времени безотказной работы);

t – время работы.

Среднее время безотказной работы (MTBF, Mean Time Between Failures) определяется по формуле:

$$MTBF = \frac{T}{N},$$

где T – общее время работы;

N – количество отказов.

Среднее время восстановления (MTTR, Mean Time To Repair) определяется по формуле:

$$MTTR = \frac{\sum T_r}{N},$$

где T_r – время восстановления;

N – количество отказов.

Как было указано выше, ГОСТ 27.003-2016 определяет состав и общие правила задания требований по надежности, в контексте РЛР вероятность безотказной работы ($P(t)$) может быть выражена:

$$P(t) = e^{-\int_0^t \lambda(t) dt},$$

где $\lambda(t)$ – интенсивность отказов, которая может изменяться со временем.

Коэффициент готовности (K_g) – это показатель, характеризующий способность системы или оборудования быть в работоспособном состоянии, когда это необходимо для выполнения своих функций и учитывает как время безотказной работы, так и время восстановления после отказа:

$$K_g = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR},$$

где MTBF (Mean Time Between Failures) – среднее время безотказной работы;

MTTR (Mean Time To Repair) – среднее время восстановления.

Для роботизированных линий розлива, высокое значение K_g означает, что оборудование редко выходит из строя и быстро восстанавливается после отказов.

ГОСТ 24.701-86 «Единая система стандартов автоматизированных систем управления. Надежность автоматизированных систем управления. Основные положения» устанавливает основные положения по надежности автоматизированных систем управления (АСУ), порядок установления требований к надежности АСУ и общий порядок оценки надежности АСУ [55].

Эти показатели помогают оценить и улучшить надежность ячеек и систем, однако в стандарте не указаны детализированные рекомендации по

автоматизации процессов мониторинга и управления надежностью. В современных условиях автоматизация играет ключевую роль в обеспечении высокой надежности и эффективности производственных процессов, поэтому отсутствие таких рекомендаций является значительным недостатком.

Помимо российских стандартов, существуют международные системы ключевых показателей, адаптированные к потребностям отрасли или компании, в которой они используются. Здесь следует упомянуть «Общую эффективность оборудования (OEE, Overall Equipment Effectiveness)», которая определяется по формуле:

$$OEE = A \cdot P \cdot Q;$$

где A – доступность (Availability);

P – производительность (Performance);

Q – качество (Quality).

OEE является частью концепции «Всестороннего продуктивного технического обслуживания» (TPM, Total Productive Maintenance). Эта концепция разработана Японским институтом технического обслуживания заводов и направлена на учет ключевых показателей, связанных с заводом, и на повышение качества завода и продукции. Концепция TPM получила международное признание в области технологий розлива и применяется многими операторами розливных заводов.

ГОСТ Р 56103-2014 «Защита информации. Автоматизированные системы в защищенном исполнении. Организация и содержание работ по защите от преднамеренных силовых электромагнитных воздействий» регламентирует организацию и содержание работ по защите автоматизированных систем от преднамеренных силовых электромагнитных воздействий. ГОСТ Р 56103-2014 устанавливает общие положения по организации и содержанию работ по защите автоматизированных систем (АС) от преднамеренных мощных электромагнитных воздействий (ППЭМИ) [56]. Основные мероприятия включают повышение устойчивости АС, снижение уровня ППЭМИ, своевременное обнаружение и реагирование на ППЭМИ,

Конкретные меры по защите автоматизированных систем от электромагнитных воздействий, изложенные в ГОСТ Р 56103-2014, могут потребовать значительной адаптации при применении к роботизированным линиям розлива. Сложность и изменчивость этих сред может затруднить эффективное применение стандартизированных мер электромагнитной защиты. Это может привести к несоответствию уровней защиты различных роботизированных систем в процессе розлива, что потенциально может повлиять на общую надежность и эффективность производственной линии.

ГОСТ Р 27.102-2021 «Надежность в технике. Надежность объекта. Термины и определения» устанавливает основные понятия, термины и определения, относящиеся к надежности изделий. Стандарт распространяется на аппаратные и программные средства, объекты или их комбинации, а также на персонал. Термины, установленные в настоящем стандарте, рекомендуются для использования во всех видах документации и литературы, входящих в область деятельности по стандартизации и использующих результаты этой деятельности. Положения настоящего стандарта рекомендуются к применению организациями Российской Федерации, осуществляющими разработку, производство, эксплуатацию и ремонт технических объектов.

ГОСТ Р 27.102-2021 содержит стандартизированный набор терминов и определений, который обеспечивает последовательность и ясность в общении между специалистами, занимающимися разработкой, обслуживанием и эксплуатацией роботизированных линий розлива. Унифицированная терминология способствует лучшему пониманию и сотрудничеству между различными отделами и организациями [57]. Стандарт охватывает все аспекты надежности, включая надежность, ремонтпригодность и доступность, однако его общий характер может потребовать дополнительной адаптации и уточнения с учетом уникальных требований, предъявляемых к роботизированным линиям розлива.

ГОСТ Р ИСО 9001-2015 (ИСО 9001:2015): «Системы менеджмента качества. Требования» устанавливает требования к системам менеджмента

качества и может применяться для повышения качества продукции и процессов на роботизированных линиях розлива [58]. Стандарт предоставляет всеобъемлющую основу для создания, внедрения, поддержания и улучшения системы менеджмента качества, обеспечивающей соответствие продукции требованиям заказчика и нормативных документов. Однако данный стандарт также не позволяет учитывать специфические потребности и особенности роботизированных линий розлива, которые требуют индивидуального подхода к управлению качеством.

ГОСТ Р 34.003-90: «Автоматизированные системы. Общие положения» устанавливает основополагающие принципы проектирования, внедрения и эксплуатации автоматизированных систем, которые имеют важное значение для упаковочных роботизированных линий [59]. Придерживаясь этих рекомендаций, возможно достичь высокого уровня интеграции и координации между различными автоматизированными компонентами, что приведет к повышению надежности и эффективности системы [60]. Отсутствие подробных положений о современных автоматизированных и роботизированных технологиях может привести к проблемам с внедрением, требуя дополнительных усилий.

Результаты и выводы по разделу 1

Проведенный анализ современных систем управления качеством организации роботизированных линий розлива выявил ряд направлений в исследованиях, которые позволяют сформировать решения для повышения эффективности данных производственных систем. На основе проведенного анализа выявлена научно-техническая проблема, для решения которой сформулированы цель и задачи диссертационного исследования. Анализ проблематики объекта исследования выявил взаимосвязи с неполной унификацией существующих технических решений, особенно в области задач промышленной и экологической безопасности в области снижения шумовых

эмиссий, в ходе чего выявлены следующие принципиальные организационно-технические аспекты:

1) использование разнообразных систем контроля параметров роботизированных линий затрудняет разработку универсальных решений. Необходима разработка новых критериев и стандартов для оценки качества работы РЛР, что позволит унифицировать подходы к управлению качеством на производственных линиях и обеспечить их соответствие международным стандартам, таким как ISO 9001;

2) разнообразие систем управления параметрами роботизированных линий создает проблемы для разработки универсальных решений организации производства и контроля качества продукции, в результате чего возникает необходимость в разработке дополнительных критериев и показателей качества отдельных операций и процессов линии, а оптимизация данных процессов и внедрение дополнительных критериев показывает возможности повышения эффективности процессов упаковки и качества выпускаемой продукции на 1-2 % за счет улучшения согласованности работы различных узлов;

3) интеграция современных методов и подходов управления качеством, таких как FMEA и DMAIC, необходима для систематического выявления и устранения дефектов; применение данных методологий позволяет более точно выявлять причины дефектов и разрабатывать меры по их предотвращению, что, в свою очередь, повышает надежность и эффективность производственного процесса, например, внедрение методологии FMEA в некоторых случаях позволяет снизить количество дефектов на 2 и более %;

4) существующие действующие нормативные документы не в полной мере учитывают специфику роботизированных упаковочных линий, что затрудняет их применение на практике, в результате чего возникает необходимость усовершенствования и обновления существующей НТД;

Данные выводы согласуются с целью и задачами диссертационной работы.

2 РАЗРАБОТКА И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ НАУЧНЫХ ИНСТРУМЕНТОВ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ОРГАНИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ РОБОТИЗИРОВАННОГО РОЗЛИВА

Анализ, проведенный в предыдущей главе, выявил высокую потребность в уточнении и совершенствовании моделей и методик повышения качества организации РЛР, за счет разработки оптимизированных методик оценки и контроля качества производства, его эффективности, а также безопасности. В данном разделе рассматриваются подходы, модели и методики совершенствования процессов оценки и контроля качества организации РЛР с помощью математического и имитационного моделирования, внедрения новых подходов применения СМК в конкретных случаях организации отдельных технологических процессов, внедрения квалиметрических моделей и методик оценки и управления качеством организации РЛР.

2.1 Разработка квалиметрической модели оценки и управления качеством роботизированного розлива

В данном разделе предлагается комплексная квалиметрическая модель оценки и управления качеством организации роботизированных линий розлива, использующая в своей основе комплексный набор критериев для управления качеством в РЛР на основе выявленных проблем в автоматизации процессов роботизированного розлива жидкости в тару и упаковки тары в контейнеры. Для каждого критерия представлены математические формулировки, позволяющие интегрировать их в систему управления качеством. В таблице 1 представлена классификация основных проблем управления качеством РЛР и предложенные эксплуатационные коэффициенты, позволяющие оценивать уровень данных проблем.

**Таблица 1 – Сопоставление проблем управления качеством
роботизированных линий розлива и 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)	$K_y = \frac{\sum_{i=1}^N U_i}{N} \cdot \frac{C_{\text{универсальных}}}{C_{\text{общее}}}$
Отсутствие общих критериев качества	Нет единых показателей или критериев качества, что приводит к несоответствиям в управлении качеством	Коэффициент согласованности качества ($K_{ск}$)	$K_{ск} = \frac{\mu_Q}{\sigma_Q}$
Индивидуальная конфигурация систем	Каждая автоматическая упаковочная система уникально сконфигурирована, что препятствует общей стандартизации	Коэффициент стандартности (K_c)	$K_y = \frac{\sum_{i=1}^N S_i}{N} \cdot \frac{C_{\text{стандартизированных}}}{C_{\text{общее}}}$
Сложности в разработке стандартизированных требований	Уникальный характер каждой системы усложняет процесс создания стандартизированных требований и процедур	Коэффициент сложности стандартизации (K_{cc})	$K_{cc} = \frac{\sum_{i=1}^N U_i(1 - S_i)}{N} \cdot \frac{1}{1 + \alpha D}$
Трудности обеспечения безопасности и вредности	Обеспечение соответствия стандартам безопасности и гигиены при упаковке является сложной задачей из-за отсутствия универсальных руководящих принципов	Коэффициент безопасности и гигиены ($K_{без}$)	$K_{без} = \frac{\sum_{i=1}^N B_i(1 - H_i)}{N} \cdot \frac{C_{\text{соотв}}}{C_{\text{общих}}}$
Защита от несанкционированного вмешательства	Необходимы надежные механизмы управления доступом и защиты от несанкционированного вмешательства	Коэффициент защиты (K_3)	$K_3 = \frac{\sum_{i=1}^N P_i(1 - F_i)}{N} \cdot \frac{C_{\text{защищенных}}}{C_{\text{общее}}}$
Выбор и обоснование режимов работы	Сложность выбора и обоснования подходящего режима работы для фасовочных или разливочных установок из-за отсутствия стандартизированных критериев	Коэффициент режимов работы (K_{pp})	$K_{pp} = \frac{\sum_{i=1}^N R_i}{N} \cdot \frac{1}{1 + \beta D_R}$
Шумовое загрязнение	Высокий уровень шума на производственных линиях, который может негативно влиять на здоровье операторов и эффективность их работы	Коэффициент шумового загрязнения ($K_{ш}$)	$K_{ш} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{L_i}{L_{max}}$

Ниже приведено математическое описание для всех предлагаемых критериев.

Введение коэффициента универсальности (K_y) систем контроля позволяет измерять степень согласованности систем мониторинга и контроля, что позволяет обеспечить сопоставление разнообразия ячеек и систем контроля и их применимость в различных условиях производства.

Коэффициент универсальности:

$$K_y = \frac{\sum_{i=1}^N U_i}{N} \cdot \frac{C_{\text{универсальных}}}{C_{\text{общее}}},$$

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.

Введение коэффициента согласованности качества ($K_{\text{ск}}$) позволяет оценить степень унификации и согласованности критериев качества между различными системами. Это критически важно для обеспечения однородности продукции и надежности производственного процесса.

Коэффициент согласованности качества ($K_{\text{ск}}$):

$$\mu_Q = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Q_i,$$

$$\sigma_Q = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Q_i - \mu_Q)^2},$$

$$K_{\text{ск}} = \frac{\mu_Q}{\sigma_Q},$$

где Q_i – качество i -го критерия;

σ_Q – стандартное отклонение качества;

μ_Q – среднее значение качества.

Введение коэффициента стандартности (K_c) позволяет описать и контролировать уровень унификации конфигураций систем, что помогает определить, насколько используемые системы соответствуют установленным стандартам и общим требованиям.

Коэффициент стандартности (K_c):

$$K_c = \frac{\sum_{i=1}^N S_i}{N} \cdot \frac{C_{\text{стандартизированных}}}{C_{\text{общее}}},$$

где $C_{\text{стандартизированных}}$ – количество стандартных конфигураций;

$C_{\text{общее}}$ – общее количество конфигураций;

N – общее количество компонентов;

S – значение от 0 до 1, указывающее, насколько стандартен компонент, где 0 совсем не стандартизированный, не имеет критериев стандартизации, а 1 – полностью стандартизирован;

Коэффициент сложности стандартизации (K_{cc}) представляет собой некоторую оценку трудоемкости разработки и внедрения стандартизированных требований для различных систем. Это необходимо для оценки сложности унификации при сохранении эффективности операций.

Коэффициент сложности стандартизации (K_{cc}):

$$K_{cc} = \frac{\sum_{i=1}^N U_i(1 - S_i)}{N} \cdot \frac{1}{1 + \alpha D'}$$

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.

Введение коэффициента безопасности ($K_{без}$) позволит производить оценку соответствия систем установленным стандартам безопасности и гигиены, что критически важно для обеспечения безопасных и чистых условий упаковки и производства.

Коэффициент безопасности ($K_{без}$):

$$K_{без} = \frac{\sum_{i=1}^N B_i(1 - H_i)}{N} \cdot \frac{C_{соотв}}{C_{общих}},$$

где B_i – безопасность i -го компонента, может быть измерена как вероятность отсутствия аварий или инцидентов, связанных с компонентом, или степень соответствия нормативным стандартам безопасности. Данный показатель может быть выражен через количественно, например частота инцидентов или соответствие нормативным требованиям (стандартам ISO или

OSHA) или измеряться в процентах или индексах, где 100% соответствует полному соответствию всем стандартам;

H_i – вредность i -го компонента, может быть измерена как степень потенциального негативного воздействия на здоровье оператора или окружающую среду, например, уровень токсичности, выбросов или механической опасности. Предполагается оценка по критериям, таким как уровень токсичности (ПДК – предельно допустимая концентрация), механическая опасность (вероятность травмы и пр.) или другие параметры, влияющие на здоровье оператора и окружающую среду. Значение также может быть выражено в процентах или балльной системе, где более высокие значения указывают на большую вредность;

N – общее количество компонентов;

$C_{\text{соотв}}$ – количество компонентов, соответствующих нормативным требованиям;

$C_{\text{общих}}$ – общее количество компонентов, (то есть максимально возможное в идеальном случае число соответствующих компонентов в конкретной линии).

Предлагается также введение коэффициента защиты ($K_{\text{за}}$) для того, чтобы оценить уровень защищенности систем от несанкционированного вмешательства, что важно для обеспечения безопасности и гарантии соблюдения качества производственных процессов.

Коэффициент защиты (K_3):

$$K_3 = \frac{\sum_{i=1}^N P_i (1 - F_i)}{N} \cdot \frac{C_{\text{защищенных}}}{C_{\text{общее}}},$$

где P_i – защита i -го компонента, которая может быть выражена через количественные показатели, (уровень защищенности от несанкционированного доступа, физическая защита, кибербезопасность, устойчивость к внешним воздействиям, IP рейтинг и т.п), измеряется в процентах или баллах, где 100% или максимальное количество баллов указывает на полную защищенность.

F_i – уязвимость i -го компонента, которая может быть оценена через его слабые места, (подверженность атакам, вероятность выхода из строя при воздействии определенных факторов) также измеряется в процентах или баллах, где более высокие значения указывают на большую уязвимость;

N – общее количество компонентов в системе или процессе;

$C_{\text{защищённых}}$ – количество компонентов, соответствующих требованиям защиты;

$C_{\text{общее}}$ – общее число компонентов в системе или общее число требований по защите, применимых к системе.

Помимо этого, предлагается введение коэффициента режимов работы (K_{pp}) для того, чтобы оцениваться сложность выбора и обоснование режимов работы для систем, при анализе необходимости оптимизации и эффективного функционирования производственных процессов.

Коэффициент режимов работы (K_{pp}):

$$K_{pp} = \frac{\sum_{i=1}^N R_i}{N} \cdot \frac{1}{1 + \beta D_R},$$

где R_i – нормализованный режим работы i -го компонента (деленный на максимальное значение режима $R_{\max}$, который определяется среди всех компонентов системы).

β – коэффициент сложности выбора режима, отражает степень сложности и трудоемкости процесса выбора и обоснования оптимального режима работы для компонента, измеряется на основе экспертных оценок или исторических данных о времени и усилиях, затраченных на выбор режимов.

D_R – дисперсия режимов работы, то есть оценка вариативности эксплуатационных параметров компонентов, где высокие значения дисперсии указывают на большую изменчивость режимов работы, что может усложнять процесс оптимизации.

Введение коэффициента шумового загрязнения ($K_{ш}$) необходимо для контроля и оценки унификации производственных линий по уровню шума.

Коэффициент шумового загрязнения $K_{ш}$ предлагается определять следующим образом:

$$K_{ш} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{L_i}{L_{max}},$$

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.

При этом для измерения уровня шума L_i предполагается использование шумомера в различных точках производственной линии, определение точек замеров должно производиться в местах, где операторы проводят большую часть времени или где оборудование и тара издает наибольший шум. Важно отметить, что шум оборудования соизмеримо меньше, чем шум сталкивающейся тары, особенно, если тара еще не заполнена продукцией. Количество точек определяется в зависимости от размера производственной линии, также необходим учет таких мест, где уровень шума может значительно различаться, как правило, это будут участки, где осуществляют наполнение тары (это одно из самых тихих мест на линии), проход материальных потоков через моечные и стерилизационные ячейки, участки, где устанавливаются крышки и используется оборудование для герметизации бутылок, места вдоль конвейеров, где происходит перемещение заполненной тары. Передвижение по ленте пустой тары и ее столкновение в буферных зонах наиболее шумный процесс.

Значения предельно допустимого уровня шума L_{max} определяются в соответствии с действующими нормами, для промышленных объектов это может быть значение, не превышающее 85 дБА или более специфичное в зависимости от конкретных требований [50].

Большинство предложенных коэффициентов базируются на существующих принципах оценки и управления качеством в различных системах, а их конкретные формулы разработаны как интерпретации адаптированных критериев для учета специфических условий автоматических

упаковочных процессов жидких материальных потоков. Предложенные критерии и их математические формулировки предназначены для решения специфических проблем управления качеством и стандартизации в области РЛР, что делает их ценными инструментами для решения вопросов управления качеством и организации производственных процессов в упаковочных линиях.

Предлагаемая квалиметрическая 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.

Интегральная оценка качества функционирования РЛР, как и любая сводная квалиметрическая модель, основывается на использовании показателей разной природы, размерности и шкалы измерения. В связи с этим, ключевым этапом формирования обоснованной математической модели является приведение каждого частного коэффициента к сопоставимому интервалу значений. Для решения этой задачи в модели применяются нормализующие функции, трансформирующие исходные значения в диапазон $[0;1]$, сохраняя при этом смысловую нагрузку каждого критерия и его вклад в итоговую оценку.

В тех случаях, когда показатель изначально формируется как нормированная величина (например, доля, вероятность или степень соответствия в интервале от 0 до 1), необходимость в дополнительном преобразовании отсутствует. Это относится к таким эксплуатационным коэффициентам, как коэффициент универсальности (K_y), стандартности (K_c),

безопасности и гигиены ($K_{\text{без}}$), защищённости (K_3) и режимов работы ($K_{\text{пр}}$). Эти коэффициенты отражают структурные или функциональные свойства системы и обладают линейной интерпретацией: значения, приближающиеся к 1, характеризуют высокую степень соответствия заданному критерию, в то время как значения, близкие к 0, указывают на выраженную проблему в соответствующей области.

Вместе с тем, некоторые показатели характеризуются иным масштабом или нелинейной зависимостью от управляемого параметра. Так, коэффициент согласованности качества ($K_{\text{ск}}$) формируется как отношение среднего значения оценки качества к его стандартному отклонению, что делает его чувствительным к малым значениям дисперсии. В ряде случаев этот показатель может достигать значений, значительно превышающих единицу (например, 35, 50 и более), что нарушает баланс вклада между коэффициентами и может исказить интегральную оценку. С целью устранения этой проблемы используется ограничивающая нормализация вида:

$$f(K_{\text{ск}}) = \min\left(\frac{K_{\text{ск}}}{50}, 1\right),$$

здесь значения выше 50 приравниваются к максимальному нормализованному уровню (единице), а более низкие значения уменьшаются пропорционально. Выражаясь простым языком, описанная таким образом функция нормализации указывает: «возьми либо результат деления, либо 1 – что меньше из двух». Это позволяет сохранить относительные различия в пределах допустимого диапазона, обеспечивая при этом ограничение вклада данного коэффициента в итоговый индекс.

Для коэффициента сложности стандартизации ($K_{\text{сс}}$), напротив, характерна обратная зависимость: чем выше значение, тем более затруднено внедрение единых требований и норм. Соответственно, в агрегированной модели используется инверсия значений:

$$f(K_{\text{сс}}) = 1 - K_{\text{сс}},$$

что позволяет сохранить интерпретацию: «чем ближе значение к 1 – тем лучше».

Особое внимание в рамках оценки функционирования РЛР уделяется уровню шумового загрязнения, отражаемому коэффициентом $K_{ш}$, который рассчитывается как среднее отношение фактического уровня шума на участках линии к предельно допустимому уровню. Поскольку превышение шумовых норм оказывает негативное влияние на здоровье персонала и стабильность технологических процессов, было принято решение применить к данному коэффициенту нормализацию в форме:

$$f(K_{ш}) = 1 - \min\left(\frac{K_{ш}}{10}, 1\right).$$

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

Таблица 2 – Обоснование распределение весовых показателей влияния эксплуатационных коэффициентов в квалиметрической модели

Коэффициент	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
$K_{ск}$	$\min\left(\frac{K_{ск}}{50}, 1\right).$	обеспечивает стабильность розлива, влияет на ДРМО → <i>критично для продукта</i>	0,15	высокая
K_c	Без преобразования	влияет на время настройки, надёжность логистики узлов, согласуется с RPN нестандартов	0,10	средняя
K_{cc}	$1 - K_{cc}$	усложняет унификацию → <i>уменьшает управляемость</i>	0,10	средняя
$K_{без}$	Без преобразования	<i>влияет на ISO 45001</i>	0,15	высокая
K_z	Без преобразования	необходим для современных линий с удалённым управлением	0,10	средняя
K_{pp}	Без преобразования	прямое влияние на производительность отклонения → сбой	0,15	высокая
$K_{ш}$	$1 - \min\left(\frac{K_{ш}}{10}, 1\right).$	высокий вклад в отказоустойчивость	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 согласованности, надёжности, безопасности и стандартизации её компонентов.

Границы шкалы определяются с опорой на принятые в отрасли уровни допустимых отклонений, риск-ориентированные методы анализа (в том числе FMEA и расчёт DPMO), а также практические значения показателей, полученные в ходе экспериментальной верификации модели. Шкала, представленная на рис. 18 отражает степень приближения интегрального состояния системы к идеальному (единичному) уровню. Таким образом, значения выше 0,85 интерпретируются как отличные, указывающие на полное соответствие заданным требованиям, в то время как значения ниже 0.50 свидетельствуют о критическом уровне функциональных отклонений и требуют немедленного пересмотра параметров функционирования или технической модернизации линии. Шкала, представленная на рис. 15 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.

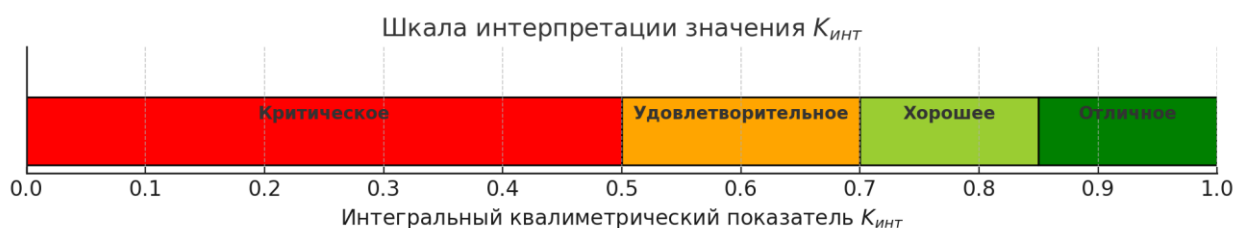


Рисунок 15 – Шкала интерпретации значений интегрального квалиметрического показателя качества функционирования РЛР

Предложенная квалиметрическая модель представляет собой адаптивный инструмент количественной оценки функционирования РЛР, позволяющий на основе диагностических данных рассчитать интегральный показатель качества функционирования, выявить слабые звенья системы, и обосновать направления для совершенствования производственного процесса.

Таким образом, предложенная квалитетрическая модель предназначена для:

- внедрения в QMS, MES и HSE системы в виде индикатора состояния линии;
- сопровождения FMEA-анализа и обоснования мероприятий по снижению рисков;
- расчета KPI при принятии решений об оптимизации или модернизации оборудования.

2.2 Методика оценки качества организации технологических процессов роботизированного розлива и эффективности функционирования линии

Разработанные эксплуатационные коэффициенты возможно интегрировать в системы управления качеством и мониторинга, такие как MES (от англ. – manufacturing execution system (система управления производством), QMS (от англ. – quality management system) (система управления качеством) и HSE(от англ. – Health, Safety, and Environment) (охрана труда, промышленная безопасность и охрана окружающей среды), а использование более конкретных описанных коэффициентов способствует унификации управления оборудованием, диаграмма интеграции коэффициентов в СМК представлена в приложении А.

Моделируемые процессы производственных операций РЛР, представляют собой систему, состоящую автоматизированных модулей, где каждый модуль выполняет конкретную задачу, соответствующую основному типу операции: депалетирование, очистка и мытье тары (если тара повторного использования), розлив, контроль объема, маркировка, кистерс (укупорка), контроль качества укупорки, палетирование, складирование.

Исходя из описания моделируемых процессов РЛР были приняты следующие допущения модели:

- 1) сырье поступает в систему с постоянной скоростью Q и качеством без значительных колебаний, поток исходного материала равномерный;

2) в процессе фильтрации удаляются все посторонние частицы размером более d мк, при этом фильтр работает с постоянной эффективностью E_f ;

3) вся тара очищается до уровня чистоты C , достаточного для предотвращения загрязнения продукта, оборудование для очистки работает без сбоев и обеспечивает вероятность очистки $P_{\text{очистки}} \approx 0,99$;

4) механизм дозирования работает с точностью $\pm \delta V_d$ литров, отклонения в объеме дозы не превышают установленного предела;

5) система контроля объема обнаруживает любые отклонения от номинального объема V_d с точностью $\pm \delta V_m$;

6) модуль укупорки обеспечивает герметичность с вероятностью $P_{\text{укупорки}} \approx 0,98$;

7) система мониторинга и контроля качества выявляет отклонения в объеме, герметичности и чистоте с вероятностью P_{QC} ;

8) модуль этикетирования наносит этикетки без ошибок с вероятностью $P_{\text{маркировки}} \approx 0,98$;

9) модуль паллетирования правильно группирует контейнеры на паллете с вероятностью $P_{\text{паллет}} \approx 0,97$;

10) температура жидкости и окружающей среды поддерживается на оптимальном уровне, а влиянием температурных факторов на процесс дозирования и укупорки можно пренебречь; оборудование контроля температуры работает стабильно и поддерживает температуру в заданных пределах;

11) давление в системе подачи и дозирования поддерживается на постоянном уровне, исключая влияние колебаний давления на объем дозирования и розлива; система регулирования давления работает правильно и обеспечивает стабильность давления;

12) для каждого модуля системы РЛР уровень шума L_i может меняться в зависимости от времени и загрузки линии. Предполагается, что уровень шума изменяется линейно в зависимости от времени работы модуля t и текущей нагрузки γ ;

13) система регулирования давления работает правильно и обеспечивает стабильность давления; случаи задержек и несоответствий в материальном потоке не рассматриваются, то есть в течение всего периода моделирования система управления обеспечивает правильную координацию работы всех модулей.

Математическая интерпретация системы подачи материального потока. Исходя из принятых допущений, данный модуль обеспечивает непрерывную подачу жидкости из основного резервуара в систему с помощью насосов и регулирующих клапанов.

Жидкость подается с постоянной скоростью потока Q (литров в минуту), объем жидкости $V_{\text{подачи}}$, подаваемой в систему за период времени t , определяется следующим образом:

$$V_{\text{подачи}} = Q \cdot t,$$

где $V_{\text{подачи}}$ – объем жидкости, подаваемой в систему;

Q – скоростью потока жидеости, л/мин, подаваемой в систему за период времени t .

Модуль фильтрации удаляет твердые частицы из жидкости для обеспечения ее чистоты до того, как она попадет в дозирующий механизм.

Эффективность фильтрации E_f определяется как доля удаленных частиц:

$$E_f = N_{\text{удален}}/N,$$

где $N_{\text{удален}}$ – количество удаленных частиц;

N – общее количество частиц.

Для того, чтобы производить такие пробы, необходимо взять образец жидкости до фильтрации с известным количеством концентрации частиц (ее можно измерить с помощью подходящего метода, например, микроскопии или счётчика частиц) затем необходимо пропустить известный объём этой жидкости через фильтр и снова взять образец уже отфильтрованной жидкости, измерив в нём оставшуюся концентрацию частиц тем же методом; разница между количеством частиц до и после фильтрации, умноженная на объём жидкости, даст общее число частиц, которые были удалены фильтром.

Это гарантирует, что все посторонние частицы размером более d микрометров будут удалены. Эффективность фильтрации должна соответствовать требованиям безопасности $K_{\text{без}}$.

Система очистки тары подготавливает пустую тару, промывая и стерилизуя ее для удаления всех загрязнений.

Уровень чистоты тары (при вторичном использовании) C имеет решающее значение для предотвращения загрязнения продукта и определяется как:

$$C = C_{\text{очист}}/C_N,$$

где $C_{\text{очист}}$ – чистота после очистки;

C_N – изначальная чистота.

Механизм дозирования, обычно представляющий собой прецизионный поршневой или перистальтический насос, точно отмеряет и дозирует жидкость в заранее определенные объемы V_d . Количество доз n , произведенных за период времени t , рассчитывается как:

$$n = V_{\text{подачи}}/V_d,$$

где n – количество доз;

V_d – заданный объем дозы;

$V_{\text{подачи}}$ – Объем поданной жидкости за период времени t .

Общий дозированный объем $V_{\text{дозир}}$ составляет:

$$V_{\text{дозир}} = n \cdot V_d.$$

где $V_{\text{дозир}}$ – суммарный объем жидкости, отмеренной и поданной в виде отдельных доз;

V_d – заданный объем дозы.

n – количество доз (как определено выше).

Этот механизм работает с точностью дозирования $\pm \delta V_d$ литров, обеспечивая минимальное отклонение от заданного объема. Точность дозирования влияет на коэффициент согласованности качества $K_{\text{ск}}$.

Как правило, модуль наполнения состоит из нескольких форсунок, которые дозируют жидкость в тару, которая движется по конвейерной ленте.

Каждый клапан сконструирован таким образом, чтобы минимизировать разбрызгивание и обеспечить точное заполнение.

Объем заполненной жидкости $V_{\text{заполн}}$ определяется следующим образом:

$$V_{\text{заполн}} = k \cdot V_d,$$

где $V_{\text{заполн}}$ – общий объем жидкости, заполненной в тару за время t ;

V_d – заданный объем дозы;

k – количество тары, заполненной за время t .

Система контроля объема непрерывно проверяет объем жидкости в каждом контейнере, чтобы убедиться, что он соответствует установленным стандартам. Любые отклонения от номинального объема V_d корректируются в режиме реального времени:

$$\Delta V = V_d \pm \delta V_m.$$

Эта система обеспечивает точность процесса розлива, выявляя отклонения с точностью $\pm \delta V_m$ литров.

ΔV – фактический объем жидкости;

V_d – заданный объем дозы;

δV_m – допустимое отклонение объема.

Модуль укупорки (кистерса) и герметизации крепит крышки на заполненную тару и герметично закрывает их. Этот этап предотвращает утечку и загрязнение, при этом вероятность успеха процесса герметизации $P_{\text{герметиз}} \approx 0,98$. Скорость укупорки R_s синхронизируется со скоростью конвейера для поддержания эффективности.

Модуль контроля качества проверяет каждую упаковку на точность объема, целостность крышки с помощью камер технического зрения. Общая вероятность P_{quality} того, что тара пройдет все проверки качества, определяется следующим образом:

$$P_{\text{quality}} = P_{\text{дозир}} \cdot P_{\text{герметиз}} \cdot P_{\text{очист}}$$

где $P_{\text{дозир}}$ – вероятность работы дозирующего механизма и системы мониторинга объема с заданной точностью;

$P_{\text{очист}}$ – вероятность эффективной очистки с заданной чистотой;

$P_{\text{герметиз}}$ – вероятность успеха процесса герметизации.

Это гарантирует, что каждая тара или контейнер с тарой соответствует требуемым стандартам качества, прежде чем перейти к следующему этапу.

Для каждого модуля системы РЛР уровень шума L_i может меняться в зависимости от времени и загрузки линии. Предположим, что уровень шума изменяется линейно в зависимости от времени работы модуля t и текущей нагрузки γ .

Тогда уровень шума $L_i(t, \gamma)$ может быть описан как:

$$L_i(t, \gamma) = L_{i0} + g_i \cdot t + m_i \cdot \gamma,$$

где L_{i0} – начальный уровень шума модуля;

g_i – коэффициент изменения шума с течением времени;

m_i – коэффициент изменения шума в зависимости от нагрузки;

t – время работы модуля;

γ – текущая нагрузка на модуль (ед. нагрузки или проценты).

Коэффициент стандартизации K_c отражает долю компонентов, соответствующих установленным стандартам. Он помогает оценить уровень однородности конфигурации в системах. Для каждого модуля i в линии S_i принимает значение 1, если компонент является стандартным, и 0, если он нестандартный.

В системе РЛР наличие большего количества стандартизированных компонентов облегчает замену или модификацию, сокращает время простоя и повышает общую эффективность линии. Предположим, что стандартные компоненты требуют меньше времени на установку по сравнению с нестандартными. Общее время установки T_{setup} для всех компонентов может быть выражено как:

$$T_{\text{setup}} = \sum_{i=1}^N (S_i \cdot T_{\text{standard}} + (1 - S_i) T_{\text{non-standard}}),$$

где T_{standard} – время установки или настройки стандартного компонента;

$T_{\text{non-standard}}$ – время установки или настройки нестандартного компонента;

S_i – индикатор стандартизации компонента (показатель, который указывает, является ли компонент i стандартным или нестандартным);

N – общее количество компонентов в системе.

Здесь важно пояснить, что понимается под стандартными и нестандартными компонентами. Компоненты, которые соответствуют установленным промышленным или внутренним стандартам, например ISO являются стандартными и взаимозаменяемыми, а нестандартные компоненты – это элементы системы, которые могут не соответствовать определенным установленным критериям общего стандарта, но при этом они могут обладать более уникальными характеристиками, которые в определенных условиях могут оказывать положительное влияние на процессы работы линии.

Например, в линии может быть установлен насос для подачи жидкости, являющийся стандартным компонентом, и данный элемент имеет примерное время настройки $T_{\text{standard}} = 3$ часа и нормализованную эффективность $E_{\text{max}} = 1,0$. В то же время в линии может быть установлен насос для подачи жидкости, являющийся нестандартным компонентом, имеющим более высокое время настройки ($T_{\text{non-standard}} = 4$ часа), но при этом его нормализованная эффективность $E_{\text{max}} = 1,1$. Допустим, что второй насос для подачи жидкости разработан специально для данной линии, имеет уникальные характеристики, требующие специфической настройки. Он несовместим с большинством стандартных систем, сложен в замене и имеет ограниченную документацию. Однако, в определенных условиях он может обеспечивать более высокую точность и эффективность.

Для расчета времени настройки всей линии используется следующий состав компонентов:

- 1) стандартные компоненты: насосы, фильтры, конвейеры.
- 2) нестандартные компоненты: специализированные дозирующие механизмы, датчики.

В среднем, такого рода системы на каждые 10 разных узлов или компонентов, состоят которых 6 стандартных и 4 нестандартных.

Рассмотрим массив S , который в контексте рассматриваемой методики представляет собой бинарный массив для обозначения стандартных и нестандартных компонентов в системе. В этом массиве значение 1 указывает на стандартный компонент, а значение 0 указывает на нестандартный компонент.

Для рассматриваемого сценария массив S :

$$S = [1,1,1,1,1,1,0,0,0,0].$$

Тогда время настройки T_{setup} можно рассчитать следующим образом:

$$T_{setup} = \sum_{i=1}^{10} (S_i \cdot T_{standard} + (1 - S_i)T_{nonstandard}),$$

$$T_{setup} = 6 \cdot 3 + 4 \cdot 4 = 34 \text{ часа},$$

далее, для расчета эффективности работы линии E_{line}

$$E_{line} = \frac{1}{10} \sum_{i=1}^{10} (S_i \cdot E_{max} + (1 - S_i)E_{min}),$$

$$E_{line} = \frac{1}{10} (6 \cdot 1 + 4 \cdot 1,1) = 1,04,$$

таким образом, линия, включающая в свой состав как стандартные, так и нестандартные компоненты, будет требовать 34 часа на настройку (18 часов на настройку стандартных компонентов и 16 часов на настройку нестандартных компонентов). При этом эффективность работы линии составляет 1,04. Нестандартные компоненты работают с эффективностью 1.1, что может повышать общую производительность линии, несмотря на более длительное время настройки.

Рассмотрим, случай, когда РЛР состоит из 10 стандартных компонентов, где $T_{standard} = 3$ часа и $E_{max} = 1,0$.

В таком случае Массив S будет следующим: $S = [1,1,1,1,1,1,1,1,1,1]$.

Тогда время настройки $T_{setup} = 3 \cdot 10 = 30$ часов, а $E_{line} = \frac{1}{10} (10 \cdot 1) = 1,0$.

В итоге линия, состоящая только из стандартных компонентов, требует 30 часов на настройку. Таким образом, в рассматриваемом примере

нестандартные компоненты повышают общую эффективность работы линии на 4 %, но увеличивают время ее настройки на 4 часа.

При этом в рассматриваемой системе каждый компонент имеет свое значение уникальности U_i и стандартности S_i при определенной дисперсии уникальности компонентов D . Каждый компонент системы также имеет определенный уровень защиты P_i и уязвимости F_i .

Это необходимо для того, чтобы применить коэффициент выбора и обоснования режимов работы K_{pp} , благодаря которому можно оценить сложность выбора и обоснования оптимальных режимов работы для различных компонентов системы в модель вводятся также коэффициенты сложности выбора режима $\beta = 1,5$, выражаемые за счет экспертной оценки и особых технических условий, описанных производителем, а также максимальное значение режима R_{max} принимаемое равным 100.

После проведенного анализа был предложен ряд улучшений производственного процесса.

Основные мероприятия включали:

- 1) установка индикаторов контроля за процессом заполнения чернил, что помогло снизить вероятность ошибок операторов и обеспечило своевременное пополнение чернил, что напрямую влияет на стабильность цвета печати и уменьшение дефектов, связанных с несоответствием цвета;
- 2) введение цветowych индикаторов для хранения чернил, что позволило идентифицировать срок годности и условия хранения чернил для того, чтобы избежать использования чернил с истекшим сроком годности и снижения вероятности появления дефектов, связанных с качеством чернил;
- 3) создание новых процедур по очистке печатных пластин и внедрение регулярных проверок их состояния, что способствовало предотвращению накопления загрязнений на пластинах и уменьшило

вероятность появления таких дефектов, как «pearl defects» и «spot defects».

На рисунке 16 показан алгоритм реализуемой в рассматриваемом исследовании методики, повышения контроля качества, качества функционирования и эффективности производственного процесса розлива. На рисунке показано, как предлагаемая система объединяет цикл DMAIC (аббревиатура от слов Define, Measure, Analyze, Improve, Control, определять, измерять, анализировать, улучшать, контролировать), с методами интеллектуального анализа данных и FMEA (аббревиатура от failure mode and effects analysis, анализ режимов и последствий отказов) для систематического выявления, анализа и устранения дефектов [44].

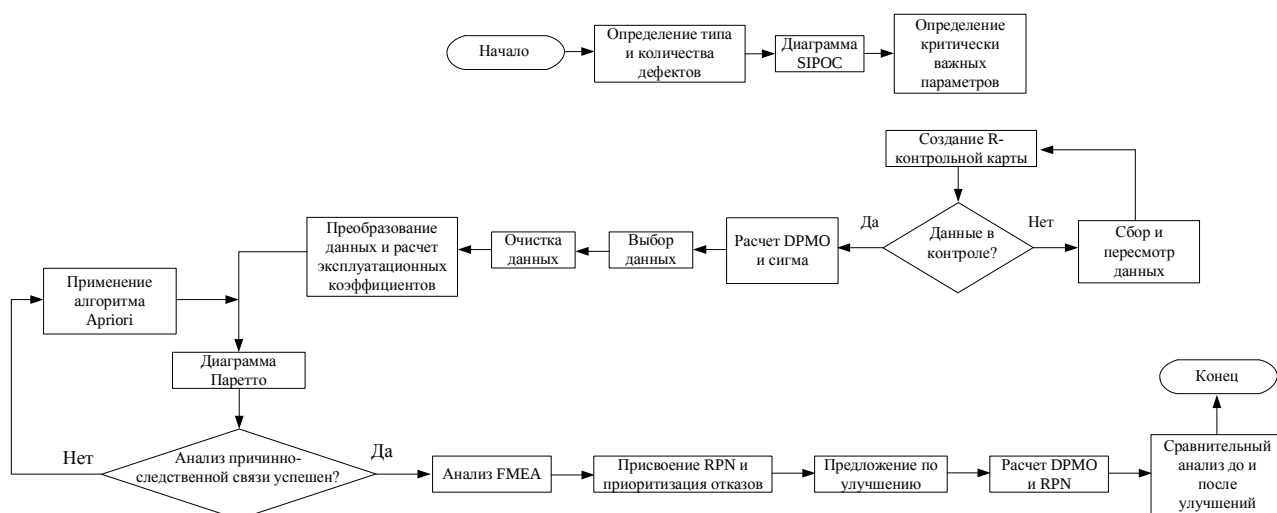


Рисунок 16 – Алгоритм применения предлагаемой методики оценки качества организации технологических процессов роботизированной линии розлива

На рисунке 16 процесс разделяется на два направления, где первый направлен на анализ данных с использованием диаграммы Парето и анализа причинно-следственных связей, а второй на подготовку данных через выбор данных, их очистку, преобразование и применение алгоритма Apriori [47].

2.2.1 Практическое применение методики оценки качества организации технологических процессов роботизированного розлива

Исходные данные и входные параметры исследуемой линии представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Исходные данные для моделируемого анализа качества на РЛР

Параметр	Значение
Скорость выгрузки материального (Q)	10 литров в минуту
Эффективность очистки тары (при вторичном использовании тары) (E_f)	99%
Вероятность корректной очистки ($P_{\text{cleanliness}}$)	99%
Точность дозирования (δV_d)	$\pm 0,01$ литра
Вероятность герметизации заполненной тары без дефекта (P_{seal})	98%
Вероятность корректного паллетирования (P_{pallet})	97%
Средняя вероятность прохождения контроля качества (P_{quality})	97,02%
Вероятность безошибочной маркировки (P_{label})	98%
Начальный уровень шума (L_i)	50 дБ
Температурные колебания	Незначительное влияние
Количество стандартных компонентов	6
Количество нестандартных компонентов	4
Время настройки стандартного компонента (T_{standard})	3 часа
Время настройки нестандартного компонента ($T_{\text{non-standard}}$)	4 часа
Нормализованная эффективность стандартного компонента (E_{max})	1,0
Нормализованная эффективность нестандартного компонента (E_{max})	1,1
Коэффициент изменения шума со временем (g_i)	0,1 дБ/час
Коэффициент изменения шума от нагрузки (m_i)	0,05 дБ/единицу нагрузки
Коэффициент сложности выбора режима (β)	1,5
Максимальное значение режима (R_{max})	100
Количество дефектов до улучшений (defects_before)	2500 на 1 000 000 ед. продукции (units)
Возможности для дефектов (opportunities), количество проверок на каждой единице продукции, включающие: фильтрация; дозирование; укупорка; маркировка; паллетирование	opportunities = 5: 1.

Далее в модели для снижения количества дефектов и оценки эффективности внедрения улучшений используется метод DPMO, анализ FMEA с внедрением предложенных в главе 1 коэффициентов.

$$DPMO = \frac{\text{defects_before}}{\text{opportunities} \cdot \text{units}} \cdot 1000000,$$

$$\text{до улучшений: } DPMO_{\text{до_улучшений}} = \frac{2500}{5 \cdot 1000000} \cdot 1000000 = 500.$$

Номер приоритетности риска, RPN рассчитывается по формуле:

$$RPN = T \cdot Ч \cdot Д,$$

где T – тяжесть, параметр оценивает серьезность последствий отказа;

Ч – частота возникновения, параметр оценивает вероятность возникновения отказа;

Д – возможность детектирования, параметр оценивает вероятность обнаружения отказа до его возникновения.

Значения параметров риска оцениваются от 1 до 10, где для (тяжесть) (Т) 1 соответствует незначительным последствиям, а 10 катастрофическим последствиям, для (частота) (Ч) 1 – очень низкая частота возникновения, а 10 – очень высокая, для (детектирование) (Д) 1 – легко обнаруживаемый отказ, а 10 – трудно обнаруживаемый.

Примеры расчетов RPN для различных режимов отказа показаны в таблице 4.

Таблица 4 – Параметры RPN исследуемой РЛР

Тип отказа	Тяжесть (Т)	Частота (Ч)	Детектирование (Д)	RPN до улучшений
Засорение фильтра	9	5	3	
Неправильное дозирование	8	4	4	
Неправильная герметизация	9	3	2	
Ошибки маркировки	6	4	3	
Ошибки паллетирования	3	3	4	

Необходимые характеристики РЛР, используемые в расчетах эксплуатационных коэффициентов представлены в таблице 5, где использованы следующие обозначения: U – уникальность компонента (от 0 до 1, где 1 – абсолютно уникальный компонент); S – стандартность компонента (1 – стандартный, 0 – нестандартный); Q – качество компонента (от 0 до 1, где 1 – идеальное качество); P – вероятность безопасной работы компонента (от 0 до 1, где 1 – полностью безопасный); F – уязвимость компонента (от 0 до 1, где 1 – очень уязвимый); L – уровень шума компонента в дБ; В – коэффициент безопасности компонента; Н – коэффициент вредности компонента.

Таблица 5 – Параметры моделируемой РЛР, необходимые для расчета эксплуатационных коэффициентов стандартизации

№ п.п	Описание	U	S	Q	P	F	L	В	Н
1	Система фильтрации	0,9	1	0,95	0,98	0,05	50	0,95	0,05
2	Дозирующий насос	0,8	1	0,92	0,97	0,04	48	0,93	0,07
3	Система управления процессами	0,85	0	0,90	0,96	0,06	52	0,92	0,08
4	Укупорочная Ячейка	0,7	1	0,93	0,99	0,03	47	0,97	0,03
5	Система маркировки	0,95	0	0,89	0,95	0,07	53	0,90	0,10
6	Транспортная лента	0,6	1	0,91	0,94	0,08	49	0,88	0,12

7	Система паллетирования	0,7	0	0,88	0,93	0,09	54	0,87	0,13
8	Система контроля давления	0,9	1	0,94	0,98	0,05	50	0,94	0,06
9	Система контроля температуры	0,75	0	0,87	0,92	0,10	55	0,85	0,15
10	Система контроля качества	0,8	1	0,93	0,97	0,04	48	0,91	0,09

Ниже представлен подробный расчет эксплуатационных коэффициентов.

Коэффициент универсальности:

$$K_y = \frac{\sum_{i=1}^N U_i}{N} = \frac{0,9 + 0,8 + 0,85 + 0,7 + 0,95 + 0,6 + 0,7 + 0,9 + 0,75 + 0,8}{10} = 0,815.$$

Коэффициент согласованности качества:

$$\mu_Q = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Q_i = \frac{0,95 + 0,92 + 0,9 + 0,93 + 0,89 + 0,91 + 0,88 + 0,94 + 0,87 + 0,93}{10} = 0,912,$$

$$\sigma_Q = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Q_i - \mu_Q)^2} \approx 0,026,$$

$$K_{ск} = \frac{\mu_Q}{\sigma_Q} = \frac{0,912}{0,026} = 35,01.$$

Остальные эксплуатационные коэффициенты были рассчитаны аналогичным образом. В таблице 6 приведены все рассчитанные эксплуатационные коэффициенты стандартизации.

Таблица 6 – Рассчитанные эксплуатационные коэффициенты стандартизации

Коэффициент	Значение	Оценка критерия
Коэффициент универсальности (K_y)	0,815	Высокий уровень универсальности
Коэффициент согласованности качества ($K_{ск}$)	35,01	Средняя согласованность качества
Коэффициент стандартности (K_c)	0,6	Средний уровень стандартности
Коэффициент сложности стандартизации ($K_{сс}$)	0,305	Высокая сложность стандартизации

Коэффициент безопасности и гигиены ($K_{\text{без}}$)	0,549	Умеренный уровень безопасности и гигиены
Коэффициент защиты (K_z)	0,907	Высокий уровень защиты
Коэффициент режимов работы (K_p)	0,885	Высокая согласованность режимов работы
Коэффициент шумового загрязнения ($K_{\text{ш}}$)	9,1	Высокий уровень шума

В результате проведённого анализа эксплуатационных коэффициентов роботизированной линии розлива была получена комплексная оценка её текущего состояния с использованием соответствующих шкал оценки для каждого коэффициента.

Коэффициент универсальности ($K_y = 0,815$) указывает на высокий уровень универсальности компонентов (шкала: 0,8–1,0 – высокий уровень), что свидетельствует о возможности их адаптации или замены, повышая гибкость и снижая затраты на обслуживание линии.

Коэффициент согласованности качества ($K_{\text{ск}} = 35,01$) находится в среднем диапазоне (шкала: $K_{\text{ск}} > 50$ – высокий уровень, 30–50 – средний, < 30 – низкий), отражая умеренную однородность качества продукции и указывая на необходимость усиления мер контроля качества и внедрения дополнительных статистических методов для снижения отклонений.

Коэффициент стандартности ($K_c = 0,6$) соответствует среднему уровню стандартности (шкала: 0,6–0,8 – средний уровень), показывая, что 60% компонентов являются стандартными; рекомендуется увеличить эту долю и разработать стандарты для нестандартных компонентов.

Коэффициент сложности стандартизации ($K_{\text{сс}} = 0,305$) свидетельствует о высокой сложности унификации компонентов и процессов (шкала: 0,0–0,3 – высокая сложность), требуя упрощения и разработки универсальных процедур, возможно через модульный подход в конструкции системы.

Коэффициент безопасности и гигиены ($K_{\text{без}} = 0,549$) оценивается как умеренный (шкала: 0,5–0,7 – умеренный уровень), указывая на потенциальные

риски для операторов и продукции; необходимо проведение аудита безопасности, внедрение дополнительных мер и обучение персонала.

Коэффициент защиты ($K_z = 0,907$) демонстрирует высокий уровень защиты компонентов от внешних воздействий (шкала: 0,8–1,0 – высокий уровень), рекомендовано поддерживать текущие меры и проводить регулярные аудиты безопасности.

Коэффициент режимов работы ($K_{pp} = 0,885$) отражает высокую согласованность и эффективность режимов работы компонентов (шкала: 0,8–1,0 – высокий уровень), предлагается поддерживать и оптимизировать текущие настройки с использованием автоматизированных систем управления.

Коэффициент шумового загрязнения ($K_{ш} = 9,1$) указывает на высокий уровень шума, превышающий допустимые нормы (шкала: $K_{ш} < 5$ – низкий уровень шума, 5–10 – высокий, >10 – очень высокий), негативно влияющий на персонал; необходимо внедрение мер по снижению шума, таких как звукоизоляция и использование оборудования с более низким уровнем шума. Таким образом, рассчитанные коэффициенты и применённые шкалы оценки позволяют определить приоритетные направления для улучшения, установить цели по повышению эффективности, качества и безопасности работы РЛР, а также разработать планомерные меры для достижения соответствия отраслевым стандартам и повышения конкурентоспособности предприятия.

Для коэффициента универсальности ($K_y = 0,815$) необходимо продолжить использование универсальных компонентов и увеличить стандартизацию.

Для коэффициента согласованности качества ($K_{ск} = 35,01$) рекомендуется поддерживать текущие методы контроля качества и внедрить дополнительные меры для улучшения согласованности.

Для коэффициента стандартности ($K_c = 0,6$) следует увеличить долю стандартных компонентов в системе и разработать стандарты для нестандартных компонентов.

Для коэффициента сложности стандартизации ($K_{cc} = 0,305$) требуется унифицировать процедуры и стандарты, а также разработать универсальные решения для снижения сложности стандартизации.

Для коэффициента безопасности и гигиены ($K_{без} = 0,549$) необходимо улучшить меры безопасности и гигиены, внедрить новые стандарты и процедуры для повышения уровня безопасности.

Для коэффициента защиты ($K_z = 0,907$) рекомендуется поддерживать текущие меры защиты и внедрить дополнительные меры для обеспечения еще большей защищенности компонентов.

Для коэффициента режимов работы ($K_{rp} = 0,885$) следует поддерживать текущую согласованность режимов работы и оптимизировать режимы работы для повышения эффективности.

Для коэффициента шумового загрязнения ($K_{ш} = 9,1$) необходимо внедрить меры по снижению уровня шума, такие как звукоизоляция, и использовать оборудование с более низким уровнем шума.

На основании проведенного анализа и предложенных улучшений, реализуем изменения в модели для оценки их влияния на систему.

1. Увеличить частоту замены и очистки фильтров. Ожидаемое снижение частоты (Ч) с 5 до 3.
2. Внедрение автоматических систем калибровки дозирующих насосов. Ожидаемое снижение частоты (Ч) с 4 до 2.
3. Использование более надежных материалов для герметизации. Ожидаемое снижение частоты (Ч) с 3 до 2.
4. Внедрение системы автоматической проверки маркировки. Ожидаемое снижение частоты (Ч) с 4 до 2.
5. Внедрение автоматизированных систем контроля паллетирования. Ожидаемое снижение частоты (Ч) с 3 до 2.

Рассмотрим конструктивные обоснования улучшений:

- 1) увеличение частоты замены и очистки фильтров приведет к снижению частоты возникновения засорений;

- 2) внедрение автоматических систем калибровки и регулярная проверка клапанов снизят вероятность неправильного дозирования;
- 3) использование более надежных материалов и регулярные проверки герметиков уменьшат частоту протечек;
- 4) внедрение системы автоматической проверки маркировки повысит точность и снизит вероятность ошибок;
- 5) внедрение автоматизированных систем контроля обеспечит правильное паллетирование и уменьшит количество ошибок.

В таблице 7 представлен пример расчетов RPN для различных типов после проведения улучшений.

Таблица 7 – Параметры RPN для различных типов отказа моделируемой РЛР
после улучшений

Тип отказа	Тяжесть (Т)	Частота (Ч)	Детектирование (D)	RPN
Засорение фильтра	6	3	3	54
Неправильное дозирование	7	2	4	56
Неправильная герметизация	8	2	2	32
Ошибки маркировки	5	2	3	30
Ошибки паллетирования	6	2	4	84

На основании обновленных данных об ожидаемом снижении дефектов, пересчитаем DPMO: – количество дефектов до улучшений: 2500 на 1,000,000 единиц продукции; – ожидаемое количество дефектов после улучшений: 978 на 1,000,000 единиц продукции; – количество проверок (opportunities) на единицу продукции: 5; – $DPMO_{\text{после}} = 195,6$.

На рисунке 17 представлен пример реализации программного расчета RPN до и после моделируемых улучшений, а также выводятся значения DPMO.

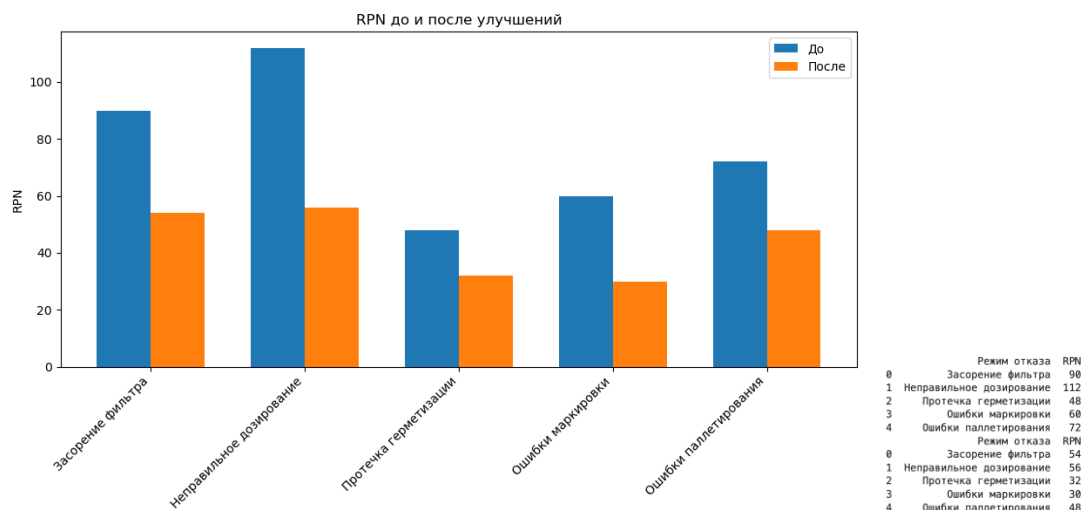


Рисунок 17 – Программный расчет RPN до и после моделируемых улучшений на основе рассчитанных эксплуатационных коэффициентов

Таким образом, разработанная методика на основе эксплуатационных коэффициентов позволяет производить объективную оценку характерных параметров качества производственного процесса РЛЛ, чтобы выявить области, требующие улучшения.

На рисунке 18 представлена структурная схема применения методики оценки качества работы отдельных модулей РЛР по эксплуатационным коэффициентам, содержащая в себе основные шаги по расчету коэффициентов, сбору необходимых данных, проведению последующего анализа FMEA.

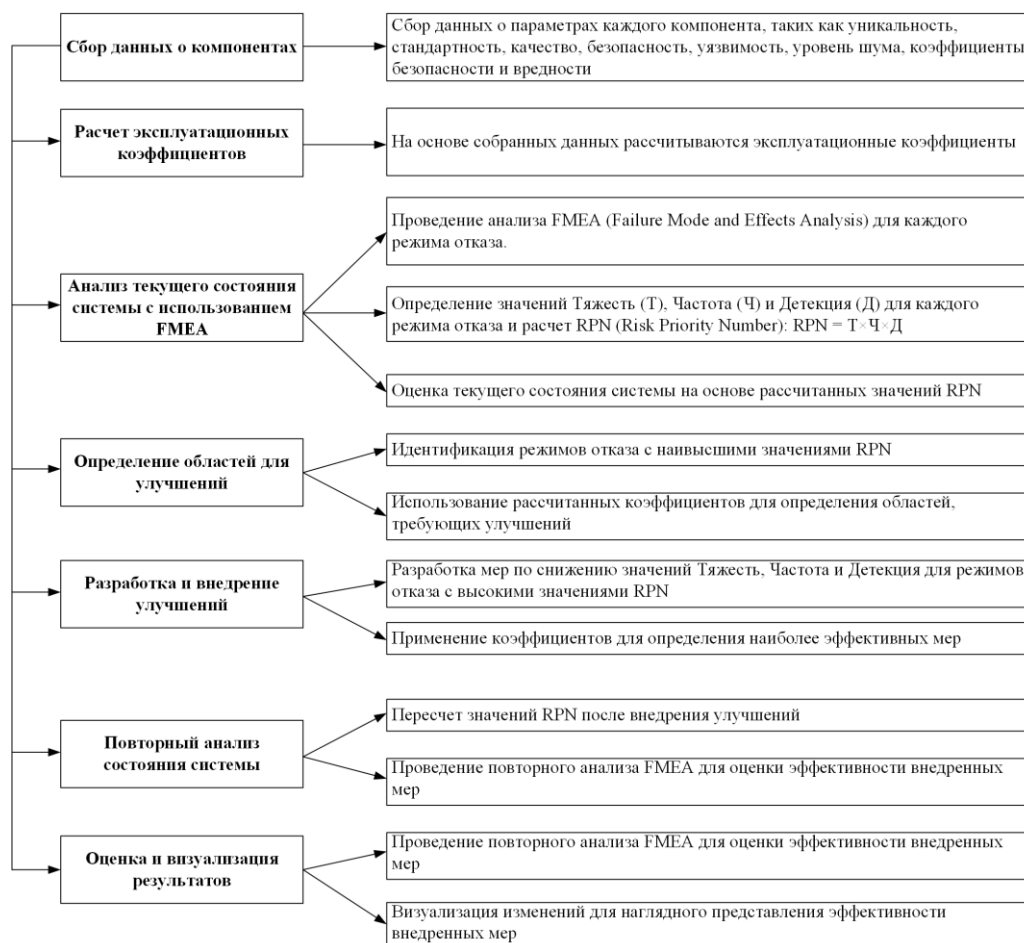


Рисунок 18 – Структурная схема методики анализа РЛР с применением эксплуатационных коэффициентов

В приложении Б представлен программный код, написанный на языке Python, который предназначен для проведения анализа эксплуатационных коэффициентов компонентов РЛР и проведения первичного анализа FMEA с визуализацией результатов. Код разделен на несколько функций, основная из которых рассчитывает описанные в первом разделе эксплуатационные коэффициенты на основе параметров и данных о модулях РЛР. Программа предложит пользователю ввести количество компонентов исследуемой системы. Для каждого компонента необходимо ввести следующие параметры:

U (уникальность): значение от 0 до 1, указывающее, насколько уникален компонент;

Q (качество): значение от 0 до 1, указывающее на качество компонента, где компонент с высокими техническими характеристиками может иметь значение 0,95, а компонент с частыми отказами – 0,2;

S (стандартизация): значение от 0 до 1, указывающее на возможность и текущую степень стандартизации модуля/компонента, где полностью стандартизованный модуль может иметь значение 1, тогда как уникальный, нестандартный модуль – 0,3 или меньше;

B (безопасность): значение от 0 до 1, указывающее на уровень безопасности, где компонент, соответствующий всем необходимым стандартам безопасности, может иметь значение 0,95, а компонент с низким уровнем безопасности – 0,3 или ниже;

H (вредность): значение от 0 до 1, указывающее на степень вредности, создающий высокий уровень вредности (например, очень шумный или радиационный компонент), может иметь значение 0,8, тогда как экологически чистый компонент – 0,1;

P (защищенность): значение от 0 до 1, указывающее на уровень защиты модуля или компонента;

F (уязвимость): значение от 0 до 1, указывающее на уязвимость модуля или компонента, компонент, который легко повреждается, может иметь значение 0,8, тогда как прочный и устойчивый компонент – 0,2;

R (режим работы): значение от 0 до 1, указывающее на режим работы модуля, где значение 0 указывает на то, что компонент работает в крайне неэффективном режиме, где возможны частые отказы или недопустимая производительность, а значение 1 указывает на оптимальный режим работы, где компонент работает наилучшим образом;

L (Уровень шума): значение в децибелах (дБ), указывающее на уровень шума модуля, в точке его расположения в линии.

Рисунок 19 показывает результат работы разработанного программного кода на основании которого проводится анализ FMEA, как было описано выше, после чего программным кодом, на основе получившихся значений коэффициентов генерируются общие рекомендации по необходимым улучшениям процессов и модулей в РЛР, о которых пользователем вводились требуемые параметры.

Коэффициенты:
 Ku: 0.3667
 Ksk: 3.8891
 Ks: 0.6000
 Kss: 16.0000
 Kbez: 0.8462
 Kz: 1.0000
 Krr: 0.1031
 Ksh: 0.4000

Рекомендации по улучшению:
 – Увеличить стандартизацию компонентов для повышения универсальности (Ku).
 – Увеличить долю стандартных компонентов для повышения стандартности (Kс).
 – Оптимизировать режимы работы для повышения согласованности (Kp).

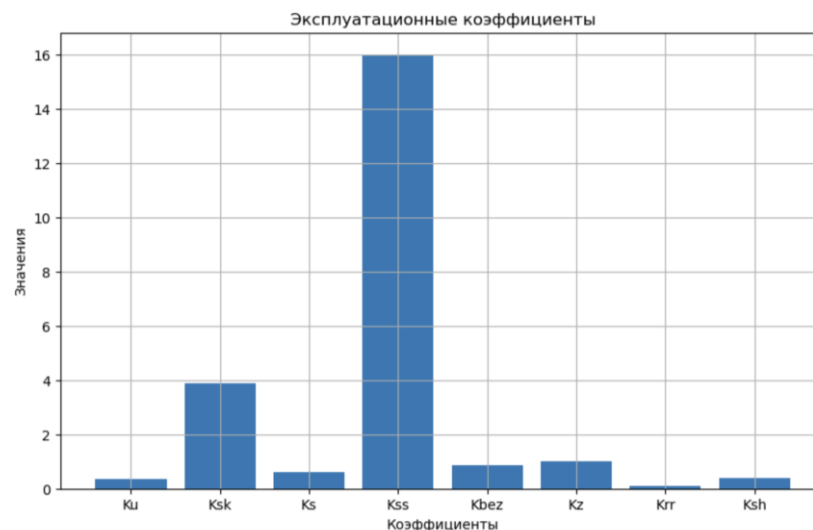


Рисунок 19 – Пример работы программы расчета эксплуатационных коэффициентов РЛР

Таким образом, при корректном подходе к использованию методики оценки качества производственного процесса и работы отдельных модулей РЛР разработанный программный код предлагает структурированный подход к выявлению слабых мест, оценке рисков и внедрению улучшений.

2.3 Апробация методики оценки качества организации технологических процессов роботизированного розлива и эффективности функционирования линии

Для проведения верификации разработанной модели и методики анализа качества РЛР на основе эксплуатационных коэффициентов были собраны реальные данные с действующей производственной линии автоматического розлива газированных напитков в алюминиевые банки. Собранные данные были получены с высокоскоростной линии розлива напитков, в специализированную алюминиевую тару (банки) специально разработанную для данного производства (250 мл тонкие алюминиевые банки). Исследуемая

упаковочная линия работает со скоростью 90 000 банок в час. Учитывая такую высокую производительность, поддержание контроля качества имеет решающее значение для обеспечения правильного наполнения каждой банки и соответствия требуемым стандартам.

Данные, собранные в течение дня, включают информацию о случаях недолива и перелива, обнаруженных инспекционной системой HEUFT, используемых аппарат представлен на рисунке 20.



Рисунок 20 – Система HEUFT InLine II IXS для рентгеновской проверки дна пустой тары с использованием HEUFT SPECTRUM II для определения недоливов и переливов

Каждый обнаруженный дефект (факт перелива или недолива в банку) сразу связывается с определенным номером клапана, что позволяет точно определить проблемные зоны на линии розлива.

Данные показывают различное количество инцидентов недолива для разных клапанов, причем для некоторых клапанов количество инцидентов значительно выше. В результате исследования был разработан программный интерфейс для сбора данных в конце рабочей смены упаковочной линии, который показан на рисунке 21.

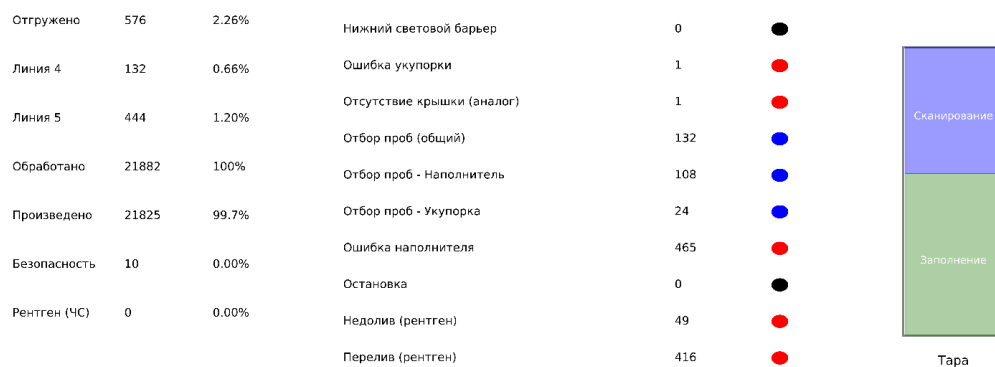


Рисунок 21 – Программный интерфейс системы контроля наполнения тары

Пример вывода данных перелива или недолива, показанного в программе представлен на рисунке 22.

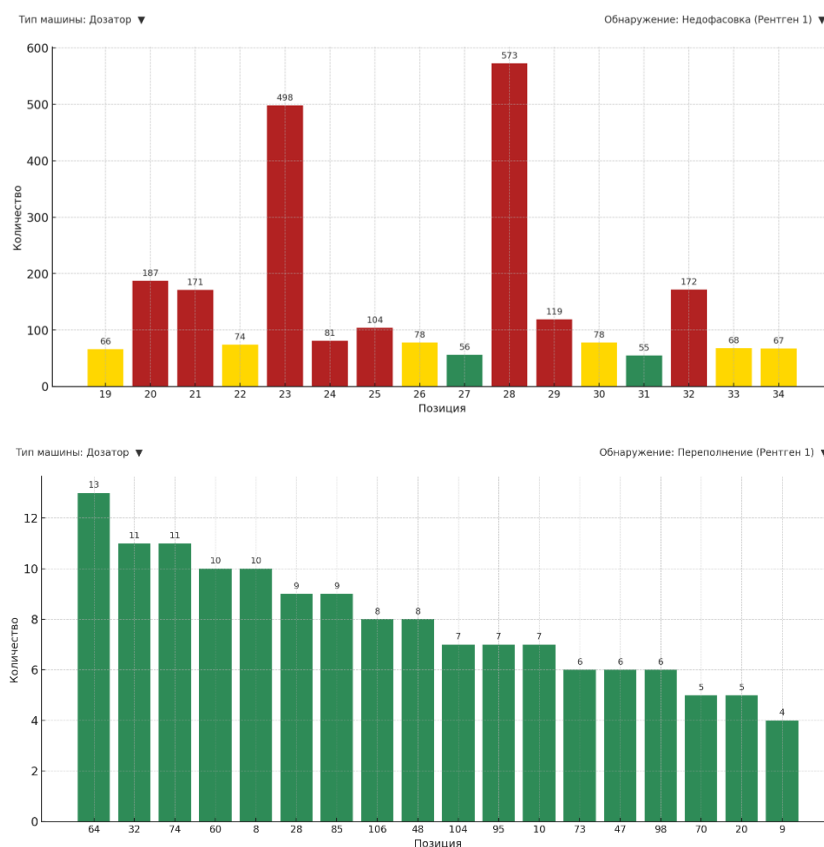


Рисунок 22 – Верхний график – данные о недоливах, нижний – данные о переливах по номерам позиций клапанов роботизированной линии розлива

Как и в случае с недоливом, количество случаев перелива также варьируется, что указывает на возможные несоответствия в работе клапанов.

Данные, представленные на рисунке 22 отображают количество переливов или недоливов за один конкретный день смены. Всего сбор данных производился для двух месяцев каждый день, непрерывно.

В результате сбора данных наблюдалась заметная вариативность работы клапанов, причем некоторые клапаны постоянно демонстрировали более высокое количество дефектов (как недолива, так и перелива).

В течение следующего после двух месяцев сбора данных следовал месяц калибровки и дополнительной пуско-наладки системы. Причем операторы и инженеры линии в своих ежедневных отчетах указывали, что изменение интенсивности налива на $\pm 0,05\%$ не позволяло спрогнозировать получаемые изменения на линии: в некоторых случаях прибавка налива всего на $0,05\%$, наоборот вызывала увеличение количества недоливов и наоборот.

Приступим к анализу на основе разработанной в п. 2.1 данной диссертации методики. Основная цель – расчет и оценка эксплуатационных коэффициентов качества, исходя из условий исследуемой производственной линии.

Необходимые для расчета эксплуатационных коэффициентов параметры были получены исходя из экспертной оценки инженерного состава и операторов исследуемой линии.

1. Уникальность компонента ($U = 0,7$) выбрано операторами исходя из того, что производственная линия работает с очень высокой скоростью (90 000 банок в час). Для этого требуются компоненты, способные решать специфические задачи, уникально подходящие к требованиям такой быстро меняющейся среды. Хотя высокая уникальность может привнести сложность в комплексную систему РЛР, она уравнивается необходимостью в специализированных компонентах, которые обеспечивают высокую эффективность и низкий уровень брака.

2. Стандартизация компонента ($S = 0,9$) выбрано операторами исходя из обеспечения РЛР поддержания последовательности и надежности в условиях высокоскоростного производства. Исследуемая РЛР имеет высокий уровень стандартизации и обеспечивает взаимозаменяемость компонентов, сокращая время простоя и сложность обслуживания.

3. Качество компонента ($Q = 0,95$) выбрано инженерным составом основываясь на том, что линия обеспечивает не высокий процент дефектов и высокий процент бесперебойной работы на значительных скоростях и загрузке. Значение 0,95 отражает потребность в компонентах, отвечающих строгим стандартам качества, чтобы выдерживать требования производственной линии.

4. Вероятность безопасной работы ($P = 0,85$) означает реальную производственную вероятность того, что компоненты будут работать безопасно в нормальных условиях, данное значений передано операторами из проектной документации исследуемой РЛР.

5. Уязвимость компонента ($F = 0,20$) описано инженерным составом как низкое значение уязвимости в силу того, что по их экспертной оценке компоненты устойчивы к повреждениям и износу, что снижает вероятность отказов.

6. Уровень шума компонента ($L_{\text{сред}} = 75$ дБ), это связано с тем, что высокоскоростные операции обычно создают значительный шум, который может повлиять на рабочую среду и здоровье оператора. Значение 75 дБ отражает типовой уровень шума для высокоскоростного производственного оборудования, который со временем может увеличиваться. На исследуемой РЛР для обеспечения соответствия действующим нормам охраны труда и техники безопасности в обязательном порядке требуются меры по снижению уровня шума.

7. Коэффициент безопасности ($B = 0,9$) выбран согласно экспертной оценке операторов и инженеров линии исходя из наличия современных средств защиты и соответствия отраслевым стандартам безопасности.

8. Коэффициент вредности ($H = 0,5$) выбран согласно экспертной оценке операторов и инженеров исходя из того, что на производстве присутствуют радиоактивные устройства, которые необходимо дополнительно изолировать, для обеспечения минимального вредного воздействия на рабочую среду.

Далее производим расчет DPMO.

Исходные данные:

- линия производит 90,000 банок в час;
- количество часов работы в день 21 час;
- общее количество произведенной продукции за день: 2 070 000 банок;
- среднее количество дефектов недолива (всего по клапанам): 4 670 шт.;
- среднее количество дефектов перелива (всего по клапанам): 3 385 шт.

Недолив:

$$DPMO_{\text{недолив}} = \frac{4670}{2070000} \cdot 1000000 = 2257,$$

перелив:

$$DPMO_{\text{перелив}} = \frac{3385}{2070000} \cdot 1000000 = 1635.$$

Произведем расчет RPN для данных типов отказов и сведем его в таблицу 8.

Таблица 8 – Рассчитанный RPN для типов отказов недолив и перелив
для исследуемой производственной линии

Тип отказа	Тяжесть (Т)	Частота (Ч)	Детектирование (D)	RPN
Недолив	6	7	6	252
Перелив	4	5	6	150

Рассчитанные значения эксплуатационных коэффициентов для исследуемой РЛР представлены в таблице 9.

Таблица 9 – Эксплуатационные коэффициенты исследуемой РЛР

Коэффициент	Значение
Коэффициент универсальности (K_y)	0,7
Коэффициент согласованности качества ($K_{ск}$)	0,95
Коэффициент стандартности (K_c)	0,9
Коэффициент сложности стандартизации ($K_{сс}$)	0,07
Коэффициент безопасности и гигиены ($K_{без}$)	0,27
Коэффициент защиты (K_3)	0,91
Коэффициент режимов работы (K_p)	0,89
Коэффициент шумового загрязнения ($K_{ш}$)	75

На основе рассчитанных эксплуатационных коэффициентов стандартизации и управления качеством работы РЛР, был предложен ряд мер по снижению отказов и улучшению работы линии. В первую очередь меры были направлены на повышение общей эффективности линии, снижение брака и улучшения качества продукции.

При анализе коэффициента универсальности составляет, который составил 0,7, руководителем линии было принято решение о дополнительном обучении операторов работе с универсальными компонентами, так как конструкционные изменения в линии уже не произвести.

Для контроля коэффициента качества продукции было принято решение увеличить регламентную частоту калибровки датчиков контроля веса, также, эффективной, но дорогостоящей мерой здесь могло бы быть внедрение системы автоматической настройки параметров технологического процесса на основе данных, полученных с датчиков и информации оперативного журнала операторов. Это также может способствовать повышению уровня стандартизации компонентов, который в настоящее время составляет 0,9, и позволит сократить количество ошибок при переходе к производству новых партий продукции.

Коэффициент сложности стандартизации, так как данная линия уже находится в работе с 2022 года рассматривался только с точки зрения информативного характера, меры по его повышению могут быть приняты только в случае реконструкции линии.

Для повышения коэффициента безопасности и гигиены, который составляет 0,2667, необходимо внедрить дополнительные меры безопасности, такие как регулярный осмотр оборудования на предмет износа и повреждений, и проведения дополнительных процедур контроля доступа посторонних и утечки продукции, для этого были произведены дополнительные мероприятия, одним из которых являлся контроль разбрызгивания

наполняемых веществ, результат проведения процедуры которого представлен на рисунке 23.



Рисунок 23 – Результаты процедуры контроля разбрызгивания материальных потоков упаковочной линии

После внедрения описанных мер по улучшению были произведены повторные измерения, статистика переливов клапанов после проведения улучшений представлена рисунке 24.

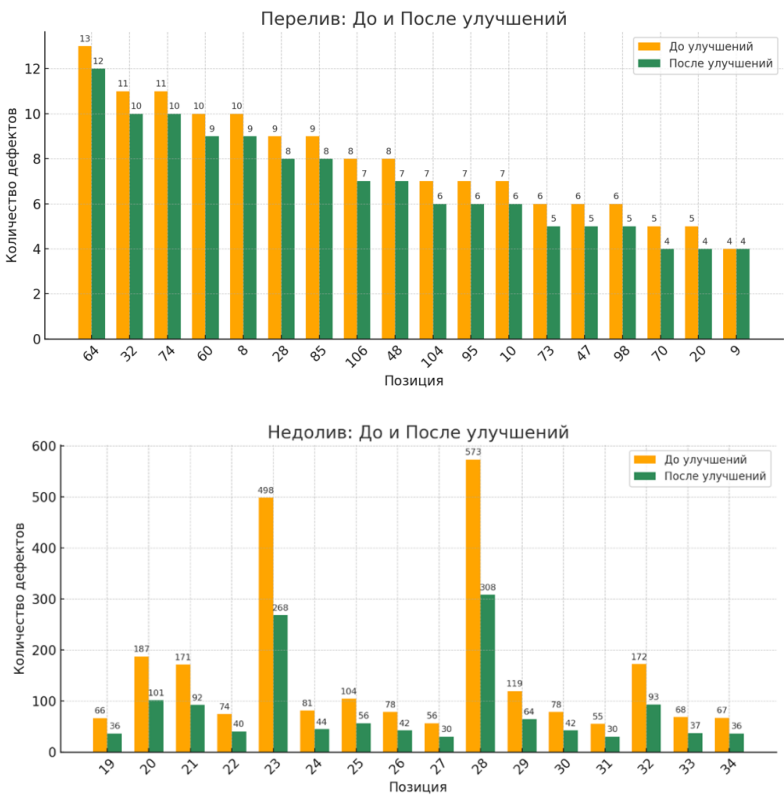


Рисунок 24 – Статистика работы исследуемой линии розлива после проведения предложенных улучшений в производственных процессах

После внедрения улучшений и перенастройки оборудования РЛР производились снова замеры переливов и недоливов в течение недели. Исходя из этого было получено среднее значение дефектов за день. Перелив составил 1461 дефектов, а недолив 1214 дефектов. Расчет RPN и DPMO после внедрения улучшений представлен в таблице ниже. Важно отметить, что с точки зрения бизнес-процессов, организации и планирования производства недолив имеет гораздо более тяжелые последствия для производителя в силу возможных исков со стороны потребителя. В таблице 10 представлены рассчитанные показатели RPN и DPMO после внедрения улучшений в исследуемой РЛР.

Таблица 10 – Расчет RPN и DPMO после внедрения улучшений в исследуемой РЛР

Параметр	Значение до улучшений	Значение после улучшений
Количество дефектов (недолив)	2257	1214
Количество дефектов (перелив)	1635	1461
Общее количество дефектов	3892	2675
Количество произведенных банок в день	2 070 000	2 070 000
Количество проверок на банку	5	5
RPN (перелив)	150	42
RPN (недолив)	252	32
DPMO (перелив)	276,81	141,21
DPMO (недолив)	210,63	117,13

Таким образом, полученные результаты практического применения разработанной методики, указывают на то, что данный подход способствует повышению эффективности, надежности и безопасности высокоскоростных РЛР.

2.4 Контроль уровней шума, генерируемого роботизированной линией розлива

Для эффективного снижения шума необходимо в первую очередь выявить основные источники шума. Затем необходимо принять меры, направленные на борьбу с ними. Многие источники шума с меньшими уровнями звукового давления не оказывают значительного влияния на общий

уровень звукового давления. Таким образом, можно сказать, что при разнице в 10 дБ и более между двумя источниками шума, выбросы менее шумного источника не играют роли на практике. В дополнение к непосредственному восприятию шума человеческим ухом и снижению способности к общению из-за шума [61], отдельные звуковые явления или высокий постоянный уровень шума также могут повредить слух человека. Существует значительное количество литературы, описывающей вредное воздействие промышленного шума на слух человека [61, 62, 63, 64].

Общий уровень звукового давления определяется уровнем звукового давления доминирующего источника. Если же два источника шума имеют одинаковый уровень звукового давления, общий уровень повышается примерно на 3 дБ [65, 66]. Это означает, что меры по снижению шума должны быть сосредоточены на основных источниках шума. В линиях розлива напитков для этого используются, например, изолирующие экраны-капсулы для частей оборудования. Они устанавливаются на особенно шумных частях установки, таких как вход и выход ячейки для очистки бутылок и так далее [66]. Помимо самих ячеек, также могут быть оборудованы звукоизолирующими туннелями транспортеры или, по крайней мере, их части. Однако такие туннели редко встречаются на практике, поскольку они затрудняют доступ к транспортерам и могут вызывать в том числе гигиенические проблемы [50, 65, 66, 67, 68].

Однако именно транспортеры бутылок являются основным источником шума в линиях розлива напитков [69, 70]. Особенно важную роль играют уровни шума, возникающие при столкновении стеклянных бутылок.

В таблице 11 представлены результаты практических измерений уровня шума, создаваемого столкновением бутылок в конвейерной системе РЛР. Для выполнения измерений группа бутылок подвергалась ударам с разной скоростью. Измерения проводились на расстоянии одного метра от места удара с использованием настроек шумомера в настройке быстрого (125 мс) и импульсного (35 мс) измерений для того, чтобы более точно детектировать

импульсные шумовые события. Данные были собраны с размером выборки $n = 5$ для каждой скорости, а уровень значимости был установлен на уровне $\alpha = 0,05$. Такой подход гарантирует, что результаты являются статистически значимыми и надежными для оценки уровней шума в рабочей среде.

Таблица 11 – Измерения уровней шума при различных скоростях столкновения не заполненных стеклянных бутылок на РЛР

Скорость столкновения, м/с	Уровень звукового давления («Быстрый»), дБ(А)	Уровень звукового давления («Импульс»), дБ(А)
0,05	$64,7 \pm 0,3$	$74,6 \pm 1,0$
0,10	$74,4 \pm 1,0$	$85,4 \pm 1,4$
0,15	$80,0 \pm 0,6$	$89,1 \pm 1,0$
0,20	$85,3 \pm 0,5$	$94,1 \pm 0,8$
0,25	$87,6 \pm 0,5$	$96,9 \pm 0,5$
0,30	$90,1 \pm 0,8$	$97,7 \pm 0,9$
0,35	$92,5 \pm 1,1$	$99,8 \pm 0,8$

График средних значений измеренного уровня шума представлен на рисунке 25.

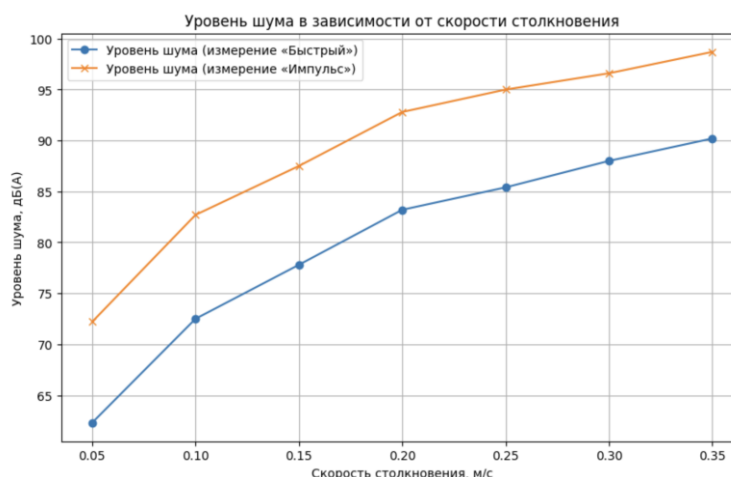


Рисунок 25 – График средних значений измеренного уровня шума от стеклянной тары при столкновениях

Измерения проводились с использованием стандартных стеклянных бутылок, обычно используемых на заводах по розливу напитков. Бутылки имели объем 0,5 литра и стандартные размеры 70 мм в диаметре и 240 мм в высоту. Эти размеры соответствуют типичным бутылкам, используемым в промышленности, что обеспечивает соответствие измерений реальным условиям.

Роботизированная линия розлива, использованная для измерений, представляла собой современную автоматизированную систему, предназначенную для высокоскоростных операций. Система включала в себя расширенные функции, такие как точное обращение с бутылками и их выравнивание, что сводило к минимуму вероятность несогласованности измерений из-за различий в позиционировании бутылок. Производительность линии составляла 40 000 бутылок в час, что соответствует высокой производительности, требуемой на современных предприятиях по розливу.

Чтобы лучше понять влияние содержимого бутылок на уровень шума, были проведены измерения как для наполненных, так и для пустых бутылок. Наполненные бутылки были заполнены водой до максимального объема (0,5 литра). Это различие имеет решающее значение, поскольку содержимое бутылок может существенно повлиять на уровень шума, производимого при столкновении. Дополнительная масса и демпфирующий эффект жидкости могут изменять акустические свойства бутылок, что приводит к изменению уровня шума.

Таблица 12 – Измерения уровней шума при различных скоростях столкновения заполненных стеклянных бутылок на РЛР

Скорость столкновения, м/с	Уровень звукового давления («Быстрый»), дБ(А)	Уровень звукового давления («Импульс»), дБ(А)
0,05	62,3 ± 0,4	72,2 ± 1,2
0,10	72,5 ± 0,9	82,7 ± 1,1
0,15	77,8 ± 0,7	87,5 ± 1,0
0,20	83,2 ± 0,6	92,8 ± 0,9
0,25	85,4 ± 0,5	95,0 ± 0,7
0,30	88,0 ± 0,7	96,6 ± 0,8
0,35	90,2 ± 1,0	98,7 ± 0,9

Результаты, приведенные в таблицах 11 и 12, указывают на заметную разницу в уровнях звукового давления между пустыми и наполненными бутылками. Наполненные бутылки, как правило, обладают более низким уровнем шума из-за демпфирующего эффекта жидкости, которая поглощает часть энергии удара и уменьшает амплитуду звуковых волн. Эти данные имеют решающее значение для разработки эффективных стратегий снижения

шума на заводах по розливу напитков, где состояние бутылок (наполненных или пустых) может существенно влиять на акустическую обстановку.

В соответствии с действующими нормами охраны труда, постоянный уровень шума выше 80-85 дБ(А) является вредным и требует принятия мер по его снижению. Представленные данные показывают, что при определенных скоростях удара уровень шума может превышать этот порог, особенно при использовании пустых бутылок в режиме «Импульс». Эти измерения подчеркивают важность целенаправленных мер по снижению шума, таких как изменение скорости конвейера или использование звукопоглощающих материалов.

2.4.1 Разработка методики организации производства для решения задач промышленной и экологической безопасности в области снижения шумовых эмиссий, возникающих в процессе работы роботизированных линий розлива

На заводах по розливу напитков стратегии снижения уровня шума часто включают герметизацию шумящих компонентов. Как уже говорилось, особенно важен уровень шума, создаваемый сталкивающимися стеклянными бутылками, а столкновения могут происходить в различных точках конвейера. Более высокий перепад скоростей при столкновениях приводит к более высокому уровню звукового давления [70]. Высокий перепад скоростей возникает в узком месте конвейера, где бутылки переходят от свободной транспортировки к группе застрявших бутылок. Столкновения с высокой разницей скоростей могут также происходить в группе застрявших бутылок, где бутылки под действием высокого давления могут выскакивать в зазоры. Это может привести к их значительному ускорению и столкновению на высокой скорости, как правило, с соседними бутылками. Одним из способов предотвращения этого является направление бутылки под низким давлением внутрь застрявшей бутылки.

Выбросы шума от конвейеров представляют собой серьезную проблему, поскольку эти устройства расположены по всему предприятию и влияют практически на всех операторов. Вторичные меры по снижению шума, такие как использование шумопоглощающих экранов или изоляционных материалов, как правило, непрактичны для конвейеров из-за их широкого распространения и сложности в установке. Поэтому обычно применяются первичные меры, направленные на непосредственное устранение источника шума. Одной эффективной такой мерой является использование систем подачи баллонов низкого давления, что позволяет снизить уровень шума на входе и выходе конвейеров за счет уменьшения давления воздуха в баллонах, однако это приводит к снижению скорости.

2.4.2 Алгоритм применения методики организации производства для решения задач промышленной и экологической безопасности в области снижения шумовых эмиссий, возникающих в процессе работы роботизированных линий розлива

Эффективные стратегии снижения шума необходимы для обеспечения соблюдения норм охраны труда и улучшения условий работы. Предлагаемый алгоритм описывает шаги и меры, которые необходимо предпринять для снижения шума на роботизированных линиях розлива, основываясь на идентифицированных основных источниках шума и физических и технических параметрах системы.

Рассмотрим систему, которая включает два агрегата и промежуточный транспортер, состоящий из $N+1$ секций, которые обеспечивают транспортировку и буферизацию тары между агрегатами. Необходимые к измерению параметры, а также регулируемые параметры, оказывающие влияние на генерацию шума приведены в таблице 13 и 14.

Таблица 13 – Взаимосвязь измеряемых и регулируемых параметров, влияющих на генерацию шума в РЛР

Измеряемая величина	Регулируемая величина
Производительность предшествующей ячейки $q_{вх}(t)$	$q_{вх_рег}(t)$
Производительность последующей ячейки $q_{вых}(t)$	$q_{вых_рег}(t)$
Скорость первого участка буфера $v_{вх}(t)$	$v_{вх_рег}(t)$
Скорость последнего участка буфера $v_{вых}(t)$	$v_{вых_рег}(t)$
Скорость участка буфера n: $v_n(t)$	$v_{n_рег}(t)$

Таблица 14 – Контролируемые физические параметры, влияющие на генерацию шума в РЛР

Описание параметра	Обозначение
Вместимость транспортера, бут.	C
Установленная производительность предшествующей ячейки, бут./ч	$q_{вх_max}$
Установленная производительность последующей ячейки, бут./ч	$q_{вых_max}$
Длины отдельных участков транспортера, м	$l_0, \dots, l_N$
Максимальная скорость конвейерных лент, м/с	$v_{вх_max}, \dots, v_{вых_max}$

Методика контроля предполагает следующие шаги.

1) Проведение оценки уровня шума:

- измерить уровни шума (в дБ(А)) у всех ключевых компонентов системы: предшествующая ячейка, последующая ячейка, и каждый участок буферного транспортера;

- использовать калиброванные шумомеры на расстоянии одного метра от источников шума, фиксируя значения в настройках быстрого и импульсного режимов;

- регулярность измерений: каждую смену или цикл для выявления изменений в уровне шума;

2) Регулирование производительности предшествующей ячейки $q_{вх_рег}(t)$:

- установить производительность ячеек таким образом, чтобы избежать перегрузок на транспортере, начальную производительность предшествующей ячейки и последующей ячейки изначально установить на

уровне 80% от их максимальной производительности, чтобы избежать начальной перегрузки;

- измерять фактическую производительность $q_{\text{вых}}(t)$ для обеспечения стабильности материального потока, для измерения фактической производительности использовать оптические или индуктивные датчики, которые могут подсчитывать количество проходящей тары, оптические датчики (например Sick WTB4-3P1361) подходят больше для прозрачной и полупрозрачной тары, индуктивные датчики, (например Omron E2B-M12KN04-WP-B1 2M) чаще используются для металлической тары;

- если фактическая производительность $q_{\text{вх}}(t)$ или $q_{\text{вых}}(t)$ превышает установленные значения, уменьшить производительность соответствующей ячейки на 1-5%, чтобы избежать перегрузки;

- если фактическая производительность значительно ниже установленных значений, увеличьте производительность на 1-5%, чтобы оптимизировать производственный процесс;

- для расчета производительности предшествующей ячейки обозначим количество тары, проходящей через датчик за время Δt , как $N_{\text{вх}}$;

Производительность предшествующей ячейки $q_{\text{вх}}(t)$ определяется:

$$q_{\text{вх}}(t) = N_{\text{вх}} / \Delta t,$$

- аналогично, обозначим количество тары, проходящих через датчик за время Δt , как $N_{\text{вых}}$, тогда:

$$q_{\text{вых}}(t) = N_{\text{вых}} / \Delta t,$$

3) Регулирование скорости транспортера ($v_{\text{вх_рег}}(t)$, $v_{\text{вых_рег}}(t)$, $v_{\text{п_рег}}(t)$) на каждом участке:

- установить скорость таким образом, чтобы минимизировать столкновения бутылок и уменьшить дифференциальные скорости;

- использовать профили скорости для более равномерного распределения скорости по ширине транспортера.

4) Планирование механических улучшений и настроек.

4.1) Для конвейерных цепей с криволинейным движением

- заменить прямоугольные пересечения на криволинейные цепи для предотвращения столкновений бутылок с фиксированными препятствиями;

4.2) Для направляющих для стеклянной тары

- проверить и регулярно обслуживать материалы направляющих, чтобы снизить трение и смягчать столкновения;
- использовать специальные скользящие башмаки и синхронные двигатели для уменьшения вибраций и шума.

5) Контроль и улучшение акустики помещений РЛР

- установка и использование звукопоглощающих панелей на стенах в зонах с высоким отражением шума;
- использование подвесных потолков с звукопоглощающими панелями для снижения отражения шума;
- размещать звукопоглощающие материалы на или около твердых поверхностей, где отражение шума наиболее высоко;
- учитывать геометрию помещения, угловатости помещения, переотражения из-за пустоты или объемов помещения, контролировать углы, учитывать полосность частот звуковых диапазонов и характер их отражения и поглощения материалами помещения.

6) Мониторинг и обслуживание

- контролировать уровни шума на линии розлива, используя датчики шума, подключенные к системе управления;
- контролировать обслуживание инкапсуляции, модификации конвейеров и регулярность акустических обработок.
- на основе данных текущего мониторинга вносить необходимые корректировки в меры по оценке, снижению, контролю уровня шума.

На рисунке 26 представлен алгоритм применения разработанной методики.

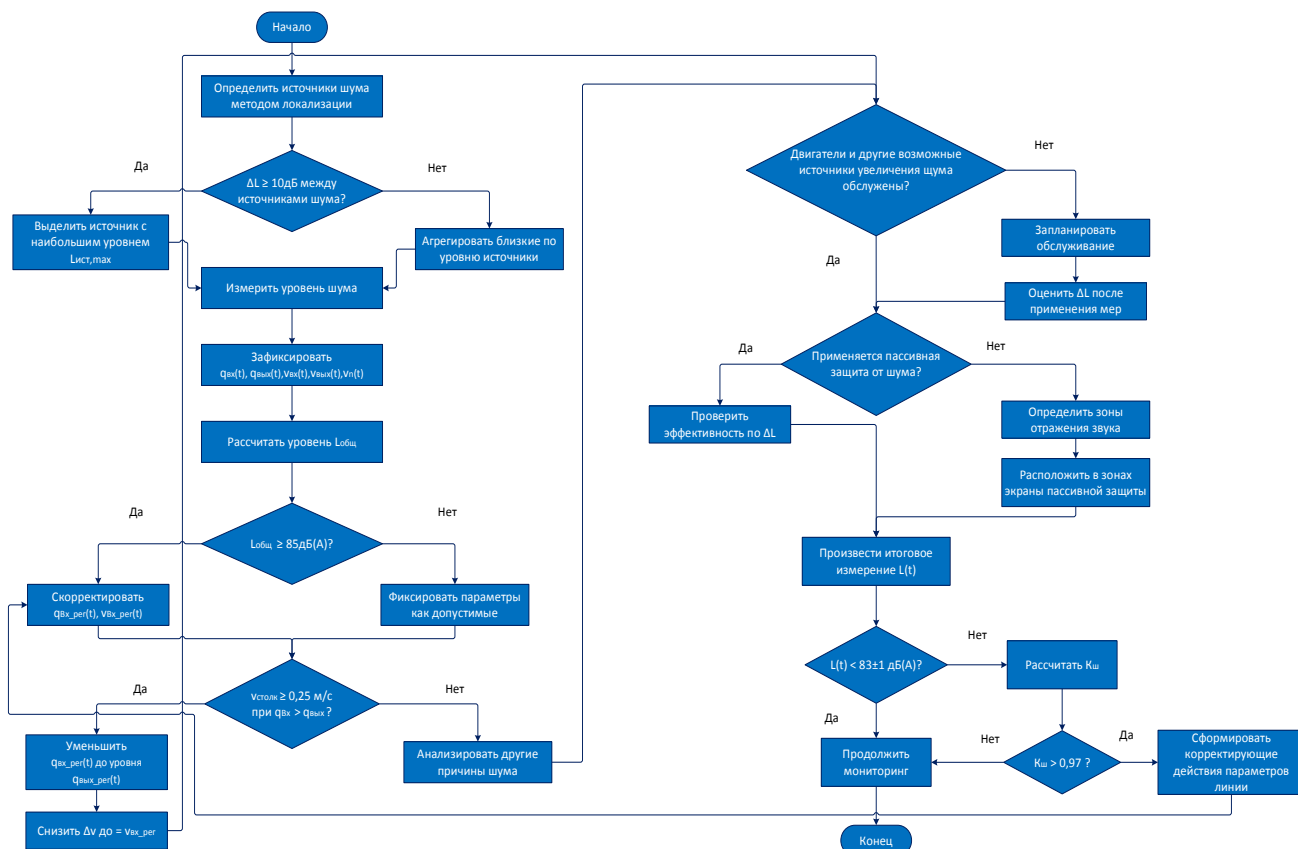


Рисунок 26 – Алгоритм применения разработанной методики контроля и снижения шумовых эмиссий в роботизированной линии розлива

2.4.2.1 Практический пример использования разработанной методики организации производства для решения задач промышленной и экологической безопасности в области снижения шумовых эмиссий, возникающих в процессе работы роботизированных линий розлива

Рассмотрим действующую РЛР со следующими параметрами, являющимися исходными данными, необходимыми для использования предлагаемого метода контроля генерации шума. Если предыдущая ячейка работает со скоростью медленнее, чем скорость последующей ячейки, то проблемы генерации дополнительного шума не возникает, в противном случае могут возникать дополнительные столкновения тары, которые будут усиливать генерацию шума.

Максимальная производительность предшествующей ячейки $q_{вх}(t) = 40\,000$ бутылок/час. Максимальная производительность последующей ячейки $q_{вых}(t)$

= 40 000 бутылок/час. Вместимость транспортера $C = 10,000$ бутылок. Длина каждого участка транспортера $l_n = 5$ метров. Максимальная скорость конвейерных лент $v_{вх}, v_{вых} = 5$ м/с. Используемая модель оптических датчиков: Sick WTB4-3P1361, датчики размещены на выходе предшествующей ячейки и на входе в следующую ячейку на высоте около 250 мм (средняя высота бутылки 0,5 л).

Установка начальной производительности предшествующей ячейки на 80% от максимальной:

$$q_{вх_рег} = 0,8 \cdot 40\,000 = 32\,000 \text{ бут./час},$$

$$q_{вых_рег} = 0,8 \cdot 40\,000 = 32\,000 \text{ бут./час}.$$

Собранные на 5й час работы РЛР данные о производительности показали следующие результаты (рисунок 27):

$$q_{вх}(t) = 35\,112 \text{ бут./час};$$

$$q_{вых}(t) = 34\,808 \text{ бут./час}.$$

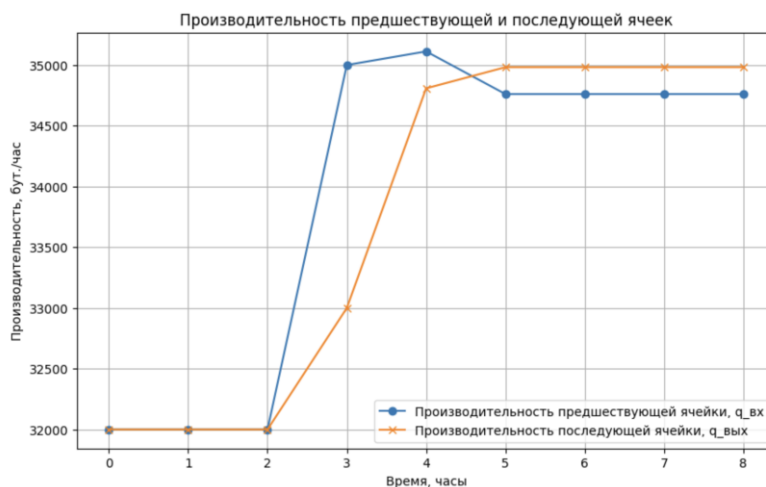


Рисунок 27 – Измеренная производительность двух смежных ячеек РЛР

Начальная производительность предшествующей ячейки была установлена на 32 000 бут./час, однако фактические данные показывают 35 112 бут./час.

Измеренный уровень шума показал значения $L_{вх} = 85$ дБ(А) при скорости столкновения 0,25 м/с.

Возможные причины: снижение времени простоев, увеличение скорости работы предшествующей ячейки или улучшение качества исходных материалов, что позволило повысить производительность.

Начальная производительность на выходе ячейки была установлена на 32 000 бут./час, однако фактические данные показывают 34 808 бут./час.

Возможные причины: узкие места на последующей ячейке, необходимость в техническом обслуживании или возникновение проблем с обработкой тары.

Разница между производительностью предшествующей и последующей ячеек минимальна, что указывает на отсутствие значительных перегрузок на транспортере.

Фактическая производительность предшествующей ячейки (35 112 бут./час) немного превышает производительность последующей ячейки (34,808 бут./час), что может привести к незначительному накоплению тары на транспортере.

Регулирование производительности предшествующей ячейке.

Поскольку фактическая производительность предшествующей ячейки немного выше установленной ($q_{\text{вх_рег}}(t) = 32,000$ бут./час), необходимо немного уменьшить производительность на 1-2%, чтобы избежать перегрузки транспортера.

Уменьшение на 1%: $q_{\text{вх_рег_новая1}} = 0,99 \cdot 35\,112 = 34,761$ бут./час;

Уменьшение на 2%: $q_{\text{вх_рег_новая2}} = 0,98 \cdot 35\,112 = 34\,410$ бут./час.

Можно начать с уменьшения на 1% и продолжить мониторинг.

Поскольку фактическая производительность последующей ячейки почти соответствует установленной ($q_{\text{вых}} = 32,000$ бут./час), значительных изменений не требуется.

Можно немного увеличить производительность на 0,5-1%, чтобы синхронизировать потоки:

- увеличение на 0,5%: $q_{\text{вых_новая_0,5}} = 1,005 \cdot 34\,808 = 34,982$ бут./час;

- увеличение на 1%: $q_{\text{вых_новая_1}} = 1,01 \cdot 34\,808 = 35\,156$ бут./час.

Начнем с увеличения на 0,5% и продолжим мониторинг.

Собранные данные через 3 часа показали значения фактической производительности предшествующей ячейки $q_{\text{вх}}(t) = 34,761$ бутылок/час. Фактическая производительность последующей ячейки $q_{\text{вых}} = 34,982$ бут./час.

Измеренный уровень шума на входе последующей ячейки показал значения $L_{\text{вых}} = 84$ дБ(А) при скорости столкновения 0,25 м/с в режиме «быстрый». На рисунке 30 представлен график изменения уровня шума для настроек данных ячеек. Также был произведен расчет коэффициента шумового загрязнения ($K_{\text{ш}}$) для данных из таблицы 11 и 12, измеренных для двух соседних ячеек РЛР. Полученное значение $K_{\text{ш}} = 0,94$ указывает на то, что уровень шума на производственной линии в среднем близок к предельно допустимому значению, что требует принятия мер по его снижению.

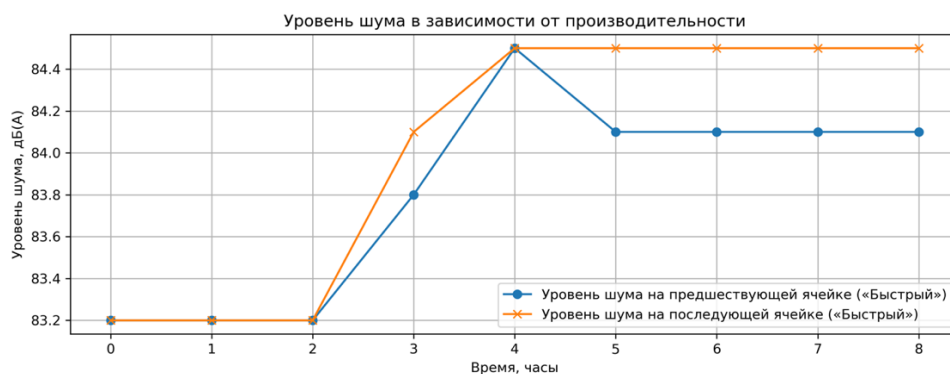


Рисунок 28 – График изменения уровня шума в исследуемой РЛР в зависимости от производительности

Разница между производительностью предшествующей и последующей ячеек стала минимальной. Поскольку уровни шума близки к допустимым пределам, необходимо поддерживать текущую производительность и продолжать мониторинг. Контроль за уровнем шума подтверждает эффективность проведенных корректировок. Для поддержания оптимальной работы системы рекомендуется продолжать регулярный мониторинг данных о производительности и уровнях шума, а также проводить корректировки параметров работы ячеек при необходимости. Это обеспечит минимизацию воздействия шума на операторов и стабильную работу линии розлива напитков.

Результаты и выводы по разделу 2

1) Применение разработанных эксплуатационных коэффициентов позволяет влиять на процессы оценки и управления качеством организации роботизированного розлива. Это подтверждается практическими исследованиями, проведенными на реальной функционирующей роботизированной линии розлива, в результате которых удалось достичь повышения точности дозирования ($\delta V_d \pm 0,01$ литра), вероятности успешной герметизации ($P_{\text{seal}} \approx 0,98$) и точности контроля функциональных процессов ($P_{\text{QC}} = 97,02\%$) на исследуемой линии роботизированного розлива.

2) Анализ применения разработанной методики оценки и мониторинга качества организации технологических процессов роботизированного розлива и эффективности функционирования линии показал, что применение стандартных компонентов (время настройки $T_{\text{standard}} = 3$ часа) и нестандартных компонентов (время настройки $T_{\text{non-standard}} = 4$ часа) влияет на общую эффективность линии. Рассчитанные эксплуатационные коэффициенты, например, коэффициент сложности стандартизации ($K_{\text{cc}} = 0,07$) и коэффициент защиты ($K_z = 0,91$), подтверждают необходимость повышения уровня стандартизации и защиты компонентов в исследуемых типах РЛР.

3) Проведенный в рамках внедрения методики оценки и мониторинга качества организации технологических процессов роботизированного розлива анализ FMEA выявил основные режимы отказов, такие как засорение фильтра (RPN до улучшений = 105), неправильное дозирование (RPN до улучшений = 128) и ошибки маркировки (RPN до улучшений = 72). После внедрения разработанной методики, значения RPN значительно снизились (RPN для неправильного дозирования после улучшений = 56). Пересчет DPMO до и после улучшений показал снижение дефектов с 500 до 195,6, что указывает на повышение качества и надежности производственного процесса и говорит в практической значимости разработанных моделей и методик.

4) Предложен новый подход, включающий интеграцию эксплуатационных коэффициентов в системы управления качеством, что позволяет более точно определять и улучшать критические аспекты производственного процесса, обеспечивая повышение эффективности, надежности и безопасности высокоскоростных производственных линий.

5) Выявлено, что превышение допустимых уровней шума связано с высокой скоростью столкновения бутылок, что подтверждается измерениями уровня шума при различных скоростях столкновения. При экспериментальном исследовании наибольший уровень шума был зафиксирован при скорости столкновения 0,35 м/с и составил 90,2 дБ(А) в режиме «быстрый» и 98,7 дБ(А) в режиме «импульс».

Таким образом, полученные результаты подтверждают эффективность разработанных методик и целесообразность их внедрения для улучшения качества и производительности роботизированных линий розлива. Полученные результаты подчеркивают существующую проблематику направления и необходимость дальнейших исследований в разработке методов управления и экспериментальной проверки массовых транспортёров, алгоритмов для бесступенчатого управления буферами, моделирования многоструйных транспортёров для тары и контейнеров с тарой, применения предложенных стратегий и адаптации приложенных моделей и методик.

3 РАЗРАБОТКА СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ СОСТОЯНИЯ БУФЕРНЫХ ЗОН РОБОТИЗИРОВАННЫХ ЛИНИЙ РОЗЛИВА

В данной главе формулируются требования и методы контроля качества роботизированных линий розлива, разработанные в рамках диссертационных исследований, для малошумного и эффективного управления конвейерными системами, а также предлагаются способы оценки качества управления. Основное внимание уделено предлагаемой новой, бесступенчатой системе управления для конвейерных систем и необходимой для этого системе сенсоров, системе управления на основе счётчиков скопления, для бесступенчатого управления потоками.

Помимо разработки системы управления, была разработана модель симуляции, предназначенная для тестирования алгоритмов управления на длительных временных интервалах и при различных граничных условиях.

3.1 Принципы организации системы управления качеством состояния конвейера и буфера на линии розлива

Для создания алгоритма, обеспечивающего как малошумную транспортировку тары, так и эффективное использование конвейеров, необходимо сформулировать требования к системам такого рода.

Система управления конвейерными линиями на производственных участках розлива напитков должна в первую очередь обеспечивать выполнение основных задач. Эти задачи включают безопасный приём тары от предшествующей ячейкой, ее транспортировку с минимальными сбоями к следующей ячейке и бесперебойное снабжение этой ячейки тарой. Данные требования могут быть выполнены за счет соответствующей настройки скоростей транспортных лент и должны быть учтены при реализации системы управления.

В системах с открытыми направляющими, таких как безнапорные системы слияния или расхождения потоков, это может привести к падению или повреждению тары. Таким образом, при выборе скорости входной ленты ($v_{вх}$) необходимо учитывать производительность предшествующей ячейки ($q_{вх}$), диаметр обрабатываемой тары (d) и желаемое количество тары в ряду (n), то есть ширину потока тары. Ширина потока тары на первом участке транспортной ленты не должна быть меньше, чем ширина потока, выходящего из ячейки или системы расхождения тары, иначе в компактном потоке образуются пробелы. Поэтому необходимо соблюдение следующего соотношения:

$$v_{вх} \cdot c_{вх} \geq q_{вх},$$

где $c_{вх}$ – представляет собой коэффициент, объединяющий диаметр обрабатываемой тары (d) и желаемое количество тары в ряду (n), которые остаются неизменными в стабильной системе;

$v_{вх}$ – скорость конвейерной ленты на входе;

$q_{вх}$ – производительность предшествующей ячейки.

В данном контексте, коэффициенты c , $c_{вх}$, и $c_{вых}$ представляют собой параметры, объединяющие характеристики потока тары. Где c – это общий коэффициент, который учитывает ширину потока тары. Он определяется как комбинация диаметра тары и желаемого количества тары в ряду:

$$c = \frac{d}{n},$$

где d – диаметр обрабатываемой тары;

n – желаемое количество тары в ряду.

$c_{вых}$ – аналогично, коэффициент для выходного потока тары, включающий параметры диаметра и ширины потока, но применяемый для выходной ленты системы. Он учитывает особенности ширины потока тары при их выходе, особенно в ситуациях, где необходимо добавить небольшое увеличение скорости ($\Delta v_{скольжения}$) для предотвращения сбоев в системе.

На данном этапе следует учесть, что, как правило, в РЛР для обеспечения плавного перемещения тары используется специальная смазка, представляющая собой водный мыльный раствор, известный как *SlipCoat* или *DryFormance*. Этот раствор наносится на поверхность транспортных лент и снижает трение между тарой и лентой поэтому важно учитывать изменения $\Delta v_{\text{скольжения}}$.

Ширина потока тары на первом транспортном участке должна быть не меньше ширины потока тары, покидающей ячейку или устройство подачи, чтобы избежать пробелов в компактном потоке.

Поэтому должна выполняться следующая зависимость:

$$v_{\text{вх}} = \frac{q_{\text{вх}} \cdot d}{n} = c_{\text{вх}} \cdot q_{\text{вх}},$$

где $v_{\text{вх}}$ – скорость конвейерной ленты на входе;

$q_{\text{вх}}$ – производительность предшествующей ячейки.

$c_{\text{вх}}$ – представляет собой коэффициент, объединяющий диаметр обрабатываемой тары (d) и желаемое количество тары в ряду (n), которые остаются неизменными в стабильной системе;

d – диаметр обрабатываемой тары;

n – желаемое количество тары в ряду.

Настройка скорости на выходной ленте ($v_{\text{вых}}$) может быть выполнена аналогично. Здесь необходимо учесть лишь небольшое увеличение скорости ($\Delta v_{\text{скольжения}}$) для создания необходимого давления накопления для работы многих ячеек или безнапорных систем сливания:

$$v_{\text{вых}} \cdot c_{\text{вых}} \geq q_{\text{вых}} + \Delta v_{\text{скольжения}},$$

$$v_{\text{вых}} = \frac{q_{\text{вых}} \cdot d}{n} + \Delta v_{\text{скольжения}} = c_{\text{вых}} \cdot q_{\text{вых}} + \Delta v_{\text{скольжения}}.$$

Здесь системные параметры диаметр тары и ширина потока также объединены в коэффициент $c_{\text{вых}}$.

При транспортировке тары важно следить за тем, чтобы не снижать скорость ниже определённого уровня, чтобы обеспечить бесперебойное снабжение следующей ячейки тарой. Для этого приток тары в накопительный

конец транспортёра должен быть равен или превышать потребление тары следующей ячейкой, согласно v-диаграмме, представленной в главе 2 (рис 9). Для этого скорость транспортной ленты должна быть скорректирована в соответствии с шириной потока тары:

$$v_{\text{потока}} \geq \frac{q_{\text{вых}} \cdot d}{n},$$

$$v \cdot c \geq q_{\text{след}},$$

где $q_{\text{след}}$ обозначает производительность следующей ячейки, то есть количество тары, которые она обрабатывает за единицу времени.

Это условие, конечно, действует только при бесперебойной работе системы. В случае возникновения сбоев или недостатков в предшествующей ячейке, формула неизбежно нарушается через определённое время, и возникает дефицит на следующей ячейке.

Кроме того, в отношении безопасного транспортирования тары особенно важно учитывать, что градация скоростей участков транспортных лент должна быть выбрана так, чтобы не превышать угол наклона бутылок.

3.1.1 Стабилизация заполнения буфера

Основным требованием к системе управления должно быть поддержание наполнения буфера в пределах заданного уровня при бесперебойной работе и максимально быстрое восстановление заданного уровня после сбоев, чтобы быть готовым к возможным новым сбоям. Это должно осуществляться за счет регулировки производительности предшествующей или последующей ячейки.

При разработке управления буфером необходимо учитывать большое разнообразие вариантов. Системы различаются по параметрам производительности, приему и выдачи и размерам буферов.

Производительность центрального агрегата может достигать до 90 000 бутылок в час, в зависимости от конструкции установки (для ячейки по розливу многоразовых стеклянных бутылок). Соответственно, у самых

удалённых от центрального агрегата буферов для бутылок, согласно V-диаграмме, представленной в разделе 2 данного диссертационного исследования, могут возникать пиковые значения производительности до 140% или в данном случае до 126 000 тары в час. Поэтому в данной работе рассматривается максимальная производительность до 100 000 бутылок в час.

Прием и выдача тары могут быть сконструированы по-разному, как было описано в главе 2. Управление этими частями установки не включено напрямую в концепцию управления, так как в последние годы эти части значительно усовершенствовались и считаются зрелыми. Предполагается, что этим частям установки, как и предшествующей и последующей ячейке, будут заданы целевые значения. Эти значения затем реализуются системами управления для расхождения и слияния потоков.

Размеры буферов могут значительно варьироваться в зависимости от конструкции, условий размещения и производительности установки. Поэтому эти факторы должны быть учтены при разработке системы управления. В частности, необходимо учитывать количество сегментов, оснащённых собственным приводом, чтобы они могли управляться индивидуально [69]. На рисунке 29 показаны измерения шума при работе линии, доказывающие, что шум в значительной степени зависит от скорости столкновения тары.

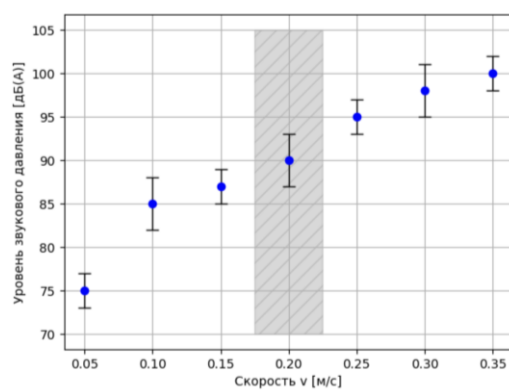


Рисунок 29 – Шумовые эмиссии стеклянной тары, сталкивающейся с неподвижным концом потока бутылок при указанных скоростях

На рисунке 29 уровни звукового давления были измерены на расстоянии одного метра от точки столкновения ($n = 5$, $\alpha = 0,05$), где типичная скорость ленты транспортёров тары показана штриховкой. Поэтому система

управления должна эксплуатировать транспортёры только на тех скоростях, которые необходимы для выполнения основных задач. Чрезмерные скорости, часто возникающие в современных системах управления на основе счётчиков скопления, особенно после сбоев, должны быть избегнуты для снижения уровня шума. Время задержки буфера можно уменьшить, соответствующим образом увеличив скорость транспортной ленты. Использование буферной ёмкости в современных установках сильно зависит от положения счётчиков скопления, используемых в качестве конечных выключателей. Если они неправильно расположены, не вся буферная площадь используется. Регулировка производительности ячеек может ускорить восстановление буфера после сбоя и, таким образом, быстрее вернуть буфер в состояние, оптимальное для следующего сбоя. Сравнивая требование минимально возможной скорости транспортной ленты для снижения шумовых эмиссий, изложенное в разделе, с требованием высокой производительности регулируемой ячейки и необходимого увеличения скорости транспортной ленты для сокращения времени задержки буфера. Это противоречие между эффективным и малозумным управлением необходимо разрешить.

3.2 Концепция и модель системы управления качеством состояния буферных зон транспортеров роботизированных линий розлива

Для реализации новой концепции системы управления качеством состояния буферных зон, реализован алгоритм управления, разработанный на основе счётчиков скопления, где была использована модель установки в виде кольцевого конвейера, которая представлена на рисунке 30. Такая модель означает, что вся тара, пройдя через испытательную зону, может быть снова направлены в эту зону. Данное решение имеет значительное преимущество: требуется относительно небольшое количество тары для проведения экспериментов. Дополнительно эксперименты могут проводиться в течение любого времени, так как количество тары не ограничено благодаря ее

возврату. Недостаток этого решения заключается в необходимости разъединения входа и выхода испытательной зоны.

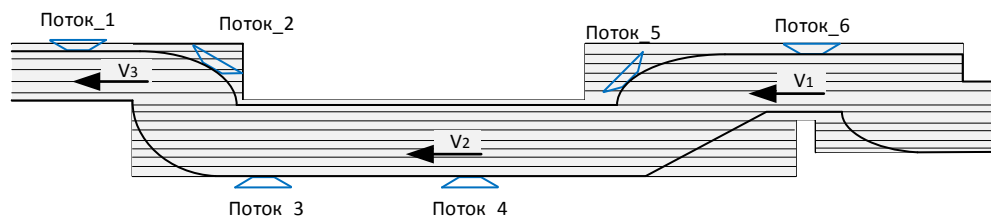


Рисунок 30 – Модель роботизированной линии розлива

На рисунке 30 представлен масштабный чертеж всей пилотной установки. Испытательная трасса расположена между входом и выходом. Она состоит из буферных секций «поток 1-6». Вход тары в испытательную трассу осуществляется по одному потоку. Транспортные ленты секций 0 и 1 имеют по два привода, которые могут управляться отдельно. Это позволяет левой половине приводных лент работать на другой скорости, чем правая половина. Секция «поток 2» имеет только один привод. Тара, проходящая через испытательную трассу, выходит из неё в конце по нескольким потокам, образуя пул для контейнеризации. Затем она попадает через изогнутый конвейер либо в безнапорную систему объединения тары (БСОТ), либо при обратном потоке в буфер разъединения. Этот буфер служит для разъединения входа и выхода испытательной трассы. Он может принимать тару при обратном потоке и возвращать их в поток производства при недостатке тары перед БСОТ. После БСОТ тара попадает в участок однопоточной ленты. В этом районе интегрирована ячейка для инспекции пустых бутылок (Heuft InLine) компании Heuft Systemtechnik GmbH.

Управление конвейерными лентами модели установки осуществляется с помощью двух отдельных систем управления. Однопоточный участок транспортной ленты и БСОТ управляются системой Heuft Synchron. Это система опережающего регулирования для однопоточных транспортных участков, упомянутая в главе 2 данного диссертационного исследования. Все датчики и исполнительные механизмы, установленные на этих участках, должны быть подключены к этой системе управления.

Остальные участки транспортной ленты управляются программируемым логическим контроллером (ПЛК) компании Siemens. Это ПЛК S7-1500 с типом CPU 317-2 PN/DP, который был расширен модулем интерфейса IM 151-1. Все счётчики скопления и световые барьеры, установленные в этой области, подключены через цифровые входные модули контроллера или интерфейсного модуля. Частотные преобразователи двигателей управляются через соединение Profinet.

Все вводы, которые должны быть осуществлены оператором, могут выполняться через несколько терминалов управления. Все вводы, которые должны быть обработаны системой Heuft Synchron, могут быть осуществлены на двух терминалах управления Heuft Synchron или Heuft InLine. Все вводы, касающиеся испытательной трассы и остальной части пилотной установки, выполняются через интерфейс управления, созданный с использованием WinCC. Через интерфейс управления также осуществляется связь между двумя частями установки. Система Heuft InLine получает от сюда целевые значения для производительности и разрешение на работу частотных преобразователей, установленных в области Heuft Synchron.

Для работы могут быть смоделированы транспортные линии с производительностью до 56 000 бутылок в час.

Однако необходимо учитывать некоторые ограничения. На испытательной трассе отсутствует ячейка, которая бы определенно забирала тару. Поэтому поток бутылок должен регулироваться исключительно скоростью ленты секции «поток 2». Это особенно сложно при достижении заданного уровня наполнения, когда транспортёр ранее был полностью пуст. В этот период ширина потока бутылок значительно меняется. Пока первые бутылки прибывают по одной или в узком потоке, во время работы они накапливаются по всей ширине транспортёра. Поэтому выпуск тары с транспортёра должен быть вручную заблокирован до тех пор, пока ячейка не будет готова к приёму.

Даже в процессе работы выпуск транспортёра подвержен незначительным колебаниям, однако они находятся в пределах допустимого (около ± 200 бутылок в час). Эти колебания могут также возникать в реальных условиях из-за регулировочных воздействий на ячейки и должны компенсироваться системой управления транспортёром.

Измерение наполнения испытательной трассы осуществляется с помощью шести счётчиков скопления (рис 32), счётчики «Поток_1» и «Поток_6» выполняют функцию конечных выключателей для предшествующей и последующей ячейки. Счётчики «Поток_1» и «Поток_6» выполняют роль конечных выключателей: «Поток_1» отслеживает поступление бутылок от предыдущей ячейки на текущий участок, а «Поток_6» контролирует их выход к следующей ячейке. Счётчики «Поток_2» и «Поток_5» используются для контроля скопления бутылок в промежуточных точках конвейера. Полученные данные позволяют системе регулировать скорость движения ленты и производительность ячеек, чтобы предотвратить накопление бутылок или возникновение простоев. Регулирование осуществляется автоматически на основе заранее заданной таблицы решений (см приложение В), где указаны действия системы для различных уровней заполненности, зафиксированных счётчиками.

В зависимости от состояния счётчиков скопления, система регулирует производительность предшествующей и последующей ячейки, а также скорости транспортных лент. Результаты моделирования представленной системы изображены на диаграммах рисунка 31.

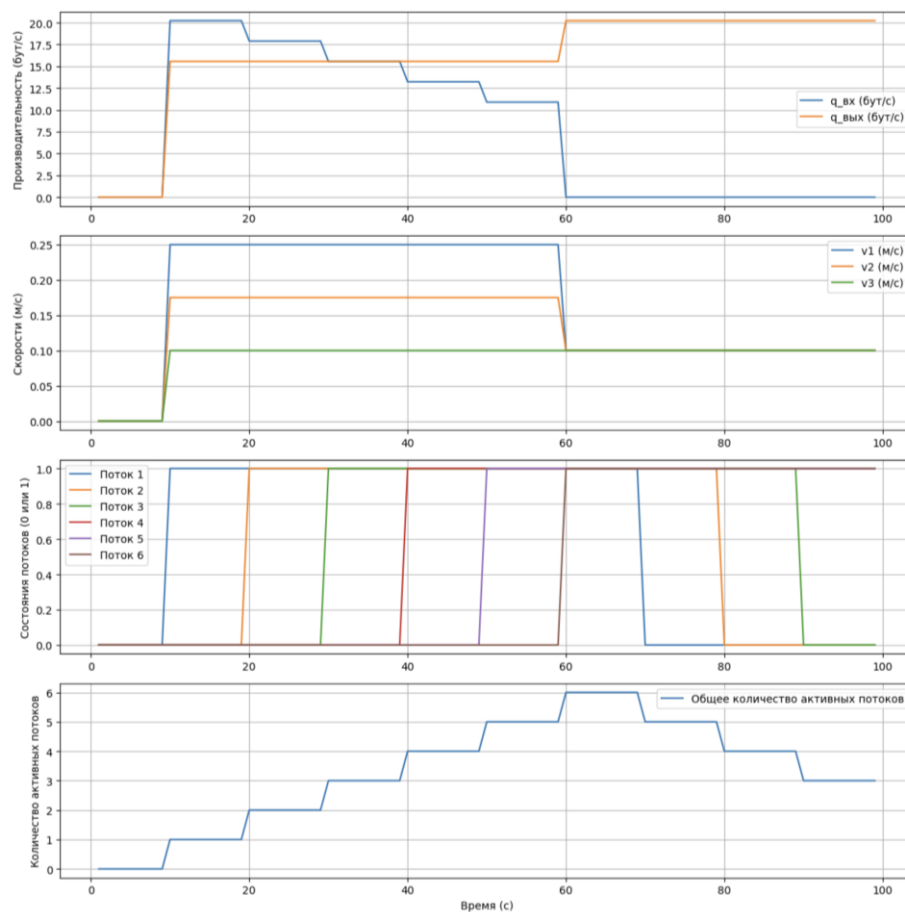


Рисунок 31 – Диаграммы производительности, скорости и состояния потоков в буферной системе предотвращения голодания (выхода в режим ожидания)

В таблицах приложения В представлены состояния переключателей и соответствующие настройки параметров управления буферной системой предотвращения голодания и антиблокировочной системы на основе счётчиков скопления. Буферная система предотвращения голодания предназначена для обеспечения непрерывного потока тары на производственной линии, предотвращая ситуации, когда тара заканчивается перед ячейкой.

3.2.1 Разработка алгоритма функционирования системы управления качеством состояния буферных зон

Системой отсчета для алгоритма бесступенчатого регулирования буфера является транспортер, изображенный на рисунке 32. Он соответствует по своей конструкции сегментированному параллельному буферу и

моделируемой трассе. Однако для разработки алгоритма бесступенчатого регулирования буфера он был расширен на $n = 1, \dots, \infty$ средних участков транспортера. Это бесступенчатое регулирование применимо только к сегментированным параллельным буферам, но с произвольным количеством средних участков транспортера.

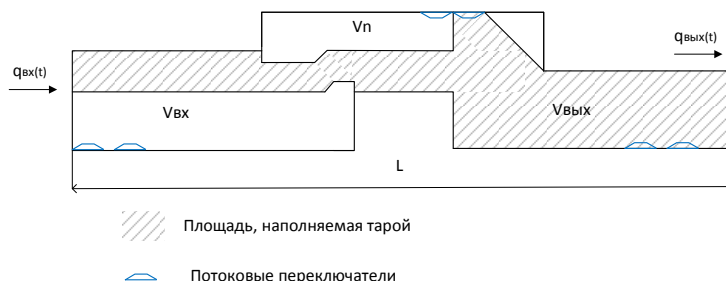


Рисунок 32 – Схема рассматриваемой системы с одним участком транспортера для входа и выхода и одним средним участком транспортера

Чтобы выполнить требования, сформулированные в выше, для создания низкошумного и эффективного регулирования буфера, были определены следующие рабочие состояния системы ячейка-буфер-ячейка.

I. Непрерывная работа. Непрерывная работа транспортера характеризуется тем, что предшествующая и последующая ячейки работают без сбоев.

II. Остановка последующей ячейки. Остановка последующей ячейки приводит к накоплению тары. Причины остановки могут быть две: либо это сбой, либо накопление у последующей ячейки. В результате при работе предшествующей ячейки заполняемость буфера увеличивается до тех пор, пока последующая ячейка не возобновит работу или предшествующая ячейка не остановится из-за полного заполнения буфера.

III. Остановка предшествующей ячейки. Этот случай возникает, когда предшествующая ячейка должна остановиться из-за сбоя или нехватки материала. Это приводит к снижению заполняемости буфера и образованию пробелов в потоке тары. Пробелы должны быть устранены для обеспечения непрерывной работы установки и всех агрегатов до того, как они достигнут последующей ячейки и вызовут ее остановку.

Каждое состояние может переходить в одно из двух других состояний (см. рисунок 33).

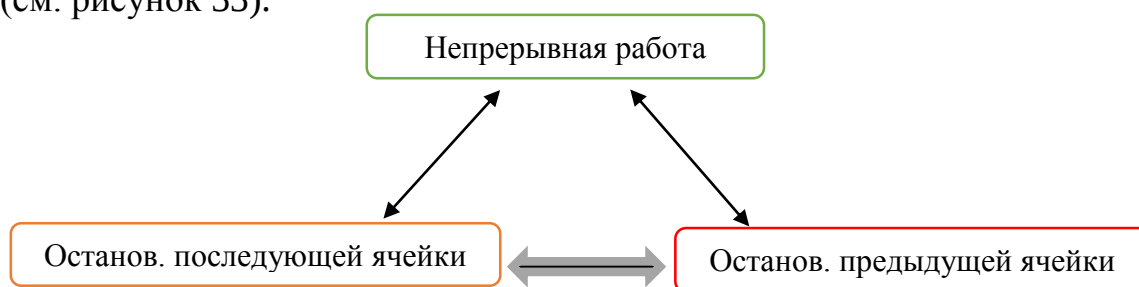


Рисунок 33 – Рабочие состояния рассматриваемой системы ячейка-буфер-ячейка

Переход от «Остановка предшествующей ячейки» к «Остановка последующей ячейки» и наоборот обычно происходит только при полном заполнении или опустошении буфера. Одновременный сбой предшествующей и последующей ячейки маловероятен, но все же должен быть учтен.

Помимо этих трех рабочих состояний, также различают два основных режима работы буферов. Антиблокировочный (АБ) и режим ожидания (РО) буферы на первый взгляд различаются только по своей целевой заполняемости, но их регулирование должно осуществляться по-разному, как было описано в главе 1.

Поэтому в дальнейшем всегда будет различие между этими двумя основными режимами работы (буфер предотвращения режима ожидания/антиблокировочный буфер) и для каждого из них разработан схожий, но в ключевых моментах различный алгоритм регулирования. Этот алгоритм, в свою очередь, подразделяется на три описанных выше рабочих состояния (I, II и III).

3.2.2 Структура алгоритма управления качеством состояния буферных зон транспортеров роботизированных линий розлива

Программа разделяется на три подпрограммы, соответствующие трем описанным рабочим состояниям. Решение о том, какой из трех случаев имеет место и, следовательно, какая подпрограмма должна быть вызвана, принимается на основе мониторинга входного потока в буфер ($q_{вх}(t)$) и

выходного потока из буфера ($q_{\text{вых}}(t)$). Для этого оба значения обновляются в каждом цикле программы.

Для $q_{\text{вх}}(t) \leq 0$ выполняется подпрограмма для устранения разрывов (в зависимости от типа буфера для АБ буфера или РО буфера). Это также происходит при полном заполнении буфера, так как в этом случае первое измеренное значение $q_{\text{вх}}(t)$ равно нулю. Если это не так, проверяется значение $q_{\text{вых}}(t)$. Если это значение равно нулю, вызывается подпрограмма для работы при накоплении (в зависимости от типа буфера для АБ буфера или РО буфера). Если оба значения больше нуля и ни одна из подпрограмм не вызвана, вызывается программа для непрерывной работы.

Структура основной программы представлена на рисунке 34 и не отличается для АБ и РО буферов.

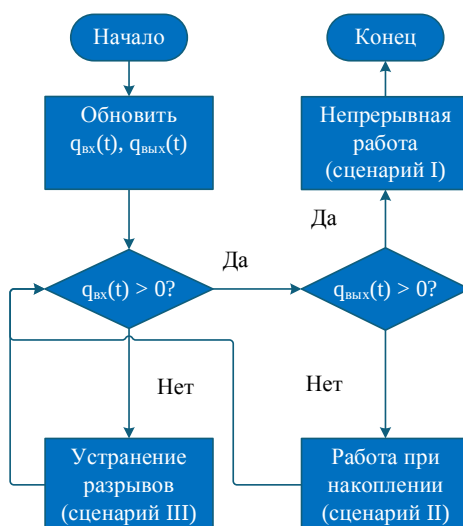


Рисунок 34 – Блок-схема основной программы моделируемых для АБ и РО буферов

3.2.3 Структура алгоритма управления качеством состояния буферов в рабочем состоянии I

Подпрограмма для непрерывной работы направлена на приведение заполняемости буфера $V(t)$ к целевому значению $V_{\text{цел}}$.

Заполняемость буфера определяется из входного ($q_{\text{вх}}$) и выходного ($q_{\text{вых}}$) потоков бутылок по формуле:

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

Таким образом, в любой момент времени можно определить текущее состояние заполняемости транспортера в количестве тары. Это значение служит основным управляющим параметром для всей системы регулирования. Для этого $B(t)$ приводится в соответствие с целевым значением $B_{\text{цел}}$, и в зависимости от типа буфера принимаются следующие меры.

Для приведения $B(t)$ к целевому значению $B_{\text{цел}}$ в РО буфере производительность предшествующей ячейки $q_{\text{вх_цел}}(t)$ адаптируется в соответствии с производительностью последующей ячейки по следующей формуле:

$$q_{\text{вх_цел}}(t) = q_{\text{вых}}(t) \cdot \left(\frac{B_{\text{цел}}}{B(t)} \right)^p.$$

Если целевая заполняемость не достигнута ($B(t) < B_{\text{цел}}$), целевое значение производительности предшествующей ячейки уменьшается по отношению к фактическому значению производительности последующей ячейки. В обратном случае, когда целевая заполняемость превышена, предшествующая ячейка увеличивает свою производительность по отношению к последующей ячейке. Эмпирически определенный коэффициент p служит для настройки поведения регулирования и может варьироваться. С его помощью можно регулировать скорость приведения к целевому значению $B_{\text{цел}}$. Коэффициент p в системе управления буфером играет ключевую роль в динамическом регулировании производительности ячеек в зависимости от текущей заполняемости буфера $B(t)$ относительно целевого значения $B_{\text{цел}}$. Коэффициент p определяет, с какой скоростью и степенью буфер стремится к целевому значению заполняемости. При $p > 1$ система более чувствительно реагирует на отклонения от $B_{\text{цел}}$, что позволяет быстрее скорректировать производительность ячеек для достижения необходимого уровня. В случае же, если p меньше единицы, регулирование будет происходить плавнее, что помогает снизить колебания и уменьшить шум из-за столкновений бутылок.

Коэффициент p должен подбираться эмпирически через практическое тестирование и настройку параметров в условиях реальной работы линии или в тщательно построенной модели. Сначала проводят серию экспериментов, изменяя значение p и наблюдая, как система реагирует на отклонения от целевой заполняемости буфера $B_{\text{цел}}$. Если p слишком велик, система начинает слишком резко корректировать производительность, что приводит к колебаниям и возможному шуму от столкновений тары. При слишком низком значении p регулирование происходит плавно, но медленно, и система может не успевать адаптироваться к изменениям потока бутылок.

Описанное выше поведение регулирования предшествующей ячейки в зависимости от $B(t)$ показано на рисунке 35.

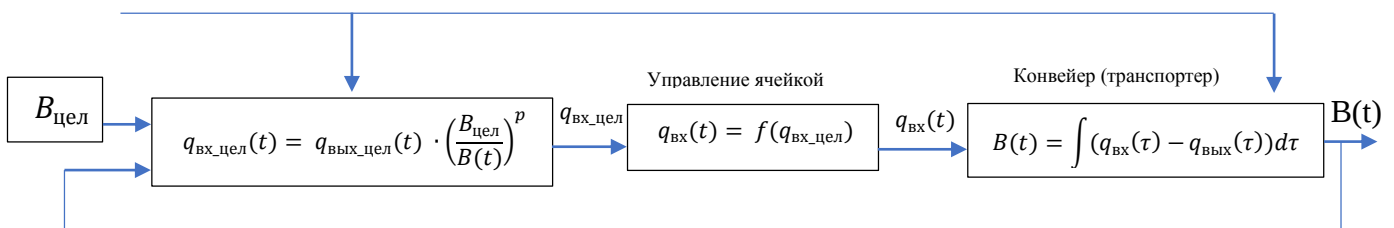


Рисунок 35 – Контур управления для непрерывной работы РО(И) буфера

Непрерывная работа АБ буфера отличается от РО буфера главным образом в отношении регулируемой ячейки. Если целевое значение заполняемости АБ буфера достигнуто, оно поддерживается путем адаптации производительности последующей ячейки к производительности предшествующей ячейки. Если целевое значение заполняемости превышено, необходимо увеличить производительность последующей ячейки. Если целевое значение заполняемости ниже, необходимо уменьшить производительность последующей ячейки. Скорость транспортных лент должна быть адаптирована к производительности ячеек так же, как и в РО буфере:

$$q_{\text{вых}}(t) = q_{\text{вх}}(t) \cdot \left(\frac{B_{\text{цел}}}{B(t)} \right)^p.$$

Текущая заполняемость также влияет на производительность ячеек. Если отношение $B_{\text{цел}}(t)/B(t)$ больше единицы, производительность

последующей ячейки увеличивается по отношению к предшествующей ячейке. В обратном случае производительность последующей ячейки уменьшается. Скорости транспортных лент для РО(І) и АБ(І) регулируются одинаково. Расчет скорости для входной и выходной ленты ($v_{\text{вх}}(t)$ и $v_{\text{вых}}(t)$) осуществляется аналогично формулам из раздела 3.1.

Скорость средней секции(-й) должна быть подобрана так, чтобы минимальные возможные различия скоростей существовали между отдельными участками транспортных лент. Это позволяет избежать столкновений тары с высокими разностями скоростей. Регулировка начинается с первой средней секции, следующей за входной секцией ($n = 1$), затем расчет выполняется для всех секций до предпоследнего участка транспортной ленты:

$$v_{n+1}(t) = v_n(t) + \frac{v_{\text{вых}}(t) - v_{\text{вх}}(t)}{N + 1},$$

где $v_{n+1}(t)$ – скорость следующей средней секции транспортной ленты в момент времени t , м/с;

$v_n(t)$ – скорость текущей средней секции в момент времени t , м/с;

$v_{\text{вых}}(t)$ – скорость выходной ленты в момент времени t , м/с;

$v_{\text{вх}}(t)$ – скорость входной ленты в момент времени t ;

N – количество промежуточных секций транспортной ленты, например, если рассматривается 3 промежуточные секции, то $N = 3$, а включая входную и выходную секции, всего в системе будет $N+2$ участков.

Таким образом, разница скоростей должна быть распределена на $N+1$ промежутков, чтобы плавно согласовать скорости между участками.

3.2.4 Структура алгоритма управления качеством состояния буферов в рабочем состоянии II

Если ячейка, следующая за буфером, должна остановиться из-за накопления или сбоя, на транспортере происходит накопление. Так как $q_{\text{вых}}(t)$

≤ 0 , вызывается подпрограмма для работы при накоплении (см. рисунок 32). Соответствующая ситуация показана на рисунке 36.



Рисунок 36 – Накопление в буфере, вызванное остановкой последующей ячейки ($q_{\text{вых}}(t) \leq 0$)

В этом случае регулирование режима ожидания и антиблокировочного буферов будет различаться, поэтому они будут рассматриваться отдельно.

При остановке последующей ячейки предшествующая ячейка продолжает работать и регулируется в зависимости от заполнения буфера, постепенно снижая производительность до остановки. Скорость транспортных лент также будет адаптирована к производительности ячеек. Полностью заполненные участки транспортной ленты могут быть отключены, так как последующая ячейка не нуждается в подаче бутылок.

Когда последующая ячейка остановлена, предшествующая ячейка больше не может регулироваться на основе производительности последующей. Поэтому в этом случае используется альтернативный управляющий параметр. Целевая производительность ($q_{\text{вх_цел}}(t)$) предшествующей ячейки регулируется на основе производительности последующей до остановки ($q_{\text{вых}}(t_{\text{остановки}})$) по формуле:

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

Это приводит к тому, что производительность предшествующей ячейки постепенно снижается. Однако это может продолжаться только до тех пор, пока не будет достигнуто критическое заполнение буфера. Поэтому текущее заполнение ($B(t)$) постоянно сравнивается с емкостью (C) буфера. Если емкость достигнута или превышена, предшествующая ячейка должна быть остановлена. Кроме того, регулирование производится только до

минимальной производительности ($q_{\text{вых_мин}}$), так как большинство ячеек не могут работать произвольно медленно. Эта минимальная производительность поддерживается до полной остановки или до возобновления работы ячейки.

Скорости транспортных лент адаптируются аналогично случаю РО(I) по формулам, описанным выше. Единственное отличие состоит в том, что $v_{\text{вых_цед}}(t)$ рассчитывается на основе $q_{\text{вых}}(t_{\text{остановки}})$, так как $q_{\text{вых}}(t) = 0$.

Дополнительно полностью заполненные участки транспортера отключаются. Для этого задаются фиксированные значения заполняемости буфера, при достижении которых отдельные участки отключаются. Когда последующая ячейка снова запускается, подпрограмма РО(II) (рис. 40) завершается, программа переходит в основную программу и оттуда в режим непрерывной работы АГ(I).

При остановке последующей ячейки предшествующая ячейка продолжает работать. В режиме антиблокировки снижение производительности, как описано в АГ(II) (см рисунок 37), не происходит, поскольку с точки зрения эффективности важно, чтобы предшествующая ячейка работала с заданной производительностью как можно дольше. При этом может потребоваться принять более высокие уровни шума, так как с увеличением заполненности участков транспортера будет доступно меньше переходов/сегментов для снижения скорости тары. Скорости транспортных лент, как уже неоднократно упоминалось, адаптируются к производительности ячеек. Задние участки транспортной ленты отключаются, как только они полностью заполнены. Остановка предшествующей ячейки происходит только при достижении критической заполненности, соответствующей емкости буфера. Отключение или снятие разрешения является единственным сигналом, который подпрограмма для режима антиблокировки может передать предшествующей ячейке.

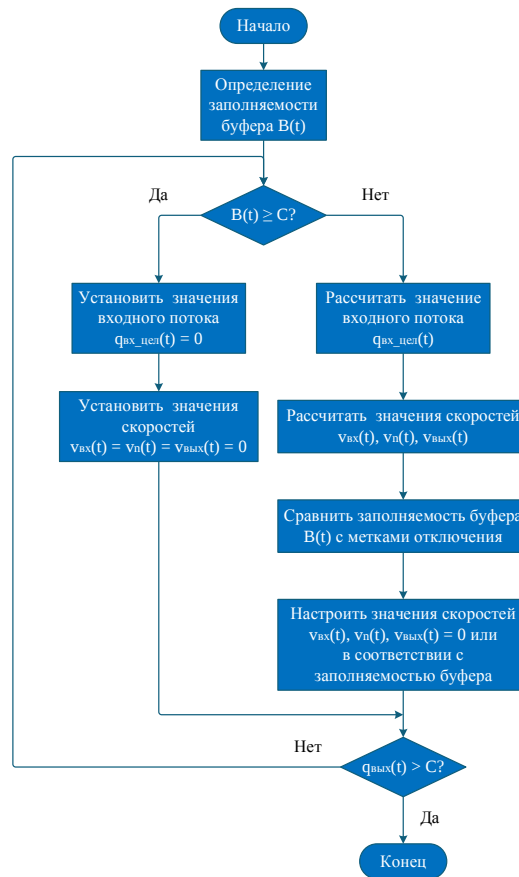


Рисунок 37 – Блок-схема режима накопления в РО(II)

Разрешение снимается с предшествующей ячейки, когда заполненность $B(t)$ почти достигает емкости буфера (C):

$$q_{\text{вх_цел}}(t) = 0, \text{ при } C \leq B(t) + f(q_{\text{вх}}),$$

$$B(t) \approx C - f(q_{\text{вх}}).$$

Дополнительно учитывается, что предшествующая ячейка после снятия разрешения уменьшает свою производительность и бутылки, находящиеся в ячейке, еще должны быть введены в буфер ($f(q_{\text{вх}})$). Место для них должно быть доступно в буфере.

Скорость транспортных лент для входного ($v_{\text{вх}}(t)$) и средних участков транспортера ($v_{\text{ср}}(t)$) устанавливается аналогично случаю АБ (I). Скорость для выходных лент адаптируется к производительности последующей ячейки до остановки ($q_{\text{вых}}(t_{\text{остановки}})$):

$$v_{\text{вых_цел}}(t) = C_{\text{вых}} \cdot q_{\text{вых}}(t_{\text{остановки}}).$$

В режиме антиблокировки полностью заполненные участки транспортера также отключаются и включаются снова только тогда, когда

последующая ячейка снова запускается. В этом случае программа возвращается в подпрограмму АБ (I).

Дополнительно полностью заполненные участки транспортера отключаются. Для этого задаются фиксированные значения заполняемости буфера, при достижении которых отдельные участки отключаются. Когда последующая ячейка снова запускается, подпрограмма РО(II) завершается, программа переходит в основную программу и оттуда в режим непрерывной работы РО(I).

3.2.5 Структура алгоритма управления качеством состояния буферов в рабочем состоянии III

При остановках предшествующей ячейки возникают разрывы в потоке тары, и если последний останов последующей ячейки произошел давно, это приводит к снижению уровня заполнения буфера ниже заданного. Оба этих явления необходимо избегать для обеспечения равномерной работы ячеек и всей установки. Поэтому разрывы в потоке тары должны быть устранены до того, как они достигнут последующей ячейки и вызовут её остановку. Заданное заполнение должно быть как можно быстрее восстановлено после сбоя, чтобы привести транспортёр в правильное рабочее состояние для следующего сбоя.

Для этого ситуация на транспортёре должна быть максимально точно отображена для управления установкой. В данном случае это означает, что потоки тары на транспортёре должны быть максимально точно зафиксированы. Как только предшествующая ячейка останавливается, позиция последних бутылок, покинувших ячейку, непрерывно рассчитывается ($x_{1\text{ленты}}(t)$) (см. рисунок 38). Для этого должна быть известна скорость участка транспортной ленты, на котором находится последняя из первого потока бутылок. Также должны быть известны длины отдельных участков транспортной ленты. На основе текущей позиции тары определяется, какая скорость будет использована для расчёта. Точно так же поступают при

возобновлении работы предшествующей ячейки. Однако в этом случае отслеживается первая бутылка, покидающая ячейку. Рассчитанная позиция таким образом соответствует первой бутылке второго потока тары $x_2(t)$.

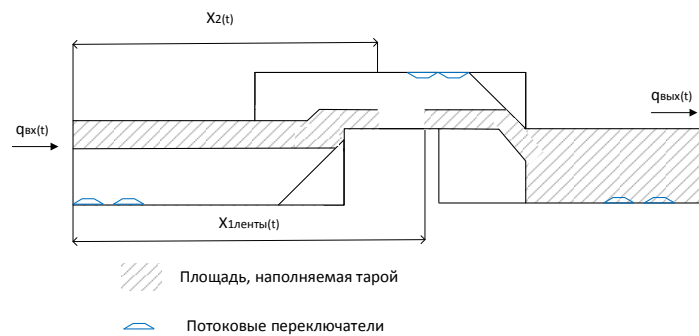


Рисунок 38 – Отображение позиций $x_{1ленты}(t)$ и $x_2(t)$ на свободном транспортере

Расчёт должен производиться для каждого участка отдельно, учитывая различные длины ($l_0, l_1, \dots, l_n, \dots, l_N$) и различные скорости ($v_{вх}, \dots, v_n, \dots, v_{вых}$). Расчёт позиций осуществляется путем интегрирования соответствующей скорости по времени. В качестве пределов интегрирования используются момент смены участка (t_0) и текущее время (t). К текущей рассчитанной позиции на каждом участке транспортной ленты необходимо добавлять длины предыдущих участков ($\sum_{i=0}^{n-1} l_i$), чтобы вычислить позицию относительно входа в буфер:

$$x(t) = \int_{t_0}^t v(t) dt,$$

$$x_n(t) = \sum_{i=0}^{n-1} l_i + \int_{t_i}^t v_i(t) dt = \sum_{i=0}^{n-1} l_i + x_{n_{l_i}}(t).$$

Последняя тара из первого потока тары может перейти в накапливающийся поток в конце транспортёра (см. рисунок 39). Если это происходит, то расчёт позиции $x_1(t)$ должен выполняться иным способом, поскольку тара больше не движется со скоростью транспортной ленты, на которой она находится, а движется со скоростью вывода потока. Для расчёта позиции необходимо знать, сколько тары находится в конце транспортёра, какую площадь она занимает в самой плотной части, какая геометрия

транспортёра (ширина b_n и длина l_n) и какова общая длина транспортёра ($\sum_{i=0}^N l_i$). Следует отметить, что при необходимости полностью очистить транспортер используется программа очистки на $\frac{1}{2}$ скорости от номинальной.

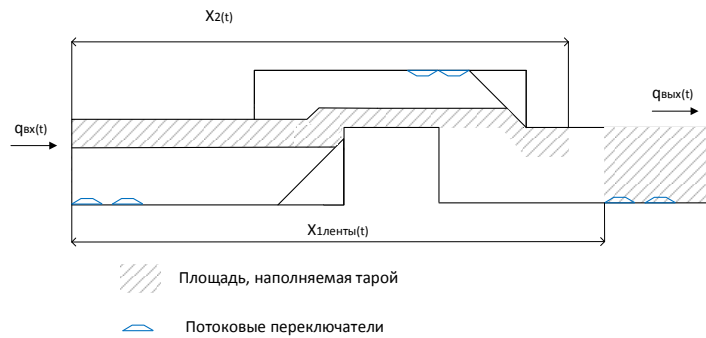


Рисунок 39 – Отображение позиций тары, где $x_{1\text{ленты}}(t)$ представляет собой позицию последней бутылки первого потока тары, которая теперь движется со скоростью выхода потока

Для учета группы тары (которая может быть собрана в контейнер), которая попала на транспортер до момента остановки предшествующей ячейки ($t_{\text{остановки}}$), и тех, которые покинули транспортер до момента вычисления, используются следующие формулы:

$$x_{1\text{контейнера}}(t) = L - \frac{e \cdot d}{b_N} \left(\int_0^{t_{\text{остановки}}} q_{\text{вх}}(\tau) d\tau - \int_0^t q_{\text{вых}}(\tau) d\tau \right),$$

при условии:

$$\left(\int_0^{t_{\text{остановки}}} q_{\text{вх}}(\tau) d\tau - \int_0^t q_{\text{вых}}(\tau) d\tau \right) - \frac{b_N \cdot l_N}{e \cdot d} \leq 0,$$

$$t_{\text{остановки}} \leq t,$$

где в данном контексте t обозначает текущий момент времени, в который производится расчет, это означает, что момент времени остановки предшествующей ячейки ($t_{\text{остановки}}$) должен быть меньше или равен текущему моменту времени (t), что гарантирует, что расчет учитывает остановку предшествующей ячейки, произошедшую до или в момент текущего времени, и не рассматривает события, которые еще не произошли;

$x_{1\text{контейнера}}(t)$ – позиция конца группы бутылок на транспортере в момент времени t ;

L – общая длина транспортера;

$e \cdot d$ – занимаемое место одной бутылки (где e – количество бутылок, d – их диаметр);

b_N – ширина последнего участка транспортной ленты;

$t_{\text{остановки}}$ – время остановки предшествующей ячейки;

$q_{\text{вх}}(\tau)$ – входной поток бутылок в момент времени τ ;

$q_{\text{вых}}(\tau)$ – выходной поток бутылок в момент времени τ ;

l_N – длина последнего участка транспортной ленты;

Для случая, когда группа бутылок находится на одном из предыдущих участков транспортной ленты, используются следующие формулы:

$$x_{1\text{контейнера}}(t) = L - \frac{e \cdot d}{b_n} \left(\left(\int_0^{t_{\text{остановки}}} q_{\text{вх}}(\tau) d\tau - \int_0^t q_{\text{вых}}(\tau) d\tau \right) - \sum_{i=n+1}^N \frac{b_i \cdot l_i}{e \cdot d} \right),$$

при условии:

$$\left(\int_0^{t_{\text{остановки}}} q_{\text{вх}}(\tau) d\tau - \int_0^t q_{\text{вых}}(\tau) d\tau \right) - \sum_{i=n+1}^N \frac{b_i \cdot l_i}{e \cdot d} > 0,$$

$$t_{\text{остановки}} \leq t,$$

l_i – длина участка транспортной ленты с индексом i .

После вычисления позиций, как для свободного транспортирования ($x_{1\text{лента}}(t)$), так и для транспортирования в группе ($x_{1\text{контейнера}}(t)$), алгоритм решает, какая из рассчитанных позиций $x_1(t)$ является правильной. Для этого сравниваются обе рассчитанные позиции. Если $x_{1\text{лента}}(t)$ меньше $x_{1\text{тары}}(t)$, то $x_{1\text{лента}}(t)$ является правильной позицией, так как последняя бутылка первой группы бутылок еще не достигла теоретически рассчитанного конца группы ($x_{1\text{контейнера}}(t)$). В обратном случае, если $x_{1\text{контейнера}}(t)$ меньше или равен $x_{1\text{лента}}(t)$, то $x_{1\text{контейнера}}(t)$ является правильной позицией, так как последняя бутылка передней группы бутылок не может находиться за рассчитанным концом группы ($x_{1\text{контейнера}}(t)$).

Это описывается следующими уравнениями:

$$x_1(t) = x_{1\text{лента}}(t), \text{ если } x_{1\text{лента}}(t) < x_{1\text{контейнера}}(t),$$

$$x_1(t) = x_{1\text{контейнера}}(t), \text{ если } x_{1\text{лента}}(t) \geq x_{1\text{контейнера}}(t),$$

где $x_{\text{лента}}(t)$ – позиция бутылок на транспортере при свободном транспортировании в момент времени t .

С помощью начальной и конечной позиции каждой группы бутылок могут быть произведены соответствующие корректировки производительности ячеек и регулировка скорости транспортных лент, чтобы как можно быстрее закрыть пробелы, возникшие из-за остановок. В этом случае РО и АБ буферы рассматриваются отдельно из-за различий в регулировке скоростей транспортных лент и производительности ячеек.

Когда в буфере режима ожидания происходит остановка предшествующей ячейки, сначала можно адаптировать скорости всех участков транспортной ленты к скорости последующей ячейки. Скорость транспортных лент снижается ($v_{\text{ленты}}$) до минимально необходимого уровня для обеспечения последующей ячейки. Это возможно, потому что условие $v_{\text{вх}} = (q_{\text{вх}} \cdot d)/n$, для $v_{\text{вх}}$ больше не должно выполняться (пока предшествующая ячейка остановлена). Замедление тары, поступающей из предшествующей ячейки через несколько сегментов, больше не требуется из-за остановки. Поэтому скорости адаптируются к скорости $v_{\text{вых}}(t)$ и, соответственно, к $q_{\text{вых}}(t)$ по следующей формуле:

$$v(t) = v_{\text{вых}}(t) + \Delta v_{\text{скопления}},$$

где дополнительный фактор $\Delta v_{\text{скопления}}$ служит для увеличения или уменьшения скорости относительно выходной ленты. Это учитывает различные ширины транспортеров или различные ширины потока бутылок в нормальном режиме. Для безопасного обеспечения последующей ячейки бутылками необходимо соблюдать минимальную скорость это можно производить по алгоритму, представленному на рисунке 40.

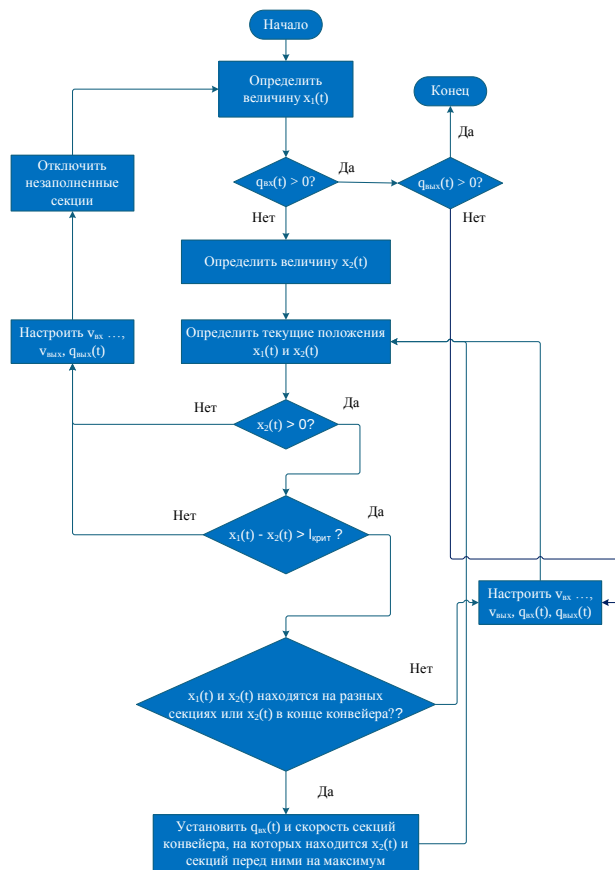


Рисунок 40 – Блок-схема режима закрытия пробелов в РО режиме

При значительных различиях между отдельными участками можно ввести отдельный фактор для каждого участка. Тогда скорость транспортных лент снижается до минимально необходимого уровня для обеспечения последующей ячейки ($v_{ленты}$):

$$v_{вх_цел}(t) = v_{ср_цел}(t) = v_{вых_цел}(t) = c_{вых} \cdot q_{вых}(t) + \Delta v_{скопления}$$

Когда предшествующая ячейка снова запускается, система управления пытается закрыть пробелы, чтобы они не достигли последующей ячейки и не вызвали ее остановку.

В этом случае необходимо различать несколько возможных сценариев работы:

а) если обе группы бутылок с позициями $x_1(t) = x_{1ленты}(t)$ и $x_2(t)$ находятся на одном и том же участке транспортной ленты (см. рисунок 41), пробел не может быть закрыт, так как обе группы бутылок движутся с одинаковой скоростью; производительность предшествующей ячейки рассчитывается и корректируется в зависимости от заполнения буфера, как описано в случае АГ

(I); скорости лент рассчитываются и корректируются также, как описано в АГ (I);

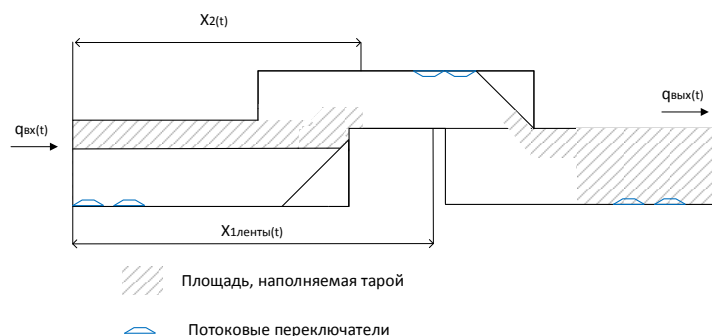


Рисунок 41 – Пример участка, где задняя и передняя группы бутылок (тары) находятся на одном участке транспортной ленты, поэтому закрытие пробела НЕВОЗМОЖНО

б) если две группы бутылок с позициями $x_1(t) = x_{1\text{лента}}(t)$ и $x_2(t)$ находятся на разных участках транспортной ленты, производительность предшествующей ячейки увеличивается до максимума (заданной производительности); скорость первого участка транспортной ленты $v_{\text{вх}}(t)$ адаптируется к производительности предшествующей ячейки по формуле:

$$v_{\text{вых}}(t) = c_{\text{вых}} \cdot q_{\text{вых}}(t),$$

позиция $x_2(t)$ затем сравнивается с длинами отдельных участков; все участки перед текущей позицией, а также участок, на котором находится $x_2(t)$, адаптируются по скорости к $v_{\text{вх}}(t)$:

$$v_n(t) = v_{\text{вх}}(t) + (v_{\text{вых}}(t) - v_{\text{вх}}(t)) \cdot 1/(N+1);$$

другими словами, если $x_1(t)$ и $x_2(t)$ находятся на одном участке транспортной ленты, пробел не может быть закрыт, так как обе группы бутылок движутся с одинаковой скоростью, а если $x_1(t)$ и $x_2(t)$ находятся на разных участках, скорость адаптируется, чтобы закрыть пробелы и предотвратить остановку последующей ячейки;

с) задняя группа бутылок полностью переходит в накопленную группу в конце транспортера (см. рисунок 42); поэтому производительность предшествующей ячейки $q_{\text{вх}}(t)$ увеличивается до максимума (установленная производительность); все транспортные ленты, на которых находится задняя

группа бутылок с позицией $x_2(t)$, будут адаптированы к скорости первого участка транспортной ленты $v_{вх}(t)$; это также касается участка, на котором находится $x_1(t) = x_{1\text{контейнера}}(t)$, если $x_2(t)$ также находится на этом участке; это может привести к кратковременному увеличению давления в первой группе бутылок, но зато $x_2(t)$ можно приблизить к $x_1(t)$; серьезного увеличения шумовых эмиссий не ожидается, так как бутылки первой группы больше не находятся в свободном транспорте и, следовательно, не сталкиваются с медленно движущейся накопленной группой.

Для скорости участка, на котором находится задняя группа бутылок:

$$v_n(t) = v_{вх}(t) + (v_{вых}(t) - v_{вх}(t)) \cdot \sum l_i / (\sum l_i + l_{текущ}).$$

Данные условия возникают, когда позиция $x_2(t)$ меньше или равна длине начального участка l_0 и позиция $x_{1\text{контейнера}}(t)$ больше l_0 , тогда заданная скорость входного участка транспортной ленты $v_{вх_цел}(t)$ равна $c_{вх} \cdot q_{вх}(t)$. Если позиция $x_2(t)$ меньше или равна суммарной длине всех участков транспортной ленты до текущего положения и позиция $x_{1\text{контейнера}}(t)$ больше этой суммы, то заданная скорость всех промежуточных участков $v_{вх_цел}(t)$, $v_{ср_цел}(t)$ и $v_{вых_цел}(t)$ равна $c_{вх} \cdot q_{вх}(t)$.

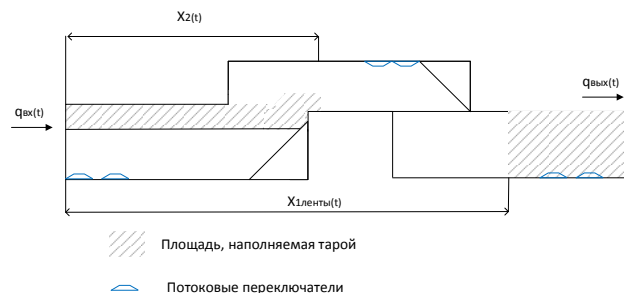


Рисунок 42 – Схематическое изображение ситуации на транспортере, когда задняя группа бутылок накапливается в конце транспортера, что позволяет передней группе $x_2(t)$ приблизиться к $x_1(t)$

Если при работе с антиблокировочными буферами, если происходит сбой в предшествующей ячейке, последующая ячейка замедляется в зависимости от заполнения буфера. Однако $q_{вх}(t)$ не может быть использован для расчетов, так как этот показатель равен нулю из-за остановки. Поэтому используется производительность предшествующей ячейки до остановки

$(q_{\text{вх}}(t_{\text{остановки}}))$. Аналогично случаю РО (II), ячейка замедляется только до минимальной производительности $q_{\text{вых_мин}}$:

$$q_{\text{вх_цел}}(t) = q_{\text{вх}}(t_{\text{остановки}}) (B(t)/C)^p,$$

где $q_{\text{вх_цел}}(t)$ – целевая производительность предшествующей ячейки в момент времени t ;

$q_{\text{вх}}(t_{\text{остановки}})$ – производительность предшествующей ячейки до момента остановки;

$B(t)$ – текущее заполнение буфера в момент времени t ;

C – общая емкость (вместимость) буфера;

p – эмпирически определенный коэффициент, который используется для настройки поведения системы управления.

Если передняя группа бутылок ($x_1(t) = x_{1\text{контейнера}}(t)$) полностью переходит в накопленную группу в конце транспортера, то все транспортные ленты, на которых находится задняя группа бутылок с позицией $x_2(t)$, адаптируются по скорости к скорости первого участка транспортной ленты

Пустые участки транспортера отключаются. Участки, на которых находится первая группа, работают на скорости, рассчитанной для $v_{\text{вых}}(t)$, пока вторая группа не достигнет этих участков.

Подпрограмма для закрытия пробелов выполняется до тех пор, пока условие, описанное в формулах выше, не будет выполнено, и длина пробела не станет меньше критического значения $l_{\text{крит}}$.

3.3 Разработка требований подсчета тары для реализации управления качеством состояния буферных зон

До сих пор для измерения заполнения транспортеров использовались датчики накопления. Проблема использования этого метода заключается в том, что датчики могут распознавать только полностью заполненные области, которые находятся за датчиком в направлении материального потока. Это не позволяет определить точное положение групп бутылок на транспортере, а также позицию накопленной группы бутылок. Таким образом, этот метод не

подходит для алгоритма плавного управления транспортерами бутылок. Поэтому для нового концепта управления необходимо разработать новый подход измерения, который не требует использования датчиков накопления.

Для одноцепочных входов и выходов, как, например, после карусельных машин (например, ячейки для наполнения бутылок, ячейки для маркировки бутылок) или линейных машин (например, инспекционные ячейки), можно использовать световые барьеры. Эти устройства устанавливаются на направляющих перилах и считают бутылки, проходящие через них по одному.

Для многоцепочных входов и выходов использование световых барьеров невозможно. Они встречаются, например, в ячейках для мойки бутылок, упаковочных и распаковочных ячейках и туннельных пастеризаторах. Для подсчета бутылок в этом случае предложен метод [71, 72], при котором бутылки фиксировались с помощью световых датчиков, установленных над транспортером. Однако эта система оказалась непрактичной, так как, во-первых, она могла надежно фиксировать только закрытые бутылки, а во-вторых, ошибка подсчета была относительно большой. Эти проблемы не удалось решить даже с учетом предложенных изменений в системе датчиков. Поэтому требовалось разработать новую систему датчиков.

3.3.1 Требования к системе датчиков для подсчета тары в группе

Основное требование к системе датчиков – это надежное фиксирование бутылок, движущихся в группе.

Для этого необходимо выполнить следующие требования.

1) Временные пропускные способности до 100 000 бутылок/час могут быть достигнуты на входах и выходах буферов; поэтому система датчиков должна быть способна надежно распознавать и считать бутылки при такой скорости.

2) Скорости лент транспортеров сильно варьируются. Они настраиваются в соответствии с условиями работы установки. Максимальная

скорость транспортера для стеклянных бутылок составляет 1,2 м/с, так как при резкой остановке на такой скорости возможен разрыв бутылок [73, 74]. Скорость ленты и, соответственно, максимальная скорость бутылок на массовых транспортерах составляет около 0,15–0,3 м/с, причем нормальная рабочая скорость в зависимости от типа используемой бутылки составляет около 0,18 – 0,22 м/с. Однако на очень узких транспортерах могут быть и более высокие скорости. Поэтому частота выборки датчика должна быть достаточно высокой, чтобы фиксировать бутылки при скорости до 0,5 м/с. Ширина буферов на входах и выходах редко превышает один метр. Этот показатель был определен из различных планов установок. Таким образом, ширина измерительного диапазона в один метр обычно достаточна для современных установок.

3) Датчик должен обладать высокой точностью подсчета, учитывая все условия транспортировки, возникающие в практической эксплуатации. Скорости лент могут варьироваться от 0,0 до 0,5 м/с, причем изменения скорости часто происходят очень резко. На ленте могут возникать поперечные смещения, особенно если бутылки накапливаются под датчиком и смещаются в группе. При быстром движении установки могут возникать вибрации. Эти вибрации не должны влиять на результат подсчета.

4) Для системы подсчёта бутылок в группе применяется барьерный оптический датчик, способный точно фиксировать бутылки при движении с высокой скоростью. Этот датчик построен на основе световой завесы, обеспечивая надёжное обнаружение даже при изменении положения бутылок и при групповой транспортировке. Как материалы, так и конструкция датчика должны соответствовать требованиям гигиенического дизайна. Кроме того, материалы должны быть устойчивы (химически нейтральны) к чистящим средствам, используемым на линиях розлива и упаковки, и, прежде всего, защищать чувствительную электронику. Датчики как правило должны иметь защиту на уровне IP67 и быстро перенастраиваться, так как на большинстве

линий розлива и упаковки обрабатываются различные типы бутылок, которые имеют разные высоты и диаметры.

5) Датчик должен быть оснащён простой системой мониторинга, позволяющей оператору быстро проверять показания и корректировать настройки. Такая система обычно включает цифровой интерфейс с индикацией параметров, таких как количество обнаруженных бутылок, что облегчает контроль точности подсчёта и позволяет оперативно вносить изменения при работе с высокими скоростями и большим потоком бутылок.

На основе этих требований была разработана и проверена система датчиков.

3.3.2 Конструкция предлагаемой системы управления качеством состояния буферных зон транспортеров роботизированных линий розлива

Конструкция системы имеет решающее значение для качества изображения и точности подсчета. Система должна быть сконструирована таким образом, чтобы область захвата крышек бутылок была наилучшим образом освещена и, следовательно, могла быть надежно распознана.

Существующие системы подсчитывают единичные, либо небольшие группы тары. Однако они не могут обеспечить заданную точность и скорость подсчета, как это необходимо для алгоритма разработанной модели системы управления буферами.

Для того, чтобы система корректно работало, необходимо добавить дополнительный элемент в виде источника света, который должен быть установлен так, чтобы свет, проецируемый на крышки бутылок, непосредственно отражался в камеру (см. рисунок 46 и 47).

Даже при небольших отклонениях угла между камерой, крышками бутылок и источником света качество изображения значительно ухудшается, что делает его непригодным для автоматической обработки. Это связано с небольшим углом излучения используемых светодиодов. Ограничивающими

факторами при обработке изображений являются, с одной стороны, упомянутая выше частота считывания, а с другой стороны, сама обработка изображений. Поэтому целью разрабатываемой рабочей системы является минимизировать объем считываемых и обрабатываемых данных. Это также достигается с помощью системы, показанной на рисунке 46 за счет камеры с техническим зрением для подсчета бутылок в группе. Для захвата и подсчета бутылок не требуется весь область изображения размером 1024 x 1024 пикселей, особенность заключается в том, что при реализации такой системы достаточно фиксировать горлышко бутылки, которое стандартизировано для большинства типов бутылок. Область интереса камеры должна быть адаптирована к ширине транспортера, это значит, что камера должна быть настроена так, чтобы захватывать только ту часть изображения, где находятся бутылки. Например, если транспортер имеет ширину 50 см, и бутылки занимают всю его ширину, то камера должна фиксировать именно эту область, а не весь кадр, если его размер больше. Вideoзахват в области интереса означает, что камера захватывает только нужную область изображения, а не весь кадр. Это сокращает объем данных, которые нужно обрабатывать, и позволяет увеличить частоту кадров.

Для широко распространенного в пивоваренной промышленности горлышка под коронную пробку размеры горлышка, например, определены в ГОСТ 10117.1-2001 «Бутылки стеклянные для пищевых жидкостей. Общие технические условия», таким образом необходимо фиксировать только область, немного большую, чем само горлышко бутылки. В случае со стандартной стеклянной бутылки для пива объемом 0,5 литра достаточно области интереса длиной 32 пикселя при выбранном положении камеры, это значение выбрано на основе разрешения камеры и физического размера горлышка бутылки, 32 пикселя являются достаточными для фиксации и анализа критической области горлышка для проверки на наличие дефектов, правильности укупорки и других параметров. Частота кадров (frames per second, fps) определяет, сколько кадров камера может захватить за одну

секунду. Полноэкранный режим захватывает больше данных, поэтому частота кадров ниже из-за времени, необходимого для обработки каждого кадра. Если мы ограничиваемся областью интереса, например, 640 x 480 пикселей, то каждый кадр содержит 307200 пикселей. При полноэкранной частоте кадров 37 fps объем будет 76723200 пикселей в секунду, а при выделенной области 307200 пикселей можно увеличить частоту кадров до 250 fps. Следовательно переход с полноэкранного режима, типового для систем технического зрения (1024 x 1024 пикселей) к области интереса размером 320 x 240 пикселей позволяет увеличить частоту кадров примерно до 450 fps.

На рисунке 43 изображена схема работы предлагаемой системы визуального контроля, предназначенной для мониторинга состояния стеклянных бутылок в буферной зоне возле разделительного конвейера, который используется для контейнеризации тары.

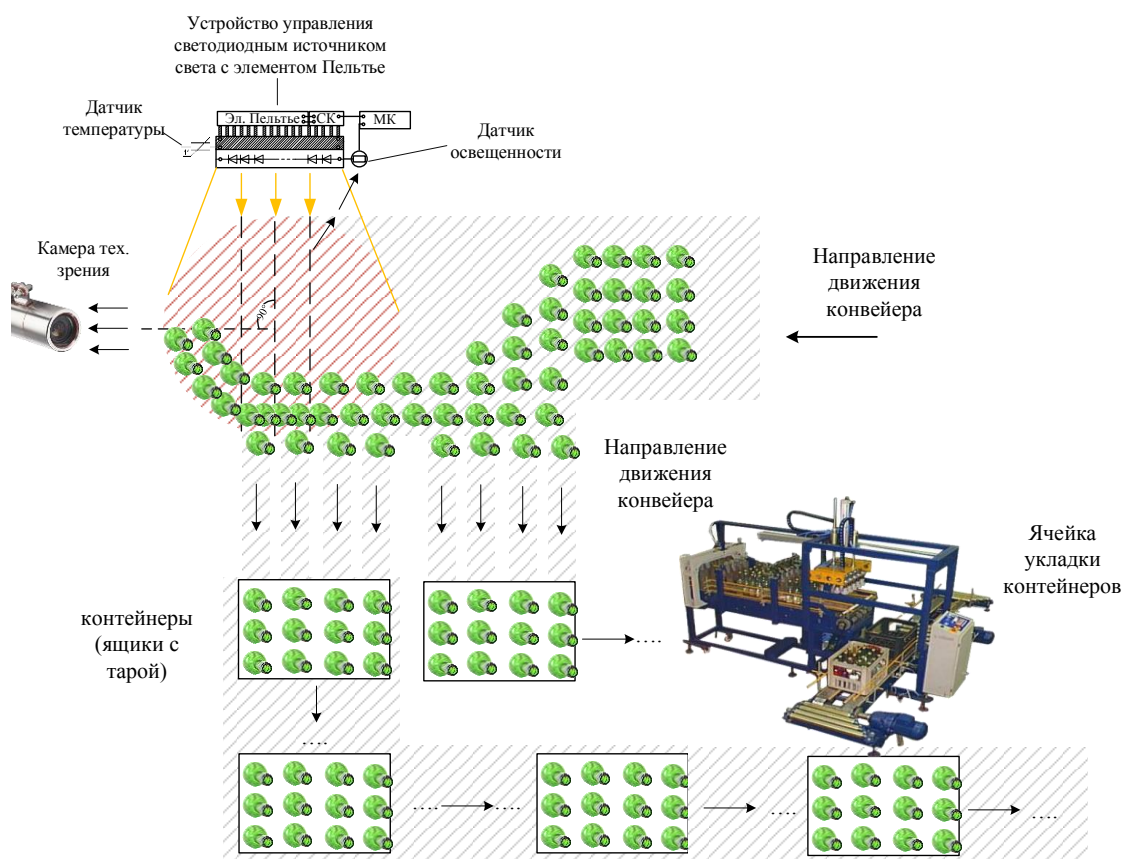


Рисунок 43 – Схематичное изображение системы отражения света от горлышка бутылки и попадания его в камеру с техническим зрением

Эффективность данной системы достигается за счет использования камеры технического зрения, которая настроена таким образом, чтобы улавливать свет, отраженный от горлышек бутылок. Источник света представляет собой светодиодный модуль, который освещает зону контроля под определенным углом, оптимизированным для конкретного типа тары и контейнеров. Камера фиксирует преломленный свет, что позволяет идентифицировать положение и состояние бутылок.

Процесс преломления и отражения света происходит следующим образом: лучи света от светодиодов падают на поверхность горлышка бутылки под углом, рассчитанным на основе коэффициента преломления стекла. В результате происходит отражение света, которое улавливается камерой, расположенной под оптимальным углом. Камера преобразует полученные световые сигналы в цифровые данные, которые далее анализируются системой управления. Эта система может различать ситуации, когда бутылки находятся в правильном положении и когда возникают отклонения, которые могут привести к деформации или разрушению тары.

Для обеспечения оптимальных условий работы светодиодного модуля и повышения его долговечности в сложных условиях освещения, используется устройство управления светодиодным светильником, которое построено на базе элемента Пельтье, что позволяет не только регулировать яркость, но и контролировать тепловой режим системы. Важным элементом устройства является микроконтроллер, который управляет силовым ключом и диммируемым драйвером, обеспечивая стабильность работы системы при изменении яркости освещения.

Применение устройства управления светодиодным светильником, описанного в патенте RU197321U1, обеспечивает необходимую надежность и точность работы системы визуального контроля. Этот патент описывает инновационное решение, позволяющее существенно увеличить время работы светодиодного источника света и повысить автономность модуля за счет интеграции элементов Пельтье с радиатором отвода тепла [75]. Это, в свою

очередь, улучшает температурный режим светодиодного модуля, что критически важно для стабильной работы в условиях высокой интенсивности эксплуатации. Дополнительные исследования, подтверждающие эти выводы, можно найти в работе [76].

Принцип работы устройства управления светодиодным светильником заключается в следующем: световой модуль, включающий в себя элемент Пельтье с радиатором отвода тепла, контролируется с помощью микроконтроллера и диммируемого драйвера, что позволяет поддерживать стабильную яркость светодиодов и предотвращать перегрев. Таким образом, система визуального контроля может бесперебойно работать в течение длительного времени, минимизируя риск деформации или повреждения тары.

Предлагаемый способ и устройство система визуального контроля работают следующим образом: в ходе экспериментальных исследований и проведенного анализа линии розлива эффективностью до 90 тыс. бутылок в час выявлено, что емкость распределительной буферной зоны перед участком ячейки контейнеризации должна быть не менее 1000 бутылок, при этом количестве система может производить контроль последовательности операций контейнеризации без сбоев и застоев, однако в ходе нормальной работы конвейерных линий с хрупкой такой периодически могут возникать ошибки и сбои, в результате которых может происходить деформация или разрушение стеклянной тары, для данного контроля а также контроля заполняемости буферной зоны, предлагается использовать систему визуального контроля, которая состоит из камеры технического зрения установленной под специальным углом, чтобы улавливать исходящие от светодиодного источника света лучи, отраженные от горлышек стеклянных бутылок под определенным углом, который настраивается в зависимости от типа тары и контейнера; в качестве специализированного устройства подсветки пятна, соизмеримого с площадью 1000 шт. тары (на рисунке 44 отмечено красной штриховкой) предлагается использовать устройство управления светодиодным светильником с элементом Пельтье, так как данное

устройство разрабатывалось специально под сложные условия освещения и позволяет производить регулировку яркости, а наличие микроконтроллера (обозначенного на рисунке 44 «МК» и силового ключа («СК»)) повышает гибкость настройки устройства при этом позволяя контролировать нагрев, тем самым повышая его долговечность [75].

3.3.2.1 Описание способа расчета углов преломления света при реализации визуального контроля в системе управления качеством состояния буферных зон

Преломление света происходит на границе двух сред с разными коэффициентами преломления. В нашем случае, это граница воздух-стекло. Коэффициенты преломления (n) для воздуха и стекла обозначаются как n_1 и n_2 соответственно.

Для воздуха, $n_1 \approx 1,0003$ (можно принять $n_1 \approx 1$ для упрощения, так как преломление воздуха минимально).

Для стекла, n_2 зависит от типа стекла, но для стандартного стекла он обычно составляет $n_2 \approx 1,5$.

Преломление света внутри бутылки также будет зависеть от показателя преломления воды (n_3), который составляет примерно 1,33. Поэтому при переходе луча из воздуха в стекло и далее в воду угол преломления будет изменяться в зависимости от каждого слоя среды, что необходимо учитывать при установке камеры для корректного детектирования.

Отношение углов падения и преломления света при переходе из одной среды в другую можно описать через Закон Снелла:

$$n_1 \cdot \sin\theta_1 = n_2 \cdot \sin\theta_2,$$

где θ_1 – угол падения (угол между падающим лучом и нормалью к поверхности);

θ_2 – угол преломления (угол между преломленным лучом и нормалью к поверхности).

Используем закон Снелла для определения угла преломления:

$$\sin\theta_2 = \frac{n_1}{n_2} \sin\theta_1,$$

подставляя значения для воздуха и стекла:

$$\sin\theta_2 = \frac{1}{1,5} \sin 30^\circ = 0,333333,$$

Тогда угол преломления θ_2 определяется как:

$$\theta_2 = \arcsin(0,333333) \approx 19,47^\circ.$$

Если свет внутри стеклянного материала проходит под определенным углом, то при выходе из стекла обратно в воздух возможен эффект полного внутреннего отражения. Это происходит, если угол падения на внутреннюю границу превышает критический угол (θ_c), который определяется следующим образом:

$$\theta_c = \arcsin\left(\frac{n_1}{n_2}\right) = \arcsin(0,6667) \approx 41,81^\circ.$$

Следующий переход происходит на границе стекло–вода. Применим закон Снелла ещё раз:

$$n_2 \cdot \sin\theta_2 = n_3 \cdot \sin\theta_3,$$

где $n_2 \approx 1,5$ для стекла;

$n_3 \approx 1,33$ для воды;

θ_3 – угол преломления в воде.

Подставляем найденный ранее угол преломления θ_2 :

$$\sin\theta_3 = \frac{1,5}{1,33} \sin\theta_2 \approx 0,374,$$

тогда угол преломления θ_3 в воде:

$$\theta_3 = \arcsin(0,374) \approx 21,97^\circ$$

Если угол падения внутри стекла θ_2 больше θ_c , свет не выйдет из стекла, а полностью отразится внутри него. В контексте нашей системы, нужно убедиться, что камера расположена таким образом, чтобы регистрировать именно те лучи, которые преломляются или отражаются под углами, соответствующими условиям работы.

Для оптимальной работы камеры её угол установки должен учитывать преломление, чтобы правильно фиксировать отражённый свет. Если камера расположена под углом $\theta_{\text{камеры}}$ к нормали, и этот угол соответствует отражённому свету, то:

$$\theta_{\text{камеры}} = \theta_2.$$

Это важно для обеспечения точности и минимизации ошибок при детектировании положения бутылок. Неправильный угол установки камеры может привести к тому, что свет не будет правильно фиксироваться, что снизит эффективность системы контроля.

Светодиодные источники света обычно ведут себя как ламбертианские излучатели, что означает, что их сила света подчиняется закону косинуса. Этот закон описывает распределение света в зависимости от угла относительно нормали к поверхности светодиода [77]:

$$I(\theta) = I(0) \cos(\theta),$$

где $I(0)$ – сила света при $\theta = 0$ (прямо перпендикулярно поверхности);

θ – угол между точкой наблюдения и нормалью к поверхности светодиода.

На распространение и интенсивность света, излучаемого светодиодом, значительно влияют конструктивные элементы, такие как линзы, отражатели и рассеиватели. Эти элементы могут менять направление света, сужать или расширять угол луча (α), который определяется как угол, при котором интенсивность света падает до 50% от максимального значения. Для ламбертианского излучателя это происходит при угле $\theta=60^\circ$.

Рабочая температура светодиода также оказывает влияние на дисперсию света. При повышении температуры может изменяться показатель преломления материалов, что, в свою очередь, влияет на угол преломления и характер излучения. Это может потребовать корректировки угла установки камеры для правильного считывания данных в зависимости от рабочих условий.

Используя модель Ламбертиана в качестве основы, можно включить такие факторы, как эффект линзы и других элементов, формирующих дисперсию света у осветительного прибора.

Яркость L светодиода может быть определена для ламбертовского источника при учете ϕ азимутального угла следующим образом:

$$L(\theta, \phi) = \frac{I_0}{\pi} \cos(\theta).$$

Для источника, не относящегося к Ламберту, более общей моделью яркости может быть:

$$L(\theta, \phi) = L_0 f(\theta, \phi),$$

где $f(\theta, \phi)$ – функция, которая фиксирует поведение рассеивания света светодиодом. Эта функция может быть определена эмпирически для конкретной конструкции светодиода или выведена на основе оптики, используемой со светодиодом [78].

Суммарный световой поток Φ , излучаемый светодиодом, может быть рассчитан путем интегрирования излучения по всей полусфере излучения:

$$\Phi = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} L(\theta, \phi) \sin(\theta) \cos(\theta) d\theta d\phi.$$

Этот интеграл дает суммарный световой поток светодиода с учетом всех направлений излучения.

Приведенные в данном разделе принципы являются основой для разработки модели оценки бликов и моделирования распространения света.

Используя модель Ламбертиана, можно учитывать все перечисленные факторы при проектировании и настройке системы визуального контроля. Для обеспечения точного и надёжного считывания данных камерой, важно учитывать:

- правильный выбор угла установки камеры, который будет оптимален для считывания отражённого света;
- влияние конструктивных элементов (линз, отражателей) на фокусировку или рассеивание света;

- влияние рабочей температуры на световые характеристики и корректировка системы в зависимости от условий эксплуатации.

Снимки, сделанные при помощи описанной системы изображены на рисунке 44. Изображений такого качества достаточно для последующей автоматической обработки, однако тара должна быть открытая и чистая.

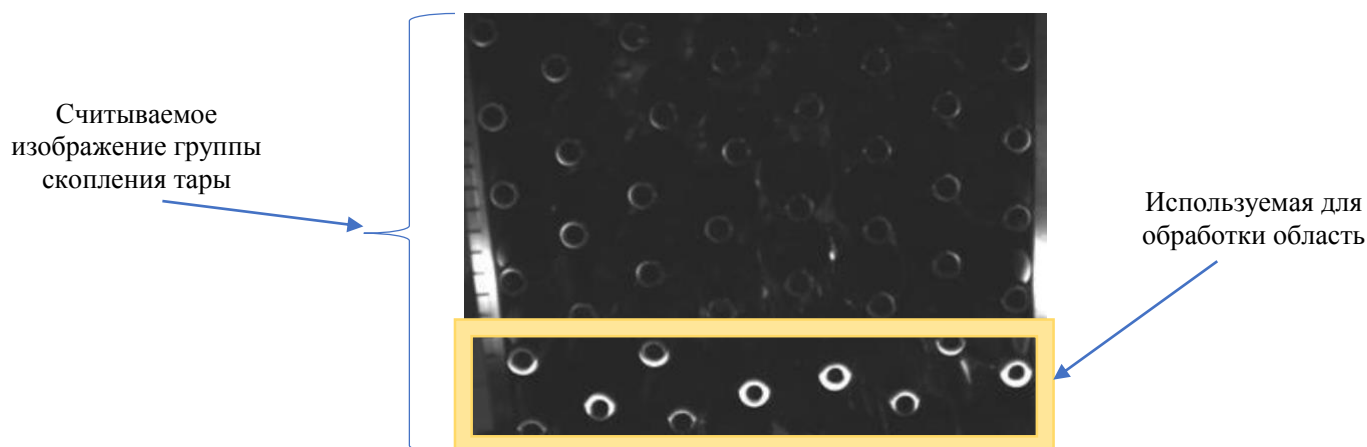


Рисунок 44 – Отображение считываемой камерой технического зрения области и выделение части отображения с видимым отражением света от горлышек бутылочной тары

Горлышки бутылок должны быть представлены в виде полностью замкнутых кругов (как показано на рисунке 47) или частично открытых кругов в зависимости от используемого алгоритма анализа. Таким образом, анализ может быть адаптирован к качеству обрабатываемых бутылок. В приложении Г представлен код, представляющий собой основу для алгоритма обнаружения дефектных бутылок в буферной зоне. На изображении 45 продемонстрирована работа программного в приложении Г кода, представляющая собой симуляцию работы алгоритма и считывания изображения камерой.

Принцип работы алгоритма, работу которого симулирует программный код из приложения Г следующий: камера захватывает изображение, в случае с симуляцией изображение с бутылками создается синтетически, на котором расположены бутылки. Каждая бутылка представляет собой круг с отражающим светом. Некоторые из них могут быть повреждены, что моделируется частичным отсутствием этого круга. Программа случайным образом решает, какие бутылки будут повреждены, и создает их с неполным

контуром. Чтобы имитировать условия реальной производственной линии, изображение подвергается специальной обработке – перспективному преобразованию. Это придает изображению эффект, будто камера, фиксирующая бутылки, установлена под углом. Такой подход позволяет приближенно воспроизвести реальные условия контроля.

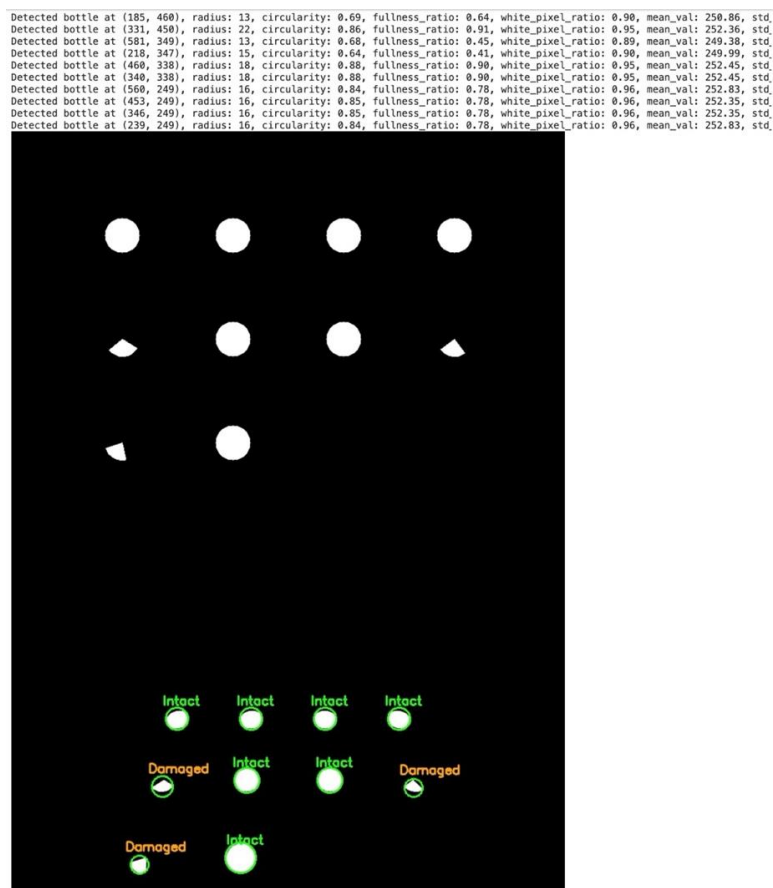


Рисунок 45 – Демонстрации работы кода, выполняющего симуляцию алгоритма детектирования битых бутылок камерой визуального контроля

Детектирование бутылок в этом алгоритме производится по следующему принципу:

- 1) обнаружение контуров – изображение преобразуется в градации серого, после чего применяется бинаризация;
- 2) поиск контуров на бинаризованном изображении – производится с использованием встроенной функции OpenCV, при этом контуры представляют собой замкнутые границы объектов, которые, вероятно, являются бутылками;
- 3) для каждого найденного контура рассчитывается радиус

- наименьшего круга, который может его полностью охватить (это называется минимальной окружностью);
- 4) определяется площадь этого круга и сравнивается с фактической площадью, занимаемой контуром; этот параметр называется полнотой (fullness ratio) и показывает, насколько плотным и полным является объект по сравнению с идеальным кругом от верха бутылки;
 - 5) вычисление округлости (circularity), которая показывает, насколько форма контура близка к идеальному кругу; округлость рассчитывается на основе площади контура и его периметра;
 - 6) для каждого объекта анализируется текстура внутри контура; сначала создается маска, которая выделяет область внутри контура, после чего производится вычисление средней яркости (mean_val) и стандартного отклонения яркости (std_dev);
 - 7) через среднюю яркость определяется насколько объект заполнен, а стандартное отклонение показывает степень вариации яркости, что может указывать на неровности или дефекты поверхности бутылки;
 - 8) на основе рассчитанных метрик (округлость, полнота, средняя яркость и стандартное отклонение) бутылки классифицируются как:
 - целая (Intact) – если бутылка имеет высокую округлость, полноту, нормальную яркость и низкое стандартное отклонение, она считается целой;
 - поврежденная (Damaged) – если параметры показывают небольшие отклонения от нормы, такие как уменьшенная округлость или высокая вариация яркости, бутылка классифицируется как поврежденная;
 - 9) после классификации бутылки на изображении помечаются соответствующими метками («Intact», «Damaged»);
 - 10) далее программой выводится информацию о каждом контуре в консоль, включая радиус, округлость, полноту и результаты анализа текстуры.

Разработанные алгоритм и программный код из приложения Г может служить основой для реальной системы контроля качества на производственных линиях, помогая автоматически выявлять и отсортировать поврежденные бутылки до того, как они попадут к потребителю.

Для камеры и источника освещения этот аспект особенно важен, поскольку и освещение, и камера должны быть установлены над транспортером, а следовательно, в зависимости от применения, также над открытыми очищенными бутылками или другой тары (например, после ячейки для мойки бутылок).

3.4 Симуляция алгоритма бесступенчатого регулирования буфера в системе управления качеством состояния буферных зон

Существуют многострочные транспортеры для бутылок в различных вариациях, которые могут значительно отличаться друг от друга. Проблема, возникающая из этого, заключается в возможности тестирования концепций управления на всех этих вариациях. Кроме того, к различным транспортным системам добавляются внешние параметры, такие как производительность предшествующих и последующих ячеек и их поведение при сбоях, которые сильно варьируются. Эти параметры влияют на регулирование транспортера. Множество этих параметров затруднительно тестировать на реальной установке. Поэтому была разработана модель, с помощью которой также можно провести анализ эффективности различных стратегий управления в течение длительного периода испытаний.

Для задания поведения системы в каждом случае модель должна иметь интерфейсы для задания производительности ячеек и скоростей лент. Кроме того, модель должна снабжать данные для регулирования, такие же, как и на реальной установке. Это, например, состояние заполненности определенных участков транспортера (реальная установка: датчики накопления) и значения

счетчиков на входе и выходе (реальная установка: световые барьеры или интеллектуальная камера).

Кроме того, должна быть возможность с минимальными усилиями изменять все параметры, например, геометрию буферов или производительность ячеек. Компоненты модели также должны быть связаны таким образом, чтобы можно было моделировать большие участки установок, состоящие, например, из двух транспортеров и трех ячеек.

Ввиду требования, что модель должна быть легко адаптирована к различным конфигурациям буферов и ячеек, была выбрана модульная структура. Каждая компонента системы была разработана как отдельный модуль с входами и выходами. Это интерфейсы для транспортировки материалов, то есть потока бутылок, а также интерфейсы для взаимодействия с системой управления.

3.4.1 Допущения и требования к симуляции

Чтобы создать симуляцию, необходимо четко определить границы системы. Они должны охватывать область, подлежащую регулированию, и все возможные возмущающие величины. Это означает, что как транспортер, так и предшествующие и последующие ячейки должны быть включены в систему. Ячейки при этом функционируют как источники или стоки, которые вводят или удаляют материал из системы. Их параметры должны быть настроены таким образом, чтобы можно было воспроизвести поведение при сбоях, описанное в разделе.

Центральным элементом симуляции является сам транспортер. Симуляция должна быть способна достаточно точно отображать поток тары в пределах границ системы, чтобы тестировать различные концепции регулирования. Для этого не обязательно отображать каждую бутылку отдельно. Важно точно отображать потоки тары, которой достаточно для сборки в контейнер. Для этого необходимо знать начало и конец каждого потока тары, если он находится в пределах системы. Кроме того, необходимо

знать ширину потока тары в каждой точке системы, а также конец накопившегося потока, находящегося в системе. Поток тары должен двигаться через систему в зависимости от заполненности транспортера и скорости ленты.

Чтобы задать поведение системы, симуляция должна иметь интерфейсы для задания производительности ячеек и скорости ленты. Также симуляция должна предоставлять данные для регулирования, как это делается в реальной установке. Это могут быть данные о состоянии заполненности определенных участков транспортера (реальная установка: накопительный выключатель) и счетчики на входе и выходе (реальная установка: световая завеса или интеллектуальная камера).

Кроме того, должна быть возможность легко изменять все параметры, чтобы, например, менять геометрию буферов или производительность ячеек. Компоненты симуляции должны быть связаны таким образом, чтобы можно было отображать и более крупные участки установки – например, состоящие из двух транспортеров и трех ячеек.

Через информационные интерфейсы каждый модуль сообщает о своем состоянии, например, о заполнении участка транспортера, а также получает информацию от системы управления, такую как заданная скорость или производительность.

Симуляция осуществляется дискретно по времени, чтобы в каждый момент времени можно было определить точное состояние, особенно транспортеров и, следовательно, потоков тары. Это необходимо для того, чтобы тестировать описанные концепции регулирования в реалистичных, практически непрерывных условиях.

3.4.2 Описание элементов симуляции системы

Транспортный модуль (ТМ) служит для моделирования отдельного участка транспортера. Он может быть соединен с любым количеством других транспортных модулей, образуя полный транспортер (Т). Модуль

характеризуется транспортными лентами, приводимыми в движение мотором, которые движутся с одинаковой скоростью или с фиксированным соотношением скоростей лент друг относительно друга. Транспортер характеризуется тем, что он принимает тару от одной ячейки и передает ее другой ячейке. Таким образом, он включает все транспортные модули между двумя ячейками.

Транспортный модуль имеет четыре интерфейса: по одному для источника и стока для потока материала, а также по одному для приема и передачи данных. Через источник и сток модуль может быть соединен с другими транспортными модулями или с модулем ячейки для обмена потоками материалов. Два интерфейса данных в первую очередь служат для связи с модулем управления. Через них принимаются данные, необходимые для расчета потока материалов. Это шаг симуляции (Δt), то есть время, прошедшее с момента последнего расчета, а также текущая заданная скорость транспортера для соответствующего модуля (заданная скорость транспортера $v_{\text{зад}}(t)$).

Для вычисления этих двух значений система управления модуля получает информацию. В зависимости от выбранного метода управления, это могут быть данные о текущем потоке тары (входящий поток $q_{\text{вх}}(t)$) и выдаче контейнеров (выходящий поток $q_{\text{вых}}(t)$), текущей скорости (текущая скорость $v(t)$) и заполнении элементов транспортного модуля (заполнение $b_j(t)$), что позволяет реализовать запросы накопительных переключателей. Помимо предоставления данных для модуля управления, эти интерфейсы также используются как виртуальные датчики. Они записывают данные процесса во время испытаний и сохраняют их для последующего анализа в одном или нескольких файлах.

Транспортный модуль (ТМ) предназначен для моделирования транспортировки тары и контейнеров с тарой в системе автоматизации. Он разделен на равные элементы шириной x (см. рис. 46).

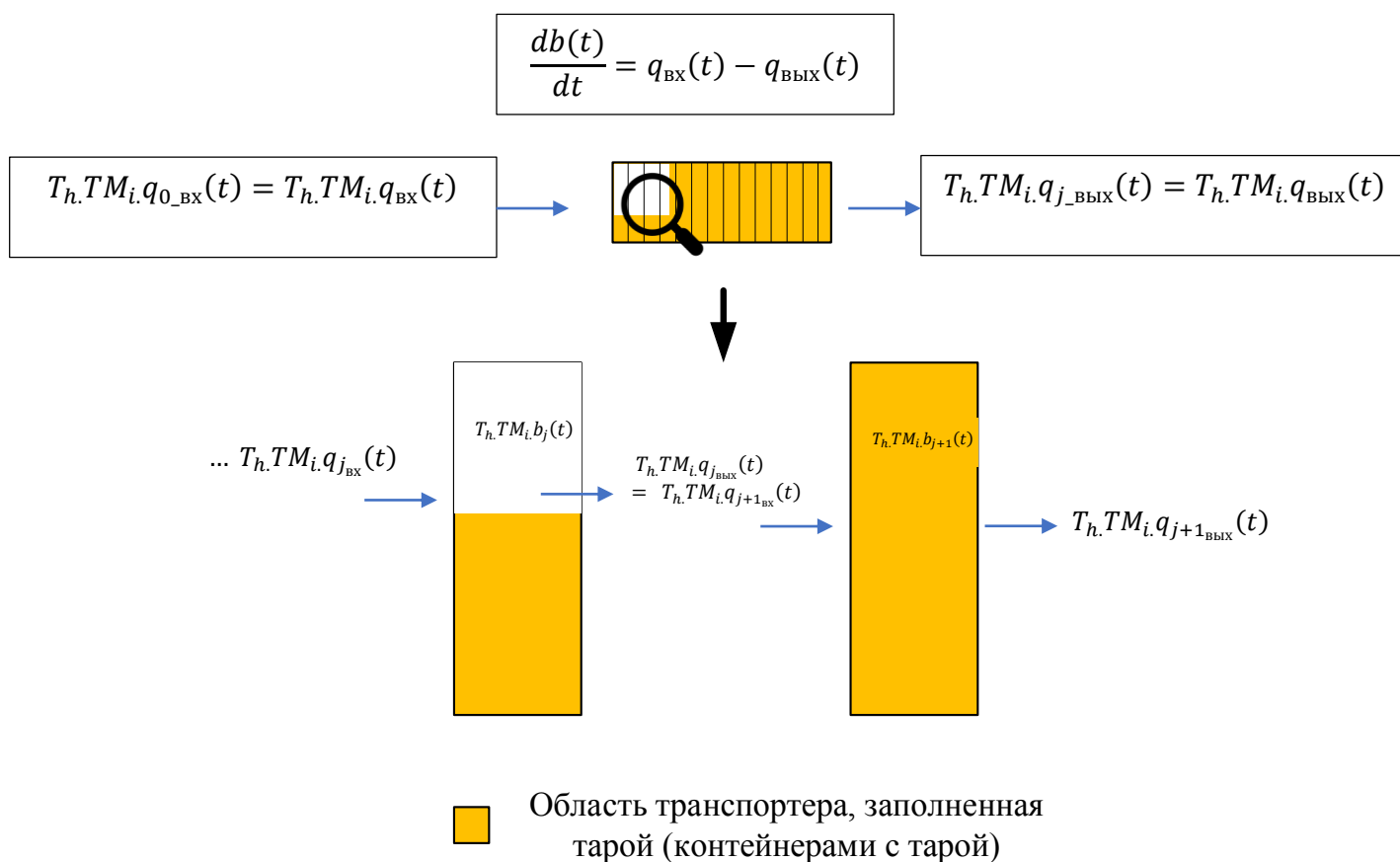


Рисунок 46 – Структура модели транспортного модуля

Каждый элемент имеет те же интерфейсы, что и транспортный модуль в целом. Это позволяет детально описывать и анализировать движение тары по всему транспортеру. Текущее заполнение определяется разностью между входом и выходом тары для каждого элемента, так что для транспортного модуля в целом, а также для каждого элемента транспортного модуля, элемента j транспортного модуля i транспортера h справедлива формула:

$$T_h.TM_i.q_{0_ВХ}(t) = T_h.TM_i.q_{ВХ}(t) = T_h.TM_i.q_{j_ВЫХ}(t) = T_h.TM_i.q_{ВЫХ}(t).$$

Материальный поток между отдельными элементами может быть рассчитан, если известны скорость транспортного модуля $T_h.TM_i.v(t)$ и заполнение соседних элементов ($T_h.TM_i.b_{j-1}(t)$ и $T_h.TM_i.b_{j+1}(t)$). Расчет проводится от конца транспортера, начиная с последнего модуля последнего транспортера с наибольшими значениями индекса h ($h=H$) и i ($i=I$), а также элемента с наибольшим значением индекса j ($j=J$), и продолжается для всех остальных модулей до первого источника системы ячейки с индексом $k=0$.

При этом рассчитывается только приток тары для каждого элемента $T_h.TM_i.q_{jвх}(t)$.

Потенциальный входной поток $T_h.TM_i.q_{jвх_пот}(t)$ определяется как:

$$T_h.TM_i.q_{jвх_пот}(t) = T_h.TM_i.v(t) \cdot T_h.TM_i.b_j(t),$$

$$T_h.TM_i.q_{jвх_пот}(t) = T_h.TM_i.b_j(t) / x.$$

Фактический входной поток $T_h.TM_i.q_{jвх}(t)$ ограничивается либо потенциальным потоком, либо разностью между емкостью элемента и его текущим заполнением:

$$T_h.TM_i.q_{jвх}(t) = \min(T_h.TM_i.q_{jвх_пот}(t), T_h.TM_i.b_j - T_h.TM_i.b_j(t)).$$

Изменение заполнения элемента $T_h.TM_i.b_j(t)$ интегрируется по времени на основе разности между входным и выходным потоками:

$$T_h.TM_i.b_j(t) = \int (T_h.TM_i.q_{jвх}(t) - T_h.TM_i.q_{jвых}(t))dt.$$

Вышеописанные формулы учитывают динамику заполнения элементов и позволяют моделировать процесс транспортировки материалов по конвейерной линии с учетом ограничения по скорости и емкости каждого элемента.

Средняя скорость транспортера:

$$\bar{v} = \frac{1}{T} \int_0^T (T_h.TM_i.v(t) dt).$$

Коэффициент использования транспортного модуля:

$$\rho = \frac{T_h.TM_i.q_{вх}(t) \cdot T_{обработки}}{C}.$$

Коэффициент пропускной способности транспортного модуля:

$$\eta = \frac{T_h.TM_i.q_{вх}(t)}{T_h.TM_i.q_{вых}(t)}.$$

Уравнение состояния запасов в элементе:

$$b_j = T_h.TM_i.b_j(t).$$

Время задержки тары в элементе:

$$\tau = \frac{x}{T_h.TM_i.v(t)}.$$

Время простоя транспортного модуля:

$$T_{\text{простоя}} = T - \frac{TM_i \cdot q_{\text{вх}}(t) \cdot T_{\text{обработки}}}{C}.$$

Управляющие воздействия:

$$u(t) = f(T_h \cdot TM_i \cdot q_{\text{вх}}(t), T_h \cdot TM_i \cdot q_{\text{вых}}(t), T_h \cdot TM_i \cdot v(t) \dots).$$

Передача тары между элементами:

$$\begin{aligned} T_h \cdot TM_i \cdot q_{\text{вых}}(t) &= T_h \cdot TM_{i+1} \cdot q_{\text{вх}}(t), \\ i &< T_h \cdot I - 1, \\ J &< T_h \cdot TM_i \cdot J. \end{aligned}$$

Для моделирования динамики заполнения элементов транспортного модуля необходимо учитывать входящий и исходящий потоки тары, чтобы определить текущее заполнение каждого элемента:

$$T_h \cdot TM_i \cdot b_j(t) = \int_{t-1}^t (T_h \cdot TM_i \cdot q_{j_{\text{вх}}}(\tau) - T_h \cdot TM_i \cdot q_{j_{\text{вых}}}(\tau)) d\tau.$$

Ниже представлено описание ячеечного модуля с моделируемыми параметрами, описанными в таблицах приложения Д.

Ячеечный модуль (М) предназначен для моделирования поведения реальной ячейки, связанной только с одним материалопроводом установки. В случае построенной в данной работе симуляционной модели материалопроводом является транспортировка тары. Ячеечный модуль, как и транспортный модуль, имеет четыре интерфейса. Два из этих интерфейсов служат для связи с управляющей системой, другие два – для отображения потока материала. Через два интерфейса для передачи данных ячейка может сообщать свой текущий выход $M_k \cdot q_{\text{вых}_k}(t)$, потенциальный выход $M_k \cdot q_{\text{потк}}(t)$ (по ГОСТ 28133-89), а также возможные неисправности.

Все данные могут быть записаны во время симуляции и сохранены для последующего анализа в одном или нескольких файлах. Через входной и выходной $M_k \cdot q_{\text{вх}_k}(t)$ и выходной $M_k \cdot q_{\text{вых}_k}(t)$ потоки ячейки модуль может быть связан с другими ячейками модулями (например, для моделирования

блокированных ячеек) или транспортными модулями для представления потока материала.

Если модуль ячеек соединен с транспортными модулями, как это обычно бывает, действуют следующие закономерности:

1) если производительность ячейки больше, чем пропускная способность следующего элемента, симуляция прерывается из-за появления несоответствий; ячейочный модуль выполняет две основные задачи в симуляционной модели; во-первых, он моделирует «случайные» сбои ячеек, а во-вторых, моделирует поведение ячейки при запуске и остановке; для реализации поведения при запуске и остановке используется уравнение кривой, по которому ячейка увеличивает или снижает свою производительность, обычно это будет линейное уравнение, но может быть использована любая другая функция; это означает, что при задании более высокой производительности;

2) большинство ячеек имеют время задержки, хотя оно обычно не так выражено, как у транспортных модулей (исключение составляет только ячейка для очистки бутылок). Это означает, что бутылки, поступающие в ячейку, будут доступны на выходе только через интервал времени $M_k \cdot t_{d_k}$.

Время задержки особенно важно при запуске и остановке ячейки, так как при запуске возникает временная задержка до выхода первого контейнера с тарой, а при остановке ячейки контейнеры продолжают выходить даже после закрытия входного барьера. Также это поведение можно моделировать с помощью ячейочного модуля.

Для моделирования работы модуля используются следующие зависимости, представленные ниже.

Вход и выход контейнеров с тарой или тары:

$$M_k \cdot q_{\text{вых}_k}(t) = \min (M_k \cdot q_{\text{цел}_k}(t), M_k \cdot q_{\text{пот}_k}(t)),$$

при потенциальной производительности ячейки:

$$M_k \cdot q_{\text{пот}_k}(t) = M_k \cdot q_{\text{цел}_k}(t) \cdot M_k \cdot \rho_k.$$

Заполнение элемента (если ячейка соединена с транспортным модулем):

$$T_{h.TM_i.b_j}(t) = \int_{t-1}^t (T_{h.TM_i.q_{j_{вх}}}(\tau) - T_{h.TM_i.q_{j_{вых}}}(\tau))d\tau.$$

Передача тары между ячейками и транспортным модулями:

$$M_k.q_{выхk}(t) = T_{h.TM_{i+1}.q_{0_вх}}(t).$$

Поведение при запуске и остановке:

$$M_k.q_k(t) = \begin{cases} M_k.q_{цел_k}(t) \cdot \frac{t}{M_k.t_{дк}}, & \text{если } 0 \leq t \leq M_k.t_{дк} \\ M_k.q_{цел_k}(t), & \text{если } t > M_k.t_{дк} \end{cases}.$$

Время задержки:

$$M_k.t_{дк} = \frac{l_{M_k}}{M_k.v_k(t)},$$

где l_{M_k} – длина ячейки k .

Моделирование сбоев:

$$t_{след_неисправ_k} = t + M_k.t_{неисправ_k},$$

$$t_{периода_без_неисправ_k} = t + M_k.t_{без_неисправ_k}.$$

Скорость контейнеров с тарой или отдельной тары:

$$M_k.v_k(t) = \frac{M_k.q_{вхk}(t)}{M_k.C_k}.$$

3.4.3 Построение симуляционной модели применения разработанной системы управления качеством состояния буферных зон

На основе предоставленных схем и формул, необходимо уточнить и описать процесс симуляции и параметры, влияющие на её выполнение.

Важным фактором для симуляции является выбор времени шага Δt , который должен быть таким, чтобы ошибка была минимальной, а вычислительные затраты не были чрезмерными. Шаг времени Δt должен быть выбран таким образом, чтобы тара не перемещалась дальше, чем ширина элемента x за один шаг симуляции. Также шаг времени Δt должен обеспечивать точное воспроизведение переходов тары между модулями и

элементами транспортных модулей. Это можно выразить следующей формулой:

$$\Delta t = \frac{x}{v_{max}}.$$

Для точного воспроизведения переходов тары между элементами транспортного модуля, необходимо учитывать поток тары между элементами. Поток тары из элемента j в элемент $j+1$:

$$T_{h.TM_i}.q_{j_ВЫХ}(t) = T_{h.TM_i}.q_{j+1_ВХ}(t),$$

Заполнение элемента j транспортного модуля i на следующем шаге времени:

$$T_{h.TM_i}.b_j(t + \Delta t) = T_{h.TM_i}.b_j(t) + \Delta t \cdot \left(T_{h.TM_i}.q_{j_ВХ}(t) - T_{h.TM_i}.q_{j_ВЫХ}(t) \right).$$

Дискретизация симуляции осуществляется на основе выбранного шага времени Δt . Потенциальный входной поток для элемента j транспортного модуля i :

$$T_{h.TM_i}.q_{j_ВХ_ПОТ}(t) = \frac{T_{h.TM_i}.b_j(t)}{x}.$$

Фактический входной поток для элемента j :

$$T_{h.TM_i}.q_{j_ВХ}(t) = \min \left(T_{h.TM_i}.q_{j_ВХ_ПОТ}(t), T_{h.TM_i}.c_j(t) - T_{h.TM_i}.b_j(t) \right).$$

На каждом шаге времени t симуляция обновляется и производится расчет потенциального входного потока, определение фактического входного потока, обновление заполнения элемента, переход тары между элементами.

По данной логике был построен программный код на языке Python, моделирующий поведение системы и заполнение РО и АБ буферов. Первая итерация моделирования была разработана для верификации логики работы алгоритма, проверки корректности математических интерпретаций и допущений, процесс моделирования включал 100 секунд работы конвейерной линии только с РО буфером, результаты представлены на рисунке 47.

Скорость конвейера: 0,8 м/с
 Буфер пополнен до уровня: 965 бутылок
 Буфер уменьшен до уровня: 731 бутылок
 Обработано бутылок: 6000,0
 Буфер стабилен на уровне: 731 бутылок
 Скорость конвейера: 0,7000000000000001 м/с



Рисунок 47 – моделирование работы РО буфера по предложенному алгоритму и математическому описанию системы розлива

На рисунке 48 показан пример симуляции для линии производительностью 90 000 бут./час, емкости РО буфера 1500 бутылок и АБ буфера – 1000 бутылок, скорость транспортера рассматривалась в стандартном для линий с такой производительностью диапазоне: от 0,1 м/с до 1,2 м/с. Листинг кода для показанной ниже симуляции представлен в приложении Д. Описание параметров модели транспортного модуля используемые в симуляции управления буферами в приложении Е.

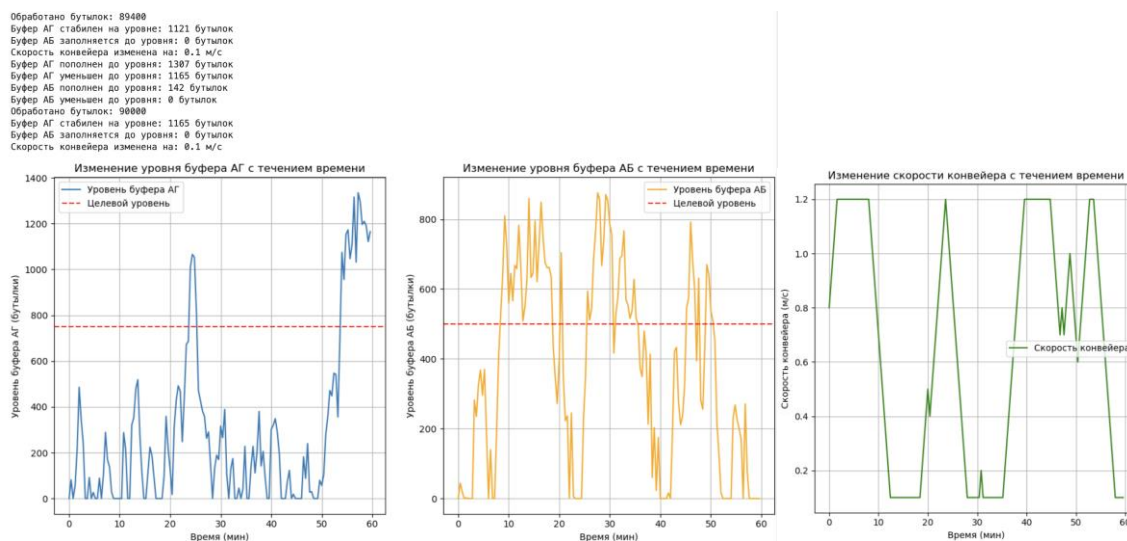


Рисунок 48 – Пример симуляции разработанного алгоритма бесступенчатого регулирования буферов

Далее в программный код были внедрены данные зависимости скорости столкновения бутылок и общий уровень шума, в результате чего программным кодом реализовано решение задачи оптимизации между необходимостью поддержания максимальной производительности и снижением уровня генерируемого шума. В результате работы разработанного программного кода построены графики изменения скорости транспортера, заполняемости буферов и изменения уровня шума, представленные на рисунке 49.

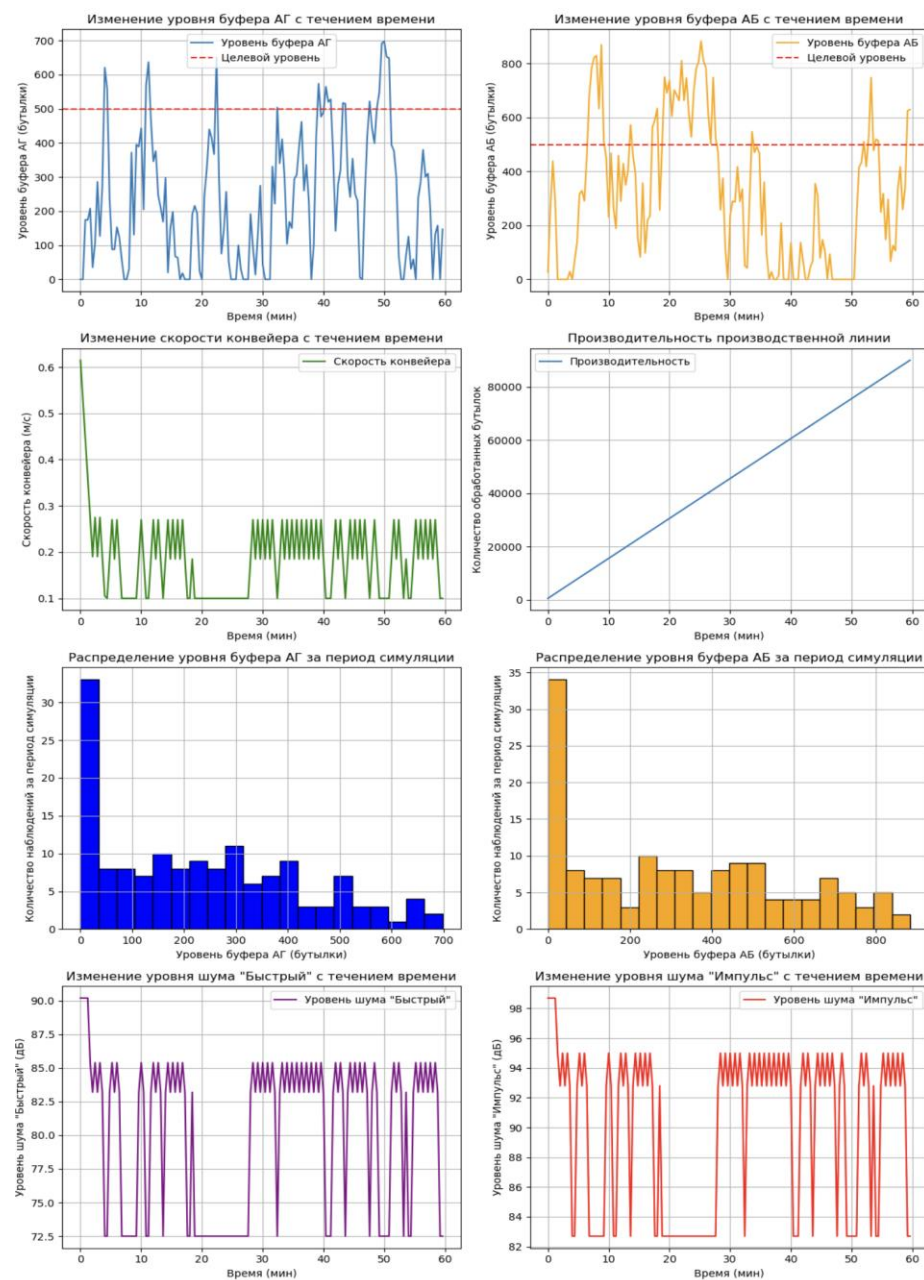


Рисунок 49 – Результат симуляции и верификации работы разработанного алгоритма бесступенчатого регулирования скорости конвейеров и заполнения РО и АБ буферов с учетом шумовой генерации линией

В результате решения задачи оптимизации по разработанному алгоритму бесступенчатого регулирования возможно добиться снижения уровня шума и поддержания его в заданных нормах за счет незначительного снижения производительности линии, так, для моделируемой ранее линии с производительностью 90 000 бут./час можно добиться снижения шумового воздействия за счет незначительного снижения производительности до 86 449 бут./час, как показано на рисунке 53. Полученные результаты совпадают с результатами измерений шумового давления, представленными в главе 2 данного диссертационного исследования.

Модель бесступенчатого регулирования буферов, представленная в данной работе, позволяет успешно разрешить противоречие, возникающее между необходимостью поддержания высокой производительности линии (до 90 000 бут./час) и требованиями по снижению уровня шума. Это достигается путем использования стратегии, где производительность предшествующих и последующих ячеек регулируется динамически, адаптируясь к текущему состоянию буфера.

Результаты и выводы по разделу 3

- 1) Применены новые методики управления буферными зонами для малошумного и эффективного управления конвейерными системами. Основное внимание уделено бесступенчатой системе управления и системе сенсоров на основе счетчиков скопления для управления потоками тары. Моделирование показало, что применение этих методов позволяет достичь высокой эффективности и снижения уровня шума. Это подтверждается экспериментальными данными по снижению уровня шума при столкновении стеклянной тары и достижении высокой производительности транспортных модулей.
- 2) Предложенный алгоритм управления и расстановка системы датчиков, разработанные для подсчета тары, показали высокую точность и надежность при различных условиях эксплуатации. Алгоритм

учитывает временные пропускные способности до 90 000 бутылок в час и способна фиксировать бутылки при скорости до 0,5 м/с. Использование камеры технического зрения и правильная настройка области захвата изображения обеспечивают точный подсчет и минимизацию объема обрабатываемых данных.

- 3) Анализ и имитационное моделирование показали, что использование буферных систем предотвращения выхода в режим ожидания и антиблокировочных буферов позволяет поддерживать непрерывный поток тары и оптимально регулировать производительность ячеек. Эти системы обеспечивают баланс между эффективностью и уровнем шума, что подтверждается данными симуляции и экспериментальной валидации. Снижение уровня шума достигается за счет незначительного уменьшения производительности, что подтверждает эффективность предложенного алгоритма бесступенчатого регулирования буфера.

4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ И ОБОБЩЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ПРИМЕНЕНИЯ РАЗРАБОТАННЫХ МЕТОДОЛОГИЧЕСКИХ И СИСТЕМОТЕХНИЧЕСКИХ ПРИНЦИПОВ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ОРГАНИЗАЦИИ ПРОЦЕССОВ РОБОТИЗИРОВАННОГО РОЗЛИВА

В данном разделе представлены результаты проверки на достоверность предлагаемых алгоритмов, моделей и методов управления качеством роботизированных линий розлива на основе компьютерного моделирования и экспериментального анализа. На основе симуляционного моделирования были проведены исследования эффективности предложенной концепции управления буфером и разработанного метода системы визуального контроля стеклянной тары. Помимо результатов симуляции, были также проведены исследования точности подсчета с использованием камеры технического зрения с возможностью детекции брака, боя, и разработанного программного кода, представленного в приложении Г. Также были произведены акустические исследования для бесступенчатого и основанного на стопорных переключателях регулирования. Дополнительно исследовались параметры качества электрической энергии на действующем оборудовании РЛР.

4.1 Валидация алгоритма регулирования буфера с разработанной системой управления качеством состояния буферных зон транспортеров роботизированных линий розлива

Для оценки эффективности различных концепций регулирования на роботизированных линиях розлива была разработана симуляционная модель, которая позволяет воспроизводить и анализировать поведение системы при различных сценариях. Основной целью моделирования является верификация того, что параметры и результаты симуляции соответствуют реальным условиям, наблюдаемым на типовых линиях розлива. В данном исследовании

были использованы параметры, аналогичные тем, которые применяются на промышленных линиях розлива со стеклянной тарой объемом 0,5 л.

Для упрощения и повышения точности симуляции были приняты следующие допущения:

1. В течение нормального режима работы транспортёров, их заполнение происходит линейно. Любые отклонения от этого режима (например, при сбоях) моделировались в соответствии с реальными условиями.
2. Начальные значения производительности ячеек Y_0 , Y_1 , и Y_2 были установлены на уровнях 16,000 бут./ч (ячейка №0), 15,000 бут./ч (ячейка №1) и 14,500 бут./ч (ячейка №2) соответственно. Эти значения соответствуют типовым параметрам ячеек на реальных линиях розлива.
3. РО буфер включен включён для предотвращения «голодания» (режима ожидания за счет недостатка продукта) транспортёров, что является важным аспектом при проектировании и эксплуатации таких систем.
4. В симуляции был смоделирован сбой на ячейке Y_0 , начиная с 180-й секунды, для оценки поведения системы в условиях нештатной ситуации. Восстановление системы после сбоя также было тщательно проанализировано.
5. Время задержки на транспортёре T_0 было установлено в 37,5 секунд, что соответствует времени, необходимому для достижения продукции следующей ячейки после начала работы первой.

Модель была верифицирована в два этапа:

1. в ходе первого этапа была подтверждена правильность отображения процессов транспортировки материалов и взаимодействия отдельных ячеек в системе;
2. в ходе второго этапа была проведена оценка корректности работы системы при имитации сбоев и нештатных ситуаций, что позволило выявить возможности регулирования и улучшения работы системы в реальных условиях.

Основные параметры и условия, использованные в симуляции, представлены в Таблице 15.

Таблица 15 – Начальные параметры и условия моделирования

Параметр	Значение	Описание
Вместимость транспортёра $T_{0.B}$	1600 бут.	Целевое значение заполнения в моделировании
Вместимость транспортёра $T_{1.B}$	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
Режим работы транспортёров	Линейный	Условия работы, при которых заполнение транспортёров увеличивается
Сбой на ячейке M_0	Начиная с 180-й секунды	Имитация сбоя для анализа поведения системы
Режим РО буфера	Включен	Использовался для предотвращения недостатка продукции
Режим заполнения при сбое	Экспоненциальное восстановление	Восстановление после сбоя на ячейке $Я_0$

На рисунке 50 представлены результаты моделирования.

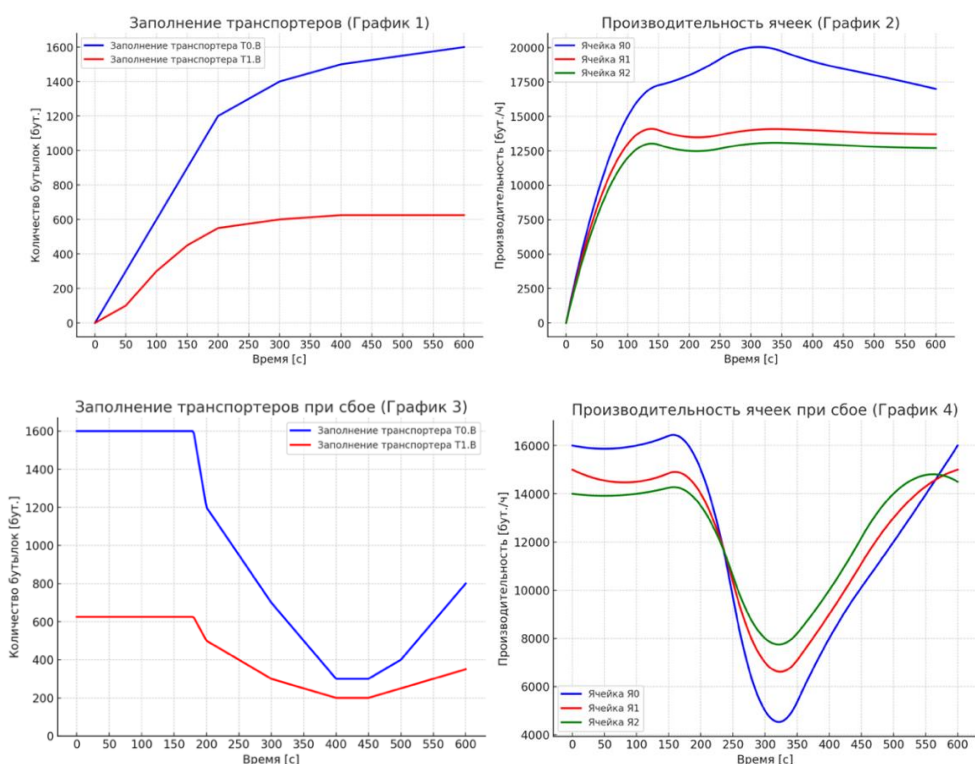


Рисунок 50 – Результаты моделирования, отображающие изменение заполнения транспортёров и производительности ячеек в нормальных условиях и при сбое

На графике 1 рисунка 50 представлено изменение заполнения транспортёров $T_{0.B}$ и $T_{1.B}$ в течение 600 секунд моделирования. В нормальных

условиях заполнение транспортёров увеличивается линейно до достижения целевых значений: 1600 бутылок для $T_{0,B}$ и 625 бутылок для $T_{1,B}$. Как видно на графике, система начинает достигать стабилизации в течение первых 200 секунд. На графике 2 рисунка 50 изображено изменение производительности ячеек Y_0 , Y_1 , и Y_2 на протяжении времени моделирования. В начале эксперимента ячейки быстро достигают своей номинальной производительности (16,000 бут./ч для Y_0 , 15,000 бут./ч для Y_1 , и 14,500 бут./ч для Y_2). После этого производительность стабилизируется с некоторыми возмущениями. На графике 3 рисунка 50 представлена динамика заполнения транспортёров в условиях сбоя на ячейке Y_0 . Видно, что заполнение транспортёров начинает снижаться, достигая минимальных значений к 300-й секунде, после чего система начинает восстанавливаться, возвращаясь к нормальным показателям. График 4 рисунка 50 показывает, как производительность ячеек изменяется при возникновении сбоя на Y_0 . Производительность резко снижается к 400-й секунде, особенно у ячейки Y_0 , но затем начинается восстановление, и к концу моделирования все ячейки возвращаются к своим номинальным значениям.

На рисунке 51 показано распределение заполнения элементов транспортных модулей $T_{0,ТЯ0}$, $T_{0,ТЯ1}$ и $T_{0,ТЯ2}$ через 90 секунд после запуска предшествующей ячейки Y_0 . Эти данные иллюстрируют процесс постепенного заполнения модулей, начиная с первого и заканчивая последним.

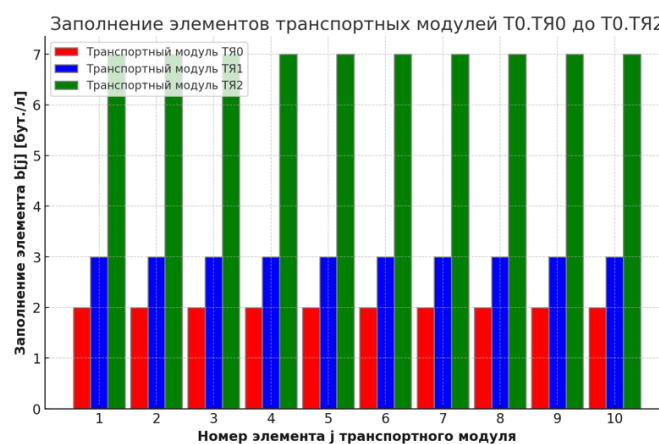


Рисунок 51 – Заполнение элементов транспортных модулей $T_{0,ТЯ0}$ до $T_{0,ТЯ2}$

На графике, изображенном на рисунке 51 красные столбцы показывают заполнение начального транспортного модуля, виден постепенный рост, но показания ещё не достигли максимума. Синие столбцы указывают что на втором транспортном модуле наблюдается более высокое заполнение по сравнению с первым, что указывает на более медленную транспортировку тары в этом модуле. Зелёные столбцы относятся к Третьему модулю, и указывают на то, что третий модуль имеет максимальное заполнение, что подтверждает его более высокую пропускную способность на данном этапе.

На основании анализа графиков можно сделать следующие выводы:

1) в нормальных условиях система стабилизируется достаточно быстро, достигая целевых значений производительности и заполнения транспортёров в течение первых 150 секунд;

2) сбой на ячейке Y_0 приводит к значительному снижению производительности всех ячеек и уменьшению заполнения транспортёров, однако система демонстрирует способность к восстановлению, что подтверждается экспоненциальным ростом показателей после устранения сбоя;

3) режим РО буфера и настройки системы показали свою эффективность в предотвращении критических ситуаций и быстром восстановлении после сбоя;

4) процесс опустошения элементов системы в симуляции работает корректно, когда предшествующая ячейка Y_0 останавливается, создается разрыв в потоке бутылок, что приводит к образованию пустых элементов на транспортёре;

5) в реальных системах, когда бутылки приближаются к концу транспортёра и сталкиваются с уже остановившимися бутылками, они замедляются за счет столкновений с соседними бутылками; это приводит к образованию плавного перехода (или изгиба) в конце потока бутылок, однако в модели этот эффект не учитывается, и в симуляции конец потока бутылок изображается с резким ограничением; это связано с тем, что в симуляции не

моделируется процесс постепенного снижения скорости бутылок при их приближении к концу потока;

6) разработанный алгоритм для системы визуального контроля работает корректно и имеет допустимую точность;

7) отклонения, выявленные в результате моделирования практически не влияют на общее поведение симуляции, хотя в модели и наблюдаются небольшие отклонения, их влияние на конечный результат моделирования можно считать несущественным.

4.2 Сравнительный анализ эффективности различных концепций регулирования буферов на основе параметров отказов и времени восстановления модулей линии

В современных производственных линиях розлива, где высокие требования к надежности и эффективности становятся ключевыми, важно учитывать влияние различных стратегий регулирования на общую производительность системы. В данном разделе рассматриваются три различных концепции регулирования на основе предложенных методов управления буферами в главе 3 данного диссертационного исследования. В качестве верификационного моделирования были выбраны трехступенчатое, пятиступенчатое и бесступенчатое регулирование, применяемые на роботизированных линиях розлива. Для анализа их эффективности была разработана симуляционная модель, которая позволяет изучать поведение системы при изменении таких ключевых параметров, как среднее время между отказами (MTBF) и среднее время восстановления (MDT).

Основной целью симуляции являлся сравнительный анализ эффективности трех концепций регулирования с точки зрения их способности поддерживать высокую производительность системы в условиях различной частоты и продолжительности сбоев. Особое внимание уделяется изучению влияния MTBF и MDT на общий коэффициент эффективности системы и выявлению наилучших условий для применения каждой из рассмотренных

концепций. В симуляции также рассматривается возможность использования бесступенчатого регулирования, предложенного в главе 3 данного диссертационного исследования для повышения устойчивости системы к частым и коротким сбоям, что особенно актуально для высокоинтенсивных производственных линий.

Для проведения моделирования и анализа эффективности различных концепций регулирования были заданы начальные параметры, соответствующие типичным условиям эксплуатации роботизированных линий розлива. В частности, моделирование охватывало три стратегии регулирования: трехступенчатое, пятиступенчатое и бесступенчатое регулирование. Эти стратегии были протестированы в условиях, где MDT было зафиксировано на уровне 150 секунд, а MTBF варьировалось от 100 до 800 секунд, а также в обратной ситуации, когда MTBF было фиксированным (400 секунд), а MDT изменялось в диапазоне от 25 до 250 секунд.

На рисунке 52 представлены четыре графика, демонстрирующие результаты моделирования.

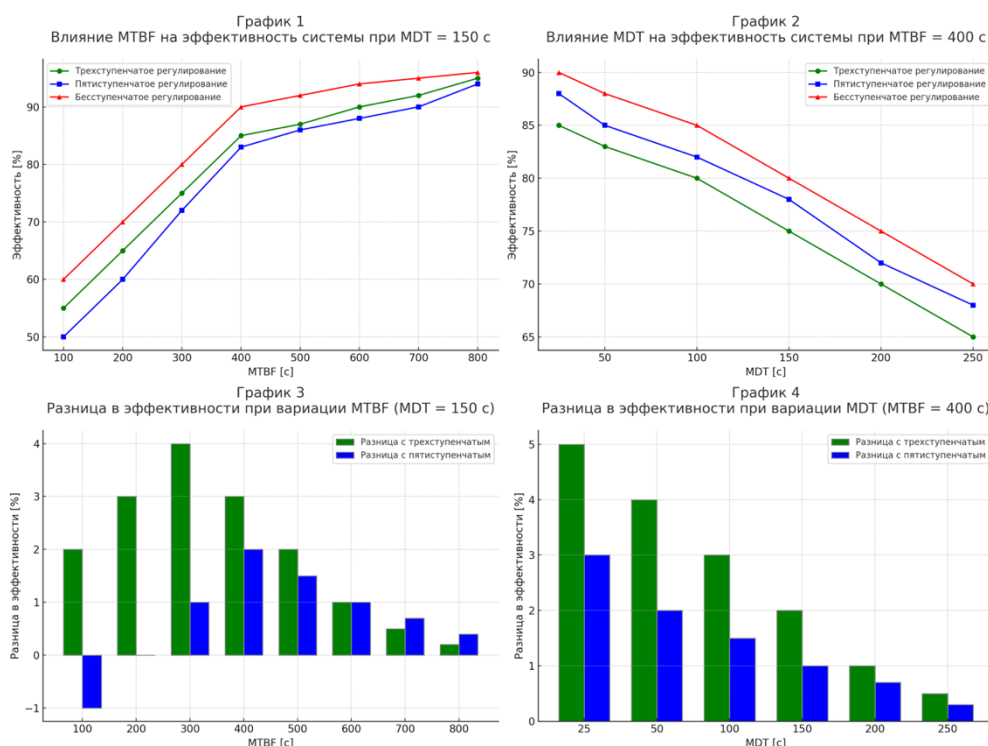


Рисунок 52 – Сравнительный анализ эффективности трех стратегий регулирования в зависимости от параметров MTBF и MDT

График 1 рисунка 52 показывает, как изменение MTBF влияет на общую эффективность системы при фиксированном MDT в 150 секунд: по мере увеличения MTBF эффективность каждой из стратегий регулирования возрастает, приближаясь к максимальным значениям. Бесступенчатое регулирование демонстрирует наилучшие результаты при всех значениях MTBF, особенно в диапазоне 300-400 секунд, где наблюдается максимальная разница по сравнению с другими методами.

График 2 рисунка 52 иллюстрирует влияние изменения MDT на эффективность системы при фиксированном MTBF в 400 секунд: здесь видна линейная зависимость снижения эффективности системы по мере увеличения времени восстановления после сбоев. Бесступенчатое регулирование также показывает лучшие результаты по сравнению с трех- и пятиступенчатым регулированием, особенно при коротких MDT, где оно способно быстрее восстановить систему до оптимального состояния.

График 3 рисунка 52 демонстрирует разницу в эффективности между бесступенчатым регулированием и трех-/пятиступенчатым регулированием при изменении MTBF: на графике видно, что максимальная разница наблюдается в диапазоне средних значений MTBF (300-400 секунд), где бесступенчатое регулирование значительно превосходит остальные методы.

График 4 рисунка 52 показывает разницу в эффективности при вариации MDT: максимальные различия в пользу бесступенчатого регулирования проявляются при коротких MDT, где его способность быстро адаптироваться к изменяющимся условиям позволяет поддерживать более высокий уровень эффективности по сравнению с другими стратегиями.

Полученные результаты подчеркивают преимущества бесступенчатого регулирования буферов, особенно в условиях, требующих высокой гибкости и быстрого реагирования на изменения в производственном процессе.

4.3 Оценка эффективности предложенной методики организации производства для контроля шумовых эмиссий на роботизированных линиях розлива

В разделе 2 данного диссертационного исследования была предложена методика организации РЛР для повышения контроля качества и снижения генерации шумовых эмиссий, в разделе 3 была представлена разработка алгоритма управления буферными зонами конвейерных систем РЛР. В связи с чем целесообразно произвести имитационный анализ шумовых эмиссий, возникающих при работе конвейерных систем. Симуляция была проведена с использованием математических моделей, описанных в главе 3 данного диссертационного исследования, где для каждого сценария работы рассчитывались параметры потока тары и его воздействие на шумовые эмиссии.

На рисунке 53 представлены результаты моделирования уровней шума, возникающих в различных точках установки при работе конвейерных систем с использованием различных режимов управления. В первой и второй части рисунка показаны уровни шумовых эмиссий в стандартном (Fast) и импульсном (Impuls) режимах для трех сценариев: нормальная работа системы, сбой в предшествующей ячейке и сбой в последующей ячейке.

При моделировании учитывались следующие допущения:

1. измерения уровней шума проводились в стабильных условиях, без влияния внешних факторов;
2. моделируемая система считалась работающей в оптимальных условиях, без учета возможных механических износов;
3. скорость транспортных лент и их взаимодействие с тарой моделировались с учетом рекомендаций по безопасной эксплуатации.

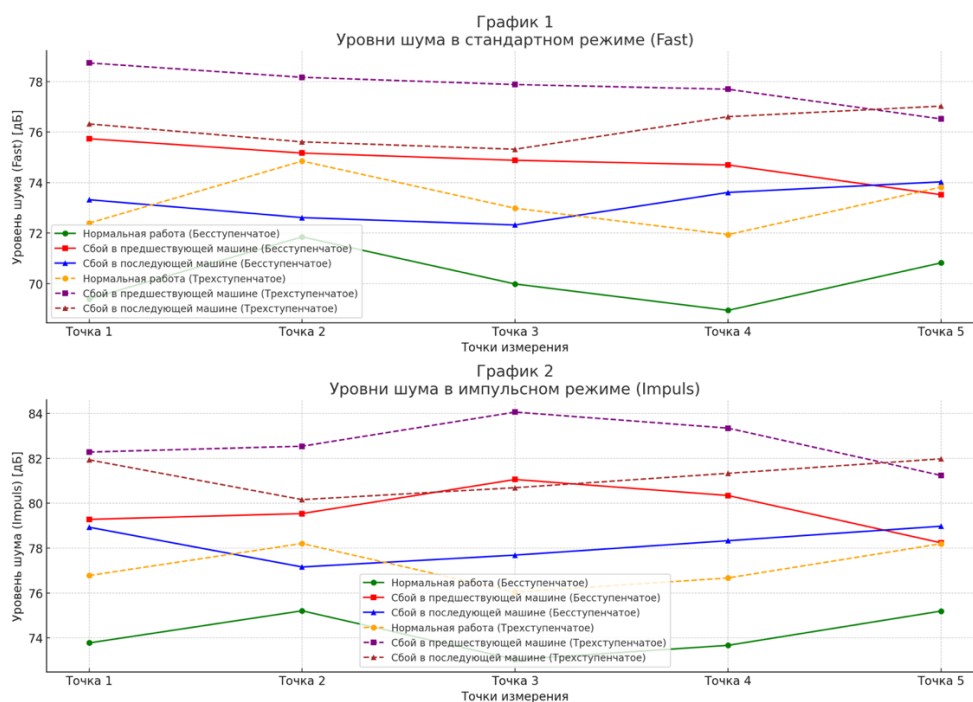


Рисунок 53 – Уровни шума в стандартном (Fast) и импульсном (Impuls) режимах для различных точек измерения и сценариев

На рисунке 53 график 1 демонстрирует уровни шума в стандартном режиме. Видно, что при нормальной работе системы уровень шума во всех точках минимален по сравнению с двумя другими сценариями. График 2 показывает уровни шума в импульсном режиме. В этом режиме также наблюдается увеличение шума при сбоях, особенно в точке 3 для сбоя в предшествующей ячейке. Здесь точка 1 – это начало транспортной ленты, где тара или входит в систему; точка 2 – средняя часть транспортной ленты, где происходит ускорение потока 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.

Реализация предложенных мер, подтвержденных научными исследованиями в области повышения гибкости и устойчивости производственных линий, позволит не только стабилизировать работу оборудования, но и повысить общую эффективность производственного процесса, что особенно важно в условиях растущей автоматизации и увеличения доли роботизированных технологий на производстве [82-92].

Результаты и выводы по разделу 4

1) В рамках данного раздела был произведен экспериментальный анализ, моделирование и валидация предложенных в предыдущих разделах методов контроля и повышения качества процессов буферизации стеклянной тары на производственных линиях розлива. Результаты показывают, что внедрение разработанных алгоритмов и методов позволит эффективно снизить шумовые эмиссии при сохранении или улучшении общей эффективности установки.

2) Проведенные экспериментальные исследования показали, что применение разработанных моделей и методик в сочетании с алгоритмами и способами бесступенчатого регулирования позволяют влиять на снижение шумовых эмиссий, особенно в критических точках линии, таких как участки замедления и столкновения тары.

3) Проведённое симуляционное моделирование показало, что внедрение разработанных моделей и методик способствует не только снижению шумовых эмиссий, но и увеличению эффективности системы, особенно в условиях высокой интенсивности работы и при наличии сбоев в функционировании отдельных компонентов производственной линии. Было доказано, что предложенные способы позволяют уменьшить потери производительности и более эффективно использовать ресурсы системы. В результате чего удалось достичь поставленных целей: снижение шумовых эмиссий было обеспечено без потери эффективности линий, а в ряде случаев – с ее увеличением. Точность полученных результатов симуляционного моделирования варьировалась в диапазонах от 93 до 96 % от полученных экспериментальных данных, что говорит о воспроизводимости и корректности разработанных моделей, алгоритмов и методик.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе изложены и научно обоснованы новые технические и технологические решения, имеющие существенное значение для развития страны в соответствии с решениями Правительства Российской Федерации в области повышения эффективности производственных процессов и обеспечения качества продукции, что отвечает целям Федерального закона от 31.12.2014 №488-ФЗ «О промышленной политике в Российской Федерации» и Постановления Правительства Российской Федерации от 21.02.2023 №478-ФЗ «О развитии технологических компаний в Российской Федерации».

В ходе проведенных исследований получены новые научные результаты:

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) Разработана 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 позволило усовершенствовать многоступенчатую систему контроля и сократить количество дефектов 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, с учетом отраслевых требований к

акустической безопасности и комфорту персонала на производствах данного 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 розлива.

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% на производственных объектах роботизированного розлива.

Применение разработанных моделей и методик позволило повысить результативность системы менеджмента качества с уровня (0,75) до высокого уровня (0,85), что подтверждает высокую эффективность предлагаемых решений и их потенциал для интеграции в современные производственные комплексы, ориентированные на стандарты качества и надёжности.

Таким образом в диссертационном исследовании успешно решены поставленные задачи, достигнута цель по разрешению описанного во введении противоречия. Достигнутые результаты подтверждаются конкретными улучшениями показателей эффективности и качества, что соответствует поставленной цели исследования.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

РЛР – Роботизированная линия розлива

СТЗ – Система технического зрения

АСУ – Автоматизированная система управления

MTTR (аббревиатура от англ. от mean time to repair) – Среднее время, необходимое для восстановления после отказа

MTBF (аббревиатура от англ. Mean time between failures) – Средняя наработка на отказ

FMEA (аббревиатура от англ. failure mode and effects analysis) – Анализ режимов и последствий отказов

DPMO (аббревиатура от англ. defects per million opportunities) – Дефектов на миллион возможностей

DMAIC (аббревиатура от англ. define, measure, analyze, improve, control) – Определение, измерение, анализ, совершенствование, контроль

TPM (аббревиатура от англ. total productive management) – Концепция менеджмента производственного оборудования

OEE (аббревиатура от англ. overall equipment effectiveness) – Общая эффективность оборудования

RPN (аббревиатура от англ. risk priority number) – Номер приоритета риска

MDT (аббревиатура от англ. mean down time) – Среднее время восстановления

FPS (аббревиатура от англ. frames per second) – Количество кадров в секунду

THD (аббревиатура от англ. Total harmonic distruction) – полное гармоническое искажение

СМК – Система менеджмента качества

ППЭМИ – Преднамеренные последовательные мощные электромагнитные воздействия

ИСО (ISO) – Международная организация по стандартизации

КПД – Коэффициент полезного действия

БСОТ – Безнапорная система объединения тары

АБ – Антиблокировка (в контексте ячеек линии)
РО – Режим ожидания (в контексте отсутствия тары на конвейере)
ПЛК – Программируемый логический контроллер
ТМ – Транспортный модуль
СВП – Среднее время простоя
СВВ – Среднее время восстановления
ПДР – Предотвращение дефицита ресурсов
ПК – Производственный комплекс
НТД – Нормативно-техническая документация
ПНР – Пуско-наладочные работы
АС – Автоматизированная система

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Послание президента России Федеральному собранию (2023) [Электронный ресурс]. URL: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/49010> (дата обращения: 25.06.2024).
2. Федеральный закон от 4 августа 2023 года N 478-ФЗ «О развитии технологических компаний в Российской Федерации».
3. Яковлева Е. А., Моторкин А. С., Капустин Д. Р. Выбор системы роботизированной автоматизации процессов на производстве // Системный анализ в проектировании и управлении. 2023. Т. XXVI, № 3. С. 357-362. DOI: 10.18720/SPBPU/2/id23-499.
4. Маренков И.М. (2019). Инновации в промышленности России: состояние и перспективы развития. Интеллект. Инновации. Инвестиции, (1), 35-42.
5. Варшавский А. Е., Дубинина В. В. Мировые тенденции и направления развития промышленных роботов // МИР (Модернизация. Инновации. Развитие). 2020. Т. 11. № 3. С. 294–319.
6. Маляренко О.В. (2023). Совершенствование процесса подачи продуктов в автоматизированной системе применением робототехнических комплексов. Инновации и инвестиции, (6), с. 97-98.
7. Lindh, Helena & Williams, Helén & Olsson, Annika & Wikström, Fredrik. (2016). Elucidating the Indirect Contributions of Packaging to Sustainable Development: A Terminology of Packaging Functions and Features. Packaging Technology and Science. 29. 10.1002/pts.2197.
8. Bouzerar, R. & Tekaya, Issyan & Bouzerar, R.. (2019). A stochastic approach to the filling dynamics of a porous medium: full/empty pores duality symmetry and the emergence of Darcy's law.
9. Jettanasen C, Phannil N, Yoomak S, Thongsuk S, Bunjongjit S, Ngaopitakkul A. Downtime Reduction with Fast Restart Function in a Beverage Production System. *Processes*. 2023; 11(1):39. <https://doi.org/10.3390/pr11010039>.

10. Федеральный закон от 02.07.2021 № 311-ФЗ "О внесении изменений в Трудовой кодекс Российской Федерации" [Электронный ресурс] // Официальный интернет-портал правовой информации. - URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202107020022> (дата обращения: 29.06.2024).

11. Baroorkar, Abhinav & Dolas, Pavan & Dhule, Adarsh & Kulkarni, Adwait. (2021). DESIGN OF AN AUTOMATED BOTTLE PACKAGING SYSTEM. *International Journal of Advanced Research*. 9. 1311-1315. 10.21474/IJAR01/12972.

12. T. Dong, "Research on the Application of Mechanical Automation in the Field of Food Packaging," *2020 5th International Conference on Mechanical, Control and Computer Engineering (ICMCCE)*, Harbin, China, 2020, pp. 763-766, doi: 10.1109/ICMCCE51767.2020.00168.

13. Федорова Е.В. Макаров С. Ю. Анализ технологии розлива и качества стеклотары при производстве ликероводочных изделий shape * MERGEFORMAT. *Евразийский Союз Ученых*, (3-5 (60)), 2019, С 59-62.

14. Shah, Chirag and Gund, Ninad, Bottling Line Inspection System using Digital Image Processing (April 8, 2020). *Proceedings of the 3rd International Conference on Advances in Science & Technology (ICAST) 2020*.

15. Oke, A., Abafi, J., & Adewole, B. (2021). Failure data analysis for preventive maintenance scheduling of a bottling company production system. *Journal of Industrial Engineering and Management Studies*, 8(1), 32-44. doi: 10.22116/jiems.2020.227003.1355

16. Fu, X., & Wang, K. (2019). Design of Control System for Intelligent Beverage Machine Based on AT89C51. *2019 4th International Conference on Mechanical, Control and Computer Engineering (ICMCCE)*, 592-5922.

17. Dolgui, Alexandre & Ereemeev, Anton & Kolokolov, A. & Sigaev, Viatcheslav. (2002). A Genetic Algorithm for the Allocation of Buffer Storage Capacities in a Production Line with Unreliable Machines. *Journal of Mathematical Modelling and Algorithms*. 1. 89-104. 10.1023/A:1016560109076.

18. Hamada, M.; Martz, H. F.; Berg, E. C.; Koehler, A. J.: Optimizing the product-based availability of a buffered industrial process. *Reliability Engineering & System Safety*, Vol. 91, (2006), S. 1039–1048
19. Zhang, D., & Li, S. (2015). Design and realization of liquid filling machine intelligent control system. 2015 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA), 1283-1288.
20. Cooke, R. M.; Bosma, A.; Härte, F.: A practical model of Heineken's bottle filling line with dependent failures. *European Journal of Operational Research*, Vol. 164, (2005), S. 491–504
21. Alwardat, Mohammad & B, Балабанов. (2023). Simulation of the industrial packaging line using plc. 10.13140/RG.2.2.19997.69600.
22. Göttlich, S., Hoher, S., Verl, A., Weißen, J., Kienzlen, A. (2024). Materialflusssimulation für die Virtuelle Inbetriebnahme in Steuerungsechtzeit. In: Verl, A., Röck, S., Scheifele, C. (eds) *Echtzeitsimulation in der Produktionsautomatisierung*. Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg.
23. Zou, Z., Gui, X., Meng, L., Wang, Z., Liu, X., & Meng, Y. (2015). The design of a dynamic simulation system of a liquid chemical filling process. 2015 *Chinese Automation Congress (CAC)*, 2033-2038.
24. Guerrier, P., Tosello, G., & Hattel, J. (2017). Flow visualization and simulation of the filling process during injection molding. *Cirp Journal of Manufacturing Science and Technology*, 16, 12-20. doi.org/10.1016/J.CIRPJ.2016.08.002.
25. Liu, J., Li, F., Zhang, L., & Yang, H. (2015). Numerical simulation of flow of rubber compounds in partially filled internal mixer. *Journal of Applied Polymer Science*, 132. <https://doi.org/10.1002/APP.42496>.
26. Venturelli, M., Milani, M., Montorsi, L., & Torelli, C. (2018). Influence of non-Newtonian fluid on transient operation of a liquid packaging machine: a combined 1D-3D approach. 2018 *Global Fluid Power Society PhD Symposium (GFPS)*, 1-6. <https://doi.org/10.1109/GFPS.2018.8472382>.

27. Wilczynski, Krzysztof & Narowski, Przemyslaw. (2019). Simulation Studies on the Effect of Material Characteristics and Runners Layout Geometry on the Filling Imbalance in Geometrically Balanced Injection Molds. *Polymers*. 11. 639. 10.3390/polym11040639.

28. Salah, B., Alsamhan, A., Khan, S., & Ruzayqat, M. (2021). Designing and Developing a Smart Yogurt Filling Machine in the Industry 4.0 Era. *Machines*. <https://doi.org/10.3390/machines9110300>. 29. Meinhardt, I; Marquardt, H. -G.: Dimensionierung von Entkopplungspuffern in dynamischen Fertigungsprozessen mittels Warteschlangen. *Logistics Journal*, (2007), S. 1-15.

30. В. С. Сигаев О свойствах локальных оптимумов задачи размещения буферных накопителей // Вестник ОмГУ. 2006. №2.

31. Недбайлюк, Б. Е., Антонова, И. И., Антонов, С. А., Кудряшов, В. Н., & Галявиев, Л. Х. (2011). Методы бережливого производства в непрерывных производственных процессах. *Russian Journal of Economics and Law*, (1 (17)), 102-110.

32. Пижурин, А. А., & Муращенко, Д. Д. (1998). Оптимизационная математическая модель задачи оперативного планирования и управления лесопильно-деревообрабатывающим производством в условиях рыночной экономики. *Лесной вестник / Forestry bulletin*, (3), 32-36.

33. ГОСТ 33750-2016 «Технология производства напитков. Установки для розлива. Общие технические условия».

34. Заморёнов М. В., Копп В. Я., Заморёнова Д. В., Федоренко С. Н.. Модель контроля системы с отключением и упреждающим восстановлением компонента. *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*, (11-1), 298-308.

35. Garzon, F., & Hafner, A. (2019). Heat pumps for energy efficient breweries... <https://doi.org/10.18462/IIR.NH3-CO2.2019.0048>.

36. Rempe, D., Sridhar, S., Wang, H., & Guibas, L. (2019). Learning Generalizable Physical Dynamics of 3D Rigid Objects. *ArXiv*, abs/1901.00466.

37. Jasiulewicz-Kaczmarek, M., & Bartkowiak, T. (2016). Improving the performance of a filling line based on simulation. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 145. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/145/4/042024>.
38. Aragón-González, Gerardo & Barragán-Santiago, I & Huerta-Rizo, E & León, Alejandro. (2021). Automatic bottling Machine. *Journal of Physics: Conference Series*. 1723. 012029. 10.1088/1742-6596/1723/1/012029.
39. Killcross, M. (2021). Factory acceptance testing. In M. Killcross (Ed.), *Chemical and Process Plant Commissioning Handbook* (2nd ed., pp. 203-212). Butterworth-Heinemann. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-824049-6.00052-4>
40. Xi-bi, W. (2015). A Research of Intelligent Filling Production Line Control System. *Journal of North China Institute of Aerospace Engineering*.
41. Shah, Chirag and Gund, Ninad, Bottling Line Inspection System using Digital Image Processing (April 8, 2020). Proceedings of the 3rd International Conference on Advances in Science & Technology (ICAST) 2020, <https://ssrn.com/abstract=3572179>.
42. Musić, Josip, Ivo Stančić, Barbara Džaja, and Vesna Pekić. 2023. "Image-Based Sensor for Liquid Level Monitoring during Bottling with Application to Craft and Home-Brewing" *Sensors* 23, no. 16: 7126. <https://doi.org/10.3390/s23167126>.
43. Wu, You, Hengzhou Ye, Yaqing Yang, Zhaodong Wang, and Shuiwang Li. 2023. "Liquid Content Detection In Transparent Containers: A Benchmark" *Sensors* 23, no. 15: 6656. <https://doi.org/10.3390/s23156656>.
44. R. A. . Ramadhani, R. Fitriana, A. N. Habyba, and Y.-C. . Liang, "Enhancing Quality Control of Packaging Product: A Six Sigma and Data Mining Approach", *J. Optimasi Sist. Ind.*, vol. 22, no. 2, pp. 197–214, Dec. 2023.
45. The Council for Six Sigma Certification. Six Sigma: A Complete Step-by-Step Guide: A Complete Training & Reference Guide for White Belts, Yellow Belts, Green Belts, and Black Belts. 2018. URL: <https://www.capvidia.com/blog/fmea-guide> (дата обращения: 04.07.2024).
46. Guide to Failure Mode and Effects Analysis (FMEA). URL: <https://www.capvidia.com/blog/fmea-guide> (дата обращения: 04.07.2024).

47. Tumanggor A. H. U., Kurniawan, Lestari R. I. Analysis of Quality Control of Production of Bottled Water. NS-UNISM. EAI, 2020. DOI: 10.4108/eai.23-11-2019.2298351.

48. Osterroth IA, Voigt T. Energy Consumption of Beverage-Bottling Machines. *Sustainability*. 2021; 13(17):9880. <https://doi.org/10.3390/su13179880>.

49. Zennaro, I., Battini, D., Sgarbossa, F., Persona, A. and De Marchi, R. (2018), "Micro downtime: Data collection, analysis and impact on OEE in bottling lines the San Benedetto case study", *International Journal of Quality & Reliability Management*, Vol. 35 No. 4, pp. 965-995. <https://doi.org/10.1108/IJQRM-11-2016-0202>.

50. СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания» (с изменениями на 30 декабря 2022 года). URL: <https://docs.cntd.ru/document/573500115/titles/8PE0LS> (дата обращения: 16 января 2024 г.).

51. ГОСТ 16299-2022. Упаковывание. Термины и определения [Текст] : межгосударственный стандарт. – Введ. 2023-03-01. – Москва: Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации (МГС), 2022. – МКС 55.020.

52. ГОСТ Р 50-54-93-88. Классификация, разработка и применение технологических процессов. Рекомендации. Р 50-54-93-88 [Текст]: утверждены Приказом ВНИИНМАШ № 192 от 04.07.1988 г. – Москва: ВНИИНМАШ, 1988.

53. ГОСТ 27.002-2015. Надежность в технике. Термины и определения [Текст]: межгосударственный стандарт. – Введ. 2017-03-01. – Москва: Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации (МГС), 2015. – МКС 21.020.

54. ГОСТ 27.003-2016. Надежность в технике. Состав и общие правила задания требований по надежности [Текст] : межгосударственный стандарт. –

Введ. 2017-09-01. – Москва: Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации (МГС), 2016. – МКС 21.020.

55. ГОСТ 24.701-86. Единая система стандартов автоматизированных систем управления. Надежность автоматизированных систем управления. Основные положения [Текст]: межгосударственный стандарт. – Введ. 1987-07-01. – Москва: Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации (МГС), 1986. – МКС 35.240; ОКСТУ 0024.

56. ГОСТ Р 56103-2014. Национальный стандарт Российской Федерации. Защита информации. Автоматизированные системы в защищенном исполнении. Организация и содержание работ по защите от преднамеренных силовых электромагнитных воздействий. Общие положения. Москва: Стандартинформ, 2018.

57. ГОСТ Р 27.102-2021. Национальный стандарт Российской Федерации. Надежность в технике. Надежность объекта. Термины и определения. Москва: Стандартинформ, 2021.

58. ГОСТ Р ИСО 9001-2015. Национальный стандарт Российской Федерации. Системы менеджмента качества. Требования. Москва: Стандартинформ, 2015.

59. ГОСТ Р ИСО/МЭК 27001-2006. Национальный стандарт Российской Федерации. Информационные технологии. Методы и средства обеспечения безопасности. Системы менеджмента информационной безопасности. Требования. Москва: Стандартинформ, 2006.

60. ГОСТ Р 34.003-90. Национальный стандарт Российской Федерации. Автоматизированные системы. Основные положения. Москва: Стандартинформ, 1990.

61. Капитанов В.С., Моздор М.С. (2021). Датчик шума как средство индивидуальной защиты рабочего. Современные инновации, (2 (40)), 10-13.

62. Albera, R., Lacilla, M., Piumetto, E., & Canale, A. (2010). Noise-induced hearing loss evolution: influence of age and exposure to noise. *European Archives*

of *Oto-Rhino-Laryngology*, 267, 665-671. <https://doi.org/10.1007/s00405-009-1096-3>.

63. Сердюк В.С. и др. Управление производственными рисками на объектах машиностроительного комплекса. Омский научный вестник, (5 (167)), 5-9.

64. Lie, A., Skogstad, M., Johannessen, H., Tynes, T., Mehlum, I., Nordby, K., Engdahl, B., & Tambs, K. (2015). Occupational noise exposure and hearing: a systematic review. *International Archives of Occupational and Environmental Health*, 89, 351 - 372. <https://doi.org/10.1007/s00420-015-1083-5>.

65. Оглезнева Л.А. О-37 Акустические методы контроля и диагностики. Часть II: учебное пособие / Л.А. Оглезнева, А.Н. Калиниченко. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2009. – 292 с.

66. Иванов, Н. И. Инженерная акустика. Теория и практика борьбы с шумом : учебник / Н. И. Иванов. - 5-е изд. перераб. и доп. - Москва : Логос, 2020. - 432 с. - (Новая университетская библиотека). - ISBN 978-5-98704-659-3.

67. ГОСТ ИСО 7919-1-2002. (2002). Вибрация. Контроль состояния машин по результатам измерений вибрации на вращающихся валах. Общие требования. Москва: Стандартинформ.

68. А.Л. Шицкова, И.Л. Карагодина , А.П. Путилина , Н.К. Кирюшина, & А.А. Климухин (1989). Гигиенические аспекты шумозащиты в условиях города. Гигиена и санитария, (10), 13-16.

69. Vallone, Mariangela & Pipitone, Felice & Amoroso, Salvatore & Catania, Pietro. (2013). Noise risk assessment in a bottling line of a modern Sicilian winery. *Journal of Agricultural Engineering*. 44. 10.4081/jae.2013.s2.e140.

70. СП 51.13330.2011 Защита от шума. Актуализированная редакция СНиП 23-03-2003 (с изменением № 1).

71. Roy, D. (2013). Design, system model and development of customized electronic light barriers for robotic and mechatronic applications. *Robotics and*

72. Musa, E., & Demirer, M. (2010). Laser-based light barrier having a rectangular detection area. *Optics and Lasers in Engineering*, 48, 435-440. <https://doi.org/10.1016/J.OPTLASENG.2009.09.004>.

73. Xie, H., Lu, F., Ouyang, G., Shang, X., & Zhao, Z. (2017). A rapid inspection method for encapsulating quality of PET bottles based on machine vision. *2017 3rd IEEE International Conference on Computer and Communications (ICCC)*, 2025-2028. <https://doi.org/10.1109/COMPCOMM.2017.8322892>.

74. He, D., Pang, Y., Lodewijks, G., & Liu, X. (2018). Healthy speed control of belt conveyors on conveying bulk materials. *Powder Technology*, 327, 408-419. <https://doi.org/10.1016/J.POWTEC.2018.01.002>.

75. Патент РФ № RU197321U1 / Е.С. Квас, В.П. Кузьменко, С.В. Солёный, О.Я. Солёная, А.В. Рысин, В.Ф. Шишлаков; заявл. 21.01.2020; опубл. 21.04.2020. - 10 с.

76. Кузьменко В.П., Шишлаков В.Ф., Солёный С.В., Квас Е.С., Солёная О.Я. Исследовательские испытания светодиодных источников света // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2019. Т. 62. № 7. С. 632-640.

77. Закируллин Рустам Сабирович (2013). Расчет параметров оптического фильтра с угловым селективным светопропусканием. Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики, (5 (87)), 54-58.

78. Abbasinejad, Reza & Kacprzak, Dariusz. (2022). Proposing a Method Reducing UGR Calculations for LED Luminaires with Diffusers in Indoor Applications. *Applied Sciences*. 12. 3462. [10.3390/app12073462](https://doi.org/10.3390/app12073462).

79. Квас Е.С., Кузьменко В.П., Солёная О.Я., Рысин А.В., Солёный С.В. Measurement of the quality of electricity in the power supply system with LED lighting devices // In: 2020 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF 2020). 2020. P. 9131506.

80. Квас Е.С., Кузьменко В.П., Солёный С.В., Шишлаков В.Ф., Соленая О.Я. Анализ влияния светодиодного освещения на показатели качества электрической сети // Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства. 2019. № 2 (99). С. 25-32.

81. Квас Е.С., Шишлаков В.Ф., Соленая О.Я., Солёный С.В. Modeling of the operation modes of the electric power system to improve its sustainability of functioning // JOP Conference Series: Metrological Support of Innovative Technologies, Krasnoyarsk, March 4, 2020 / Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations. – Vol. 1515. Krasnoyarsk, Russia: Institute of Physics and IOP Publishing Limited, 2020. P. 52083.

82. Квас Е.С., Кузьменко В.П., Рысин А.В., и др. Проблемы применения систем автоматики в управлении электромеханическими устройствами // Волновая электроника и инфокоммуникационные системы: Сборник статей XXII Международной научной конференции: 2-х частях. г. Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, 2019. Ч. 2. С. 250-253.

83. Квас Е.С., Кузьменко В.П., Сериков С.А., Солёный С.В., Шишлаков В.Ф. Организация безопасного доступа к системе промышленной автоматизации и IoT систем // В сб.: Завалишинские чтения 19. Сборник докладов конференции. 2019. С. 215-218.

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

85. Квас Е.С., Кузьменко В.П. Повышение гибкости сборочной линии бытовых светодиодных ламп с помощью анализа сети Петри // Наука и бизнес: пути развития. 2023. № 6 (144). С. 90-92.

86. Квас Е. С. Оптимизация роботизированных линий розлива на основе математического моделирования и анализа процессов эффективности // Вестник Ижевского государственного технического университета имени М. Т. Калашникова. 2025. Т. 28, № 1. С. 46-58.

87. Квас Е. С. Модель управления качеством роботизированных линий розлива на основе локализации неисправностей // Петербургский экономический журнал. 2025. № 1 С.28-41.

88. Квас Е. С. Прогнозирование срока службы роботизированных линий розлива на основе эксплуатационных коэффициентов // Известия ТулГУ. Технические науки. 2025. № 1. С. 244-258.

89. Квас Е.С., Бобрышов А.П., Кузьменко В.П. Солёный С.В. Адаптивный алгоритм определения уровня жидкости в таре на роботизированных линиях розлива// Известия ТулГУ. Технические науки. 2025. № 2. С.163-178.

90. Квас Е. С., Кузьменко В. П. Оценка эффективности роботизированных линий розлива с использованием имитационного моделирования и эксплуатационных коэффициентов // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. Т. 27, № 4. С. 31-44. 2024.

91. Квас Е. С., Кузьменко В. П., Солёный С. В. Алгоритм контроля качества и стабилизации параметров потока жидкостей в роботизированных системах розлива // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. № 1. 2025. С.77-87.

92. Квас Е. С., Кузьменко В. П., Солёный С. В. Исследование адаптивных свойств модели визуального контроля для роботизированных линий розлива // Петербургский экономический журнал. 2024. № 4. С. 71-86.

ПРИЛОЖЕНИЕ А. Диаграмма внедрения разработанных коэффициентов специализированных критериев показателей качества в СМК РЛР



ПРИЛОЖЕНИЕ Б. Программа расчета эксплуатационных коэффициентов стандартизации качества для роботизированной линии розлива на языке Python

```
# Импорт используемых библиотек
import numpy as np
import pandas as pd
import matplotlib.pyplot as plt

# Функция для расчета коэффициентов
def calculate_coefficients(components):
    Ku = sum([comp['U'] for comp in components]) / len(components)
    Ksk = sum([comp['Q'] for comp in components]) / (len(components) * np.std([comp['Q'] for
comp in components]))
    Ks = sum([comp['S'] for comp in components]) / len(components)
    Kss = sum([comp['U'] * comp['S'] for comp in components]) / (len(components) * 1.5 *
np.var([comp['U'] for comp in components]))
    Kbez = sum([comp['B'] for comp in components]) / sum([comp['H'] for comp in components])
    Kz = sum([comp['P'] for comp in components]) / sum([comp['F'] for comp in components])
    Krr = sum([comp['R']**2 for comp in components]) / (100 * 1.5 * np.var([comp['R'] for comp
in components]))
    Ksh = sum([comp['L'] for comp in components]) / (len(components) * 100)

    return {
        'Ku': Ku,
        'Ksk': Ksk,
        'Ks': Ks,
        'Kss': Kss,
        'Kbez': Kbez,
        'Kz': Kz,
        'Krr': Krr,
        'Ksh': Ksh
    }

# Функция для проведения FMEA анализа
def fmea_analysis(failure_modes):
    rpn_list = []
    for mode in failure_modes:
        s, o, d = mode['S'], mode['O'], mode['D']
        rpn = s * o * d
        rpn_list.append({'Failure Mode': mode['Failure Mode'], 'RPN': rpn})
    return pd.DataFrame(rpn_list)

# Функция для получения рекомендаций по улучшению
def get_recommendations(coefficients):
    recommendations = []
    if coefficients['Ku'] < 0.8:
        recommendations.append("Увеличить стандартизацию компонентов для повышения
универсальности (Ky).")
    if coefficients['Ksk'] < 0.8:
```

```

    recommendations.append("Внедрить дополнительные методы контроля качества для
повышения согласованности качества (Кск).")
    if coefficients['Ks'] < 0.8:
        recommendations.append("Увеличить долю стандартных компонентов для повышения
стандартности (Кс).")
    if coefficients['Kss'] < 0.5:
        recommendations.append("Унифицировать процедуры и стандарты для снижения
сложности стандартизации (Ксс).")
    if coefficients['Kbez'] < 0.7:
        recommendations.append("Улучшить меры безопасности и гигиены (Кбез).")
    if coefficients['Kz'] < 0.8:
        recommendations.append("Внедрить дополнительные меры защиты (Кз).")
    if coefficients['Krr'] < 0.8:
        recommendations.append("Оптимизировать режимы работы для повышения
согласованности (Кр).")
    if coefficients['Ksh'] > 5:
        recommendations.append("Внедрить меры по снижению уровня шума (Кш).")
    return recommendations

```

Функция для ввода данных и получения расчетов

```
def interactive_analysis():
```

```
    print("Введите параметры компонентов (все значения от 0 до 1, кроме уровня шума в
дБ):")
```

```
    print("U - Уникальность, Q - Качество, S - Стандартность, B - Безопасность, H -
Вредность")
```

```
    print("P - Защита, F - Уязвимость, R - Режим работы, L - Уровень шума (в дБ)")
```

Ввод данных о компонентах

```
num_components = int(input("Введите количество компонентов: "))
```

```
components = []
```

```
for i in range(num_components):
```

```
    print(f"\nКомпонент {i+1}:")
```

```
    U = float(input("Уникальность (U) (0-1): "))
```

```
    Q = float(input("Качество (Q) (0-1): "))
```

```
    S = float(input("Стандартность (S) (0-1): "))
```

```
    B = float(input("Безопасность (B) (0-1): "))
```

```
    H = float(input("Вредность (H) (0-1): "))
```

```
    P = float(input("Защита (P) (0-1): "))
```

```
    F = float(input("Уязвимость (F) (0-1): "))
```

```
    R = float(input("Режим работы (R) (0-1): "))
```

```
    L = float(input("Уровень шума (L) (дБ): "))
```

```
    components.append({'U': U, 'Q': Q, 'S': S, 'B': B, 'H': H, 'P': P, 'F': F, 'R': R, 'L': L})
```

Расчет коэффициентов

```
coefficients = calculate_coefficients(components)
```

```
print("\nКоэффициенты:")
```

```
for key, value in coefficients.items():
```

```
    print(f"{key}: {value:.4f}")
```

Получение рекомендаций

```
recommendations = get_recommendations(coefficients)
```

```
print("\nРекомендации по улучшению:")
```

```

for rec in recommendations:
    print(f"- {rec}")

# Визуализация коэффициентов
plot_coefficients(coefficients)

# Визуализация распределения значений компонентов
plot_component_distributions(components)

print("\nВведите данные для FMEA анализа:")
print("S - Тяжесть (Severity) (1-10), O - Частота возникновения (Occurrence) (1-10), D -
Возможность обнаружения (Detection) (1-10)")

# Ввод данных для FMEA анализа
num_failures = int(input("Введите количество режимов отказа: "))
failure_modes = []
for i in range(num_failures):
    print(f"\nРежим отказа {i+1}:")
    failure_mode = input("Описание отказа: ")
    S = int(input("Тяжесть (S) (1-10): "))
    O = int(input("Частота возникновения (O) (1-10): "))
    D = int(input("Возможность обнаружения (D) (1-10): "))
    failure_modes.append({'Failure Mode': failure_mode, 'S': S, 'O': O, 'D': D})

# Анализ FMEA до улучшений
fmea_results_before = fmea_analysis(failure_modes)
print("\nРезультаты FMEA до улучшений:")
print(fmea_results_before)

# Визуализация FMEA до улучшений
plot_fmea_results(fmea_results_before)

# Функция для визуализации изменений RPN
def plot_fmea_results(results):
    labels = results['Failure Mode']
    rpn = results['RPN']

    x = np.arange(len(labels))
    width = 0.35

    fig, ax = plt.subplots(figsize=(10, 6))
    rects = ax.bar(x, rpn, width)

    ax.set_ylabel('RPN')
    ax.set_title('RPN Before Improvements')
    ax.set_xticks(x)
    ax.set_xticklabels(labels)

    fig.tight_layout()
    plt.show()

# Функция для визуализации коэффициентов

```

```

def plot_coefficients(coefficients):
    labels, values = zip(*coefficients.items())

    plt.figure(figsize=(10, 6))
    plt.bar(labels, values)
    plt.title("Эксплуатационные коэффициенты")
    plt.xlabel('Коэффициенты')
    plt.ylabel('Значения')
    plt.grid(True)
    plt.show()

# Функция для визуализации распределения значений компонентов
def plot_component_distributions(components):
    df = pd.DataFrame(components)
    df.plot(kind='hist', subplots=True, layout=(3, 3), bins=10, figsize=(15, 10), sharex=False)
    plt.suptitle('Распределение значений компонентов')
    plt.show()

# Запуск интерактивного анализа
interactive_analysis()

```

ПРИЛОЖЕНИЕ В. Состояния переключателей и параметры управления на основе счётчиков скопления для буферной системы

Таблица В1 – Параметры управления на основе счётчиков скопления для буферной системы предотвращения режима ожидания (нехватки тары)

Состояния переключателей	Настройка регулируемых параметров
Поток_1 = пусто Поток_2 = пусто Поток_3 = пусто Поток_4 = пусто Поток_5 = пусто Поток_6 = пусто	$q_{вх}$: как только запускается предшествующая ячейка, она работает с максимальной производительностью. Для первой установки это означает: $q_{вх_настройка} = 1,3 \cdot q_{вых_max}$. $q_{вых}$: так как Поток_1 не активен, следующая ячейка не получает разрешение: $q_{вх_настройка} = 0$. $v_{1...3}$: все скорости установлены на максимум, что означает, что все скорости скорректированы по формуле: $v_{вх} = \frac{q_{вх} \cdot d}{n} = c_{вх} \cdot q_{вх}$.
Поток_1 = заполнен Поток_2 = пусто Поток_3 = пусто Поток_4 = пусто Поток_5 = пусто Поток_6 = пусто	$q_{вх}$: так как целевое заполнение значительно ниже, предшествующая ячейка работает с максимальной производительностью: $q_{вх_настройка} = 1,3 \cdot q_{вых_max}$. Когда состояние Поток_1 меняется с «пустой» на «заполнен» (положительный фронт), следующая ячейка получает разрешение после времени задержки $t_{задержки}$, если оно не равно нулю и запускается. Если состояние Поток_1 меняется с «заполнен» на «пустой» (отрицательный фронт), разрешение снимается, и ячейка останавливается без задержки. Настройка производительности выполняется по целевому значению $q_{вых_настройка} = q_{вых_max}$. v_1: первый транспортный участок работает с максимальной скоростью по формуле $v_{вх} = \frac{q_{вх} \cdot d}{n} = c_{вх} \cdot q_{вх}$. v_2: $v_2 = (v_1 + v_3)/2$. v_3: $v_3 = v_{min}$.
Поток_1 = заполнен Поток_2 = заполнен Поток_3 = пусто Поток_4 = пусто Поток_5 = пусто Поток_6 = пусто	$q_{вх}$: производительность предшествующей ячейки устанавливается по формуле $q_{вх_настройка} = 1,15 \cdot q_{вых_max}$. При отрицательном фронте Поток_2 настройка осуществляется без времени задержки. При положительном фронте Поток_2 настройка выполняется после времени задержки $t_{задержки}$. $q_{вых}$: настройка производительности выполняется по целевому значению $q_{вых_настройка} = q_{вых_max}$. v_1: на первом транспортном участке может быть выбрана более низкая скорость, так как предшествующая ячейка была замедлена. Настройка осуществляется по формуле $v_{вх} = \frac{q_{вх} \cdot d}{n} = c_{вх} \cdot q_{вх}$. v_2: $v_2 = (v_1 + v_3)/2$. v_3: $v_3 = v_{min}$.
Поток_1 = заполнен Поток_2 = заполнен Поток_3 = заполнен Поток_4 = пусто Поток_5 = пусто Поток_6 = пусто	$q_{вх}$: заполнение транспортера установлено. Производительность предшествующей ячейки устанавливается с положительным фронтом переключателя потока после времени задержки $t_{задержки}$, производительность следующей ячейки корректируется $q_{вх_настройка} = q_{вых_max}$. При отрицательном фронте переключателя Поток_3, настройка сразу возвращается в вышеуказанное состояние.

Состояния переключателей	Настройка регулируемых параметров
	$q_{\text{вых}}$: настройка производительности выполняется по целевому значению $q_{\text{вых_настройка}} = q_{\text{вых_max}}$. v_1: Настройка осуществляется по формуле $v_{\text{вх}} = \frac{q_{\text{вх}} \cdot d}{n} = c_{\text{вх}} \cdot q_{\text{вх}}$. v_2: $v_2 = (v_1 + v_3)/2$. v_3: $v_3 = v_{\text{min}}$.
Поток_1 = заполнен Поток_2 = заполнен Поток_3 = заполнен Поток_4 = заполнен Поток_5 = пусто Поток_6 = пусто	$q_{\text{вх}}$: заполнение транспортера превышено. При положительном фронте переключателя Поток_4 производительность предшествующей ячейки уменьшается без задержки переключения $q_{\text{вх_настройка}} = 0,85 q_{\text{вых_max}}$. При отрицательном фронте переключателя Поток_4, настройка возвращается в вышеуказанное состояние после времени задержки $t_{\text{задержки}}$. $q_{\text{вых}}$: настройка производительности выполняется по целевому значению $q_{\text{вых_настройка}} = q_{\text{вых_max}}$. v_1: Настройка осуществляется по формуле $v_{\text{вх}} = \frac{q_{\text{вх}} \cdot d}{n} = c_{\text{вх}} \cdot q_{\text{вх}}$. v_2: $v_2 = (v_1 + v_3)/2$. v_3: $v_3 = v_{\text{min}}$.
Поток_1 = заполнен Поток_2 = заполнен Поток_3 = заполнен Поток_4 = заполнен Поток_5 = заполнен Поток_6 = пусто	$q_{\text{вх}}$: заполнение транспортера превышено. При положительном фронте переключателя Поток_5 производительность предшествующей ячейки уменьшается без задержки переключения $q_{\text{вх_настройка}} = 0,7 q_{\text{вых_max}}$. При отрицательном фронте переключателя Поток_5 настройка возвращается в вышеуказанное состояние после времени задержки $t_{\text{задержки}}$. $q_{\text{вых}}$: настройка производительности выполняется по целевому значению $q_{\text{вых_настройка}} = q_{\text{вых_max}}$. v_1: Настройка осуществляется по формуле $v_{\text{вх}} = \frac{q_{\text{вх}} \cdot d}{n} = c_{\text{вх}} \cdot q_{\text{вх}}$. v_2: $v_2 = (v_1 + v_3)/2$. v_3: $v_3 = v_{\text{min}}$.
Поток_1 = заполнен Поток_2 = заполнен Поток_3 = заполнен Поток_4 = заполнен Поток_5 = заполнен Поток_6 = заполнен	$q_{\text{вх}}$: достигнуто максимальное заполнение транспортера. При положительном фронте переключателя Поток_6 предшествующая ячейка теряет разрешение без задержки выключения и замедляется до полной остановки. При отрицательном фронте переключателя настройка возвращается в вышеуказанное состояние после времени задержки $t_{\text{задержки}}$. $q_{\text{вых}}$: настройка производительности выполняется по целевому значению $q_{\text{вых_настройка}} = q_{\text{вых_max}}$. $v_{1...3}$: так как весь буфер заполнен и предшествующая ячейка не может работать, все скорости снижаются до $v_1 = v_2 = v_3 = v_{\text{min}}$.

Таблица В2 – Состояния переключателей и параметры управления на основе счётчиков скопления и переключателей заторов для буферной системы антиблокировочного буфера

Состояния переключателей	Настройка регулируемых параметров
Поток_1 = пусто Поток_2 = пусто Поток_3 = пусто Поток_4 = пусто Поток_5 = пусто Поток_6 = пусто	$q_{вх}$: так как переключатель затора Поток_6 не активен (пусто), предшествующая ячейка получает разрешение. Ячейка работает с максимальной производительностью, установленной в визуализации: $q_{вх_настройка} = q_{вх_max}$. $q_{вых}$: так как Поток_1 не активен, следующая ячейка не получает разрешение: $q_{вых_настройка} = 0$. $v_{1...3}$: все скорости установлены на максимум, что означает, что все скорости скорректированы по формуле: $v_{вх} = \frac{q_{вх} \cdot d}{n} = c_{вх} \cdot q_{вх}$.
Поток_1 = заполнен Поток_2 = пусто Поток_3 = пусто Поток_4 = пусто Поток_5 = пусто Поток_6 = пусто	$q_{вх}$: $q_{вх_настройка} = q_{вх_max}$. $q_{вых}$: если состояние Поток_1 меняется с «пусто» на «заполнен» (положительный фронт), следующая ячейка получает разрешение после времени задержки $t_{задержки}$ и запускается. Если состояние Поток_1 меняется с «заполнен» на «пусто» (отрицательный фронт), разрешение снимается, и ячейка останавливается без задержки. Настройка производительности выполняется по формуле $q_{вых_настройка} = 0,7q_{вх_max}$. v_1: Первый транспортный участок будет настроен по производительности предшествующей ячейки согласно формуле: $v_{вх} = \frac{q_{вх} \cdot d}{n} = c_{вх} \cdot q_{вх}$. v_2: $v_2 = (v_1 + v_3)/2$. v_3: последний транспортный участок будет настроен по производительности следующей ячейки согласно формуле $v_{вых} = \frac{q_{вых} \cdot d}{n} + \Delta v_{скольжения} = c_{вх} \cdot q_{вх} + \Delta v_{скольжения}$
Поток_1 = заполнен Поток_2 = заполнен Поток_3 = пусто Поток_4 = пусто Поток_5 = пусто Поток_6 = пусто	$q_{вх}$: $q_{вх_настройка} = q_{вх_max}$. $q_{вых}$: настройка производительности следующей ячейки выполняется по формуле $q_{вых_настройка} = 0,85 q_{вх_max}$. При отрицательном фронте переключателя Поток_2, настройка осуществляется без задержки и возвращается в вышеуказанное состояние. При положительном фронте переключателя настройка выполняется после времени задержки $t_{задержки}$. v_1: первый транспортный участок будет настроен по производительности предшествующей ячейки согласно формуле: $v_{вх} = \frac{q_{вх} \cdot d}{n} = c_{вх} \cdot q_{вх}$. v_2: $v_2 = (v_1 + v_3)/2$. v_3: Последний транспортный участок будет настроен по производительности следующей ячейки согласно формуле: $v_{вых} = \frac{q_{вых} \cdot d}{n} + \Delta v_{скольжения} = c_{вх} \cdot q_{вх} + \Delta v_{скольжения}$
Поток_1 = заполнен Поток_2 = заполнен Поток_3 = заполнен	$q_{вх}$: $q_{вх_настройка} = q_{вых_max}$.

Состояния переключателей	Настройка регулируемых параметров
Поток_4 = пусто Поток_5 = пусто Поток_6 = пусто	$q_{\text{вых}}$: заполнение транспортера установлено. Производительность следующей ячейки при положительном фронте на Поток_3 или отрицательном фронте на Поток_4, после времени задержки $t_{\text{задержки}}$, регулируется по формуле $q_{\text{вых_настройка}} = q_{\text{вх_max}}$. v_1: первый транспортный участок настраивается по производительности предшествующей ячейки согласно формуле $v_{\text{вх}} = \frac{q_{\text{вх}} \cdot d}{n} = c_{\text{вх}} \cdot q_{\text{вх}}$. v_2: $v_2 = (v_1 + v_3)/2$. v_3: последний транспортный участок настраивается по производительности следующей ячейки согласно формуле $v_{\text{вых}} = \frac{q_{\text{вых}} \cdot d}{n} + \Delta v_{\text{скольжения}} = c_{\text{вх}} \cdot q_{\text{вх}} + \Delta v_{\text{скольжения}}$
Поток_1 = заполнен Поток_2 = заполнен Поток_3 = заполнен Поток_4 = заполнен Поток_5 = пусто Поток_6 = пусто	$q_{\text{вх}}$: $q_{\text{вх_настройка}} = q_{\text{вх_max}}$. $q_{\text{вых}}$: заполнение транспортера превышено. При положительном фронте на Поток_4 производительность следующей ячейки увеличивается без задержки, при отрицательном фронте на Поток_5, производительность следующей ячейки снижается после времени задержки $t_{\text{задержки}}$ по формуле $q_{\text{вых_настройка}} = 1,15 q_{\text{вх_max}}$. v_1: Первый транспортный участок настраивается по производительности предшествующей ячейки согласно формуле $v_{\text{вх}} = \frac{q_{\text{вх}} \cdot d}{n} = c_{\text{вх}} \cdot q_{\text{вх}}$. v_2: $v_2 = (v_1 + v_3)/2$. v_3: последний транспортный участок настраивается по производительности следующей ячейки согласно формуле $v_{\text{вых}} = \frac{q_{\text{вых}} \cdot d}{n} + \Delta v_{\text{скольжения}} = c_{\text{вх}} \cdot q_{\text{вх}} + \Delta v_{\text{скольжения}}$
Поток_1 = заполнен Поток_2 = заполнен Поток_3 = заполнен Поток_4 = заполнен Поток_5 = заполнен Поток_6 = пусто	$q_{\text{вх}}$: $q_{\text{вх_настройка}} = q_{\text{вх_max}}$. $q_{\text{вых}}$: Заполнение транспортера превышено. При положительном фронте на переключателе Переключатель_5 производительность следующей ячейки увеличивается без задержки, по формуле $q_{\text{вых_настройка}} = 1,3 q_{\text{вх_max}}$. v_1: Первый транспортный участок настраивается по производительности предшествующей ячейки согласно формуле $v_{\text{вх}} = \frac{q_{\text{вх}} \cdot d}{n} = c_{\text{вх}} \cdot q_{\text{вх}}$. v_2: $v_2 = (v_1 + v_3)/2$. v_3: последний транспортный участок настраивается по производительности следующей ячейки согласно формуле $v_{\text{вых}} = \frac{q_{\text{вых}} \cdot d}{n} + \Delta v_{\text{скольжения}} = c_{\text{вх}} \cdot q_{\text{вх}} + \Delta v_{\text{скольжения}}$

Состояния переключателей	Настройка регулируемых параметров
Поток_1 = заполнен Поток_2 = заполнен Поток_3 = заполнен Поток_4 = заполнен Поток_5 = заполнен Поток_6 = заполнен	$q_{вх}$: достигнуто максимальное заполнение транспортера. При положительном фронте предшествующая ячейка теряет разрешение без задержки выключения и замедляется до полной остановки. $q_{вх_настройка} = 0$. $q_{вых}$: следующая ячейка работает на максимальной скорости: $q_{вых_настройка} = 1,3 q_{вх_max}$. $v_{1...3}$: так как весь буфер заполнен и предшествующая ячейка не может работать, все скорости снижаются до $v_1 = v_2 = v_3 = v_{min}$, согласно формуле $v_{вых} = \frac{q_{вых} \cdot d}{n} + \Delta v_{скольжения} = c_{вх} \cdot q_{вх} + \Delta v_{скольжения}$

ПРИЛОЖЕНИЕ Г. Программа симуляции работы алгоритма распознавания и визуального контроля наличия битой тары в роботизированной линии розлива

```
import cv2
import numpy as np

# Функция для генерации синтетического изображения с бутылками
def generate_structured_image(image_size=(600, 800), bottle_count=10,
                              damage_probability=0.2):
    image = np.zeros(image_size, dtype=np.uint8)

    rows = int(np.sqrt(bottle_count)) # Количество рядов
    cols = (bottle_count + rows - 1) // rows # Количество колонок

    spacing_x = image_size[1] // (cols + 1)
    spacing_y = image_size[0] // (rows + 1)

    centers = []
    radii = []

    for i in range(rows):
        for j in range(cols):
            if len(centers) >= bottle_count:
                break
            center_x = (j + 1) * spacing_x
            center_y = (i + 1) * spacing_y
            radius = 25 # Фиксированный радиус для лучшей упорядоченности

            # Добавление случайного повреждения с вероятностью damage_probability
            if np.random.rand() < damage_probability:
                # Создание поврежденной бутылки (неполный круг)
                start_angle = np.random.randint(0, 180)
                end_angle = start_angle + np.random.randint(30, 120)
                cv2.ellipse(image, (center_x, center_y), (radius, radius), 0, start_angle, end_angle, 255,
-1)
            else:
                # Создание полной бутылки (полный круг)
                cv2.circle(image, (center_x, center_y), radius, 255, -1)

            centers.append((center_x, center_y))
            radii.append(radius)

    # Преобразование в трехканальное изображение для демонстрации
```

```

image = cv2.cvtColor(image, cv2.COLOR_GRAY2BGR)

return image, centers, radii

# Функция для применения перспективного преобразования
def apply_perspective(image, angle_degrees=30):
    h, w = image.shape[:2]

    # Создание матрицы перспективного преобразования
    src_points = np.float32([
        [0, 0],
        [w, 0],
        [0, h],
        [w, h]
    ])
    dst_points = np.float32([
        [w * 0.2, h * 0.3], # Верхний левый угол
        [w * 0.8, h * 0.3], # Верхний правый угол
        [0, h],             # Нижний левый угол
        [w, h]               # Нижний правый угол
    ])

    # Применение матрицы трансформации
    M = cv2.getPerspectiveTransform(src_points, dst_points)
    perspective_image = cv2.warpPerspective(image, M, (w, h))

    return perspective_image

# Функция для анализа простых статистических характеристик текстуры
def analyze_texture_statistical(image, mask):
    masked_image = cv2.bitwise_and(image, image, mask=mask)
    mean_val = cv2.mean(masked_image, mask=mask)[0]
    std_dev = np.std(masked_image[mask == 255])
    return mean_val, std_dev

# Функция для обнаружения бутылок и анализа их состояния
def detect_bottles(image):
    gray = cv2.cvtColor(image, cv2.COLOR_BGR2GRAY)

    # Применение бинаризации для выделения контуров
    _, thresh = cv2.threshold(gray, 128, 255, cv2.THRESH_BINARY)

    # Поиск контуров
    contours, _ = cv2.findContours(thresh, cv2.RETR_EXTERNAL,
cv2.CHAIN_APPROX_SIMPLE)

```

```

detected_count = 0
for contour in contours:
    # Вычисление радиуса эквивалентного круга
    (x, y), radius = cv2.minEnclosingCircle(contour)
    radius = int(radius)
    center = (int(x), int(y))

    # Применение дополнительного условия для фильтрации мелких объектов
    if radius > 10: # Игнорирование слишком маленьких объектов
        detected_count += 1
        cv2.circle(image, center, radius, (0, 255, 0), 2)

    # Проверка на полноту контура и округлость
    area = cv2.contourArea(contour)
    perimeter = cv2.arcLength(contour, True)
    circularity = 4 * np.pi * (area / (perimeter ** 2))
    circle_area = np.pi * (radius ** 2)
    fullness_ratio = area / circle_area

    # Использование гистограммы для анализа количества белых пикселей
    mask = np.zeros_like(gray)
    cv2.drawContours(mask, [contour], -1, 255, -1)
    white_pixel_count = np.sum(gray[mask == 255] == 255)
    total_pixel_count = np.sum(mask == 255)
    white_pixel_ratio = white_pixel_count / total_pixel_count

    # Анализ текстуры с использованием средних значений и стандартного отклонения
    mean_val, std_dev = analyze_texture_statistical(gray, mask)

    # Вывод информации о бутылке
    print(f'Detected bottle at ({int(x)}, {int(y)}), radius: {radius}, circularity:
{circularity:.2f}, "
        f'fullness_ratio: {fullness_ratio:.2f}, white_pixel_ratio: {white_pixel_ratio:.2f}, "
        f'mean_val: {mean_val:.2f}, std_dev: {std_dev:.2f}")

    # Условие для классификации бутылки
    if circularity > 0.75 and fullness_ratio > 0.75 and white_pixel_ratio > 0.7 and mean_val >
150 and std_dev < 50:
        cv2.putText(image, "Intact", (center[0] - 20, center[1] - 20),
cv2.FONT_HERSHEY_SIMPLEX, 0.6, (0, 255, 0), 2)
        elif circularity > 0.6 or fullness_ratio > 0.6 or white_pixel_ratio > 0.6 or mean_val <=
150 or std_dev >= 50:
            cv2.putText(image, "Damaged", (center[0] - 20, center[1] - 20),
cv2.FONT_HERSHEY_SIMPLEX, 0.6, (0, 165, 255), 2)
            else:

```

```

        cv2.putText(image, "Heavily Damaged", (center[0] - 40, center[1] - 20),
cv2.FONT_HERSHEY_SIMPLEX, 0.6, (0, 0, 255), 2)

    return image, detected_count

# Основной блок симуляции
def main():
    # Генерация структурированного синтетического изображения
    bottle_count = 10 # Количество бутылок
    synthetic_image, centers, radii = generate_structured_image(bottle_count=bottle_count)

    # Применение перспективного преобразования (имитация камеры под углом)
    perspective_image = apply_perspective(synthetic_image, angle_degrees=30)

    # Обработка изображения для обнаружения бутылок
    processed_image, detected_count = detect_bottles(perspective_image)

    # Отображение результатов
    cv2.imshow(synthetic_image) # Отображение исходного изображения
    cv2.imshow(perspective_image) # Отображение изображения с перспективой
    cv2.imshow(processed_image) # Отображение обработанного изображения

    print(f"Total Bottles: {bottle_count}, Detected Bottles: {detected_count}")

if __name__ == "__main__":
    main()

```

**ПРИЛОЖЕНИЕ Д. Программа моделирования алгоритма
бесступенчатого управления буферами роботизированных линий
розлива**

```
# Импорт необходимых библиотек
import random
import matplotlib.pyplot as plt

def get_user_input():
    max_bottles_per_hour = int(input("Введите максимальную производительность конвейера  
(бутылок в час): "))
    buffer_capacity_ag = int(input("Введите объем буфера РО: "))
    buffer_capacity_ab = int(input("Введите объем буфера АБ: "))
    conveyor_length = int(input("Введите длину конвейера (в метрах): "))
    conveyor_width = float(input("Введите ширину ленты транспортера (в метрах): "))
    return max_bottles_per_hour, buffer_capacity_ag, buffer_capacity_ab, conveyor_length,
    conveyor_width

# Параметры системы (запрашиваем у пользователя)
MAX_BOTTLES_PER_HOUR, BUFFER_CAPACITY_AG, BUFFER_CAPACITY_AB,
CONVEYOR_LENGTH, CONVEYOR_WIDTH = get_user_input()
BOTTLES_PER_ITERATION = 600 # количество бутылок, обрабатываемых за одну
итерацию
ITERATIONS = MAX_BOTTLES_PER_HOUR // BOTTLES_PER_ITERATION #
количество итераций для обработки 72 000 бутылок
BUFFER_FILL_TARGET_AG = 0.5 * BUFFER_CAPACITY_AG
BUFFER_FILL_TARGET_AB = 0.5 * BUFFER_CAPACITY_AB

# Параметры конвейера
CONVEYOR_SPEED = 0.7 # базовая скорость конвейера, м/с
MIN_CONVEYOR_SPEED = 0.1 # минимальная скорость конвейера, м/с
MAX_CONVEYOR_SPEED = 1.2 # максимальная скорость конвейера, м/с
SPEED_ADJUSTMENT = 0.1 # шаг регулировки скорости, м/с

# Данные по шуму в зависимости от скорости столкновения
NOISE_DATA = {
    0.05: (62.3, 72.2),
    0.10: (72.5, 82.7),
    0.15: (77.8, 87.5),
    0.20: (83.2, 92.8),
    0.25: (85.4, 95.0),
    0.30: (88.0, 96.6),
    0.35: (90.2, 98.7),
}
```

```

def get_noise_level(speed):
    closest_speed = min(NOISE_DATA.keys(), key=lambda x: abs(x - speed))
    return NOISE_DATA[closest_speed]

# Функция для регулировки скорости конвейера в зависимости от уровня буфера и шума
def adjust_conveyor_speed(buffer_ag_level, buffer_ab_level, current_speed, conveyor_length,
conveyor_width):
    noise_quick, noise_impulse = get_noise_level(current_speed)
    target_noise = 85.0 # Целевой уровень шума в дБ(А)

    # Регулируем скорость конвейера с учетом длины и ширины конвейера
    speed_adjustment_factor = 1.0 - (conveyor_length / 100.0) * (conveyor_width / 2.0) #
уменьшаем скорость для более длинных и широких конвейеров

    if buffer_ag_level > BUFFER_FILL_TARGET_AG or buffer_ab_level >
BUFFER_FILL_TARGET_AB or noise_quick > target_noise:
        return max(MIN_CONVEYOR_SPEED, current_speed - SPEED_ADJUSTMENT *
speed_adjustment_factor)
    elif buffer_ag_level < BUFFER_FILL_TARGET_AG and buffer_ab_level <
BUFFER_FILL_TARGET_AB and noise_quick < target_noise:
        return min(MAX_CONVEYOR_SPEED, current_speed + SPEED_ADJUSTMENT *
speed_adjustment_factor)
    return current_speed

# Класс для моделирования производственной линии
class ProductionLine:
    def __init__(self, name, processing_rate):
        self.name = name
        self.processing_rate = processing_rate
        self.bottles_processed = 0
        self.bottles_processed_history = []

    def process(self, bottles):
        self.bottles_processed += bottles
        self.bottles_processed_history.append(self.bottles_processed)
        print(f'Обработано бутылок: {self.bottles_processed}')

# Класс для моделирования буферной системы
class BufferSystem:
    def __init__(self, capacity, buffer_type, buffer_fill_target):
        self.capacity = capacity
        self.level = 0
        self.state = "IDLE" # Состояния: IDLE, FILLING, EMPTYING, STABLE
        self.buffer_type = buffer_type
        self.buffer_fill_target = buffer_fill_target

```

```

def add(self, amount):
    if self.level + amount <= self.capacity:
        self.level += amount
    else:
        self.level = self.capacity
    print(f'Буфер {self.buffer_type} пополнен до уровня: {self.level} бутылок')

def remove(self, amount):
    if self.level - amount >= 0:
        self.level -= amount
    else:
        self.level = 0
    print(f'Буфер {self.buffer_type} уменьшен до уровня: {self.level} бутылок')

def monitor(self):
    if self.level > self.buffer_fill_target:
        self.state = "STABLE"
        print(f'Буфер {self.buffer_type} стабилен на уровне: {self.level} бутылок')
    elif self.level < self.buffer_fill_target:
        self.state = "FILLING"
        print(f'Буфер {self.buffer_type} заполняется до уровня: {self.level} бутылок')
    else:
        self.state = "IDLE"
        print(f'Буфер {self.buffer_type} в состоянии ожидания на уровне: {self.level}
бутылок')

# Класс для моделирования системы конвейера
class ConveyorSystem:
    def __init__(self, speed, length, width):
        self.current_speed = speed
        self.length = length
        self.width = width
        self.speed_history = []
        self.noise_quick_history = []
        self.noise_impulse_history = []

    def get_speed(self):
        return self.current_speed

    def set_speed(self, new_speed):
        self.current_speed = new_speed
        noise_quick, noise_impulse = get_noise_level(new_speed)
        self.speed_history.append(self.current_speed)
        self.noise_quick_history.append(noise_quick)
        self.noise_impulse_history.append(noise_impulse)

```

```

print(f'Скорость конвейера изменена на: {self.current_speed} м/с')

# Класс для моделирования всей системы
class SystemModel:
    def __init__(self):
        self.buffer_ag = BufferSystem(BUFFER_CAPACITY_AG, "PO",
        BUFFER_FILL_TARGET_AG)
        self.buffer_ab = BufferSystem(BUFFER_CAPACITY_AB, "AB",
        BUFFER_FILL_TARGET_AB)
        self.production_line = ProductionLine("Производственная линия",
        BOTTLES_PER_ITERATION)
        self.conveyor = ConveyorSystem(CONVEYOR_SPEED, CONVEYOR_LENGTH,
        CONVEYOR_WIDTH)
        self.buffer_ag_levels = []
        self.buffer_ab_levels = []
        self.conveyor_speeds = []
        self.time_steps = []
        self.noise_quick_levels = []
        self.noise_impulse_levels = []

    def run(self):
        for t in range(ITERATIONS):
            minutes = t * 60 / (ITERATIONS) # Преобразуем итерации в минуты
            self.time_steps.append(minutes)
            # Моделирование добавления бутылок в буфер PO
            bottles_to_add_ag = random.randint(100, 500)
            self.buffer_ag.add(bottles_to_add_ag)

            # Моделирование удаления бутылок из буфера PO и добавления в буфер AB
            bottles_to_remove_ag = random.randint(100, 500)
            self.buffer_ag.remove(bottles_to_remove_ag)
            self.buffer_ab.add(bottles_to_remove_ag)

            # Моделирование удаления бутылок из буфера AB
            bottles_to_remove_ab = random.randint(100, 500)
            self.buffer_ab.remove(bottles_to_remove_ab)

            # Обработка бутылок
            self.production_line.process(BOTTLES_PER_ITERATION)

            # Мониторинг буферов
            self.buffer_ag.monitor()
            self.buffer_ab.monitor()

            # Регулировка скорости конвейера

```

```

        new_speed = adjust_conveyor_speed(self.buffer_ag.level, self.buffer_ab.level,
self.conveyor.get_speed(), self.conveyor.length, self.conveyor.width)
        self.conveyor.set_speed(new_speed)

        # Запись данных для визуализации
        self.buffer_ag_levels.append(self.buffer_ag.level)
        self.buffer_ab_levels.append(self.buffer_ab.level)
        self.conveyor_speeds.append(self.conveyor.get_speed())
        noise_quick, noise_impulse = get_noise_level(self.conveyor.get_speed())
        self.noise_quick_levels.append(noise_quick)
        self.noise_impulse_levels.append(noise_impulse)

def visualize(self):
    plt.figure(figsize=(12, 18))

    # График уровня буфера РО
    plt.subplot(4, 2, 1)
    plt.plot(self.time_steps, self.buffer_ag_levels, label='Уровень буфера РО')
    plt.axhline(y=BUFFER_FILL_TARGET_AG, color='r', linestyle='--', label='Целевой
уровень')
    plt.xlabel('Время (мин)')
    plt.ylabel('Уровень буфера РО (бутылки)')
    plt.title('Изменение уровня буфера РО с течением времени')
    plt.legend()
    plt.grid(True)

    # График уровня буфера АБ
    plt.subplot(4, 2, 2)
    plt.plot(self.time_steps, self.buffer_ab_levels, label='Уровень буфера АБ', color='orange')
    plt.axhline(y=BUFFER_FILL_TARGET_AB, color='r', linestyle='--', label='Целевой
уровень')
    plt.xlabel('Время (мин)')
    plt.ylabel('Уровень буфера АБ (бутылки)')
    plt.title('Изменение уровня буфера АБ с течением времени')
    plt.legend()
    plt.grid(True)

    # График скорости конвейера
    plt.subplot(4, 2, 3)
    plt.plot(self.time_steps, self.conveyor_speeds, label='Скорость конвейера', color='g')
    plt.xlabel('Время (мин)')
    plt.ylabel('Скорость конвейера (м/с)')
    plt.title('Изменение скорости конвейера с течением времени')
    plt.legend()
    plt.grid(True)

    # График производительности производственной линии
    plt.subplot(4, 2, 4)

```

```

plt.plot(self.time_steps, self.production_line.bottles_processed_history,
label='Производительность')
plt.xlabel('Время (мин)')
plt.ylabel('Количество обработанных бутылок')
plt.title('Производительность производственной линии')
plt.legend()
plt.grid(True)
# Гистограмма уровня буфера РО
plt.subplot(4, 2, 5)
plt.hist(self.buffer_ag_levels, bins=20, color='blue', edgecolor='black')
plt.xlabel('Уровень буфера РО (бутылки)')
plt.ylabel('Количество наблюдений за период симуляции')
plt.title('Распределение уровня буфера РО за период симуляции')
plt.grid(True)
# Гистограмма уровня буфера АБ
plt.subplot(4, 2, 6)
plt.hist(self.buffer_ab_levels, bins=20, color='orange', edgecolor='black')
plt.xlabel('Уровень буфера АБ (бутылки)')
plt.ylabel('Количество наблюдений за период симуляции')
plt.title('Распределение уровня буфера АБ за период симуляции')
plt.grid(True)
# График уровня шума "Быстрый"
plt.subplot(4, 2, 7)
plt.plot(self.time_steps, self.noise_quick_levels, label='Уровень шума "Быстрый"',
color='purple')
plt.xlabel('Время (мин)')
plt.ylabel('Уровень шума "Быстрый" (дБ)')
plt.title('Изменение уровня шума "Быстрый" с течением времени')
plt.legend()
plt.grid(True)
# График уровня шума "Импульс"
plt.subplot(4, 2, 8)
plt.plot(self.time_steps, self.noise_impulse_levels, label='Уровень шума "Импульс"',
color='red')
plt.xlabel('Время (мин)')
plt.ylabel('Уровень шума "Импульс" (дБ)')
plt.title('Изменение уровня шума "Импульс" с течением времени')
plt.legend()
plt.grid(True)

plt.tight_layout()
plt.show()
# Запуск моделирования
system = SystemModel()
system.run()
system.visualize()

```

ПРИЛОЖЕНИЕ Е. Описание параметров модели транспортного модуля используемые в симуляции управления буферами

Переменная / Константа транспортного модуля	Единица измерения	Описание
T	-	Транспортер: совокупность всех транспортных модулей (ТМ) между двумя ячейками
ТМ	-	Транспортный модуль: участок транспортера, обладающий одинаковыми характеристиками, например, скоростью, и управляемый одним приводом
Элемент	-	Каждый ТМ разделен на элементы шириной x . Специального символа для этого нет. Параметры с индексом j относятся к элементам.
h	-	Индекс транспортера, нумерация в направлении потока материала, $h \in \{0, \dots, H\}$
i	-	Индекс транспортного модуля, нумерация в направлении потока материала, начиная с первого ТМ в T , $i \in \{0, \dots, I\}$
j	-	Индекс элемента, нумерация в направлении потока материала, начиная с первого элемента ТМ, $j \in \{0, \dots, J\}$
x	м	Ширина элементов
$T_h M_i.v_{\text{зад}}(t)$	м/с	Заданная скорость транспортного модуля i , транспортера h
$T_h M_i.v(t)$	м/с	Текущая скорость транспортного модуля i , транспортера h
$T_h M_i.q_{\text{вх}}(t)$	шт/с	Входящий поток тары в транспортный модуль i , транспортера h
$T_h M_i.q_{\text{вых}}(t)$	шт/с	Выходящий поток тары из транспортного модуля i , транспортера h
$T_h M_i.q_{\text{вх_пот}}(t)$	шт/с	Потенциальный входящий поток тары в элемент j , транспортного модуля i , транспортера h
$T_h M_i.q_{\text{вх}}(t)$	шт/с	Входящий поток тары в элемент j , транспортного модуля i , транспортера h
$T_h M_i.q_{\text{вых}}(t)$	шт/с	Выходящий поток тары из элемента j , транспортного модуля i , транспортера h
$T_h M_i.b_j(t)$	шт	Заполнение элемента j , транспортного модуля i , транспортера h
$T_h M_i.c_j$	шт	Вместимость элемента j , транспортного модуля i , транспортера h
$b_j(t)$	шт	Текущее состояние запаса в элементе j в момент времени t
τ	с	Время задержки тары в элементе (дискретные участки транспортера, через которые движется тара)
$\bar{v}$	м/с	Средняя скорость транспортера за определенный промежуток времени
ρ	-	Коэффициент использования транспортного модуля
$T_{\text{обработки}}$	с	Время обработки тары в модуле
C	шт	Емкость транспортного модуля
η	-	Коэффициент пропускной способности транспортного модуля
$T_{\text{простоя}}$	с	Время простоя транспортного модуля
$u(t)$	-	Управляющие воздействия на транспортер в момент времени t

Переменная / Константа транспортного модуля	Единица измерения	Описание
M	-	Модуль ячейки
k	-	Индекс модуля ячейки, нумерация по направлению потока материала $k \in \{0, \dots, K\}$
$M_k \cdot q_{\text{вх } k}(t)$	шт/с	Входной поток тары в ячейку k
$M_k \cdot q_{\text{вых } k}(t)$	шт/с	Выходной поток тары из ячейки k
$M_k \cdot q_{\text{цел } k}(t)$	шт/с	Заданное значение потока тары для ячейки k
$M_k \cdot q_{\text{пот } k}(t)$	шт/с	Потенциальный выход по ГОСТ 28133-89 для ячейки k
$M_k \cdot t_{\text{неисправ } k}$	с	Время до следующей неисправности
$M_k \cdot t_{\text{без_неисправ } k}$	с	Время до следующего периода без неисправностей
$M_k \cdot t_{\text{д } k}$	с	Текущая скорость транспортного модуля i, транспортера h
$M_k \cdot v_k$	м/с	Скорость тары в ячейке k
$M_k \cdot \rho_k$	шт/с	Коэффициент использования ячейки k
$M_k \cdot C_k$	шт/с	Емкость ячейки k

**ПРИЛОЖЕНИЕ Ж. Свидетельства о государственной регистрации
патента на полезную модель и программ ЭВМ**

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ
НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 197321

**УСТРОЙСТВО УПРАВЛЕНИЯ СВЕТОДИОДНЫМ
СВЕТИЛЬНИКОМ**

Патентообладатель: *Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования "Санкт-
Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения" (RU)*

Авторы: *Кузьменко Владимир Павлович (RU), Солёный Сергей
Валентинович (RU), Солёная Оксана Ярославовна (RU), Квас
Евгений Станиславович (RU), Рысин Александр
Владимирович (RU), Шишлаков Владислав Федорович (RU)*

Заявка № 2020102374
Приоритет полезной модели 21 января 2020 г.
Дата государственной регистрации в
Государственном реестре полезных
моделей Российской Федерации 21 апреля 2020 г.
Срок действия исключительного права
на полезную модель истекает 21 января 2030 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности



Г.П. Излиев

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2024669099

Программа для расчета эксплуатационных
коэффициентов контроля качества роботизированной
линии розлива

Правообладатель: **Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
"Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения" (RU)**

Авторы: **Кеас Евгений Станиславович (RU), Солёный Сергей
Валентинович (RU), Кузьменко Владимир Павлович (RU)**

Заявка № **2024668793**

Дата поступления **14 августа 2024 г.**

Дата государственной регистрации
в Реестре программ для ЭВМ **14 августа 2024 г.**



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат 0692e7c1a63006f542401670bca2026
Владелец **Зубов Юрий Сергеевич**
Действителен с 10.07.2024 по 03.10.2025

Ю.С. Зубов

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2024684762

Программа моделирования алгоритма бесступенчатого
управления буферами роботизированных линий
розлива

Правообладатель: *Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования "Санкт-
Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения" (RU)*

Авторы: *Солёный Сергей Валентинович (RU), Квас Евгений
Станиславович (RU), Кузьменко Владимир Павлович (RU)*



Заявка № 2024684280

Дата поступления 21 октября 2024 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 21 октября 2024 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Документ подписан электронной подписью
Сертификат: 0692e7c1a63006f54f2401670bca2026
Владелец: **Зубов Юрий Сергеевич**
Действителен с 10.07.2024 по 03.10.2025

Ю.С. Зубов

ПРИЛОЖЕНИЕ 3. Акт о внедрении результатов диссертационной работы в ФГАОУ ВО ГУАП



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения»
(ГУАП)

Санкт-Петербург

№ _____

УТВЕРЖДАЮ
Проректор по образовательным
технологиям и инновационной
деятельности ГУАП
к.т.н., доцент,
С.В. Солёный
2025 г.



АКТ О ВНЕДРЕНИИ
результатов диссертационной работы
Кваса Евгения Станиславовича

«Модели и методики повышения качества организации роботизированных линий розлива», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.5.22 Управление качеством продукции. Стандартизация. Организация производства

Комиссия в составе: председатель – директор института киберфизических систем, доктор технических наук, профессор, В.Ф. Шишлаков;

члены комиссии:

В.В. Булатов, доцент кафедры электромеханики и робототехники, кандидат технических наук, доцент;

М.В. Сержантова, доцент кафедры электромеханики и робототехники, кандидат технических наук;

Е.Ю. Ватаева, доцент кафедры управления в технических системах кандидат технических наук;

составили настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы Кваса Евгения Станиславовича, на тему «Модели и методики повышения качества организации роботизированных линий розлива», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук, внедрены в учебный процесс университета, а именно:

1. Квалиметрическая 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.

Разработанные программные и технические решения, реализующие процессы управления качеством организации роботизированных линий розлива, используются в учебном процессе по направлению: 15.03.06 – Мехатроника и робототехника, 15.04.06 – Мехатроника и робототехника, 15.03.04 – Автоматизация технологических процессов и производств при выполнении дипломного проектирования, в лекционных курсах и лабораторном практикуме учебных курсов «Контроль качества технологических операций», «Техническое зрение в промышленной автоматизации», «Управление роботами и робототехническими системами», «Оборудование автоматизированных производств», «Управление системами и процессами автоматизированного производства», «Планирование и оптимизация автоматизированных производств».

Председатель комиссии
директор института киберфизических систем,
д. т. н., профессор



В.Ф. Шишлаков

Члены комиссии:
Доцент кафедры электромеханики
и робототехники, к.т.н. доц.



В.В. Булатов

Доцент кафедры электромеханики
и робототехники, к.т.н. доц.



М.В. Сержантова

Доцент, кафедры управления
в технических системах к.т.н.



Е.Ю. Ватаева

ПРИЛОЖЕНИЕ И. Акт внедрения о внедрении результатов диссертационной работы в ООО «Иннотех»

ИННОТЕХ

ООО «Иннотех»
Сайт: <https://innotech.pro/>
Город: Ростов-на-Дону
Адрес: ул Вавилова, д 70/1
Телефон: 8-800-350-1-349

от. «24» января 2025



АКТ

внедрения в производственные процессы ООО «Иннотех»

научных результатов диссертационной работы «Модели и методики повышения качества
организации роботизированных линий розлива»
Кваса Евгения Станиславовича

Комиссия в составе:

Председатель комиссии: технический директор, Лебедев Вадим Николаевич

Члены комиссии: главный инженер Грушин Олег Николаевич;

ведущий инженер-электроник Таридонов Никита Евгеньевич;

постановили, что:

- разработанная Квасом Е.С. 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 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.

- полученные новые научные результаты внедрены в методики контроля качества организации производственных линий ООО «Иннотех».

Председатель комиссии: технический директор,  Лебедев В.Н.

Члены комиссии: главный инженер,  Грушин О.Н.;
ведущий инженер-электроник,  Таридонов Н.Е.;

ООО «Иннотех».
344064, Россия, Ростов-на-Дону
Вавилова, 70/1

8 800 350 1 349
info@innotech.team
innotech.pro

ОГРН 1156196058479. ИНН 6168082967. КПП 616501001
р/с 40702810800300005613 в Филиале «Центральный» Банка ВТБ (ПАО) в г. Москва
БИК 044525411. к/с 30101810145250000411

ПРИЛОЖЕНИЕ К. Акт внедрения о внедрении результатов диссертационной работы в ООО «Симертех»

СИМЕРТЕХ

от. «18» 02 2025

УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор

ООО «Симертех»

Балакин Олег Валерьевич



АКТ

внедрения результатов диссертационной работы Кваса Евгения Станиславовича на тему: «Модели и методики повышения качества организации роботизированных линий розлива», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.5.22. «Управление качеством продукции. Стандартизация. Организация производства».

Комиссия в составе:

председатель комиссии: главный инженер Долин Сергей Александрович

члены комиссии: главный механик, Пильгун Илья Павлович;

ведущий инженер механик, Шевкунов Николай Анатольевич;

установила, что:

- внедрение системы 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% на объектах по производству и розливу безалкогольных напитков и соков;
- научные результаты работы Кваса Е.С. введены на рабочие места производственной системы и применены для повышения качества организации процессов розлива.

Председатель комиссии: главный инженер,

Долин С.А.

Члены комиссии: главный механик,
ведущий инженер механик,

Пильгун И.П.;

Шевкунов Н.А.

ПРИЛОЖЕНИЕ Л. Акт внедрения о внедрении результатов диссертационной работы в ООО «Валдай Роботы»



ООО «ВАЛДАЙ РОБОТЫ»
129226, г. Москва, вн.тер.г. Муниципальный округ
Ростокино, ул. Сельскохозяйственная, д.17, к.1, пом.13П,
ИНН 9717138305, КПП 771701001
Email: general.secretary@vald.ai
Сайт: www.vald.ai

от. «10» 03 2025

Утверждаю
технический директор
ООО «ВАЛДАЙ РОБОТЫ»
Косов В.П.

АКТ

внедрения в ООО «ВАЛДАЙ РОБОТЫ» результатов диссертационной работы Кваса Евгения Станиславовича на тему: «Модели и методики повышения качества организации роботизированных линий розлива», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.5.22. «Управление качеством продукции. Стандартизация. Организация производства».

Настоящий акт составлен о том, что результаты диссертационной работы Кваса Е.С. использованы в производственном процессе ООО «ВАЛДАЙ РОБОТЫ».

Комиссия в составе:

председатель комиссии технический директор Косов В.П.;

члены комиссии: начальник конструкторского отдела, Дернов Сергей Андреевич;
оператор станков с числовым программным управлением, Автомонова Елизавета Алексеевна;

постановила, что:

- применение разработанной методики оценки качества организации технологических процессов роботизированного розлива и эффективности функционирования линии, разработанной на основе эксплуатационных коэффициентов, позволило усовершенствовать многоступенчатую систему контроля качества организации отдельных роботизированных модулей и сократить количество дефектов в производстве на 2-4%;

- полученные научные результаты внедрены на рабочие места производственной системы предприятия для контроля качества организации производственных процессов.

Председатель комиссии: технический директор ООО «ВАЛДАЙ РОБОТЫ»

Косов В.П.

Члены комиссии: Начальник к.о.

Дернов С.А.

Оператор станков с ЧПУ

Автомонова Е.А.



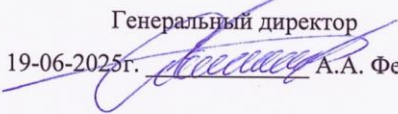
**ПРИЛОЖЕНИЕ М. Акт внедрения о внедрении результатов
диссертационной работы в ООО «Полюс»**

**ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ
«Полюс»**

Юридический адрес: 197345, г. Санкт Петербург,
ВН.ТЕР.Г.Муниципальный округ №65,
Проезд Полиграфмашевский, Д. 3 Литера А, Помещ. 108, Ком. 1Н
Телефон: (812) 456-02-70
Электронная почта: antonio@rezonit.ru, polys7878@yandex.ru
ИНН/КПП 7814413507\781401001
ОГРН/ОГРНИП 1089847287430

УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор

19-06-2025г.  А.А. Федотов

АКТ

внедрения в производственные процессы ООО «Полюс»
научных результатов диссертационной работы «Модели и методики повышения качества
организации роботизированных линий розлива»
Кваса Евгения Станиславовича

комиссия в составе: председатель комиссии - генеральный директор Антон Анатольевич Федотов; члены комиссии: начальник монтажно-сборочного производства Филонов Дмитрий Юрьевич; старший контролёр ОТК Веретенникова Юлия Андреевна составила настоящий акт о внедрении результатов применения квалиметрической модели оценки и управления качеством роботизированного розлива на основе контрольных функций и коэффициентов, основанной на эксплуатационном анализе параметров технологических операций, разработанной в ходе диссертационных исследований Кваса Евгения Станиславовича.

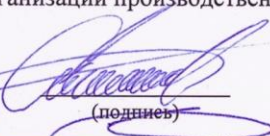
Комиссией установлено, что:

- применение разработанной Квасом Е.С. квалиметрической модели позволило повысить эффективность подбора узлов и планирования технического обслуживания линии монтажа на 3-5%.
- научные результаты диссертационной работы внедрены на рабочие места специалистов контроля качества организации производственной линии.

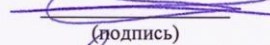
Председатель комиссии

Члены комиссии

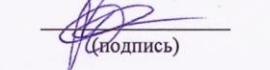



(подпись)

А.А. Федотов


(подпись)

Д.Ю. Филонов


(подпись)

Ю.А. Веретенникова