

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического
приборостроения»

На правах рукописи



Винниченко Александра Валерьевна

МОДЕЛИ И МЕТОДИКИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ БЕРЕЖЛИВЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ СИСТЕМ МЕТОДАМИ МАШИННОГО ЗРЕНИЯ

2.5.22. Управление качеством продукции. Стандартизация. Организация производства

Диссертация
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
кандидат технических наук, доцент
Назаревич Станислав Анатольевич

Санкт-Петербург 2025

Содержание

Введение.....	6
Раздел 1 Исследование методов проектирования и разработка методики верификации динамической модели состояний производственной системы и методики валидации управления организацией производства	14
1.1 Исследование ретроспективных технологий организации производства и анализ актуальности проектирования бережливых ПС	14
1.1.1 Ретроспективный анализ методов организации производственных систем и исследование принципов управления и мониторинга технологических процессов	14
1.1.2 Исследование проблем применения традиционных подходов синхронизации в производственных системах в условиях цифровизации производства	19
1.2 Разработка карты потерь как дополнение комплекса документарного обеспечения производственных процессов для подготовки к проектированию бережливой производственной системы	22
1.3 Разработка и моделирование организационной структуры производственной системы управления на основе моделей функции принадлежности	26
1.3.1 Исследование и разработка структурной модели функционирования производственной системы	26
1.3.2 Исследование адаптивности организации производства на рабочих местах и разработка моделей функций принадлежности для оценки классификации уровня качества состояния оператора в производственной системе	30
1.3.3 Разработка и исследование моделей функций принадлежности для оценки уровня состояния и динамики технологических процессов и переходов	38

1.3.4 Разработка и исследование моделей функций принадлежности для оценки уровня состояния и надежности оборудования производственной системы.....	44
1.4 Проектирование и верификация динамической модели состояния производственной системы.....	50
1.4.1 Разработка и исследование математической модели прогнозирования состояний производственной системы	50
1.4.2 Разработка и исследование методики валидации управления производством и качеством работ в производственной системе.....	55
1.4.3 Разработка алгоритма функционирования динамической модели автоматизированного хронометража для оценки качества производственной системы.....	58
Выводы по разделу 1.....	62
Раздел 2 Разработка и научно-практическое совершенствование модели проектирования организации бережливых производственных систем.....	64
2.1 Научно-практическое совершенствование моделей и методов проектирования бережливых производственных систем	64
2.2 Разработка и обоснование многокритериальной базы для проектирования бережливой производственной системы	66
2.2.1 Корреляционная матрица для сложно структурированных поведенческих факторов и параметров технологического процесса	66
2.2.2 Исследование взаимосвязи редуцированных данных факторно-дисперсионным анализом, влияющих на состояние и динамику процессов управления производственными системами	74
2.2.3 Разработка базы данных для рекомендаций и корректирующих действий оперативного управления состояниями бережливых производственных систем	80
2.3 Разработка автоматизированной методики расчета комплексного показателя организационно-технологической эффективности производственной системы.....	86

2.3.1 Разработка и обоснование многокритериальных баз показателей качества для оценки производственной системы	86
2.3.2 Разработка и верификация методики оценки организационно-технологической эффективности производственной системы	104
2.4 Разработка функциональной модели организации и управления проектирования бережливой производственной системы.....	107
Выводы по разделу 2.....	111
3.1 Разработка информационно-управляющей модели для проектирования бережливой производственной системы	114
3.1.1 Синтез методов и моделей для состояния и динамики организации бережливой производственной системы	114
3.1.2 Структурная схема и архитектура распределенного хранилища данных информационно-управляющей модели.....	116
3.1.3 Разработка фреймовой модели базы знаний и реляционной модели базы данных	121
3.2 Разработка методики принятия решений оперативного управления бережливой производственной системы	124
3.2.1 Разработка алгоритма для принятия решений оперативного управления бережливой производственной системы и ее автоматизация	124
3.2.2 Уровневая модель базы данных функционирования методики ПРОУ	127
3.3 Разработка методики дистанционного мониторинга для повышения ОТЭ ПС ООП.....	129
3.3.1 Разработка архитектуры системы дистанционного мониторинга	129
3.3.2 Алгоритм анализа ключевых параметров и показателей организационно-технологической эффективности ПС ООП	131
3.3.3 Матрица выбора методов воздействия на элементы бережливой производственной системы.....	136
3.4 Апробация разработанных моделей обеспечения качества и методики принятия решений для проектируемой бережливой производственной системы.....	140

Выводы по разделу 3.....	151
Заключение	153
Список сокращений и условных обозначений.....	155
Список литературы	156
Приложение А. Результаты патентного анализа для систем АХ.....	189
Приложение Б. Карта потерь.....	192
Приложение В. Программный код реализации ДМАХ	200
Приложение Г. Автоматизированный расчет оценки ОТЭ ПС ООП.....	204
Приложение Д. Условия вариативности состояний элементов ПС ООП.....	210
Приложение Е. Методика ПРОУ БПС	212
Приложение Ж. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ	218
Приложение З. Акт о внедрении результатов диссертационной работы в ФГАОУ ВО «СПб ГУАП».....	219
Приложение И. Акт внедрения о внедрении результатов диссертационной работы в АО «Микротехника».....	221
Приложение К. Акт внедрения о внедрении результатов диссертационной работы в АО «НИИ «Масштаб»	222
Приложение Л. Акт внедрения о внедрении результатов диссертационной работы в ООО «А-РИАЛ»	223

Введение

Актуальность работы. На сегодняшний день приоритетным и глобальным вызовом внешней среды по отношению к отечественной машиностроительной отрасли является поиск научно-практических решений для эффективного функционирования и совершенствования производственных процессов предприятий, что особенно важно в условиях реализации национального проекта технологического лидерства «Средства производства и автоматизации», который устанавливает требования к применению современных методов управления, цифровизации и бережливого производства.

Процессы обеспечения технологической независимости в области производства высокотехнологичных видов продукции и повышения уровня промышленной автоматизации сталкиваются с научно-практическими проблемами развития средств производства и улучшения качества организации производственной системы, где рационализация производственных потерь, затрат на улучшение качества продукции, сокращение сроков производства и улучшение гибкости производства являются критическими задачами.

Возникает следующее противоречие: классический подход к развитию средств производства основан на локализации и устранении технологических нарушений, несоответствий путем итерации внутреннего аудита и создания локальных рекомендаций по реструктуризации технологического процесса, не учитывает показатели, характеризующие уровень качества и степень достоверности действий и приемов оператора по осуществлению технологических операций, межоперационных и межпроцессных переходов в системе «оператор-оборудование-процесс», что характеризует гибкость производства, а также производительность оператора, как единичный показатель качества оценки релевантности действий оператора к требованиям технологического процесса в структуре задачи управления производственными потерями.

Поэтому особой значимостью и актуальностью обладают процессы повышения уровня автоматизации производственной системы с учетом улучшения гибкости производства и задачами управления производственными потерями, что необходимо для выполнения условий реализации национального проекта технологического лидерства «Средства производства и автоматизации».

Подобные задачи решаются проектированием и внедрением бережливых производственных систем в структуры основных процессов создания ценности для отечественных предприятий, с учетом применения цифровых технологий для создания новых подходов к повышению организационно-технологической эффективности производственной системы «оператор-оборудование-процесс», учитывая задачи улучшения качества технологических процессов и межпроцессных переходов.

Исследование, разработка и интеграция моделей и методик для повышения организационно-технологической эффективности производственных систем отечественных предприятий машиностроительной отрасли, сочетающих инструменты бережливого производства с цифровыми технологиями, соответствует приоритетам государственных программ в области цифровой трансформации и повышения производительности, является выполнимой и актуальной научно-практической задачей в условиях технологической трансформации и одного из приоритетных направлений развития науки, техники и технологии.

Степень разработанности проблемы.

Вопросы бережливого производства, включая различные инструменты, методы и подходы к оптимизации процессов, детально исследованы в работах как зарубежных (Д. Вумек, Д. Джонс, Т. Оно, М. Имаи, С. Синго), так и отечественных ученых (А.А. Абросимова, Ю.П. Адлер, В.А. Васильев, И.Н. Омельченко). Анализ эффективности производственных систем и инструментов Lean также представлен в трудах Э. Голдратта, Дж. Лайкера, М. Хаммера и др.

Цифровая трансформация производства и интеграция с Lean-подходами изучены в исследованиях С.В. Амелина, В.В. Баранова, П.А. Дроговоза, А.И. Орлова и др. Однако, несмотря на значительный объем работ, посвященных отдельным аспектам бережливого производства и цифровизации, остается недостаточно разработанным комплексный методологический подход к их совместному применению в условиях отечественного машиностроения.

Цель работы: Повышение организационно-технологической эффективности производственной системы «оператор-оборудование-процесс».

Объект исследования: организационно-технологическая производственная система «оператор-оборудование-процесс».

Предмет исследования: модели, методики автоматизированного мониторинга технологических операций, межоперационных и межпроцессных переходов.

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

1. Разработать динамическую модель автоматизированного хронометража, учитывающую взаимосвязь элементов производственной системы «оператор-оборудование-процесс», включая методику системы автоматизированного хронометража с использованием машинного зрения и интеграцией информационной системой предприятия.

2. Разработать модель проектирования бережливой производственной системы для организации производства на основе оптического стенда, алгоритмами планирования технологического процесса и оценкой организационно-технологической эффективности.

3. Разработать информационно-управляющую модель состояния и динамики бережливой производственной системы для обеспечения качества продукции.

4. Разработать методику принятия решений оперативного управления, реализованную на основе автоматизированного мониторинга производственной системы.

Методы исследований: Элементы теории системного анализа, теории математического моделирования, теории квалиметрии, аппарат нечеткой логики, статистическая обработка данных, методы построения архитектуры программ для объектов машинного зрения.

Методы и модели синтеза моделей объектов, процессов и программ, построения сложных систем, системного анализа, математического моделирования, искусственного интеллекта, адаптивной обработки данных, математической статистики, инженерии знаний, проектирования, разработки и сопровождения информационных систем.

Программные средства реализации диссертационного исследования: Microsoft Office, Visio, Project; MATLAB & Simulink; Python.

Область исследования соответствует следующим пунктам паспорта специальности: 2.5.22 – «Управление качеством продукции. Стандартизация. Организация производства по пунктам №1 «Методы анализа, синтеза и оптимизации, математические и информационные модели состояния и динамики процессов управления качеством и организации производства», 17 «Разработка и научно-практическое развитие инструментов бережливого производства, синхронизации в производственных системах, оптимизации процессов и рабочих мест», 23 «Разработка и совершенствование методов и средств планирования и управления производственными процессами и их результатами», 25 «Разработка моделей описания, методов и алгоритмов решения задач проектирования производственных систем, организации производства и принятия управленческих решений в цифровой экономике».

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Динамическая модель автоматизированного хронометража производственной системы «оператор-оборудование-процесс».

2. Модель проектирования бережливой производственной системы «оператор-оборудование-процесс».

3. Информационно-управляющая модель обеспечения качества выполнения предъявляемых требований с распределенными хранилищами данных.

4. Методика принятия решений оперативного управления для выбора и предоставления рекомендаций в интеграции инструментов и методов повышения организационно-технологической эффективности проектируемой бережливой производственной системы «оператор-оборудование-процесс».

Научная новизна:

1. Динамическая модель автоматизированного хронометража производственной системы «оператор-оборудование-процесс», **отличающаяся от известных** использованием показателей, характеризующих уровень качества и степень достоверности действий и приемов оператора по осуществлению технологических операций в системе «оператор-оборудование-процесс».

2. Модель проектирования бережливой производственной системы «оператор-оборудование-процесс» **отличающаяся от известных** достижением адаптивности в условиях синергии цифровизации производства с помощью адаптированного принципа цикла PDCA, применимого совместно с концепцией кайдзен, методов машинного зрения и бережливого производства.

3. Информационно-управляющая модель обеспечения качества выполнения предъявляемых требований, с распределенными хранилищами данных **отличающаяся от известных** дополненными наборами процедур для оценки соответствия технологического процесса требованиям и визуализации показателей, характеризующие уровень качества технологического процесса, включая когнитивный классификатор, отражающий потенциал и возможности персонала.

4. Методика принятия решений оперативного управления для выбора и предоставления рекомендаций в интеграции инструментов и методов повышения организационно-технологической эффективности проектируемой бережливой производственной системы «оператор-оборудование-процесс», **отличающаяся от известных** применением автоматизированного выбора рекомендаций и корректирующих действий для элементов производственной системы «оператор-оборудование-процесс» в соответствии с изменяемыми параметрами организационно-технологической эффективности бережливой производственной системы «оператор-оборудование-процесс».

Практическая значимость:

1. Динамическая модель автоматизированного хронометража производственной системы «оператор-оборудование-процесс» **позволяет сократить временные потери в осуществлении технологических операций в системе «оператор-оборудование-процесс» на 7-10%.**

2. Модель проектирования бережливой производственной системы «оператор-оборудование-процесс» **позволяет сократить количество незавершенного производства на 7% методами бережливого производства и сократить время внедрения улучшений на 10% за счет применения гибкого цикла PDCA для производственной системы «оператор-оборудование-процесс».**

3. Информационно-управляющая модель обеспечения качества выполнения предъявляемых требований с распределенными хранилищами данных **позволяет сократить время при проверке выполнения предъявляемых требований к выпускаемой продукции на 7-10%**

4. Методика принятия решений оперативного управления для выбора и предоставления рекомендаций в интеграции инструментов и методов повышения организационно-технологической эффективности проектируемой бережливой производственной системы «оператор-оборудование-процесс», **позволяет сократить время на анализ состояния производственной системы «оператор-оборудование-процесс» на 5-7%, повысить**

организационно-технологическую эффективность на 5% и сократить время на выбор рекомендаций и корректирующих действий оперативного управления на 11%.

Степень достоверности результатов диссертационной работы обеспечивается корректностью применяемого математического аппарата, алгоритмов компьютерного зрения, включая библиотеки по работе с изображениями и видео, анализа данных с использованием федеральных нормативно-правовых и нормативно-технических документов, а также официальных статистических источников, подтверждается результатами практической апробации.

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

Реализация работы. Результаты диссертационного исследования внедрены в деятельность ООО «А-РИАЛ», ООО «Масштаб», АО «Микротехника», что подтверждено соответствующими актами. Результаты диссертационного исследования использованы в учебном процессе ФГАОУ ВО «ГУАП» по дисциплинам «Технология и организация бережливого производства» «Контроль качества бережливого производства», «Основы технического анализа промышленной продукции», «Управление процессами».

Апробация. Основные результаты исследования докладывались и обсуждались на международной научной конференции «Волновая электроника и инфокоммуникационные системы», 2022 г; международной научно-практической конференции «Теория и практика современной науки: взгляд молодежи», 2023 г; международном форуме «Метрологическое обеспечение инновационных технологий» 2023 г; международном форуме «Математические методы и модели в высокотехнологичном производстве» 2021, 2022, 2024 г; всероссийской научной конференции «Моделирование и ситуационное управление качеством сложных систем» 2022 г., International

Scientific Conference on Metrological Support of Innovative Technologies (ICMSIT II-2021), 2021г.

Публикации. Результаты диссертационной работы опубликованы в 23 печатных изданиях, из них в том числе: 4 статьи, без соавторов, в изданиях, рекомендованных ВАК РФ; 2 работы в научных изданиях, индексируемых в Международных реферативных базах; 15 статей в других изданиях, одно учебно-методическое пособие, одно свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Объем и структура диссертации. Диссертация состоит из введения, трех разделов, заключения, списка литературы, и приложений. Содержание работы изложено на 223 стр. (13,93 п.л.) машинописного текста, включая 36 рисунков и 49 таблиц.

Раздел 1 Исследование методов проектирования и разработка методики верификации динамической модели состояний производственной системы и методики валидации управления организацией производства

1.1 Исследование ретроспективных технологий организации производства и анализ актуальности проектирования бережливых ПС

1.1.1 Ретроспективный анализ методов организации производственных систем и исследование принципов управления и мониторинга технологических процессов

Развитие методов управления производственными системами и контроля качества продукции имеет глубокие исторические корни, которые уходят в эпоху первого технологического уклада, связанного с промышленной революцией. Согласно теории длинных волн Н. Кондратьева [1], экономическое развитие происходит циклически, где каждый технологический уклад характеризуется определенным набором технологий, социально-экономических условий и культурных факторов [2]. Эти уклады сменяют друг друга, причем продолжительность каждого из них может превышать 50 лет, что обусловлено наложением периодов спада предыдущего уклада и роста нового [3] (рис. 1).

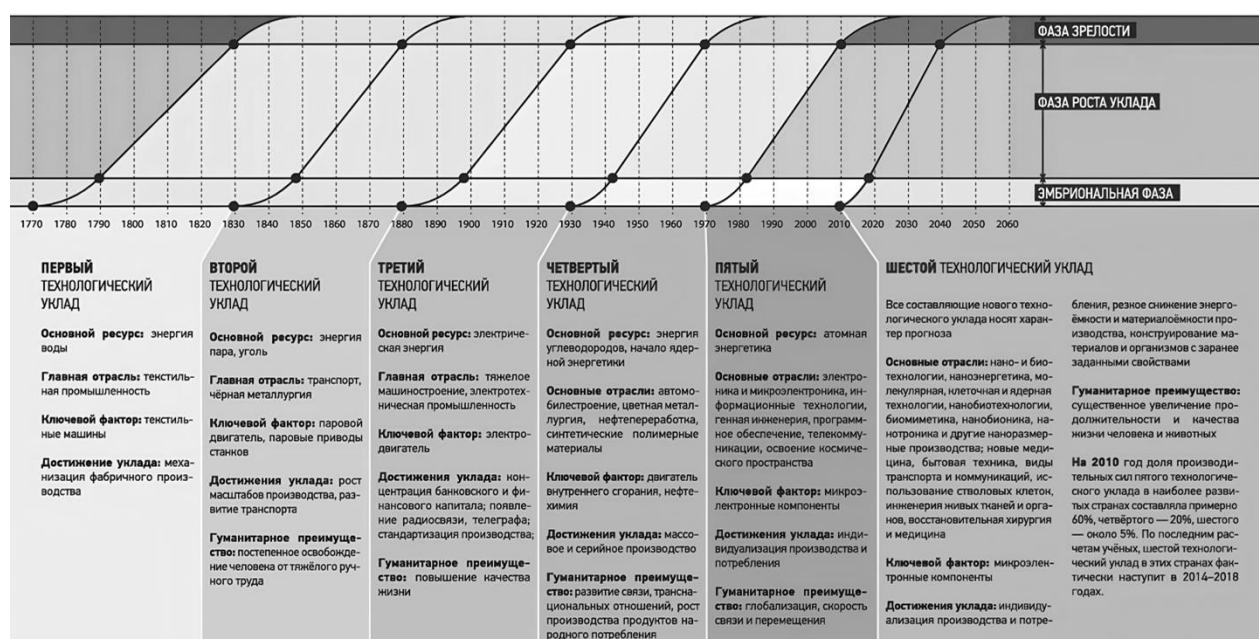


Рисунок 1 – Технологические уклады

Современные исследования показывают, что с ускорением научно-технического прогресса (НТП) продолжительность технологических укладов сокращается [4-5], что приводит к более динамичным изменениям в производственных системах. Каждый уклад оставляет после себя наследие в виде инфраструктурных объектов, производственных мощностей, знаний и культурных ценностей, которые продолжают влиять на экономический рост даже после утраты доминирующего положения [6-7].

Ретроспективный анализ методов организации производственных систем позволяет выделить несколько ключевых этапов их развития, которые коррелируют с эволюцией технологических укладов [8-10]. Эти этапы можно систематизировать в виде таблицы, отражающей изменения в методах организации, управления и мониторинга производства (табл. 1).

Таблица 1 – Ретроспективный анализ методов организации, управления и мониторинга производства

<i>Период</i>	<i>Методы организации производства</i>	<i>Методы управления производством</i>	<i>Методы мониторинга производства</i>
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>
<i>Традиционные методы (до 1950-х годов)</i>	- Ремесленное производство, основанное на мастерстве отдельных ремесленников; - Функциональная организация производства; - Процессная организация производства.	- Управление на основе опыта и интуиции; - Иерархические и формальные структуры управления; - Управление на основе стандартов и нормативов.	- Визуальное наблюдение и контроль; - Ручной сбор данных и ведение журналов.
<i>Методы второго поколения (1950-е – 1970-е годы)</i>	- Производство по шаблону (assembly line manufacturing); - Массовое производство (mass production); - Функционально-процессная организация.	- Планирование и контроль производства (MRP, MRP II); - Статистический контроль качества (методы Деминга и Шухарта).	- Контрольные листы и формы для сбора данных; - Статистические методы контроля качества (SPC).

Продолжение таблицы 1

<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>
<i>Методы третьего поколения (1980-е – 1990-е годы)</i>	- Гибкое производство (flexible manufacturing); - Ячеистая организация производства (cellular manufacturing); - Командная организация производства.	- Управление на основе гибкого производства и Just-in-Time; - Управление качеством и непрерывное улучшение (Six Sigma, Lean); - Участие работников и командная работа.	- Автоматизированные системы сбора данных (MES); - Непрерывный мониторинг и контроль (SPC, Six Sigma); - Компьютерные системы управления (ERP).
<i>Методы четвертого поколения (с 2000-х годов)</i>	- Интегрированные системы управления (MRP II, ERP); - Цифровая организация производства (Интернет вещей, Big Data); - Гибридные методы (Lean, гибкое производство, цифровые технологии).	- Управление на основе цифровизации (цифровые двойники, IoT, AI); - Анализ данных и Big Data; - Гибридные подходы (Lean + цифровые технологии).	- Цифровые технологии и сенсоры для мониторинга в реальном времени (IoT, цифровые двойники); - Аналитика и Big Data; - Платформы для цифрового управления (IIoT).

Структурировав данные из таблицы 1, можно сделать вывод о том, что эволюция методов организации, управления и мониторинга производства прошла несколько ключевых этапов, каждый из которых характеризуется своими уникальными особенностями и инновациями. Эти этапы отражают не только технологический прогресс, но и изменения в управленческих парадигмах, а также в подходах к контролю качества и эффективности производственных процессов [11].

Эволюция методов организации, управления и мониторинга производства [12-14] демонстрирует переход от простых, локально ориентированных систем к сложным, интегрированным и адаптивным производственным экосистемам. Сравнительный анализ позволяет выделить ключевые признаки и различия в подходах к управлению и мониторингу, характерные для традиционных и современных методов организации

производства (табл. 2). Эти различия обусловлены как технологическими изменениями, так и эволюцией управленческих парадигм, открывающих новые возможности для повышения эффективности, гибкости и устойчивости производственных систем [15].

Таблица 2 – Сравнение традиционных и современных методов организации производства

<i>Признак организации</i>	<i>Традиционная организация</i>	<i>Современная организация</i>
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>
<i>Масштабы организации</i>	Отсутствие крупных организаций или их малое количество.	Наличие крупных и сверхкрупных организаций.
<i>Количество руководителей</i>	Небольшое количество руководителей среднего звена.	Большое количество руководителей всех уровней.
<i>Специализация управленческой деятельности</i>	Управленческая работа не выделялась в отдельную функцию.	Четкое разделение управленческих функций и специализация.
<i>Принципы формирования руководства</i>	Занятие руководящих постов по праву рождения или силе.	Занятие руководящих постов на основе компетентности и соблюдения закона.
<i>Принятие решений</i>	Упор на приказы и интуицию.	Упор на коллективную работу, рационализм и анализ данных.
<i>Стиль руководства</i>	Авторитарный стиль, основанный на приказах.	Сотрудничество, вовлечение сотрудников и гибкость.

Проанализировав данные из таблицы 2, можно сделать вывод о том, что традиционные и современные методы организации производства существенно различаются по ключевым параметрам, что отражает эволюцию управленческих подходов, технологий и социально-экономических условий, отраженных в циклах научно-технологических укладах. Выявленные различия проявляются в масштабах организаций, принципах управления, стиле руководства и методах принятия решений.

Современные организации стремятся к распределению ответственности и полномочий, что повышает адаптивность и скорость принятия решений. Принятие решений основывается на анализе данных, что снижает риски и повышает точность управленческих действий. Также стоит отметить, что

современные методы организации предприятий уходят от авторитарных методов к вовлечению сотрудников в процесс управления и делают акцент на профессиональных навыках и знаниях [16-18], что в свою очередь, обуславливается подходами системы Toyota Production System (TPS) и принципами Дао Toyota [22-23].

Сравнение традиционных и современных методов организации производства показывает, что современные подходы ориентированы на гибкость, адаптивность и использование данных, позволяя организациям эффективнее реагировать на изменения внешней среды, повышать качество продукции и удовлетворять потребности клиентов. Однако успешное внедрение современных методов требует не только технологических изменений, но и трансформации организационной культуры, развития лидерских качеств и компетенций сотрудников.

Проведенный ретроспективный анализ подтверждает, что методы организации, управления и мониторинга производства эволюционируют в соответствии с изменениями технологических укладов и социально-экономических условий. В частности, наблюдается рост популярности концепции бережливого производства (Lean Production), которая базируется на принципах системы Toyota Production System (TPS). Эти принципы, такие как устранение потерь (муда), непрерывное улучшение (кайдзен) и уважение к людям, стали основой для современных производственных систем [24-25].

Однако, несмотря на активное внедрение Lean-подходов, в последние годы наблюдается определенная стагнация в разработке новых инструментов для улучшения взаимодействия элементов производственной системы «оператор-оборудование-процесс». Современные исследования сосредоточены на интеграции существующих методов с цифровыми технологиями, такими как Интернет вещей (IoT), искусственный интеллект (AI) и Big Data [26-31]. Это позволяет создавать гибридные системы, сочетающие принципы бережливого производства с возможностями цифровизации.

В условиях неопределенности и высокой динамики внешней среды возрастает роль стохастических методов, которые позволяют учитывать случайные факторы и вероятностные закономерности в управлении производственными процессами. Эти методы особенно актуальны для анализа и прогнозирования в условиях нестабильности, например, при колебаниях спроса или сбоях в цепочках поставок.

Кроме того, все большее внимание уделяется бихевиористским подходам, которые учитывают человеческий фактор в производственных системах [32-34]. Эти методы направлены на улучшение взаимодействия между сотрудниками, повышение их мотивации и вовлеченности, что является ключевым элементом успешного внедрения бережливого производства.

Ретроспективный анализ методов организации, управления и мониторинга производственных систем демонстрирует их тесную связь с эволюцией технологических укладов и социально-экономических условий. Современные подходы, такие как бережливое производство и цифровизация, продолжают развиваться, однако требуют интеграции с новыми методами, такими как стохастическое моделирование и бихевиористские подходы [35]. Это подтверждает актуальность разработки новых моделей и методик, направленных на повышение эффективности производственных систем в условиях неопределенности и высокой конкуренции.

1.1.2 Исследование проблем применения традиционных подходов синхронизации в производственных системах в условиях цифровизации производства

Ретроспективный анализ методов организации производственных систем, рассмотренный в предыдущем разделе, демонстрирует эволюцию подходов к управлению и мониторингу технологических процессов. Однако в условиях цифровизации производства традиционные методы синхронизации, такие как ручной хронометраж и линейное планирование, сталкиваются с

рядом ограничений. Цифровая трансформация требует пересмотра устаревших подходов и внедрения новых решений, способных обеспечить высокую точность, оперативность и адаптивность в управлении производственными системами. В данном разделе рассматриваются проблемы применения традиционных методов синхронизации в контексте цифровизации, а также предлагаются пути их решения с использованием современных технологий [36].

Традиционные методы синхронизации, такие как ручной хронометраж [37-38] и линейное планирование [39], были эффективны в условиях стабильных и предсказуемых производственных процессов, однако в современных условиях, характеризующихся высокой динамичностью и неопределенностью [40], эти методы становятся недостаточно эффективными. Так, ручной хронометраж подвержен человеческим ошибкам, что приводит к неточностям в оценке времени выполнения операций и требует значительных временных затрат, снижая оперативность управления. Ручные методы не позволяют проводить глубокий анализ данных, что затрудняет выявление узких мест и оптимизацию процессов, следовательно, традиционные подходы не способны адаптироваться к изменениям в производственных системах, что особенно критично в условиях цифровизации [41].

Для решения указанных проблем в последние годы активно разрабатываются автоматизированные системы хронометража, основанные на использовании цифровых технологий [42-44].

Патентный анализ позволяет выделить несколько ключевых направлений, которые иллюстрируют ключевые направления в области автоматизированного хронометража и синхронизации производственных процессов (Приложение А) [45-49].

Результаты патентного анализа демонстрируют, что современные подходы к автоматизированному хронометражу и синхронизации производственных процессов активно развиваются в направлениях IoT,

компьютерного зрения, цифровых двойников и искусственного интеллекта, позволяя повысить точность, оперативность и гибкость управления производственными системами.

На основе анализа существующих решений можно выделить несколько применимых методов автоматизированного хронометража (табл. 3), которые могут быть использованы в производственных системах для исследования технологических процессов и комплексной оценки элементов «оператор», «оборудование», «процесс».

Таблица 3 – Сравнение подходов и методов к процессам автоматизированного хронометража

<i>Метод</i>	<i>Описание</i>	<i>Преимущества</i>	<i>Недостатки</i>
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>
<i>Сенсоры и IoT</i>	Использование сенсоров для автоматического сбора данных о времени операций.	Высокая точность, возможность интеграции с другими системами.	Зависимость от качества сенсоров, необходимость инфраструктуры.
<i>Компьютерное зрение</i>	Анализ видеопотоков для определения времени выполнения операций.	Не требует физического вмешательства, высокая гибкость.	Зависимость от качества видео, высокая вычислительная сложность.
<i>Цифровые двойники</i>	Моделирование процессов в реальном времени для анализа и оптимизации.	Возможность прогнозирования и оптимизации, интеграция с другими системами.	Высокая стоимость разработки и внедрения.
<i>Искусственный интеллект</i>	Использование алгоритмов машинного обучения для анализа и прогнозирования.	Высокая точность прогнозов, возможность адаптации к изменениям.	Требует больших объемов данных для обучения, сложность настройки алгоритмов.

Из проведенного исследования можно сделать вывод, что наиболее актуальными и работоспособными решениями для автоматизированного хронометража являются методы, основанные на использовании сенсоров и IoT, а также компьютерного зрения, данные подходы позволяют проводить автоматизированный хронометраж с высокой точностью и минимальными

временными затратами, что особенно важно для адаптивных производственных систем «оператор-оборудование-процесс» (ООП), а также принципов организации бережливого производства.

На основе проведенного анализа разрабатывается следующее техническое решение для внедрения автоматизированного хронометража: использование оптического стенда, оснащенного камерой и алгоритмами компьютерного зрения для анализа видеопотоков и определения времени операций. Установка сенсоров на оборудовании для автоматического сбора данных о времени выполнения операций. Создание цифровых моделей производственных процессов для анализа и оптимизации в реальном времени, что позволит не только повысить точность и оперативность хронометража, но и обеспечить гибкость и адаптивность производственных систем в условиях цифровизации.

1.2 Разработка карты потерь как дополнение комплекса документарного обеспечения производственных процессов для подготовки к проектированию бережливой производственной системы

В условиях глобальной цифровой трансформации и усиления конкуренции на рынке машиностроительные организации сталкиваются с необходимостью постоянного повышения эффективности функционирования производственных систем [50-52]. Традиционные подходы к организации производства, основанные на устаревших стандартах и методах управления, не способны обеспечить требуемую гибкость, адаптивность и минимизацию потерь. В связи с этим особое значение приобретает внедрение стандартов [52-60] и принципов бережливого производства (Lean Production), которые позволяют оптимизировать производственные процессы, снизить издержки и повысить производительность. Однако для успешного внедрения таких подходов необходимо разработать и внедрить комплекс документарного обеспечения, который будет учитывать современные требования к

организации производства и обеспечивать адаптивность системы к изменяющимся условиям [61-65].

Традиционные стандарты организации производства [66-69], такие как функциональная специализация, жесткая иерархия управления и линейное планирование, были эффективны в условиях стабильного спроса и низкой конкуренции, но в современных условиях они демонстрируют ряд существенных ограничений: (табл. 4)

Таблица 4 – Сравнительный анализ возможностей стандартов традиционной организации производства и бережливого производства

<i>Критерий</i>	<i>Традиционные стандарты</i>	<i>Стандарты бережливого производства (Lean)</i>
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>
<i>Гибкость</i>	Недостаточная гибкость. Затруднено оперативное реагирование на изменения спроса и технологий.	Высокая гибкость. Быстрая адаптация к изменениям спроса и технологическим инновациям.
<i>Издержки</i>	Высокие издержки из-за жесткой структуры управления и отсутствия интеграции между подразделениями.	Снижение издержек за счет оптимизации потоков материалов и информации, устранения излишних запасов.
<i>Использование ресурсов</i>	Неэффективное использование ресурсов из-за отсутствия системного подхода к устранению потерь.	Минимизация потерь (муда) за счет внедрения инструментов, таких как 5S, Kanban, JIT, SMED.
<i>Координация и управление</i>	Высокие затраты на координацию и управление из-за жесткой иерархии.	Упрощение управления за счет автономии рабочих мест и вовлечения персонала в процесс улучшений.
<i>Качество продукции</i>	Качество зависит от контроля на конечном этапе, что может приводить к увеличению дефектов.	Повышение качества за счет стандартизации процессов, предотвращения дефектов и вовлечения персонала.
<i>Время выполнения заказов</i>	Длительное время выполнения заказов из-за линейного планирования и отсутствия синхронизации.	Сокращение времени выполнения заказов за счет синхронизации процессов и внедрения Just-in-Time (JIT).
<i>Адаптация к изменениям</i>	Медленная адаптация к изменениям рынка и технологий.	Быстрая адаптация за счет непрерывного улучшения (Kaizen) и гибких методов управления.

Продолжение таблицы 4

1	2	3
<i>Роль персонала</i>	Жесткая иерархия, ограниченное вовлечение персонала в процесс улучшений.	Активное вовлечение персонала в процесс улучшений, развитие культуры бережливого производства.
<i>Инструменты и методы</i>	Отсутствие системных инструментов для анализа и устранения потерь.	Использование инструментов Lean: 5S, Kanban, JIT, SMED, Value Stream Mapping, Kaizen и др.
<i>Результаты</i>	Низкая эффективность, высокие затраты, медленная реакция на изменения.	Повышение эффективности, снижение затрат, улучшение качества, быстрое реагирование на изменения.

Таким образом, традиционные стандарты эффективны в условиях стабильного спроса и низкой конкуренции, но в современных условиях демонстрируют недостаточную гибкость, высокие издержки и неэффективное использование ресурсов, что подтверждает необходимость дополнения комплекса документарного обеспечения процессов повышения эффективности функционирования производственной системы.

Стандарты, регламентирующие организацию производства в соответствии с принципами бережливого производства [53, 56, 58, 70], направлены не только на минимизацию потерь и повышение эффективности производственных процессов. Их внедрение позволяет: снизить издержки, связанные с производственными потерями, повысить уровень гибкости и адаптивности к изменениям спроса и технологическим инновациям на рынке, вовлечь персонал в процесс улучшений для повышения качества продукции.

Для разработки и дополнения комплекса документарного обеспечения процессов повышения эффективности функционирования производственной системы проведен технологический аудит ПС ООП, для выявления и структуризации производственных потерь, определены методы и инструменты бережливого производства, которые могут быть применены для минимизации возникающих производственных потерь, нивелирования

отрицательного влияния выявленных факторов и повышения организационно-технологической эффективности (Приложение Б).

Технологический аудит ПС выявил существенные пробелы в существующей документации, которые ограничивают эффективность производственных процессов. Для устранения этих недостатков определены ключевые элементы документарного обеспечения, на основе видов потерь проведен детальный анализ производственных потерь, характерных для машиностроительных организаций.

Основные элементы выявленных потерь: недостаточная квалификация, отсутствие мотивации и обучения операторов, износ, несоответствие технологическим требованиям, отсутствие профилактического обслуживания оборудования, неэффективная планировка производственных линий, избыточные операции, задержки в поставках.

На основе выявленных потерь разработан комплекс документарного обеспечения, включающий в себя инструменты бережливого производства, направленные на нивелирование проанализированных потерь.

Результаты проведенного исследования подтверждают, что разработка и дополнение комплекса документарного обеспечения на основе технологического аудита и инструментов бережливого производства являются эффективным методом повышения функционирования производственной системы ООП. Внедрение стандартизированных процессов, оптимизация технического обслуживания и планирования, а также постоянное совершенствование позволяют минимизировать производственные потери и повысить конкурентоспособность машиностроительной организации.

Разработанный комплекс документарного обеспечения представляет собой практический инструмент для оптимизации производственной системы «оператор-оборудование-процесс» и может

быть адаптирован для других отраслей промышленности.

1.3 Разработка и моделирование организационной структуры производственной системы управления на основе моделей функции принадлежности

1.3.1 Исследование и разработка структурной модели функционирования производственной системы

Разработка и дополнение комплекса документарного обеспечения процессов повышения эффективности функционирования производственной системы позволили систематизировать подходы к минимизации потерь и оптимизации производственных процессов [72-73]. Однако для достижения максимальной эффективности необходимо не только документировать и стандартизировать процессы, но и разработать структурную модель, которая обеспечит целостное представление о взаимодействии всех элементов производственной системы. Такой подход позволит перейти от локальных улучшений к системной оптимизации, учитывающей взаимосвязи между оператором, оборудованием и технологическим процессом.

В условиях цифровой трансформации традиционные методы управления, такие как ручной хронометраж и линейное планирование, демонстрируют свою несостоятельность. Они не способны обеспечить необходимую гибкость, точность и адаптивность, требуемые для работы в динамичной производственной среде. Цифровизация производства требует перехода к более сложным, интегрированным моделям управления, которые учитывают не только отдельные элементы системы, но и их взаимодействие в рамках единого производственного цикла [74-75]. Это особенно актуально для производственной системы «оператор-оборудование-процесс» (ООП).

Рассмотрев проблемы применения традиционных подходов синхронизации в производственных системах в условиях цифровизации, можно заключить, что устаревшие методы, такие как ручной хронометраж и линейное планирование, не способны обеспечить необходимую гибкость, точность и адаптивность в современных динамичных производственных условиях. Цифровизация требует перехода к более сложным,

интегрированным моделям управления, которые учитывают взаимодействие всех элементов производственной системы «оператор-оборудование-процесс» (ООП) [76]. В данном разделе представлены результаты исследования и разработки структурной модели функционирования производственной системы, которая позволяет выявить ключевые зоны влияния, факторы эффективности и потенциальные потери, а также предложить пути их устранения [77].

Для разработки структурной модели был проведен анализ существующих организационных структур [78-79] и схем управления производственными операциями в производственных системах «оператор-оборудование-процесс». В ходе анализа выявлены слабые места (рис. 2).



Рисунок 2 – Слабые места моделей управления

На основе проведенного анализа разработана структурная модель, определяющая ключевые зоны исследования технологической линии (рис. 3) и факторы, влияющие на эффективность системы. Модель включает следующие зоны исследования с элементами ПС (1):

1. Зона оператора. Элемент ПС «оператор», учитываются физиологические и психологические факторы (X_i), такие как усталость, уровень подготовки, мотивация и пр.

2. Зона оборудования. Элемент ПС «оборудование», учитываются технические характеристики и состояние оборудования (Y_i), включая износ, производительность, надежность.

3. Зона процесса. Элемент ПС «процесс», учитываются параметры технологического процесса (Z_i), такие как время выполнения операций, качество продукции, соблюдение стандартов (T_i).

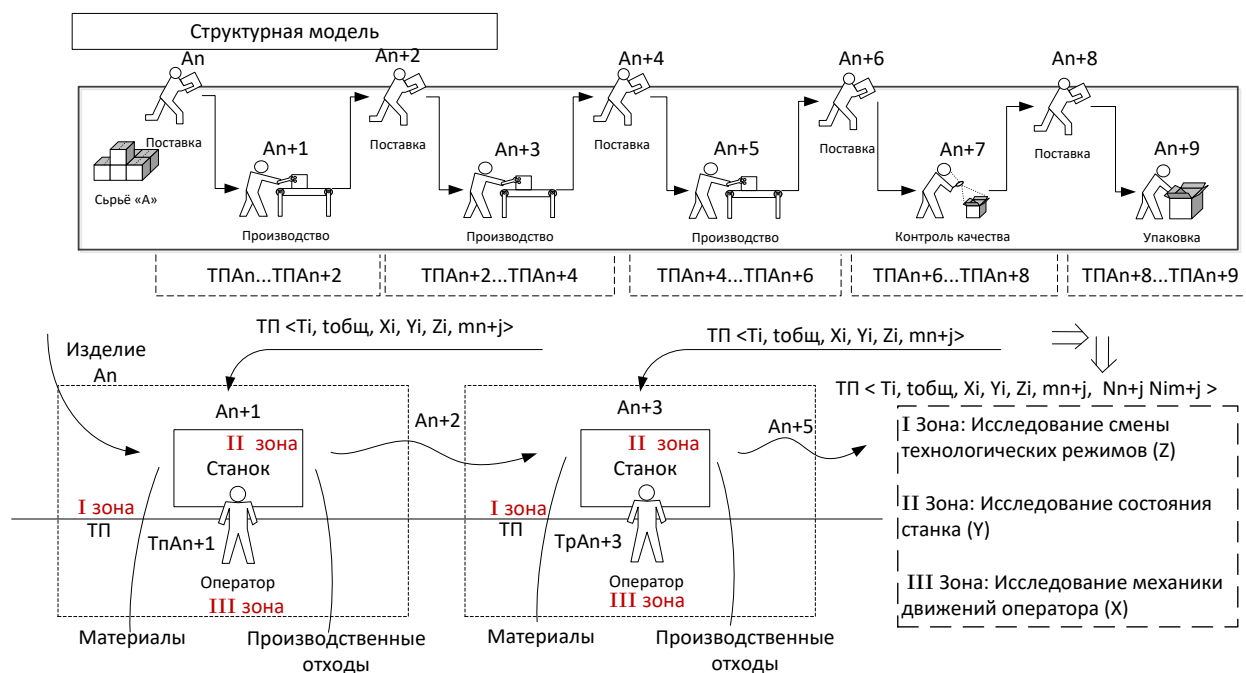


Рисунок 3 – Структурная модель функционирования ПС

$$ТП \in \langle T_i, t_{общ}, X_i, Y_i, Z_i, m_{n+j} \rangle \quad (1)$$

где T_i – требования ЕСТД и ЕСКД, $t_{общ}$ – время процессов, X_i – физиологические и психологические факторы, Y_i – характеристики оборудования и рабочего места, Z_i – параметры технологического процесса, m_{n+j} – количество изделий m с $n+j$ количеством операций.

Структурная модель, описывает взаимосвязь элементов производственной системы (ПС) в контексте бережливого производства (БП) и демонстрирует поток создания ценности (Value Stream), а также взаимодействие между срединными элементами жизненного цикла продукции [82-83].

Основные элементы модели разделяют производственный процесс на несколько этапов, обозначенных как шаги производства ($n+1$) изделия (А), шаги производства представляют собой отдельные процессы или операции, участвующие в реализации продукции, связанные с последующими, образуя непрерывный поток создания ценности: подготовительные этапы, обеспечение производства необходимыми материалами и компонентами, основные операции по обработке и сборке изделий, проверка качества продукции на различных этапах производства, завершающие этап, на котором продукция готовится к отправке [84]. Такая последовательность обеспечивает синхронизацию процессов и минимизацию простоев, что соответствует инструменту БП Just-in-Time (JIT) [20].

Разработанная модель включает элементы планирования, обеспечивая синхронизацию процессов и минимизацию простоев, базируясь на принципах планирования и выравнивания производства (Heijunka), а также управления потоками (Kanban) [21]

Модель подчеркивает взаимодействие между элементами ПС оператором, оборудованием и процессом, в выделенных зонах исследования позволяя анализировать параметры технологических процессов, такие как время, температура, давление и другие факторы, влияющие на качество продукции, проводить мониторинг и диагностику оборудования для предотвращения простоев и повышения его надежности и эксплуатационных показателей, а также анализировать действия оператора для устранения излишних движений и повышения эффективности труда.

Разработанная модель демонстрирует комплексный подход к организации производственной системы, где каждый шаг ($n+1$) взаимосвязан с другими. Модель учитывает как технологические параметры, так и человеческий фактор, что позволяет оптимизировать процессы, минимизировать потери и повысить общую эффективность производства. Внедрение такой модели в практику бережливого производства способствует

созданию устойчивой и гибкой производственной системы, способной адаптироваться к изменениям внешней среды.

1.3.2 Исследование адаптивности организации производства на рабочих местах и разработка моделей функций принадлежности для оценки классификации уровня качества состояния оператора в производственной системе

Разработка структурной модели функционирования производственной системы (ПС) позволила систематизировать взаимосвязи между ключевыми элементами, а также выявить основные факторы, влияющие на эффективность производства. Однако для дальнейшего повышения устойчивости и гибкости ПС необходимо углубиться в анализ и исследование возможных уровней элементов производственной системы ООП и адаптивности организации производства на рабочих местах [85], уделив особое состояние оператора как ключевого элемента системы. Адаптивность производства напрямую зависит от способности оператора эффективно выполнять свои функции в условиях изменяющихся технологических режимов, внешних воздействий и требований к качеству работ [86-87].

Для оценки состояния оператора предлагается ввести уровни его функционального состояния, которые могут быть интерпретированы через методы нечеткой логики [88]. Использование трапециевидных функций принадлежности позволяет учесть неопределенность и вариативность в оценке параметров [89], что особенно актуально в контексте бережливого производства, где минимизация потерь и повышение эффективности напрямую зависят от человеческого фактора [90-92]. Применение нечеткой логики для интерпретации уровней состояния оператора обеспечит более точное моделирование его поведения и адаптацию производственных процессов к изменяющимся условиям, способствуя повышению качества работ и общей устойчивости производственной системы [82].

Непосредственное участие оператора в процессе производства и контроле качества изделия на каждом этапе, обеспечение бесперебойной работы оборудования, его настройку и техническое обслуживание являются ключевыми аспектами [93-94] для разработки методики оценки состояния оператора ТЛ в ПС «ООП». Большая часть работы оператора состоит из выполнения рутинных операций и повторяющихся действий, что может приводить к усталости и снижению внимания, однако, именно от его точности и скорости зависит производительность всего производства [95-96].

Для анализа состояния оператора не существует единой методики оценки и отсутствуют единые показатели, характеризующие уровни усталости оператора, что обуславливается высокой вариабельностью показателей состояний операторов в разных производственных сферах, а также необходимостью дополнительного оборудования, например, датчиков давления и температуры, оптических стендов с алгоритмами машинного зрения и т.д.

Были определены уровни состояния оператора и принято решение интерпретировать результаты через трапецевидные функции принадлежности для уровней состояния оператора [97] (табл. 5).

Таблица 5 – Квалиметрическая шкала оценок характеристик классификации уровня состояния оператора (X_n)

<i>№ n/n</i>	<i>Обозначение</i>	<i>Показатель</i>	<i>Интервал</i>	<i>Характеристика</i>
1	2	3	4	5
1	X_1	Время на операцию	[0-0,45)	$X_{1.1}$ – Большое
			[0,3-0,75)	$X_{1.2}$ – Стандартное
			[0,7-1)	$X_{1.3}$ – Малое
2	X_2	Действия оператора	[0-0,4)	$X_{2.1}$ – Не правильное
			[0,35-0,8)	$X_{2.2}$ – Правильное
			[0,75-1)	$X_{2.3}$ – Отсутствует
3	X_3	Сложность операции	[0-0,3)	$X_{3.1}$ – Сложная
			[0,3-0,8)	$X_{3.2}$ – Стандартная
			[0,75-1)	$X_{3.3}$ – Легкая
4	X_4	Уровень стресса	[0-0,4)	$X_{4.1}$ – Высокий
			[0,375-0,775)	$X_{4.2}$ – Присутствует
			[0,7-1)	$X_{4.3}$ – Отсутствует

Для обеспечения эффективного управления производственной системой «оператор-оборудование-процесс» (ООП) необходимо разработать условия принятия решений для всех исследуемых показателей, учитывая возможные уровни их состояния и соответствующие интервалы. Это позволит реализовать адаптивную систему управления, способную оперативно реагировать на изменения в производственной среде и минимизировать отклонения от заданных параметров. В рамках данной задачи были разработаны таблицы 6-9, содержащие нечеткие множества для показателей (X_1 - X_4), в которых учитываются условия принятия решений о принадлежности к тому или иному уровню состояния (2-13).

Таблица 6 – Время на операцию (X_1)

<i>Нечеткое множество</i>	<i>Функция принадлежности</i>	<i>Дефазификатор</i>
$X_{1.1} = \{(0;0); (0,125;1); (0,3;1); (0,45;0)\}$	$\mu_{X_{1.1}}(x) = \left\{ \begin{array}{ll} y = 0, & 0,45 < x < 0 \\ \frac{x-0}{0,125-0}, & 0 \leq x \leq 0,125 \\ y = 1, & 0,125 < x \leq 0,3 \\ \frac{0,45-x}{0,45-0,3}, & 0,3 < x \leq 0,45 \end{array} \right\} (2)$	Медленное время выполнения операции, в соответствии с нормой выработки
$X_{1.2} = \{(0,3;0); (0,4;1); (0,6;1); (0,75;0)\}$	$\mu_{X_{1.2}}(x) = \left\{ \begin{array}{ll} y = 0, & 0,75 < x < 0,3 \\ \frac{x-0,3}{0,4-0,3}, & 0,3 \leq x \leq 0,4 \\ y = 1, & 0,4 < x \leq 0,6 \\ \frac{0,75-x}{0,75-0,6}, & 0,6 < x \leq 0,75 \end{array} \right\} (3)$	Стандартное время выполнения операции, в соответствии с нормой выработки
$X_{1.3} = \{(0,7;0); (0,8;1); (1,0;1)\}$	$\mu_{X_{1.3}}(x) = \left\{ \begin{array}{ll} y = 0, & x \leq 0,7 \\ \frac{x-0,7}{0,8-0,7}, & 0,7 < x < 0,8 \\ y = 1, & x \geq 0,8 \end{array} \right\} (4)$	Быстрое время выполнения операции, в соответствии с нормой выработки

Таблица 7 – Действия оператора (X_2)

<i>Нечеткое множество</i>	<i>Функция принадлежности</i>	<i>Дефазификатор</i>
$X_{2.1} = \{(0,0;0); (0,2;1,0); (0,3;1,0); (0,4;0)\}$	$\mu_{X_{2.1}}(x) = \left\{ \begin{array}{ll} y = 0, & 0,4 < x < 0 \\ \frac{x-0}{0,2-0}, & 0 \leq x \leq 0,2 \\ y = 1, & 0,2 < x \leq 0,3 \\ \frac{0,4-x}{0,4-0,3}, & 0,3 < x \leq 0,4 \end{array} \right\} (5)$	Технологическая операция выполняется неправильно
$X_{2.2} = \{(0,35;0); (0,45;1,0); (0,65;1,0); (0,8;0)\}$	$\mu_{X_{2.2}}(x) = \left\{ \begin{array}{ll} y = 0, & 0,8 < x < 0,35 \\ \frac{x-0,35}{0,45-0,35}, & 0,35 \leq x \leq 0,45 \\ y = 1, & 0,45 < x \leq 0,65 \\ \frac{0,8-x}{0,8-0,65}, & 0,65 < x \leq 0,8 \end{array} \right\} (6)$	Технологическая операция выполняется в допустимых пределах в соответствии с документами
$X_{2.3} = \{(0,75;0); (0,9;1); (1,0;1,0)\}$	$\mu_{X_{2.3}}(x) = \left\{ \begin{array}{ll} y = 0, & x \leq 0,75 \\ \frac{x-0,75}{0,9-0,75}, & 0,75 < x < 0,9 \\ y = 1, & x \geq 0,9 \end{array} \right\} (7)$	Технологическая операция выполняется правильно

Таблица 8 – Сложность операции (X_3)

<i>Нечеткое множество</i>	<i>Функция принадлежности</i>	<i>Дефазификатор</i>
$X_{3.1} = \{(0,0;0); (0,225;1,0); (0,275;1,0); (0,35;0)\}$	$\mu_{X_{3.1}}(x) = \left\{ \begin{array}{ll} y = 0, & 0,35 < x < 0 \\ \frac{x-0}{0,225-0}, & 0 \leq x \leq 0,225 \\ y = 1, & 0,225 < x \leq 0,275 \\ \frac{0,35-x}{0,35-0,275}, & 0,275 < x \leq 0,35 \end{array} \right\} (8)$	Технологическая операция сложная
$X_{3.2} = \{(0,3;0); (0,425;1,0); (0,675;1,0); (0,8;0)\}$	$\mu_{X_{3.2}}(x) = \left\{ \begin{array}{ll} y = 0, & 0,8 < x < 0,3 \\ \frac{x-0,3}{0,425-0,3}, & 0,3 \leq x \leq 0,425 \\ y = 1, & 0,425 < x \leq 0,675 \\ \frac{0,8-x}{0,8-0,675}, & 0,675 < x \leq 0,8 \end{array} \right\} (9)$	Технологическая операция средней сложности
$X_{3.3} = \{(0,75;0); (0,875;1); (1,0;1,0)\}$	$\mu_{X_{3.1}}(x) = \left\{ \begin{array}{ll} y = 0, & x \leq 0,75 \\ \frac{x-0,75}{0,875-0,75}, & 0,75 < x < 0,875 \\ y = 1, & x \geq 0,875 \end{array} \right\} (10)$	Технологическая операция легкая

Таблица 9 – Уровень стресса (X_4)

<i>Нечеткое множество</i>	<i>Функция принадлежности</i>	<i>Дефазификатор</i>
$X_{4.1} = \{(0,0;0);$ $(0,25;1,0);$ $(0,30;1,0);$ $(0,4;0)\}$	$\mu_{X_{4.1}}(x) = \left\{ \begin{array}{ll} y = 0, & 0,4 < x < 0 \\ \frac{x-0}{0,25-0}, & 0 \leq x \leq 0,25 \\ y = 1, & 0,25 < x \leq 0,3 \\ \frac{0,4-x}{0,4-0,3}, & 0,3 < x \leq 0,4 \end{array} \right\} \quad (11)$	Высокий уровень стресса, сильно влияющий на работу
$X_{4.2} = \{(0,375;0);$ $(0,45;1,0);$ $(0,65;1,0);$ $(0,775;0)\}$	$\mu_{X_{4.2}}(x) = \left\{ \begin{array}{ll} y = 0, & 0,775 < x < 0,375 \\ \frac{x-0,375}{0,45-0,375}, & 0,375 \leq x \leq 0,45 \\ y = 1, & 0,45 < x \leq 0,65 \\ \frac{0,775-x}{0,775-0,65}, & 0,65 < x \leq 0,775 \end{array} \right\} \quad (12)$	Средний уровень стресса, не сильно влияющий на работу
$X_{4.3} = \{(0,7;0);$ $(0,825;1,0);$ $(1,0;1,0)\}$	$\mu_{X_{4.3}}(x) = \left\{ \begin{array}{ll} y = 0, & x \leq 0,7 \\ \frac{x-0,7}{0,85-0,7}, & 0,7 < x < 0,85 \\ y = 1, & x \geq 0,85 \end{array} \right\} \quad (13)$	Низкий уровень стресса, или его отсутствие не влияющее на работу

Представленные нечеткие множества для исследуемых показателей описывают возможные состояния: «медленное/плохое», «стандартное», «быстрое/хорошее». Каждое состояние характеризуется определенными интервалами значений, что позволяет учитывать неопределенность и вариативность в производственных системах. Для визуализации данных на рисунке 4 представлены графики функций принадлежности для всех состояний показателей X_{1-4} , учитывая условия принятия решения о принадлежности к тому или иному уровню.

График функций принадлежности демонстрирует перекрытие интервалов, что отражает нечеткость в оценке состояния показателей. Так, значения, находящиеся на границе между уровнями, может одновременно принадлежать обоим состояниям с разной степенью уверенности, что позволяет более гибко подходить к принятию решений, учитывая возможные погрешности в измерениях или изменения в условиях производства, обеспечивая возможность работы с неточными данными.

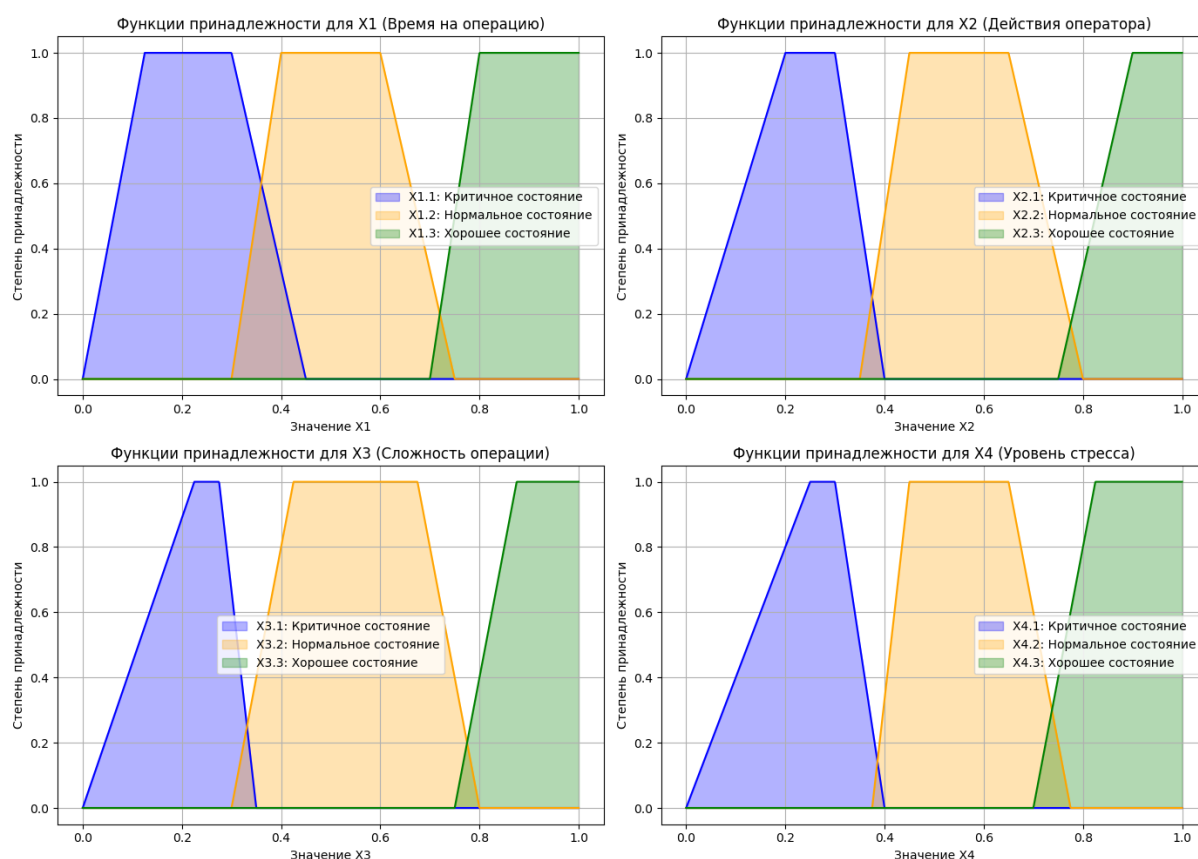


Рисунок 4 – Графики функций для показателей оператора X_{1-4}

При анализе переходов показателей оператора на более высокие уровни состояния учитываются лишь те параметры и индикаторы, которые отражают компоненты и критерии оценки готовности к переходу на следующий уровень [98-99]. В таблице 10 и рисунке 5 представлены основные условия принятия решения для отношения того или иного рассматриваемого показателя к определенному уровню состояния оператора, который классифицируется четырьмя степенями.

Таблица 10 – Уровни состояния оператора ТЛ

Уровень состояния оператора	Характеристика	Интервалы	Условия принятия решения	Дефазификатор нечеткого множества
Уровень 1 Критичное состояние	X_1	[0-0,45)	$X_{1.1} = \{(0;0); (0,125;1); (0,3;1); (0,45;0)\}$	Медленное время выполнения операции, в соответствии с нормой выработки

Продолжение таблицы 10

Уровень состояния оператора	Характеристика	Интервалы	Условия принятия решения	Дефазификатор нечеткого множества
	X ₂	[0-0,4)	$X_{2,1} = \{(0,0;0); (0,2;1,0); (0,3;1,0); (0,4;0)\}$	Технологическая операция выполняется неправильно
	X ₃	[0-0,3)	$X_{3,1} = \{(0,0;0); (0,225;1,0); (0,275;1,0); (0,35;0)\}$	Технологическая операция сложная
	X ₄	[0-0,4)	$X_{4,1} = \{(0,0;0); (0,25;1,0); (0,30;1,0); (0,4;0)\}$	Высокий уровень стресса, сильно влияющий на работу
Уровень 2 Нормальное состояние	X ₁	[0,3-0,75)	$X_{1,2} = \{(0,3;0); (0,4;1); (0,6;1); (0,75;0)\}$	Стандартное время выполнения операции, в соответствии с нормой выработки
	X ₂	[0,35-0,8)	$X_{2,2} = \{(0,35;0); (0,45;1,0); (0,65;1,0); (0,8;0)\}$	Технологическая операция выполняется в допустимых пределах в соответствии с документами
	X ₃	[0,3-0,8)	$X_{3,2} = \{(0,3;0); (0,425;1,0); (0,675;1,0); (0,8;0)\}$	Технологическая операция средней сложности
	X ₄	[0,375-0,775)	$X_{4,2} = \{(0,375;0); (0,45;1,0); (0,65;1,0); (0,775;0)\}$	Средний уровень стресса, не сильно влияющий на работу
Уровень 3 Хорошее состояние	X ₁	[0,7-1)	$X_{1,3} = \{(0,7;0); (0,8;1); (1,0;1)\}$	Быстрое время выполнения операции, в соответствии с нормой выработки
	X ₂	[0,75-1)	$X_{2,3} = \{(0,75;0); (0,9;1); (1,0;1,0)\}$	Технологическая операция выполняется правильно
	X ₃	[0,75-1)	$X_{3,3} = \{(0,75;0); (0,875;1); (1,0;1,0)\}$	Технологическая операция легкая
	X ₄	[0,7-1)	$X_{4,3} = \{(0,7;0); (0,825;1,0); (1,0;1,0)\}$	Низкий уровень стресса, или его отсутствие не влияющее на работу

Особую актуальность это приобретает в контексте сложных производственных систем, где требуется комплексный учет множества факторов [100], влияющих на качество и скорость производственных процессов. Адаптивные алгоритмы, интегрированные в систему управления, обеспечивают не только повышение эффективности, но и возможность

саморегуляции в условиях нестабильности, что является важным фактором в современном производстве [101].

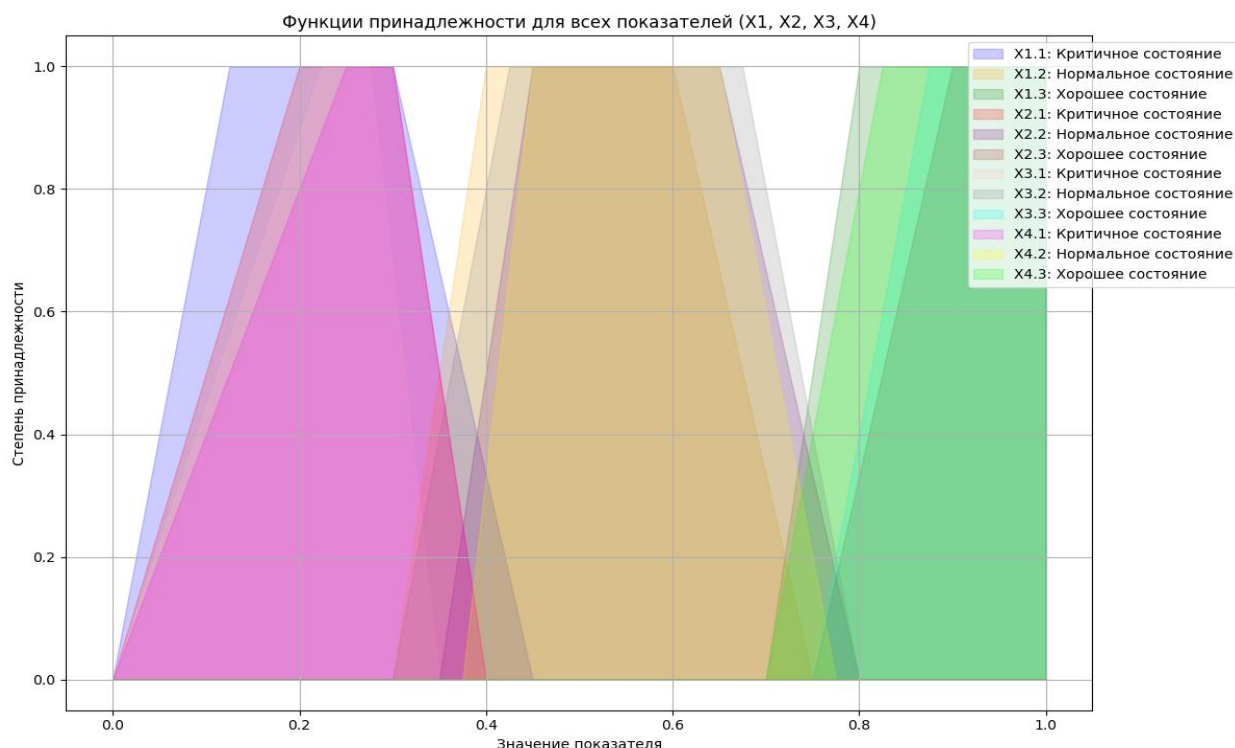


Рисунок 5 – Модель уровней состояния операторов

Ключевым аспектом данного анализа является использование функций принадлежности в контексте нечеткой логической системы. Эти функции позволяют количественно оценивать состояние оператора в реальном времени, что критично в условиях динамично изменяющейся производственной среды. Нечеткая логика, как подход, даёт возможность обрабатывать данные, полученные от различных сенсоров и систем мониторинга, выводя четкий и интегративный уровень состояния оператора. Это позволяет оперативно выявлять потенциальные проблемы и предпринимать меры для их устранения, что в свою очередь ведет к оптимизации производительности технологической линии.

Разработанная методика оценки состояния оператора на основе нечеткой логики и трапециевидных функций принадлежности представляет собой адаптивный подход с высоким уровнем вариабельности производственных систем, позволяя не только диагностировать текущее

состояние оператора, но и прогнозировать потенциальные риски, связанные с усталостью и снижением производительности. Внедрение предложенной методики способствует повышению организационно-технологической эффективности, минимизации временных и ресурсных затрат, а также улучшению качества выпускаемой продукции, что является перспективным направлением деятельности для оптимизации производственных процессов в условиях цифровой трансформации, повышения адаптивности производственных систем и повышения эффективности труда в различных технологических средах.

1.3.3 Разработка и исследование моделей функций принадлежности для оценки уровня состояния и динамики технологических процессов и переходов

В контексте изучения адаптивности организации производства и качества работ на рабочих местах, важным аспектом становится анализ состояния и динамики технологических процессов и переходов [102]. Эти элементы являются ключевыми для понимания того, как изменения в производственной системе влияют на эффективность и стабильность выполнения операций. Исследование состояния технологических процессов позволяет выявить текущие узкие места, а анализ их динамики – прогнозировать возможные риски и возможности для улучшения. Таким образом, переход к изучению технологических процессов и переходов логически продолжает анализ адаптивности, углубляя понимание взаимосвязей между организацией производства и его результативностью [103].

Как и для оценки состояния оператора, для исследования состояния процесса вводятся уровни его функционального состояния, которые интерпретируются через методы нечеткой логики. Определены показатели процесса и уровни, характеризующие состояние показателей (табл. 11).

Таблица 11 – Квалиметрическая шкала оценок характеристик классификации уровня состояния процесса (Z_n)

N_n n/n	Обозначение	Показатель	Интервал	Характеристика
1	2	3	4	5
1	Z_1	Сложность операции	[0-0,45)	$Z_{1,1}$ – Сложная
			[0,3-0,75)	$Z_{1,2}$ – Стандартная
			[0,7-1)	$Z_{1,3}$ – Легкая
2	Z_2	Норма времени на операцию	[0-0,4)	$Z_{2,1}$ – Большое
			[0,35-0,8)	$Z_{2,2}$ – Стандартное
			[0,75-1)	$Z_{2,3}$ – Малое
3	Z_3	Наличие четкой инструкции	[0-0,4)	$Z_{3,1}$ – Отсутствует
			[0,375-0,775)	$Z_{3,2}$ – Частично присутствует
			[0,7-1)	$Z_{3,3}$ – Присутствует
4	Z_4	Влияние внешних условий	[0-0,3)	$Z_{4,1}$ – Высокое
			[0,3-0,8)	$Z_{4,2}$ – Присутствует
			[0,75-1)	$Z_{4,3}$ – Отсутствует

В рамках реализации разработки условий принятия решений для каждого показателя с учетом их интервалов и уровней состояния, разработаны таблицы 12-15, содержащие нечеткие множества для показателей процесса (Z_1 - Z_4), в которых учитываются условия принятия решений о принадлежности к тому или иному уровню состояния (14-25) [104].

Таблица 12 – Сложность операции (Z_1)

Нечеткое множество	Функция принадлежности	Дефазификатор
$Z_{1,1} = \{(0;0); (0,125;1); (0,3;1); (0,45;0)\}$	$\mu_{Z_{1,1}}(z) = \begin{cases} y = 0, & 0,45 < x < 0 \\ \frac{x-0}{0,125-0}, & 0 \leq x \leq 0,125 \\ y = 1, & 0,125 < x \leq 0,3 \\ \frac{0,45-x}{0,45-0,3}, & 0,3 < x \leq 0,45 \end{cases} \quad (14)$	Групповая технологическая операция
$Z_{1,2} = \{(0,3;0); (0,4;1); (0,6;1); (0,75;0)\}$	$\mu_{Z_{1,2}}(z) = \begin{cases} y = 0, & 0,75 < x < 0,3 \\ \frac{x-0,3}{0,4-0,3}, & 0,3 \leq x \leq 0,4 \\ y = 1, & 0,4 < x \leq 0,6 \\ \frac{0,75-x}{0,75-0,6}, & 0,6 < x \leq 0,75 \end{cases} \quad (15)$	Типовая технологическая операция
$Z_{1,3} = \{(0,7;0); (0,8;1); (1,0;1)\}$	$\mu_{Z_{1,3}}(z) = \begin{cases} y = 0, & x \leq 0,7 \\ \frac{x-0,7}{0,8-0,7}, & 0,7 < x < 0,8 \\ y = 0, & x \geq 0,8 \end{cases} \quad (16)$	Единичная технологическая операция

Таблица 13 – Норма времени на операцию (Z_2)

<i>Нечеткое множество</i>	<i>Функция принадлежности</i>	<i>Дефазификатор</i>
$Z_{2.1} = \{(0,0;0);$ $(0,2;1,0); (0,3;1,0);$ $(0,4;0)\}$	$\mu_{Z_{2.1}}(z) = \left\{ \begin{array}{ll} y = 0, & 0,4 < x < 0 \\ \frac{x-0}{0,2-0}, & 0 \leq x \leq 0,2 \\ y = 1, & 0,2 < x \leq 0,3 \\ \frac{0,4-x}{0,4-0,3}, & 0,3 < x \leq 0,4 \end{array} \right\} \quad (17)$	Норма выработки ниже, чем необходимо
$Z_{2.2} = \{(0,35;0);$ $(0,45;1,0); (0,65;1,0);$ $(0,8;0)\}$	$\mu_{Z_{2.2}}(z) = \left\{ \begin{array}{ll} y = 0, & 0,8 < x < 0,35 \\ \frac{x-0,35}{0,45-0,35}, & 0,35 \leq x \leq 0,45 \\ y = 1, & 0,45 < x \leq 0,65 \\ \frac{0,8-x}{0,8-0,65}, & 0,65 < x \leq 0,8 \end{array} \right\} \quad (18)$	Норма выработки соответствует НТД
$Z_{2.3} = \{(0,75;0);$ $(0,9;1); (1,0;1,0)\}$	$\mu_{Z_{2.3}}(z) = \left\{ \begin{array}{ll} y = 0, & x \leq 0,9 \\ \frac{x-0,75}{0,9-0,75}, & 0,75 < x < 0,9 \\ y = 0, & x \geq 9 \end{array} \right\} \quad (19)$	Норма выработки выше, чем необходимо

Таблица 14 – Наличие четкой инструкции (Z_3)

<i>Нечеткое множество</i>	<i>Функция принадлежности</i>	<i>Дефазификатор</i>
$Z_{3.1} = \{(0,0;0);$ $(0,2;1,0); (0,3;1,0);$ $(0,4;0)\}$	$\mu_{Z_{3.1}}(z) = \left\{ \begin{array}{ll} y = 0, & 0,4 < x < 0 \\ \frac{x-0}{0,2-0}, & 0 \leq x \leq 0,2 \\ y = 1, & 0,2 < x \leq 0,3 \\ \frac{0,4-x}{0,4-0,3}, & 0,3 < x \leq 0,4 \end{array} \right\} \quad (20)$	Инструкция отражает все этапы технологических операций в полном объеме
$Z_{3.2} = \{(0,375;0);$ $(0,45;1,0); (0,65;1,0);$ $(0,775;0)\}$	$\mu_{Z_{3.2}}(z) = \left\{ \begin{array}{ll} y = 0, & 0,775 < x < 0,375 \\ \frac{x-0,375}{0,45-0,375}, & 0,375 \leq x \leq 0,45 \\ y = 1, & 0,45 < x \leq 0,65 \\ \frac{0,775-x}{0,775-0,65}, & 0,6 < x \leq 0,775 \end{array} \right\} \quad (21)$	Инструкция отражает этапы технологических операций
$Z_{3.3} = \{(0,7;0);$ $(0,825;1,0); (1,0;1,0)\}$	$\mu_{Z_{3.3}}(z) = \left\{ \begin{array}{ll} y = 0, & x \leq 0,7 \\ \frac{x-0,7}{0,825-0,7}, & 0,7 < x < 0,825 \\ y = 1, & x \geq 0,825 \end{array} \right\} \quad (22)$	Инструкция не отражает этапы технологических операций/инструкция отсутствует

Таблица 15 – Влияние внешних условий (Z_4)

<i>Нечеткое множество</i>	<i>Функция принадлежности</i>	<i>Дефазификатор</i>
$Z_{4.1} = \{(0,0;0);$ $(0,22;1,0);$ $(0,275;1,0);$ $(0,35;0)\}$	$\mu_{Z_{4.1}}(z) = \left\{ \begin{array}{ll} y = 0, & 0,35 < x < 0 \\ \frac{x-0}{0,22-0}, & 0 \leq x \leq 0,22 \\ y = 1, & 0,22 < x \leq 0,275 \\ \frac{0,35-x}{0,35-0,275}, & 0,275 < x \leq 0,35 \end{array} \right\} \quad (23)$	Внешние факторы сильно влияют на работу
$Z_{4.2} = \{(0,3;0);$ $(0,425;1,0);$ $(0,675;1,0); (0,8;0)\}$	$\mu_{Z_{4.2}}(z) = \left\{ \begin{array}{ll} y = 0, & 0,8 < x < 0,3 \\ \frac{x-0,3}{0,425-0,3}, & 0,3 \leq x \leq 0,425 \\ y = 1, & 0,425 < x \leq 0,675 \\ \frac{0,8-x}{0,8-0,675}, & 0,675 < x \leq 0,8 \end{array} \right\} \quad (24)$	Внешние факторы не сильно влияют на работу
$Z_{4.3} = \{(0,75;0);$ $(0,875;1); (1,0;1,0)\}$	$\mu_{Z_{4.3}}(z) = \left\{ \begin{array}{ll} y = 0, & x \leq 0,75 \\ \frac{x-0,75}{0,875-0,75}, & 0,75 < x < 0,875 \\ y = 1, & x \geq 0,875 \end{array} \right\} \quad (25)$	Внешние факторы не влияют на работу

Представленные нечеткие множества исследуемых показателей описывают возможные состояния процесса [105], как и при исследовании показателей оператора ПС. Для визуализации данных на рисунке 6 представлены графики функций принадлежности для всех состояний показателей процесса (Z_{1-4}).

В таблице 16 и рисунке 7 представлены разработанные условия принятия решения для определения исследуемых показателей к определенному уровню состояния процесса, который классифицируется четырьмя степенями [106].

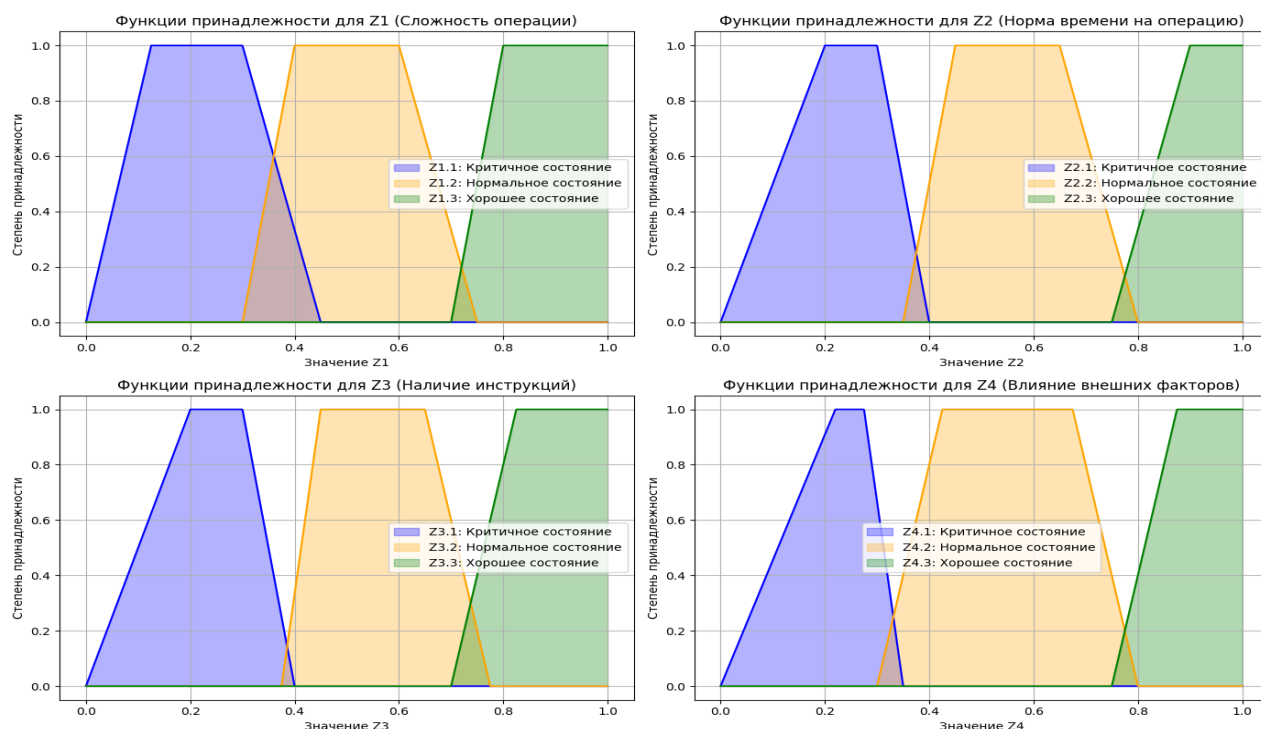


Рисунок 6 – Графики функций для показателей процесса Z_{1-4}

Таблица 16 – Уровни состояния процесса

Уровень состояния процесса	Характеристика	Интервалы	Условия принятия решения	Дефазификатор нечеткого множества
1	2	3	4	5
Уровень 1 Не стабилен	Z_1	[0-0,45)	$Z_{1.1} = \{(0,0); (0,125;1); (0,3;1); (0,45;0)\}$	Групповая технологическая операция
	Z_2	[0-0,4)	$Z_{2.1} = \{(0,0;0); (0,2;1,0); (0,3;1,0); (0,4;0)\}$	Норма выработки ниже, чем необходимо
	Z_3	[0-0,4)	$Z_{3.1} = \{(0,0;0); (0,2;1,0); (0,30;1,0); (0,4;0)\}$	Инструкция не отражает этапы технологических операций/инструкция отсутствует
	Z_4	[0-0,3)	$Z_{4.1} = \{(0,0;0); (0,22;1,0); (0,275;1,0); (0,35;0)\}$	Внешние факторы сильно влияют на работу
Уровень 2 Стабилен	Z_1	[0,3-0,75)	$Z_{1.2} = \{(0,3;0); (0,4;1); (0,6;1); (0,75;0)\}$	Типовая технологическая операция
	Z_2	[0,35-0,8)	$Z_{2.2} = \{(0,35;0); (0,45;1,0); (0,65;1,0); (0,8;0)\}$	Норма выработки соответствует НТД
	Z_3	[0,375-0,775)	$Z_{3.2} = \{(0,375;0); (0,45;1,0); (0,65;1,0); (0,775;0)\}$	Инструкция отражает этапы технологических операций

Продолжение таблицы 16

1	2	3	4	5
	Z_4	$[0,3-0,8)$	$Z_{4,2} = \{(0,3;0); (0,425;1,0); (0,675;1,0); (0,8;0)\}$	Внешние факторы не сильно влияют на работу
Уровень 3 Устойчив	Z_1	$[0,7-1)$	$Z_{1,3} = \{(0,7;0); (0,8;1); (1,0;1)\}$	Единичная технологическая операция
	Z_2	$[0,75-1)$	$Z_{2,3} = \{(0,75;0); (0,9;1); (1,0;1,0)\}$	Норма выработки выше, чем необходимо
	Z_3	$[0,7-1)$	$Z_{3,3} = \{(0,7;0); (0,825;1,0); (1,0;1,0)\}$	Инструкция отражает все этапы технологических операций в полном объеме
	Z_4	$[0,75-1)$	$Z_{4,3} = \{(0,75;0); (0,875;1); (1,0;1,0)\}$	Внешние факторы не влияют на работу

Исследование состояния элемента «процесс» производственной системы с использованием метода нечеткой логики позволяет провести глубокий анализ текущего состояния, выявить ключевые проблемы и разработать меры по оптимизации. Это способствует повышению адаптивности, эффективности и устойчивости производственной системы в условиях изменяющейся внешней среды. Применение нечеткой логики обеспечивает гибкость и точность анализа, что делает данный метод незаменимым инструментом для управления сложными производственными процессами. Применение метода нечеткой логики [106].

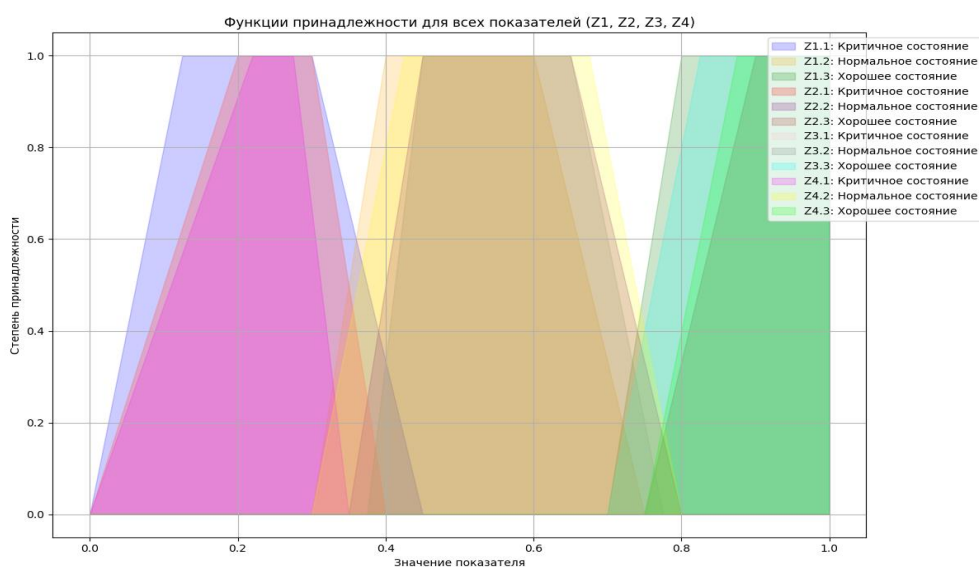


Рисунок 7 – Модель уровней состояния процесса

Формализация качественных показателей, таких как сложность операции или наличие инструкции, носят качественный характер и не могут быть точно измерены в числовых значениях, описанные с помощью нечеткой логики, могут быть преобразованы количественные данные с помощью функций принадлежности, для принятия обоснованных решений по оптимизации процессов.

В реальных производственных условиях данные часто носят нечеткий характер из-за изменчивости внешних условий, человеческого фактора и других неопределенностей, нечеткая логика позволяет работать с такими данными, учитывая их размытость и неоднозначность, что способствует быстрому реагированию на изменения в производственной среде, адаптируя процессы под новые условия, обеспечивая точность анализа за счет учета всех возможных состояний показателей и их взаимосвязей [104].

1.3.4 Разработка и исследование моделей функций принадлежности для оценки уровня состояния и надежности оборудования производственной системы

В рамках исследования адаптивности организации производства на базе разработанной структурной модели, важным аспектом становится учет взаимосвязи между эксплуатационными характеристиками оборудования и его влиянием на остальные элементы производственной системы [107]. В рамках системного подхода к организации производства особое внимание уделяется диагностике технического состояния оборудования, включая анализ деградации его функциональных параметров, оценку интенсивности отказов и прогнозирование остаточного ресурса. Это позволяет перейти к изучению надежности оборудования как ключевого фактора, определяющего устойчивость производственных процессов, минимизацию простоев и оптимизацию затрат на техническое обслуживание и ремонты [94]. Таким образом, исследование состояния и надежности оборудования становится логическим продолжением анализа производственной системы, обеспечивая

интеграцию данных о технической готовности оборудования в общую модель управления производственной системой ООП [108].

Как и для оценки состояний оператора и процесса в предыдущих разделах, для исследования состояния оборудования были определены уровни функционального состояния, интерпретируемые с помощью нечеткой логики. Определены показатели оборудования и уровни, характеризующие состояние показателей оборудования в ПС ООП (табл. 17).

Таблица 17 – Квалиметрическая шкала уровней состояния оборудования

<i>№ n/n</i>	<i>Обозначение</i>	<i>Показатель</i>	<i>Интервал</i>	<i>Характеристика</i>
1	2	3	4	5
1	Y ₁	Эффективность станка	[0-0,4)	Y _{1.1} – Отсутствует
			[0,35-0,8)	Y _{1.2} – Присутствует
			[0,75-1)	Y _{1.3} – Высокая
2	Y ₂	Уровень эргономики рабочего места	[0-0,3)	Y _{2.1} – Отсутствует
			[0,3-0,8)	Y _{2.2} – Присутствует
			[0,75-1)	Y _{2.3} – Высокая
3	Y ₃	Автоматизация оборудования	[0-0,4)	Y _{3.1} – Высокое
			[0,375-0,775)	Y _{3.2} – Присутствует
			[0,7-1)	Y _{3.3} – Отсутствует
4	Y ₄	Техническое состояние оборудования	[0-0,45)	Y _{4.1} – Отсутствует
			[0,3-0,75)	Y _{4.2} – Присутствует
			[0,7-1)	Y _{4.3} – Высокое

Для разработки условий принятия решений исследуемых показателей оборудования составлены таблицы 18-21, содержащие нечеткие множества для показателей оборудования (Y₁- Y₄), в которых учитываются условия принятия решений о принадлежности к тому или иному уровню состояния, основываясь на эксплуатационных показателях надежности и эксплуатационных показателях оборудования. (26-37).

Таблица 18 – Эффективность станка (Y_1)

<i>Нечеткое множество</i>	<i>Функция принадлежности</i>	<i>Дефазификатор</i>
$Y_{1.1} = \{(0,0;0); (0,2;1,0); (0,3;1,0); (0,4;0)\}$	$\mu_{Y_{1.1}}(y) = \left\{ \begin{array}{ll} y = 0, & 0,4 < x < 0 \\ \frac{x-0}{0,2-0}, & 0 \leq x \leq 0,2 \\ y = 1, & 0,2 < x \leq 0,3 \\ \frac{0,4-x}{0,4-0,3}, & 0,3 < x \leq 0,4 \end{array} \right\} \quad (26)$	Эффективность станка очень низкая
$Y_{1.2} = \{(0,35;0); (0,45;1,0); (0,65;1,0); (0,8;0)\}$	$\mu_{Y_{1.2}}(y) = \left\{ \begin{array}{ll} y = 0, & 0,8 < x < 0,35 \\ \frac{x-0,35}{0,45-0,35}, & 0,35 \leq x \leq 0,45 \\ y = 1, & 0,45 < x \leq 0,65 \\ \frac{0,8-x}{0,8-0,65}, & 0,65 < x \leq 0,8 \end{array} \right\} \quad (27)$	Эффективность станка стабильная
$Y_{1.3} = \{(0,75;0); (0,9;1); (1,0;1,0)\}$	$\mu_{Y_{1.3}}(y) = \left\{ \begin{array}{ll} y = 0, & x \leq 0,9 \\ \frac{x-0,75}{0,9-0,75}, & 0,75 < x < 0,9 \\ y = 0, & x \geq 9 \end{array} \right\} \quad (28)$	Эффективность станка высокая

Таблица 19 – Уровень эргономики рабочего места (Y_2)

<i>Нечеткое множество</i>	<i>Функция принадлежности</i>	<i>Дефазификатор</i>
$Y_{2.1} = \{(0,0;0); (0,22;1,0); (0,275;1,0); (0,35;0)\}$	$\mu_{Y_{2.1}}(y) = \left\{ \begin{array}{ll} y = 0, & 0,35 < x < 0 \\ \frac{x-0}{0,22-0}, & 0 \leq x \leq 0,22 \\ y = 1, & 0,22 < x \leq 0,275 \\ \frac{0,35-x}{0,35-0,275}, & 0,275 < x \leq 0,35 \end{array} \right\} \quad (29)$	Эргономика рабочего места отсутствует
$Y_{2.2} = \{(0,3;0); (0,425;1,0); (0,675;1,0); (0,8;0)\}$	$\mu_{Y_{2.2}}(y) = \left\{ \begin{array}{ll} y = 0, & 0,8 < x < 0,3 \\ \frac{x-0,3}{0,425-0,3}, & 0,3 \leq x \leq 0,425 \\ y = 1, & 0,425 < x \leq 0,675 \\ \frac{0,8-x}{0,8-0,675}, & 0,675 < x \leq 0,8 \end{array} \right\} \quad (30)$	Эргономика рабочего места средняя
$Y_{2.3} = \{(0,75;0); (0,875;1); (1,0;1,0)\}$	$\mu_{Y_{2.3}}(y) = \left\{ \begin{array}{ll} y = 0, & x \leq 0,75 \\ \frac{x-0,75}{0,875-0,75}, & 0,75 < x < 0,875 \\ y = 1, & x \geq 0,875 \end{array} \right\} \quad (31)$	Эргономика рабочего места положительная

Таблица 20 – Автоматизация оборудования (Y_3)

<i>Нечеткое множество</i>	<i>Функция принадлежности</i>	<i>Дефазификатор</i>
$Y_{3.1} = \{(0,0;0);$ $(0,2;1,0);$ $(0,30;1,0);$ $(0,4;0)\}$	$\mu_{Y_{3.1}}(y) = \left\{ \begin{array}{ll} y = 0, & 0,4 < x < 0 \\ \frac{x-0}{0,2-0}, & 0 \leq x \leq 0,2 \\ y = 1, & 0,2 < x \leq 0,3 \\ \frac{0,4-x}{0,4-0,3}, & 0,3 < x \leq 0,4 \end{array} \right\} \quad (32)$	Оборудование не автоматизировано
$Y_{3.2} = \{(0,375;0);$ $(0,45;1,0);$ $(0,65;1,0);$ $(0,775;0)\}$	$\mu_{Y_{3.2}}(y) = \left\{ \begin{array}{ll} y = 0, & 0,775 < x < 0,375 \\ \frac{x-0,375}{0,45-0,375}, & 0,375 \leq x \leq 0,45 \\ y = 1, & 0,45 < x \leq 0,65 \\ \frac{0,775-x}{0,775-0,65}, & 0,6 < x \leq 0,775 \end{array} \right\} \quad (33)$	Оборудование частично автоматизировано
$Y_{3.3} = \{(0,7;0);$ $(0,825;1,0);$ $(1,0;1,0)\}$	$\mu_{Y_{3.3}}(y) = \left\{ \begin{array}{ll} y = 0, & x \leq 0,7 \\ \frac{x-0,7}{0,825-0,7}, & 0,7 < x < 0,825 \\ y = 1, & x \geq 0,825 \end{array} \right\} \quad (34)$	Оборудование автоматизировано

Таблица 21 – Техническое состояние оборудования (Y_4)

<i>Нечеткое множество</i>	<i>Функция принадлежности</i>	<i>Дефазификатор</i>
$Y_{4.1} = \{(0;0);$ $(0,125;1); (0,3;1);$ $(0,45;0)\}$	$\mu_{Y_{4.1}}(y) = \left\{ \begin{array}{ll} y = 0, & 0,45 < x < 0 \\ \frac{x-0}{0,125-0}, & 0 \leq x \leq 0,125 \\ y = 1, & 0,125 < x \leq 0,3 \\ \frac{0,45-x}{0,45-0,3}, & 0,3 < x \leq 0,45 \end{array} \right\} \quad (35)$	Состояние оборудования плохое
$Y_{4.2} = \{(0,3;0);$ $(0,4;1); (0,6;1);$ $(0,75;0)\}$	$\mu_{Y_{4.2}}(y) = \left\{ \begin{array}{ll} y = 0, & 0,75 < x < 0,3 \\ \frac{x-0,3}{0,4-0,3}, & 0,3 \leq x \leq 0,4 \\ y = 1, & 0,4 < x \leq 0,6 \\ \frac{0,75-x}{0,75-0,6}, & 0,6 < x \leq 0,75 \end{array} \right\} \quad (36)$	Состояние оборудования приемлемое
$Y_{4.3} = \{(0,7;0);$ $(0,8;1); (1,0;1)\}$	$\mu_{Y_{4.3}}(y) = \left\{ \begin{array}{ll} y = 0, & x \leq 0,7 \\ \frac{x-0,7}{0,8-0,7}, & 0,7 < x < 0,8 \\ y = 0, & x \geq 0,8 \end{array} \right\} \quad (37)$	Состояние оборудования хорошее

Представленные нечеткие множества для исследуемых показателей описывают возможные состояния оборудования в ПС, как и при

исследовании показателей оператора и показателей процесса ПС. Для визуализации данных на рисунке 8 представлены графики функций принадлежности для всех состояний показателей оборудования Y_{1-4} , учитывая условия принятия решения о принадлежности к тому или иному уровню.

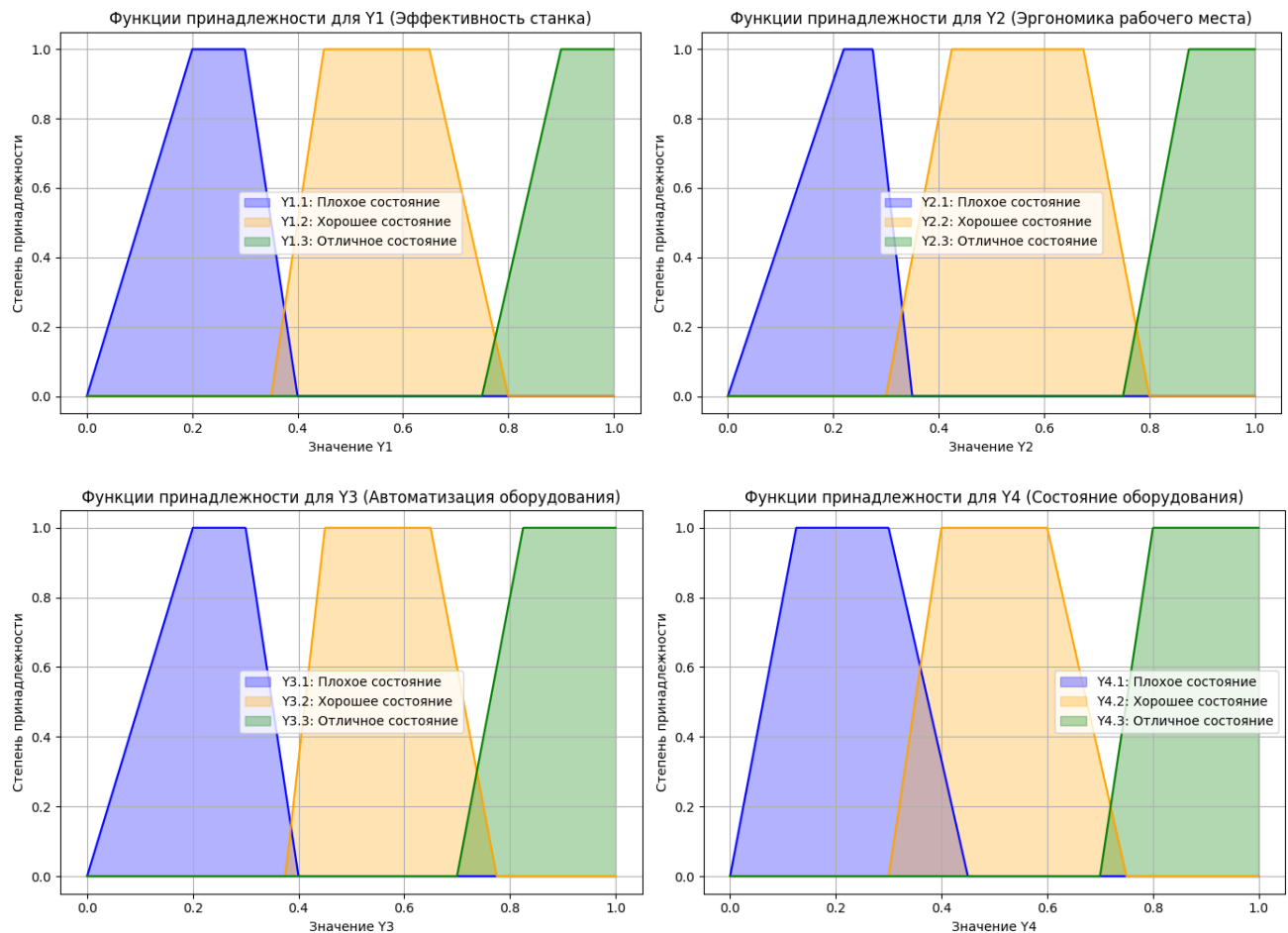


Рисунок 8 – Графики функций для показателей процесса Y_{1-4}

В таблице 22 и рисунке 9 представлены основные условия принятия решения для отношения того или иного рассматриваемого показателя к определенному уровню состояния оборудования, который классифицируется четырьмя степенями [98].

Таблица 22 – Уровни состояния оборудования

Уровень состояния оборудования	Характеристика	Интервалы	Условия принятия решения	Дефазификатор нечеткого множества
Уровень 1 Плохое состояние	Y_1	[0-0,4)	$Y_{1.1} = \{(0,0;0); (0,2;1,0); (0,3;1,0); (0,4;0)\}$	Эффективность станка очень низкая
	Y_2	[0-0,3)	$Y_{2.1} = \{(0,0;0); (0,22;1,0); (0,275;1,0); (0,35;0)\}$	Эргономика рабочего места отсутствует
	Y_3	[0-0,4)	$Z_{3.1} = \{(0,0;0); (0,2;1,0); (0,30;1,0); (0,4;0)\}$	Оборудование не автоматизированно
	Y_4	[0-0,45)	$Y_{4.1} = \{(0;0); (0,125;1); (0,3;1); (0,45;0)\}$	Состояние оборудования плохое
Уровень 2 Хорошее состояние	Y_1	[0,35-0,8)	$Y_{1.2} = \{(0,35;0); (0,45;1,0); (0,65;1,0); (0,8;0)\}$	Эффективность станка стабильная
	Y_2	[0,3-0,8)	$Y_{2.2} = \{(0,3;0); (0,425;1,0); (0,675;1,0); (0,8;0)\}$	Эргономика рабочего места средняя
	Y_3	[0,375-0,775)	$Z_{3.2} = \{(0,375;0); (0,45;1,0); (0,65;1,0); (0,775;0)\}$	Оборудование частично автоматизировано
	Y_4	[0,3-0,75)	$Y_{4.2} = \{(0,3;0); (0,4;1); (0,6;1); (0,75;0)\}$	Состояние оборудования приемлемое
Уровень 3 Отличное состояние	Y_1	[0,75-1)	$Y_{1.3} = \{(0,75;0); (0,9;1); (1,0;1,0)\}$	Эффективность станка высокая
	Y_2	[0,75-1)	$Y_{2.3} = \{(0,75;0); (0,875;1); (1,0;1,0)\}$	Эргономика рабочего места положительная
	Y_3	[0,7-1)	$Z_{3.3} = \{(0,7;0); (0,825;1,0); (1,0;1,0)\}$	Оборудование автоматизировано
	Y_4	[0,7-1)	$Y_{4.3} = \{(0,7;0); (0,8;1); (1,0;1)\}$	Состояние оборудования хорошее

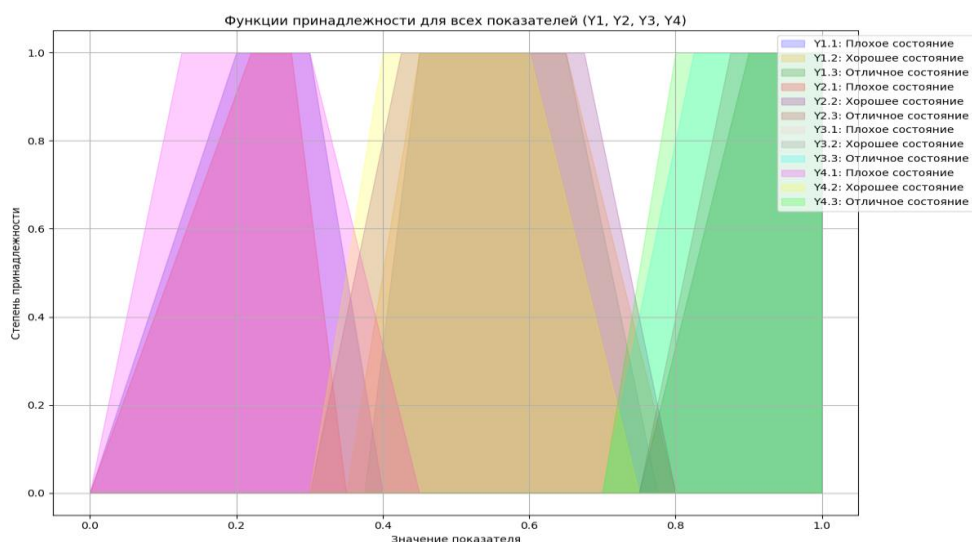


Рисунок 9 – Модель уровней оборудования

Исследование состояния элемента «оборудование» производственной системы с использованием метода нечеткой логики позволяет провести глубокий анализ текущего состояния, выявить ключевые проблемы и разработать меры по оптимизации, что обуславливается адаптивностью, производственной системы в условиях неопределенности. Применение нечеткой логики обеспечивает гибкость и точность анализа, что делает данный метод незаменимым инструментом для управления сложными производственными процессами, позволяя адаптировать модель под специфику конкретного предприятия, варьируя интервалы и функции принадлежности для каждого показателя, а также результаты анализа, представленные в виде четких значений после дефазификации, позволяют руководству предприятия принимать обоснованные решения по оптимизации использования оборудования [97. 109].

1.4 Проектирование и верификация динамической модели состояния производственной системы

1.4.1 Разработка и исследование математической модели прогнозирования состояний производственной системы

Разработка структурной модели производственной системы, включающей анализ состояний элементов «оператор-оборудование-процесс», представляет собой важный этап в понимании организации и функционирования производственных процессов, позволяя выявить ключевые компоненты системы, их взаимосвязи с основными параметрами, влияющими на производительность. Тем не менее, для более глубокого анализа и эффективного управления производственной системой необходимо перейти к следующему этапу – разработке и исследованию математической модели прогнозирования состояний системы. Этот переход обусловлен следующими ключевыми аспектами [110]:

Структурная модель, хоть и предоставляет ценную информацию о статической организации системы, но не учитывает временные изменения и

динамические процессы, происходящие в производственной среде, для более точного анализа и прогнозирования необходимо разработать математическую модель, которая может быть дополнена инструментами для прогнозирования позволяющими предсказывать изменения в системе и оценивать их влияние на производительность [111].

Также математическая модель позволит интегрировать полученные результаты исследования состояния элементов ПС [112-114], описанной в подразделе 1.4 настоящей работы, в единую систему, учитывая их взаимосвязи и взаимозависимости, что обеспечит более точное прогнозирование работы ПС. А переход к методам машинного обучения позволит не только предсказывать изменения в системе, но и тестировать различные сценарии управления, такие как распределение задач между операторами, планирование переналадки оборудования или корректировка технологических параметров.

Для реализации этих задач принято решение разработать математическую модель, которая будет учитывать: временные зависимости факторов, таких как усталость оператора, износ оборудования, изменение интенсивности поступления задач и пр., влияние изменений в одном элементе ПС (например, оборудовании) на другие (оператора и процесс), стохастический характер процессов, в виде случайных колебаний в производительности, вызванные внешними и внутренними факторами [115].

Разработана динамическая модель автоматизированного хронометража (ДМАХ), учитывающая уровень качества и степень достоверности действий оператора. В качестве показателей качества и достоверности используются факторы и их индикаторы (X, Y, Z, Q, R) [116-118]. ДМАХ основана на множественной линейной регрессии, которая позволяет установить зависимость скорости выполнения операций (V) от факторов X, Y, Z, Q, R (38) [43]:

$$V = \beta_0 + \beta_1 * X_1 + \beta_2 * X_2 + \dots + \beta_5 * X_5 + \beta_6 * Y_1 + \dots + \beta_{10} * Y_5 + \beta_{11} * Z_1 + \dots + \beta_{14} * Z_4 + \beta_{15} * Q + \beta_{16} * R + \varepsilon, \quad (38)$$

где: X_i - физиологические и психологические факторы, такие как физическая сила, реакция, память, внимание, мотивация; Y_i - характеристики оборудования и рабочего места, такие как эргономичность, удобство, техническое состояние; Z_i - параметры технологического процесса, такие как сложность операции, объем выпуска, длительность цикла; Q_i - уровень качества действий оператора; R_i - степень достоверности действий оператора; β_i - коэффициенты регрессии, определяемые методом наименьших квадратов; ε - случайная ошибка.

Коэффициенты регрессии в уравнении (38) отражают влияние каждого фактора на производительность оператора. Определение коэффициентов регрессии методом наименьших квадратов позволяет минимизировать среднеквадратическую ошибку между прогнозируемой и фактической скоростью выполнения операций.

Для влияния факторов на качество выполнения операций построена логистическая регрессия через моделирование вероятности брака (P) в зависимости от факторов X , Y , Z (39):

$$\text{logit}(P) = \ln(P/(1-P)) = \alpha_0 + \alpha_1 * X_1 + \alpha_2 * X_2 + \dots + \alpha_5 * X_5 + \alpha_6 * Y_1 + \dots + \alpha_{10} * Y_5 + \alpha_{11} * Z_1 + \alpha_{14} * Z_4 \quad (39)$$

где, α_i - коэффициенты регрессии, определяемые методом максимального правдоподобия.

Рассматривая оператора как систему массового обслуживания с очередью заданий, определяется зависимость производительности от характеристик оборудования и организации рабочего места, через М/М/1 модель (марковский процесс прибытия, марковский процесс обслуживания, 1 канал обслуживания) [119-120], где:

λ - интенсивность поступления заданий (задач/час), μ - интенсивность обслуживания (задач/час), определяемая как функция от V , $\rho = \lambda/\mu$ - коэффициент загрузки системы

Производительность системы (Π) определяется как количество обслуженных заявок в единицу времени (40):

$$\Pi = \mu(1-P_0) \quad (40)$$

где P_0 - вероятность простоя системы, вычисляемая по формуле (41):

$$P_0 = 1 - \rho \quad (41)$$

Общее количество заказов за отчетный период будет составлять сумму всех типов изделий и их количество (42):

$$\sum ABC...n = A + B + C... + n \quad (42)$$

Где A – количество продукции типа «А», B – количество продукции типа «В», C – количество продукции типа «С», n – количество типов продукции.

Исследование влияния параметров технологического процесса на временные затраты будет складываться из всех видов временных затрат на реализацию процесса, учитывая группы параметров (43), переменных (44) и ограничений (45).

$$\langle n, m, T, R_i, D_i, P_i, t_i, t_j, C_i \rangle, \quad (43)$$

где n – количество типов продукции, m – количество производственных циклов, $T_{\text{общ}}$ – длительность производственного цикла, $R_i = \{R_1...R_n\}$ – длительность переналадки оборудования для каждого типа продукции, $D_i = \{D_1...D_n\}$ – длительность приработки оборудования для каждого типа продукции. $P_n = \{P_1...P_{ni}\}$ – вероятность появления каждого типа продукции, $t_i = \{t_1...t_n\}$ – время выполнения операции для каждого типа продукции, $t_j = \{t_1...t_m\}$ – время выполнения операции для каждого производственного цикла, $C_i = \{C_1...C_n\}$ – стоимость переналадки оборудования для каждого типа продукции.

$$\langle X_{ij}, C_i, C_j \rangle, \quad (44)$$

где $X_{ij} = \{X_1...X_i; X_1...X_j\}$ – количество продукции типа i , произведенной за производственный цикл j , $C_i = \{C_1...C_n\}$ – стоимость производства продукции типа i , $C_j = \{C_1...C_m\}$ – общая стоимость производства за производственный цикл j .

Ограничения, накладываемые на математическую модель, учитывают суммарные затраты различных видов ресурсного обеспечения для реализации ПП (45-49):

Общая стоимость производства за производственный цикл j равна сумме стоимостей производства каждого типа продукции (45).

$$C_j = \sum_{i=1}^n C_i * X_{ij} \quad (45)$$

Общее количество времени, потраченного на производство каждого типа продукции, не должно превышать длительность производственного цикла (46).

$$\sum_{i=1}^n (t_{ij} * \sum_{j=1}^m X_{ij}) \leq T_{\text{длит}} \quad (46)$$

Сумма произведенной продукции каждого типа за все производственные циклы должна быть равна вероятности появления данного типа продукции (48).

$$\sum_{j=1}^m X_{ij} = P_n \quad (47)$$

Время переналадки оборудования для каждого типа продукции, не должно превышать длительность производственного цикла (48).

$$P_n \leq T_{\text{длит}} \quad (48)$$

Время приработки оборудования для каждого типа продукции не должно превышать длительность переналадки (49)

$$D_i \leq T_{\text{длит}} \quad (49)$$

Учитывая вышеперечисленные выражения, формулируется целевая функция, минимизирующая общую стоимость производства за все производственные циклы, что учитывает и минимизацию всех видов ресурсного обеспечения (50):

$$C_j = \sum_{j=1}^m C_i * X_{ij} \rightarrow \min \quad (50)$$

Разработанный математический аппарат позволяет прогнозировать производительность оператора при изменении условий труда, технологического процесса, квалификации оператора, а также комплексно подойти к оценке и оптимизации производительности оператора технологической линии, учитывая влияние различных факторов.

Разработанный математический аппарат является важным шагом в моделировании производственной системы, но для достижения более высокой точности и эффективности управления необходимо перейти к созданию динамической модели автоматизированного хронометража что позволит не только оптимизировать текущие процессы, но и адаптировать систему к изменяющимся условиям производства [115].

1.4.2 Разработка и исследование методики валидации управления производством и качеством работ в производственной системе

Реализация разработанной математической модели для динамического автоматизированного хронометража, учитывающего состояния элементов ПС ООП [79], представляет собой сложную задачу, обусловленную высокой вариативностью показателей, характеризующих данную систему. Эти показатели могут варьироваться в зависимости от специфики предприятия, типа производства, технологических процессов и других факторов [80]. Для упрощения этапа описания и идентификации исследуемых факторов, а также для автоматизации оценки их влияния на производственную систему, разработана методика валидации управления производством и качеством работ. Методика позволяет не только автоматизировать процесс оценки, но и определить степень принадлежности каждого показателя к тому или иному уровню, что является ключевым для повышения точности и достоверности анализа [43, 61, 76, 77].

Для решения данной проблемы разработана методика валидации управления технологическими процессами качеством работ в производственной системе «оператор-оборудование-процесс», учитывающая

уровень качества и степень достоверности действий оператора. В качестве показателей качества и достоверности используются факторы и их индикаторы (X, Y, Z, Q, R) (табл. 23) [90, 103-104].

Таблица 23 – Группы исследуемых факторов

Обозначение	Наименование фактора	Индикатор	Наименование индикаторов	Значение индикатора
1	2	3	4	5
Психологические и физиологические факторы (X _i)				
X ₁	Уровень стресса	X _{1.1}	Высокий	X _{1.1} = 0,25
		X _{1.2}	Присутствует	X _{1.2} = 0,5
		X _{1.3}	Отсутствует	X _{1.3} = 1,0
X ₂	Физическая усталость	X _{2.1}	Высокая	X _{2.1} = 0,25
		X _{2.2}	Присутствует	X _{2.2} = 0,5
		X _{2.3}	Отсутствует	X _{2.3} = 1,0
X ₃	Опыт работы	X _{3.1}	Отсутствует	X _{3.1} = 0,25
		X _{3.2}	Присутствует	X _{3.2} = 0,5
		X _{3.3}	Высокий	X _{3.3} = 1,0
X ₄	Эмоциональное состояние	X _{4.1}	Не стабильное	X _{4.1} = 0,25
		X _{4.2}	Нормальное	X _{4.2} = 0,5
		X _{4.3}	Стабильное	X _{4.3} = 1,0
X ₅	Уровень мотивации	X _{5.1}	Отсутствует	X _{5.1} = 0,25
		X _{5.2}	Присутствует	X _{5.2} = 0,5
		X _{5.3}	Высокий	X _{5.3} = 1,0
Характеристики оборудования и рабочего места (Y _i)				
Y ₁	Эффективность станка	Y _{1.1}	Отсутствует	Y _{1.1} = 0,25
		Y _{1.2}	Присутствует	Y _{1.2} = 0,5
		Y _{1.3}	Высокая	Y _{1.3} = 1,0
Y ₂	Уровень эргономики рабочего места	Y _{2.1}	Отсутствует	Y _{2.1} = 0,25
		Y _{2.2}	Присутствует	Y _{2.2} = 0,5
		Y _{2.3}	Высокая	Y _{2.3} = 1,0
Y ₃	Наличие вспомогательных средств	Y _{3.1}	Высокое	Y _{3.1} = 0,25
		Y _{3.2}	Присутствует	Y _{3.2} = 0,5
		Y _{3.3}	Отсутствует	Y _{3.3} = 1,0
Y ₄	Техническое состояние оборудования	Y _{4.1}	Отсутствует	Y _{4.1} = 0,25
		Y _{4.2}	Присутствует	Y _{4.2} = 0,5
		Y _{4.3}	Высокое	Y _{4.3} = 1,0
Y ₅	Автоматизация процессов	Y _{5.1}	Отсутствует	Y _{5.1} = 0,25
		Y _{5.2}	Частичная	Y _{5.2} = 0,5
		Y _{5.3}	Высокая	Y _{5.3} = 1,0
Параметры технологического процесса (Z _i)				
Z ₁	Сложность операции	Z _{1.1}	Сложная	Z _{1.1} = 0,25
		Z _{1.2}	Стандартная	Z _{1.2} = 0,5
		Z _{1.3}	Легкая	Z _{1.3} = 1,0

Продолжение таблицы 23

1	2	3	4	5
Z ₂	Время на операцию	Z _{2.1}	Большое	Z _{2.1} = 0,25
		Z _{2.2}	Стандартное	Z _{2.2} = 0,5
		Z _{2.3}	Малое	Z _{2.3} = 1,0
Z ₃	Наличие четкой инструкции	Z _{3.1}	Отсутствует	Z _{3.1} = 0,25
		Z _{3.2}	Частично присутствует	Z _{3.2} = 0,5
		Z _{3.3}	Присутствует	Z _{3.3} = 1,0
Z ₄	Влияние внешних условий	Z _{4.1}	Высокое	Z _{4.1} = 0,25
		Z _{4.2}	Присутствует	Z _{4.2} = 0,5
		Z _{4.3}	Отсутствует	Z _{4.3} = 1,0
Уровень качества действий оператора (Qn)				
Q ₁	Действия оператора	Q _{1.1}	Не правильное	Q _{1.1} = 0,25
		Q _{1.2}	Приемлемое	Q _{1.2} = 0,5
		Q _{1.3}	Правильное	Q _{1.3} = 1,0
Степень достоверности действий оператора (Rn)				
R ₁	Достоверность действий оператора	R _{1.1}	Не достоверное	R _{1.1} = 0,25
		R _{1.2}	Стабильное	R _{1.2} = 0,5
		R _{1.3}	Достоверное	R _{1.3} = 1,0

Для последующей автоматизации, основанной на предложенной математической модели (38), необходимо упростить расчет индикаторов исследуемых параметров (рис. 10). Данный алгоритм, реализует автоматизированный контроль качества производственного процесса, функционирует на основе итеративной процедуры оценки входных параметров исследуемых факторов (X_i , Y_i , Z_i , Q_n , R_n), представляющих собой наборы индикаторов (X_{im} , Y_{im} , Z_{im} , Q_{nm} , R_{nm}), характеризующих состояние производственной системы ПС ООП.

На каждом этапе оценки исследуемого фактора через итеративный цикл (J) проводится статистический анализ индикаторов. В рамках этого анализа применяется метод пороговых значений, где каждому индикатору сопоставляется набор пороговых значений, определяющих классификацию его состояния как «отличное», «нормальное» или «неудовлетворительное». Данная классификация выполняется с применением методов математического моделирования для определения оптимальных пороговых значений, обеспечивающих адекватность оценки состояния системы.

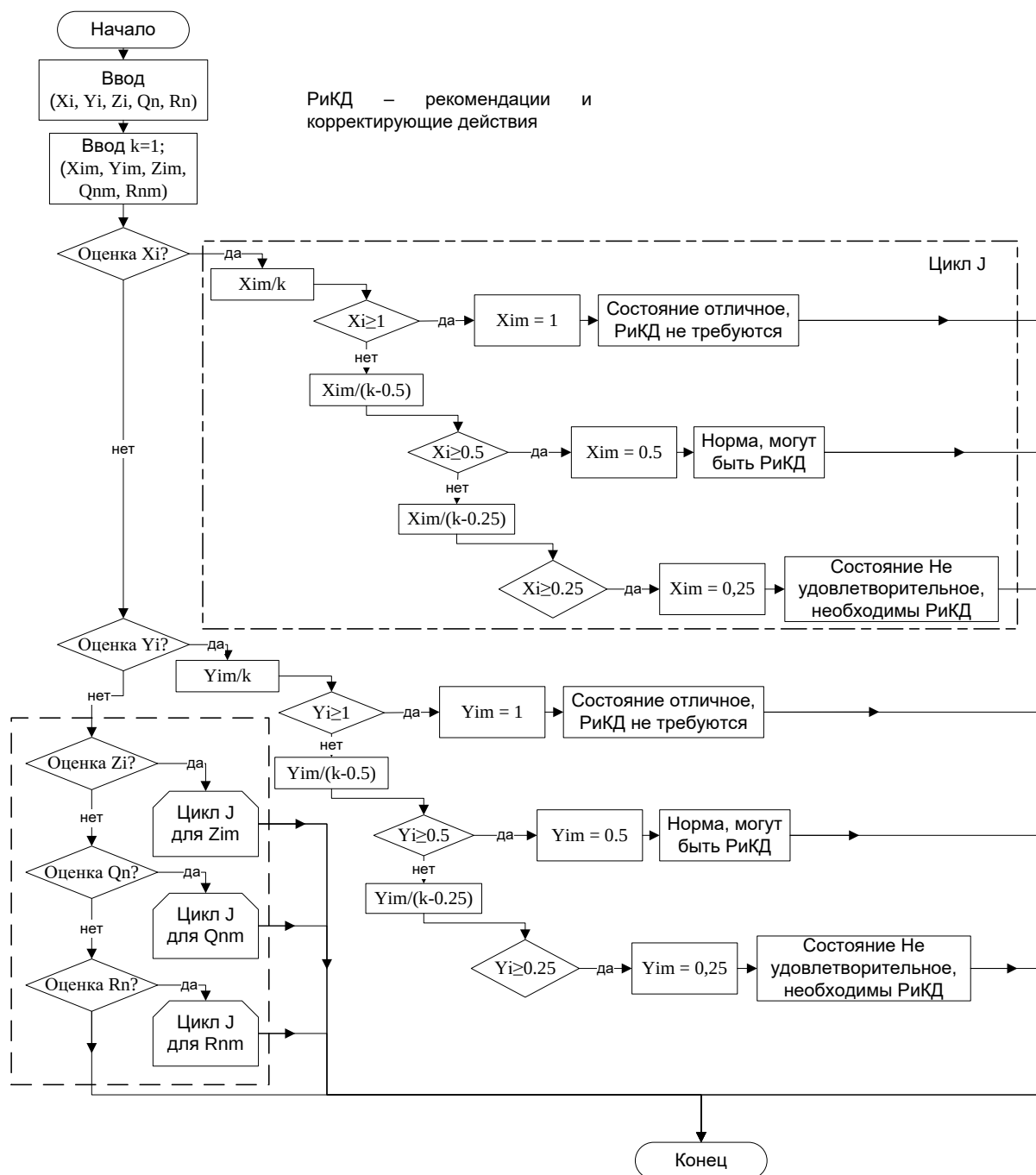


Рисунок 10 – Алгоритм расчета исследуемых факторов и их индикаторов

1.4.3 Разработка алгоритма функционирования динамической модели автоматизированного хронометража для оценки качества производственной системы

Разработанная методика валидации управления производством в системе ООП представляет собой научно обоснованный подход, позволяющий автоматизировать оценку ключевых показателей и определить степень их влияния на производственную систему, обеспечивая

прогнозирование ключевых параметров, позволяя упростить идентификацию исследуемых показателей и их интеграцию [120] в динамическую модель автоматизированного хронометража. Основой для разработки модели стали методы компьютерного зрения, анализ больших данных (Big Data) [121-127] и разработанные автором алгоритмы расчета исследуемых факторов и их индикаторов, учитывающие исследование адаптивности организации производства на рабочих местах и качества работ в производственной системе ООП. После чего, разрабатывается алгоритм ДМАХ (рис. 11) интегрирующий методы компьютерного зрения и анализа больших данных, позволяя осуществлять сбор и обработку данных с использованием высокоскоростной оптической системы, включающей в себя специализированный цифровой видеорегистратор, с ориентированной камерой на рабочую зону ПС ООП минимизируя влияние внешних факторов на качество изображения. Данное решение обеспечивает непрерывный мониторинг действий оператора и состояния оборудования в ПС. Обработка видеопотока осуществляется с применением алгоритмов компьютерного зрения, включающих детектирование и распознавание образов и движений оператора, а также автоматическую сегментацию производственных операций по изначально заданным параметрам [128-129]. Полученные данные о временных параметрах выполнения операций автоматически сопоставляются с заранее заданными стандартами времени, зафиксированными в нормативно-технической документации и базе данных технологических процессов. Блок данных автоматического хронометража, встроенный в ДМАХ, позволяет отслеживать время выполнения различных этапов производственного процесса в режиме реального времени, выявляя отклонения от плановых показателей и включает корректирующие коэффициенты, влияющие на расчет реального времени выполнения операции. Полученные результаты визуализируются в виде интерактивных графиков и отчетов, что позволяет оперативно анализировать динамику производственного процесса и принимать оптимальные управленческие

решения с целью повышения производительности труда и качества продукции в соответствии с требованиями стандартизации и управления качеством.

Разработанный алгоритм автоматизированного хронометража, основанный на интеграции статистических методов и технологий компьютерного зрения, представляет собой инновационный инструмент для повышения эффективности ДМАХ ПС. Реализация данного подхода обеспечивает сбор, обработку и анализ данных в режиме реального времени, что позволяет оперативно адаптировать производственные процессы к изменяющимся внешним и внутренним условиям, минимизируя временные задержки и оптимизируя ресурсное планирование [120, 130].

Предложенная динамическая модель автоматизированного хронометража демонстрирует значительный потенциал для повышения точности и достоверности хронометражных измерений за счет учета множества факторов, включая психофизиологическое состояние оператора, его квалификацию и условия труда. Позволяющая не только оценивать текущую производительность оператора, но и прогнозировать ее изменения в зависимости от модификации условий труда, технологических параметров и уровня квалификации персонала. Внедрение данной модели в производственные системы ООП способствует достижению значительного экономического эффекта за счет повышения точности планирования, снижения временных затрат и улучшения качества выпускаемой продукции.

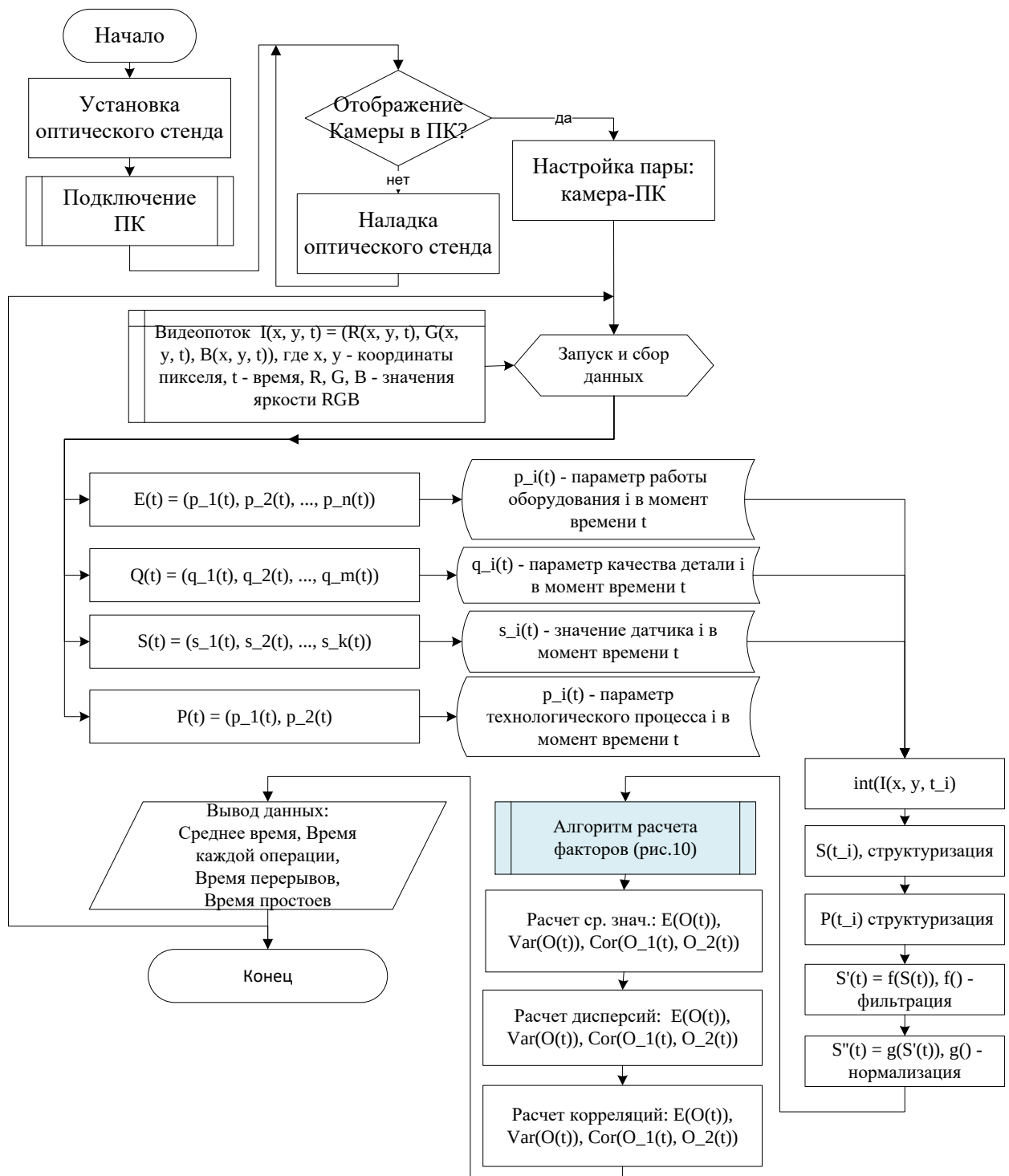


Рисунок 11 – Укрупненный алгоритм работы динамической модели автоматизированного хронометража

Реализация алгоритма на языке программирования python в приложении В.

Выводы по разделу 1

Раздел 1 посвящен комплексному исследованию, проектированию и верификации динамической модели состояний производственной системы, а также разработке методики валидации управления организацией производства. В рамках исследования проведен анализ ретроспективных технологий организации производства, исследованы проблемы традиционных подходов в условиях цифровизации, разработаны структурные и математические модели производственной системы «оператор-оборудование-процесс», а также предложены методики оценки эффективности и качества производственной системы.

Проведенный ретроспективный анализ методов организации производственных систем показал, что традиционные подходы к синхронизации процессов становятся недостаточно эффективными в условиях цифровизации производства.

Установлена необходимость внедрения бережливых производственных систем, которые позволяют минимизировать потери, повысить гибкость и адаптивность производства.

Разработан комплекс документарного обеспечения, направленный на повышение эффективности функционирования производственной системы. Этот комплекс включает стандарты, регламенты и методические рекомендации к организации бережливых производственных систем, которые обеспечивают единый подход к управлению процессами.

Разработана структурная модель функционирования производственной системы, которая учитывает взаимосвязи между элементами «оператор-оборудование-процесс».

Исследована адаптивность организации производства на рабочих местах, что позволило выявить ключевые факторы, влияющие на качество работ и производительность, что стало основой для разработки динамической модели.

Разработана математическая модель прогнозирования состояний производственной системы, которая учитывает влияние физиологических, психологических, технических и технологических факторов, основанная на методах регрессионного анализа, теории массового обслуживания и системной динамики, что обеспечивает высокую точность прогнозов.

Предложена методика валидации, которая позволяет автоматизировать оценку ключевых показателей и определить степень их влияния на производственную систему, включая использование методов компьютерного зрения, анализа больших данных и интеграции специализированных алгоритмов, обеспечивая высокую достоверность результатов.

Разработана методика оценки эффективности, которая позволяет анализировать ключевые показатели, такие как производительность, время выполнения заказов, уровень брака и затраты на производство, обеспечивая комплексный подход к оценке качества работ и функционирования системы, что позволяет выявлять узкие места и разрабатывать меры по их устранению.

Проведенные исследования и разработки позволили создать научно обоснованную основу для проектирования и верификации динамической модели состояний производственной системы. Разработанные модели и методики обеспечивают сокращение временных потерь при выполнении технологических операций в ПС ООП на 5-10%, что способствует повышению общей производительности и оптимизации производственной системы в целом.

Результаты, полученные в разделе 1, являются фундаментом для дальнейшего исследования и внедрения предложенных решений в практическую деятельность предприятий с целью повышения их конкурентоспособности и эффективности функционирования.

Раздел 2 Разработка и научно-практическое совершенствование модели проектирования организации бережливых производственных систем

2.1 Научно-практическое совершенствование моделей и методов проектирования бережливых производственных систем

В рамках исследования уделяется внимание научно-практическому совершенствованию моделей и методов проектирования бережливых производственных систем (БПС), поскольку является наиболее эффективным подходом к организации производственных процессов, направленных на минимизацию потерь, повышение производительности и качества продукции.

Традиционные методы Lean, такие как 5S, Kaizen, Value Stream Mapping (VSM) и Total Productive Maintenance (TPM) [131-146], были разработаны для аналоговых процессов и требуют адаптации к современным условиям цифровизации производства [147-151]. Для определения набора моделей и методов, которые лягут в основу модели проектирования бережливой производственной системы, необходимо проанализировать существующие подходы и их применимость в условиях цифровой трансформации (табл. 24).

Таблица 24 – Существующие модели и методы для проектирования бережливых производственных систем

<i>Модель / Метод</i>	<i>Совместимость с цифровыми технологиями</i>	<i>Гибкость и адаптивность</i>	<i>Масштабируемость</i>	<i>Эффективность в минимизации потерь</i>	<i>Простота внедрения</i>	<i>Применимость в цифровую эпоху</i>
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>
Цикл PDCA (Plan-Do-Check-Act)	Высокая (интеграция с цифровыми инструментами и анализа данных).	Высокая (цикличность позволяет адаптироваться к изменениям).	Высокая (применим как для локальных, так и для глобальных процессов).	Высокая (постоянное улучшение процессов).	Средняя (требуется обучение).	Высокая (основа для цифровой трансформации).

Продолжение таблицы 24

1	2	3	4	5	6	7
Value Stream Mapping (VSM)	Средняя (требуется адаптации для работы с цифровыми данными).	Средняя (визуализация процессов может быть ограничена в цифровой среде).	Высокая (подходит для анализа сложных процессов).	Высокая (выявление потерь и узких мест).	Низкая (требуется высокой квалификации).	Средняя (необходима интеграция с цифровыми инструментами).
Метод 5S	Низкая (ориентирован на физические рабочие места).	Низкая (ограниченная адаптивность к цифровым изменениям).	Средняя (применим для локальных процессов).	Средняя (улучшает организацию, но не устраняет цифровые потери).	Высокая (простота внедрения).	Низкая (требуется адаптации к цифровой среде).
Кайдзен (Kaizen)	Средняя (может быть интегрирована с цифровыми инструментами для анализа данных).	Высокая (непрерывное улучшение адаптивно к изменениям).	Высокая (применим для любых процессов).	Высокая (постепенное устранение потерь).	Высокая (вовлечение сотрудников).	Высокая (подходит для цифровой трансформации).
Система TPM (Total Productive Maintenance)	Высокая (интеграция с IoT для мониторинга оборудования).	Средняя (ориентирован на оборудование, а не на процессы).	Высокая (применима для всего оборудования).	Высокая (снижение простоев и потерь).	Низкая (требуется значительных ресурсов).	Высокая (подходит для цифровизации оборудования).
Six Sigma	Высокая (интеграция с Big Data и AI для анализа данных).	Средняя (ориентирован на снижение вариативности).	Высокая (применима для сложных процессов).	Высокая (снижение дефектов и потерь).	Низкая (требуется дорогостоящего обучения).	Высокая (подходит для цифровой трансформации).
Цифровые двойники (Digital Twins)	Очень высокая (основаны на цифровых технологиях).	Очень высокая (моделирование и оптимизация в реальном времени).	Высокая (применимы для сложных систем).	Высокая (точное прогнозирование и устранение потерь).	Низкая (высокая стоимость внедрения).	Очень высокая (основа цифровой трансформации).
Agile-методы	Высокая (ориентированы на гибкость и адаптивность).	Очень высокая (быстрая реакция на изменения).	Высокая (применимы для любых процессов).	Высокая (устранение потерь через быструю адаптацию).	Средняя (требуется высокой дисциплины).	Очень высокая (подходят для цифровой трансформации).
Бенчмаркинг	Средняя (требуется доступ к цифровым данным конкурентов).	Средняя (ориентирован на сравнение, а не на адаптацию).	Высокая (применим для любых процессов).	Средняя (выявление слабых мест, но не устранение потерь).	Низкая (требуется доступ к данным).	Средняя (требуется адаптации к цифровой среде).
Метод АЗ	Низкая (ориентирован на локальные проблемы).	Низкая (ограниченная адаптивность).	Низкая (применим для локальных процессов).	Средняя (решение локальных проблем).	Высокая (простота использования).	Низкая (требуется адаптации к цифровой среде).

Каждая из рассмотренных моделей и методов обладает уникальными достоинствами и недостатками, что определяет их применимость в различных условиях и для решения разнообразных задач при проектировании бережливых производственных систем (БПС). Выбор конкретного метода зависит от специфики производственной системы, поставленных целей улучшения и доступных ресурсов. Для достижения максимальной эффективности и обеспечения комплексного подхода рекомендуется использовать комбинацию нескольких методов, что позволяет компенсировать недостатки одних методов за счет сильных сторон других, создавая сбалансированный и адаптивный подход к проектированию БПС и управлению производственными процессами. В условиях цифровизации необходимо интегрировать традиционные методы Lean, адаптированные к цифровой среде, с современными технологиями, такими как IoT, Big Data, AI и цифровые двойники. Это позволяет создавать адаптивные и интеллектуальные производственные системы, способные оперативно реагировать на изменения, минимизировать потери и обеспечивать высокую эффективность, что становится основой для успешной цифровой трансформации производственных систем.

2.2 Разработка и обоснование многокритериальной базы для проектирования бережливой производственной системы

2.2.1 Корреляционная матрица для сложно структурированных поведенческих факторов и параметров технологического процесса

Разработка модели проектирования бережливой производственной системы (БПС) требует не только интеграции традиционных инструментов бережливого производства (Lean Production) с цифровыми технологиями [147, 152], но и комплексного анализа элементов [153-1] производственной системы «оператор-оборудование-процесс» (ПС ООП), достигая формирования гибкой и адаптивной системы организации производства,

способной эффективно реагировать на изменения [154] и минимизировать потери на срединных этапах жизненного цикла продукции.

В технологических процессах часто возникает необходимость постоянного мониторинга технологических операций [155], для оценки результативности предприятия, для чего также проводится анализ состояния оператора технологической линии и тех параметров, которые могут влиять на результаты процесса. Для чего необходимо определить степень взаимосвязи между различными переменными. Какие переменные являются наиболее значимыми для процесса, и как они взаимодействуют друг с другом. Такое исследование даст возможность выявить основные факторы [156], оказывающие наибольшее влияние на производительность и улучшить качество процесса, повысив его результативность и эффективность [157-158].

Для понимания объёмов производства, планирования и загрузки производственных систем необходимо детально анализировать взаимодействие элементов ПС ООП. Каждый из этих элементов (оператор, оборудование, процесс) обладает своими характеристиками и показателями, которые могут быть количественно оценены [159]. Для этого, дополнены базы показателей каждого элемента ПС ООП «оператор-оборудование-процесс», разработанные ранее в подразделе 1.3 настоящей работы, и разработаны наборы показателей организационно-технологической эффективности [157-158, 160], которые позволяют не только оценить текущее состояние каждого элемента, но и выявить взаимосвязи между ними, что является ключевым для оптимизации производственной системы [161].

Следует отметить, что в зависимости от специфики организации набор параметров, как состояния оператора, так и технологического процесса могут видоизменяться [162]. Поскольку исследуемые данные являются лингвистическими переменными, им присваиваются весовые коэффициенты (В.К.), ранжируемые по значимости в порядке убывания, на основе опыта экспертов, владеющих знаниями о протекании исследуемого технологического процесса (табл. 25-27). Также в зависимости от специфики

организации количество экспертов участвующих, в составлении матрицы влияния исследуемых факторов может меняться.

Таблица 25 – Показатели оператора ПС

<i>№ n/n</i>	<i>Поведенческие факторы оператора ПС</i>	<i>Ранжирован ный В.К. №1</i>	<i>Ранжирован ный В.К. №2</i>	<i>Ранжирован ный В.К. №3</i>
1	Длительность работы без перерывов	0,06	0,07	0,05
2	Количество ошибок, допущенных при выполнении задач	0,08	0,07	0,05
3	Скорость выполнения задач	0,07	0,08	0,15
4	Стрессоустойчивость	0,06	0,06	0,06
5	Концентрация внимания	0,04	0,06	0,06
7	Социальные навыки	0,05	0,06	0,01
8	Гибкость в переключении между задачами	0,07	0,05	0,07
9	Лояльность к работодателю	0,06	0,08	0,06
10	Коммуникабельность и умение работать в команде	0,07	0,06	0,09
11	Самодисциплина и самоконтроль	0,06	0,06	0,03
12	Мотивация к выполнению задач	0,06	0,07	0,03
13	Уровень стремления к самосовершенствованию	0,06	0,07	0,07
14	Ответственность и исполнительность	0,06	0,07	0,07
15	Устойчивость к изменениям в рабочем процессе	0,09	0,07	0,11
16	Знание технических аспектов работы	0,11	0,07	0,09
Сумма		1,00	1,00	1,00

Таблица 26 – Показатели процесса ПС

<i>№ n/n</i>	<i>Параметры процесса ПС</i>	<i>Ранжирован ный В.К. №1</i>	<i>Ранжирован ный В.К. №2</i>	<i>Ранжирован ный В.К. №3</i>
1	Скорость производства	0,07	0,05	0,03
2	Результативность	0,07	0,01	0,08
3	Время цикла производства	0,08	0,10	0,05
4	Количество брака и отходов	0,06	0,09	0,06
5	Эффективность	0,06	0,05	0,09
6	Средние общие затраты	0,06	0,05	0,08
7	Наличие четкой инструкции	0,05	0,07	0,07
8	Норма времени на операцию	0,08	0,11	0,06
9	Влияние внешних условий	0,06	0,07	0,08
10	Сложность операции	0,06	0,07	0,01
11	Ритмичность	0,07	0,09	0,12

Продолжение таблицы 26

<i>№ п/п</i>	<i>Параметры процесса ПС</i>	<i>Ранжирован ный В.К. №1</i>	<i>Ранжирован ный В.К. №2</i>	<i>Ранжирован ный В.К. №3</i>
12	Соотношение количества сбоев и время их устранения	0,07	0,04	0,06
13	Мощность потока	0,07	0,08	0,09
14	Темп потока	0,07	0,07	0,01
15	Такт потока	0,07	0,05	0,11
<i>Сумма</i>		<i>1,00</i>	<i>1,00</i>	<i>1,00</i>

Таблица 27 – Показатели оборудования ПС

<i>№ п/п</i>	<i>Параметры оборудования ПС</i>	<i>Ранжирован ный В.К. №1</i>	<i>Ранжирован ный В.К. №2</i>	<i>Ранжирован ный В.К. №3</i>
1	Общая эффективность оборудования	0,05	0,04	0,07
2	Коэффициент использования режимного фонда времени	0,05	0,02	0,07
3	Коэффициент использования планового фонда времени	0,15	0,10	0,08
4	Коэффициент сменности работы	0,06	0,08	0,06
5	Коэффициент использования сменного режима	0,06	0,05	0,06
6	Коэффициент использования рабочего времени	0,01	0,06	0,06
7	Коэффициент интенсивной нагрузки	0,07	0,07	0,05
8	Коэффициент использования оборудования	0,06	0,12	0,08
9	Износ амортизации ОФ	0,09	0,07	0,06
10	Коэффициент износа	0,03	0,06	0,06
11	Коэффициент использования парка наличного оборудования	0,03	0,09	0,07
12	Автоматизация оборудования	0,07	0,04	0,07
13	Надежность оборудования	0,07	0,08	0,07
14	Уровень эргономики рабочего места	0,11	0,07	0,07
15	Техническое состояние оборудования	0,09	0,05	0,07
<i>Сумма</i>		<i>1,00</i>	<i>1,00</i>	<i>1,00</i>

Для анализа взаимосвязей между элементами ПС ООП применяется научно-практический статистический инструментарий, включающий методы корреляционного, факторного и дисперсионного анализа [163]. На основе корреляционной матрицы выявляются степени взаимовлияния между каждой парой элементов (X_i , Y_i , Z_i), которые использованы для разработки

рекомендаций по оптимизации системы. Например, сильная отрицательная корреляция между квалификацией оператора (X_i) и частотой отказов оборудования (Y_i) может указывать на необходимость дополнительного обучения персонала или модернизации оборудования (рис. 12-14).

		№ n/n			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
		Показатели оборудования ПС			Общая эффективность оборудования	Коэф. исп. режимного фонда времени	Коэф. исп. планового фонда времени	Коэффициент сменности работы	Коэф. исп. сменного режима	Коэф. исп. рабочего времени	Коэффициент интенсивной нагрузки	Коэф. исп. оборудования	Износ амортизации ОФ	Коэффициент износа	Коэф. исп. парка наличного оборудования	Автоматизация оборудования	Надежность оборудования	Уровень эргономики рабочего места	Техническое состояние оборудования
№ n/n	Поведенческие факторы оператора ПС	В.К.			0,05	0,05	0,15	0,06	0,06	0,01	0,07	0,06	0,09	0,03	0,03	0,07	0,07	0,11	0,09
		№1	В.К.		0,04	0,02	0,1	0,08	0,05	0,06	0,07	0,12	0,07	0,06	0,09	0,04	0,08	0,07	0,05
		№2	В.К.№3		0,07	0,07	0,08	0,06	0,06	0,06	0,05	0,08	0,06	0,06	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07
1	Длительность работы без перерывов	0,06	0,07	0,05	-0,98	-0,99	0,28	0,87	-0,87	0,00	0,87	0,65	0,33	0,00	0,33	-0,87	0,87	0,00	-0,50
2	Кол-во ошибок при выполнении задач	0,08	0,07	0,05	-0,79	-0,56	0,91	0,19	-0,19	-0,76	0,94	-0,14	0,93	-0,76	-0,50	-0,19	0,19	0,76	0,33
3	Скорость выполнения задач	0,07	0,08	0,15	0,90	0,73	-0,80	-0,40	0,40	0,60	-0,99	-0,08	-0,83	0,60	0,30	0,40	-0,40	-0,60	-0,11
4	Стрессоустойчивость	0,06	0,05	0,06	0,76	0,92	0,24	-1,00	1,00	-0,50	-0,50	-0,94	0,19	-0,50	-0,76	1,00	-1,00	0,50	0,87
5	Концентрация внимания	0,04	0,06	0,06	0,19	-0,11	-0,96	0,50	-0,50	1,00	-0,50	0,76	-0,94	1,00	0,94	-0,50	0,50	-1,00	-0,87
7	Социальные навыки	0,05	0,06	0,01	-0,99	-0,90	0,58	0,65	-0,65	-0,33	0,98	0,37	0,62	-0,33	0,00	-0,65	0,65	0,33	-0,19
8	Гибкость в переключении между задачами	0,07	0,05	0,07	0,76	0,92	0,24	-1,00	1,00	-0,50	-0,50	-0,94	0,19	-0,50	-0,76	1,00	-1,00	0,50	0,87
9	Лояльность к работодателю	0,06	0,08	0,06	-0,76	-0,92	-0,24	1,00	-1,00	0,50	0,50	0,94	-0,19	0,50	0,76	-1,00	1,00	-0,50	-0,87
10	Коммуникабельность	0,07	0,06	0,09	1,00	0,95	-0,45	-0,76	0,76	0,19	-0,94	-0,50	-0,50	0,19	-0,14	0,76	-0,76	-0,19	0,33
11	Самодисциплина и самоконтроль	0,06	0,06	0,03	-0,94	-0,80	0,72	0,50	-0,50	-0,50	1,00	0,19	0,76	-0,50	-0,19	-0,50	0,50	0,50	0,00
12	Мотивация к выполнению задач	0,06	0,07	0,03	-1,00	-0,92	0,53	0,69	-0,69	-0,28	0,97	0,42	0,58	-0,28	0,05	-0,69	0,69	0,28	-0,24
13	Уровень стремления к самосовершенствованию	0,06	0,07	0,07	0,19	-0,11	-0,96	0,50	-0,50	1,00	-0,50	0,76	-0,94	1,00	0,94	-0,50	0,50	-1,00	-0,87
14	Ответственность и исполнительность	0,06	0,08	0,07	-0,33	-0,60	-0,69	0,87	-0,87	0,87	0,00	0,98	-0,65	0,87	0,98	-0,87	0,87	-0,87	-1,00
15	Устойчивость к изменениям	0,09	0,07	0,11	0,98	0,99	-0,28	-0,87	0,87	0,00	-0,87	-0,65	-0,33	0,00	-0,33	0,87	-0,87	0,00	0,50
16	Знание технических аспектов работы	0,11	0,07	0,09	0,33	0,60	0,69	-0,87	0,87	-0,87	0,00	-0,98	0,65	-0,87	-0,98	0,87	-0,87	0,87	1,00

Рисунок 12 – Корреляционная матрица пары ПС «оператор-оборудование»

Исследуя корреляционное влияние между поведенческими факторами оператора и показателями оборудования в производственной системе «оператор-оборудование», выявляются ключевые взаимосвязи между поведенческими факторами оператора и показателями оборудования, что будет использовано для оптимизации производственной системы «оператор-оборудование».

К наиболее значимым сильным положительным взаимосвязям (близкие к $r=1$), являются корреляция между «Коммуникабельностью» и «Общей

эффективностью оборудования» ($r=1.00$), что означает, что коммуникабельность оператора положительно влияет на общую эффективность оборудования. Корреляция между «Количеством ошибок при выполнении задач» и «Коэффициентом использования оборудования» ($r=0.94$), что указывает на то, что увеличение количества ошибок оператора приводит к увеличению использования оборудования, возможно, из-за необходимости повторной обработки. Корреляция между «Мотивацией к выполнению задач» и «Коэффициентом использования оборудования» составляет 0.97.

Среди ильных отрицательных взаимосвязей (близкие к $r=-1$), стоит выделить «Длительностью работы без перерывов» и «Общей эффективностью оборудования» ($r=-0.98$), что может означать, что длительная работа без перерывов снижает эффективность оборудования, из-за усталости оператора. Корреляция между «Стрессоустойчивостью» и «Коэффициентом использования оборудования» составляет ($r=-1.00$), что указывает на то, что стрессоустойчивость оператора снижает использование оборудования, из-за более стабильной работы.

Также стоит отметить слабые корреляции (близкие к 0), такие как «Концентрация внимания» и «Техническое состояние оборудования» ($r=0.00$), что указывает на отсутствие связи и отсутствие необходимости разработки рекомендаций.

		№ n/n			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
		Показатели процесса ПС			Скорость производства	Результативность	Время цикла производства	Количество брака и отходов	Эффективность	Средние общие затраты	Наличие четкой инструкции	Норма времени на операции	Влияние внешних условий	Сложность операции	Ритмичность	Соотношение количества сб	Мощность потока	Темп потока	Такт потока
№ n/ n	Поведенческие факторы оператора ПС	В.К.№1			0,07	0,07	0,08	0,06	0,06	0,06	0,05	0,08	0,06	0,06	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07
		В.К.№2			0,05	0,01	0,10	0,09	0,05	0,05	0,07	0,11	0,07	0,07	0,09	0,04	0,08	0,07	0,05
		В.К.№3			0,03	0,08	0,05	0,06	0,09	0,08	0,07	0,06	0,08	0,01	0,12	0,06	0,09	0,01	0,11
1	Длительность работы без перерывов	0,06	0,07	0,05	0,50	-0,92	0,99	0,87	-0,96	-0,98	0,00	0,99	-0,50	0,93	-0,60	-0,65	-0,50	0,87	-0,98
2	Кол-во ошибок, при выполнении задач	0,08	0,07	0,05	0,98	-0,32	0,74	0,19	-0,84	-0,79	-0,76	0,56	-0,98	0,88	-1,00	0,14	-0,98	0,94	-0,79
3	Скорость выполнения задач	0,07	0,08	0,15	-0,92	0,52	-0,87	-0,40	0,94	0,90	0,60	-0,73	0,92	-0,96	0,96	0,08	0,92	-0,99	0,90
4	Стрессоустойчивость	0,06	0,05	0,06	0,00	0,99	-0,80	-1,00	0,69	0,76	-0,50	-0,92	0,00	-0,63	0,11	0,94	0,00	-0,50	0,76
5	Концентрация внимания	0,04	0,06	0,06	-0,87	-0,38	-0,11	0,50	0,28	0,19	1,00	0,11	0,87	-0,36	0,80	-0,76	0,87	-0,50	0,19
7	Социальные навыки	0,05	0,06	0,01	0,76	-0,75	0,98	0,65	-1,00	-0,99	-0,33	0,90	-0,76	1,00	-0,83	-0,37	-0,76	0,98	-0,99
8	Гибкость в переключении между задачами	0,07	0,05	0,07	0,00	0,99	-0,80	-1,00	0,69	0,76	-0,50	-0,92	0,00	-0,63	0,11	0,94	0,00	-0,50	0,76
9	Лояльность к работодателю	0,06	0,08	0,06	0,00	-0,99	0,80	1,00	-0,69	-0,76	0,50	0,92	0,00	0,63	-0,11	-0,94	0,00	0,50	-0,76
10	Коммуникабельность	0,07	0,06	0,09	-0,65	0,84	-1,00	-0,76	1,00	1,00	0,19	-0,95	0,65	-0,98	0,74	0,50	0,65	-0,94	1,00
11	Самодисциплина и самоконтроль	0,06	0,06	0,03	0,87	-0,61	0,92	0,50	-0,97	-0,94	-0,50	0,80	-0,87	0,99	-0,92	-0,19	-0,87	1,00	-0,94
12	Мотивация к выполнению задач	0,06	0,07	0,03	0,72	-0,78	0,99	0,69	-1,00	-1,00	-0,28	0,92	-0,72	1,00	-0,80	-0,42	-0,72	0,97	-1,00
13	Уровень стремления к самосовершенствованию	0,06	0,07	0,07	-0,87	-0,38	-0,11	0,50	0,28	0,19	1,00	0,11	0,87	-0,36	0,80	-0,76	0,87	-0,50	0,19
14	Ответственность и исполнительность	0,06	0,08	0,07	-0,50	-0,79	0,40	0,87	-0,24	-0,33	0,87	0,60	0,50	0,16	0,40	-0,98	0,50	0,00	-0,33
15	Устойчивость к изменениям	0,09	0,07	0,11	-0,50	0,92	-0,99	-0,87	0,96	0,98	0,00	-0,99	0,50	-0,93	0,60	0,65	0,50	-0,87	0,98
16	Знание технических аспектов работы	0,11	0,07	0,09	0,50	0,79	-0,40	-0,87	0,24	0,33	-0,87	-0,60	-0,50	-0,16	-0,40	0,98	-0,50	0,00	0,33

Рисунок 13 – Корреляционная матрица пары ПС «оператор-процесс»

Анализируя взаимосвязи между поведенческими факторами оператора и параметрами производственного процесса, можно выделить сильные положительные корреляции (близкие к $r=1,0$), сильные отрицательные корреляции (близкие к $r=-1,0$) и слабые корреляции (близкие к $r=0$).

Так, наиболее сильные взаимосвязи «скорость выполнения задач» и «скорость производства» составляет 0,92, что интерпретируется как: увеличение скорости выполнения задач оператором положительно влияет на скорость производства. Как и корреляция между «социальными навыками» и «темпом потока» составляет 0,98, что также указывает на сильную положительную связь, указывая на то, что ошибки оператора и его социальные навыки сильно влияют на скорость производства и качество продукции.

В свою очередь, корреляция параметров «гибкость в переключении между задачами» и «количеством брака и отходов» составляет -1.00, что указывает на сильную отрицательную связь и интерпретируется как: гибкость оператора в переключении между задачами снижает количество брака в процессе производства.

Слабые корреляции, такие как между концентрацией внимания и затратами на сырье и материалы ($r=0,11$), указывают на то, что эти факторы практически не связаны между собой.

		№ n/n			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
		Показатели процесса ПС			Скорость производства	Результативность	Время цикла производства	Количество брака и отходов	Эффективность	Средние общие затраты	Наличие четкой инструкции	Норма времени на операции	Влияние внешних условий	Сложность операции	Ритмичность	Соотношение количества сбоя и время их устранения	Мощность потока	Темп потока	Такт потока
№ n/n	Показатели оборудования ПС	В.К. №1			0,07	0,07	0,08	0,06	0,06	0,06	0,05	0,08	0,06	0,06	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07
			В.К. №2	В.К. №3	0,05	0,01	0,10	0,09	0,05	0,05	0,07	0,11	0,07	0,07	0,09	0,04	0,08	0,07	0,05
					0,03	0,08	0,05	0,06	0,09	0,08	0,07	0,06	0,08	0,01	0,12	0,06	0,09	0,01	0,11
1	Общая эффективность оборудования	0,05	0,04	0,07	-0,65	0,84	-1,00	-0,76	1,00	1,00	0,19	-0,95	0,65	-0,98	0,74	0,50	0,65	-0,94	1,00
2	Кэф. исп. режимного фонда времени	0,05	0,02	0,07	-0,40	0,96	-0,97	-0,92	0,92	0,95	-0,11	-1,00	0,40	-0,89	0,50	0,74	0,40	-0,80	0,95
3	Кэф. исп. планового фонда времени	0,15	0,10	0,08	0,97	0,11	0,39	-0,24	-0,53	-0,45	-0,96	0,17	-0,97	0,60	-0,94	0,54	-0,97	0,72	-0,45
4	Коэффициент сменности работы	0,06	0,08	0,06	0,00	-0,99	0,80	1,00	-0,69	-0,76	0,50	0,92	0,00	0,63	-0,11	-0,94	0,00	0,50	-0,76
5	Кэф. исп. сменного режима	0,06	0,05	0,06	0,00	0,99	-0,80	-1,00	0,69	0,76	-0,50	-0,92	0,00	-0,63	0,11	0,94	0,00	-0,50	0,76
7	Кэф. исп. рабочего времени	0,01	0,06	0,06	-0,87	-0,38	-0,11	0,50	0,28	0,19	1,00	0,11	0,87	-0,36	0,80	-0,76	0,87	-0,50	0,19
8	Коэффициент интенсивной нагрузки	0,07	0,07	0,05	0,87	-0,61	0,92	0,50	-0,97	-0,94	-0,50	0,80	-0,87	0,99	-0,92	-0,19	-0,87	1,00	-0,94
9	Кэф. исп. оборудования	0,06	0,12	0,08	-0,33	-0,89	0,56	0,94	-0,42	-0,50	0,76	0,74	0,33	0,34	0,22	-1,00	0,33	0,19	-0,50
10	Износ амортизации ОФ	0,09	0,07	0,06	0,98	0,06	0,43	-0,19	-0,58	-0,50	-0,94	0,22	-0,98	0,64	-0,95	0,50	-0,98	0,76	-0,50
11	Коэффициент износа	0,03	0,06	0,06	-0,87	-0,38	-0,11	0,50	0,28	0,19	1,00	0,11	0,87	-0,36	0,80	-0,76	0,87	-0,50	0,19
12	Кэф. исп. парка наличного оборуд.	0,03	0,09	0,07	-0,65	-0,66	0,22	0,76	-0,05	-0,14	0,94	0,43	0,65	-0,03	0,56	-0,93	0,65	-0,19	-0,14
13	Автоматизация оборудования	0,07	0,04	0,07	0,00	0,99	-0,80	-1,00	0,69	0,76	-0,50	-0,92	0,00	-0,63	0,11	0,94	0,00	-0,50	0,76
14	Надежность оборудования	0,07	0,08	0,07	0,00	-0,99	0,80	1,00	-0,69	-0,76	0,50	0,92	0,00	0,63	-0,11	-0,94	0,00	0,50	-0,76
15	Уровень эргономики рабочего места	0,11	0,07	0,07	0,87	0,38	0,11	-0,50	-0,28	-0,19	-1,00	-0,11	-0,87	0,36	-0,80	0,76	-0,87	0,50	-0,19
16	Техническое состояние оборудования	0,09	0,05	0,07	0,50	0,79	-0,40	-0,87	0,24	0,33	-0,87	-0,60	-0,50	-0,16	-0,40	0,98	-0,50	0,00	0,33

Рисунок 14 – Корреляционная матрица пары ПС «оборудование-процесс»

На основе корреляционной матрицы, были выявлены взаимосвязи между показателями производственной системы «оборудование-процесс» и сформулированы результаты исследования: низкая эффективность оборудования: отрицательная корреляция со скоростью производства (-0.65)

указывает на необходимость повышения эффективности оборудования для улучшения качества выпускаемой продукции. Износ оборудования: сильная положительная корреляция с наличием инструкций (1.00) свидетельствует о том, что износ оборудования напрямую влияет на существующие документы и инструкции, регламентирующие правила работы с оборудованием. Надежность оборудования: сильная положительная корреляция с уровнем аварийности (1.00) указывает на то, что повышение надежности оборудования снижает аварийность. Техническое состояние оборудования: сильная положительная корреляция с результативностью (0.79) показывает, что улучшение технического состояния повышает результативность.

Анализ корреляционной матрицы позволил выявить ключевые проблемы в системе «оборудование-процесс», на основании которых будет разработана база рекомендаций для их устранения.

Полученные результаты будут использованы для разработки рекомендаций и оптимизации ПС, в том числе для улучшения качества продукции, снижения затрат и повышения эффективности производства.

2.2.2 Исследование взаимосвязи редуцированных данных факторно-дисперсионным анализом, влияющих на состояние и динамику процессов управления производственными системами

Перед разработкой базы корректирующих действий и рекомендаций для задач прогнозирования производственных систем, необходимо провести редукцию данных полученных на основе корреляционного анализа, для того, чтобы отсеять связи элементов ПС ООП которые не влияют друг на друга или слабо влияют друг на друга, поскольку в таких случаях рекомендации не несут положительного эффекта, а также необходимо сформировать группы факторов для дальнейшего удобства использования базы данных. Для подтверждения репрезентативности результатов корреляционного анализа и формирования приоритетных рекомендаций по улучшению ПС ООП применяются методы редукции данных, такие как факторный и

дисперсионный анализ. Эти методы позволяют сократить объём данных, выделяя наиболее значимые факторы, влияющие на эффективность системы. Факторный анализ помогает определить скрытые структурные взаимосвязи между элементами ПС ООП, что способствует разработке базы приоритетных рекомендаций для управления системой [164].

Для подтверждения репрезентативности показателей, формирующих приоритетные рекомендации проведена редукция данных и определены структурные классификации взаимосвязей между элементами ПС «ООП» (табл. 28-30).

Таблица 28 – Факторно-дисперсионный анализ показателей оператора ПС

№	Поведенческие факторы оператора ТП	Физический	Психологич	Время	Dфакт
		Фактор А	Фактор Б	Фактор В	
1	2	3	4	5	6
1	Длительность работы без перерывов	0,33	-0,01	0,10	2,92%
2	Количество ошибок, допущенных при вып-ии задач	0,12	0,02	-0,16	2,06%
3	Скорость выполнения задач	-0,19	-0,02	0,10	2,11%
4	Стрессоустойчивость	-0,34	0,02	-0,23	3,60%
5	Концентрация внимания	0,12	-0,04	0,30	2,82%
6	Социальные навыки	0,27	0,01	0,00	2,41%
7	Гибкость в переключении между задачами	-0,34	0,02	-0,23	3,60%
8	Лояльность к работодателю	0,34	-0,02	0,23	3,60%
9	Коммуникабельность и умение работать в команде	-0,30	0,00	-0,04	2,62%
10	Самодисциплина и самоконтроль	0,22	0,01	-0,06	2,19%
11	Мотивация к выполнению задач	0,28	0,00	0,01	2,48%
12	Уровень стремления к самосовершенствованию	0,12	-0,04	0,30	2,82%
13	Ответственность и исполнительность	0,27	-0,04	0,31	3,55%
14	Устойчивость к изменениям в рабочем процессе	-0,33	0,01	-0,10	2,92%
15	Знание технических аспектов работы	-0,27	0,04	-0,31	3,55%

Проведенный факторный анализ выявил три основных фактора, влияющих на поведенческие факторы оператора ТП: физический, психологический и фактор времени. Дисперсия каждого фактора показывает, насколько сильно он влияет на общий набор параметров.

Физический фактор (фактор А): указывает на физическую нагрузку, которую испытывает оператор во время работы. Чем выше значение фактора, тем больше нагрузка. Сильнее всего влияет на длительность работы без перерывов (0,33), стрессоустойчивость (-0,34) и гибкость в переключении между задачами (-0,34). Также имеет значительное влияние на лояльность к работодателю (0,34) и ответственность и исполнительность (0,27).

Психологический фактор (Фактор Б) отражает психологическое состояние и эмоциональный уровень оператора. Влияние этого фактора минимально. Наибольшее влияние наблюдается у стрессоустойчивости (0,02) и гибкости в переключении между задачами (0,02).

Фактор времени (Фактор В) показывает влияние временных ограничений и срочности на работу оператора. Влияет на длительность работы без перерывов (0,10), скорость выполнения задач (0,10) и концентрацию внимания (0,30). Также имеет значительное влияние на ответственность и исполнительность (0,31) и знание технических аспектов работы (-0,31).

Наибольшая дисперсия (3,60%) наблюдается у параметров стрессоустойчивости и гибкости в переключении между задачами. Что свидетельствует о наиболее подверженному влиянию всех трех факторов. Дисперсия других параметров варьируется от 2,06% до 2,92%. Низкая дисперсия (менее 2%) у параметров количество ошибок, допущенных при выполнении задач, скорость выполнения задач, социальные навыки, коммуникабельность и умение работать в команде, самодисциплина и самоконтроль, мотивация к выполнению задач, уровень стремления к самосовершенствованию и устойчивость к изменениям в рабочем процессе.

Это указывает на то, что эти параметры в меньшей степени зависят от рассматриваемых факторов.

Полученные данные позволяют лучше понять, какие факторы влияют на поведенческие факторы оператора ТП, что позволяет разрабатывать рекомендации для улучшения условий труда, обучения сотрудников и повышения их производительности, а также повышения результативности и эффективности организации с учетом принципов Дао Тойоты и бережливого производства.

Таблица 29 – Факторно-дисперсионный анализ показателей оборудования ПС

№	Показатели оборудования ПС	Эфф.	Состояние	Время	Оснащ.	D факт
		Фактор А	Фактор Б	Фактор В	Фактор Г	
1	2	3	4	5	6	7
1	Общая эффективность оборудования	-0,02	-0,06	0,23	-0,12	2,92%
2	Коэффициент использования режимного фонда времени	-0,06	0,04	0,24	-0,12	2,06%
3	Коэффициент использования планового фонда времени	-0,11	0,32	-0,04	0,05	2,11%
4	Коэффициент сменности работы	0,10	-0,17	-0,22	0,10	3,60%
5	Коэффициент использования сменного режима	-0,10	0,17	0,22	-0,10	2,82%
6	Коэффициент использования рабочего времени	0,13	-0,33	-0,03	-0,01	2,41%
7	Коэффициент интенсивной нагрузки	-0,03	0,17	-0,19	0,11	3,60%
8	Коэффициент использования оборудования	0,12	-0,25	-0,18	0,07	3,60%
9	Износ амортизации ОФ	-0,11	0,31	-0,05	0,05	2,62%
10	Коэффициент износа	0,13	-0,33	-0,03	-0,01	2,19%
11	Коэффициент использ. парка наличного оборудования	0,13	-0,31	-0,10	0,03	2,48%

Продолжение таблицы 29

1	2	3	4	5	6	7
12	Автоматизация оборудования	-0,10	0,17	0,22	-0,10	2,82%
13	Надежность оборудования	0,10	-0,17	-0,22	0,10	3,55%
14	Уровень эргономики рабочего места	-0,02	-0,06	0,23	-0,12	2,92%
15	Техническое состояние оборудования	-0,06	0,04	0,24	-0,12	3,55%

Для реализации Факторно-дисперсионного анализа показателей оборудования ПС выделены и проанализированы четыре фактора: эффективность (фактор А), состояние (фактор Б), время (Фактор В) и оснащение (Фактор Г). Каждый фактор имеет свои значения влияния на различные показатели оборудования. Фактор В чаще оказывает положительное влияние на показатели, такие как общая эффективность оборудования и техническое состояние, фактор Б имеет значительное влияние на коэффициенты использования планового фонда времени и износ амортизации. Фактор Г оказывает отрицательное влияние на большинство показателей. Наибольшая дисперсия наблюдается у коэффициентов сменности работы, интенсивной нагрузки и использования оборудования (3,60%).

Результаты анализа позволили определить, какие факторы наиболее значимы для улучшения различных показателей оборудования ПС и где необходимо сосредоточить усилия при разработке базы рекомендаций.

Таблица 30 – Факторно-дисперсионный анализ показателей процесса ПС

№	Параметры процесса ПС	Рез	Эфф	Время	Оснащ	D факт
		Фактор А	Фактор Б	Фактор В	Фактор Г	
1	2	3	4	5	6	7
1	Скорость производства	-0,07	-0,52	0,42	-0,93	34,1%
2	Результативность	0,00	0,25	-0,14	-0,12	3,3%
3	Время цикла производства	-0,04	-0,46	0,32	-0,36	12,4%

Продолжение таблицы 30

4	Количество брака и отходов	0,00	-0,19	0,09	0,25	3,3%
5	Эффективность	0,04	0,50	-0,36	0,50	17,3%
6	Средние общие затраты	0,04	0,48	-0,34	0,42	14,6%
7	Наличие четкой инструкции	0,06	0,36	-0,32	0,93	28,0%
8	Норма времени на операцию	-0,02	-0,38	0,25	-0,14	6,8%
9	Влияние внешних условий	0,07	0,52	-0,42	0,93	34,1%
10	Сложность операции	-0,05	-0,52	0,38	-0,57	20,0%
11	Ритмичность	0,07	0,54	-0,43	0,90	33,2%
12	Соотношение количества сбоев и время их устранения	-0,03	0,01	0,06	-0,54	7,8%
13	Мощность потока	0,07	0,52	-0,42	0,93	34,1%
14	Темп потока	-0,05	-0,54	0,41	-0,68	24,7%
15	Такт потока	0,04	0,48	-0,34	0,42	14,6%

По итогам проведенного анализа были выявлены четыре наиболее значимых фактора («Результативность», «Эффективность», «Время», «Оснащение») влияющими на различные параметры технологического процесса ПС. Поскольку высокая дисперсия может свидетельствовать о неустойчивости процесса, наличии чрезмерно высоких или низких значений, следует обратить внимание на факторы с наиболее высокими значениями дисперсии.

Скорость производства (34,1%). Наибольшее влияние на скорость производства оказывает фактор оснащения (Г) с отрицательным значением (-0,93), что указывает на недостаточное оснащение, которое замедляет процесс. Фактор времени (В) имеет положительное влияние (0,42), что может свидетельствовать о том, что увеличение времени на выполнение операций может компенсировать недостатки оснащения.

Влияние внешних условий (34,1%), мощность потока (34,1%) и ритмичность (33,2%). Фактор оснащения (Г) оказывает наибольшее положительное влияние (0,93), (0,93), и (0,90) соответственно, что может указывать на важность адаптации оснащения к внешним условиям.

Исследование и понимание взаимосвязей пар элементов «оператор-оборудование», «оператор-процесс», «оборудование-процесс», позволяет выделить наиболее важные связи и сфокусироваться на их устранении, в случае отрицательных зависимостей, а также на их улучшении, в случае их положительных зависимостей, позволяя оптимизировать процессы, сократить затраты и повысить производительность.

2.2.3 Разработка базы данных для рекомендаций и корректирующих действий оперативного управления состояниями бережливых производственных систем

На основе анализа данных и выявленных закономерностей разрабатывается база рекомендаций и корректирующих действий (РиКД), которые могут быть предложены в случае возникновения определённых состояний исследуемых показателей элементов ПС (табл. 31-33) [164]. Таким образом, проведенное исследование взаимосвязей элементов ПС ООП, позволяет не только диагностировать проблемы, но и оперативно реагировать на них, обеспечивая непрерывное улучшение производственной системы.

Таблица 31 – Рекомендации для показателей оператора ПС

№	<i>Показатели оператора ПС</i>	<i>Сильная отрицательная зависимость</i>	<i>Слабая отрицательная зависимость</i>	<i>Слабая положительная зависимость</i>
1	2	3	4	5
1	Длительность работы без перерывов	Внедрить регулярные перерывы для снижения усталости.	Использовать метод Pomodoro (помидора) для управления временем.	Поощрять короткие перерывы для повышения концентрации.
2	Количество ошибок при выполнении задач	Провести обучение по стандартам работы, внедрить чек-листы.	Улучшить контроль качества, внедрить системы мониторинга.	Поощрять операторов за снижение ошибок.

Продолжение таблицы 31

1	2	3	4	5
3	Скорость выполнения задач	Оптимизировать процессы, внедрить автоматизацию.	Улучшить планирование задач, снизить простои.	Поощрять операторов за высокую скорость выполнения задач.
4	Стрессоустойчивость	Проводить тренинги по управлению стрессом.	Создать комфортные условия работы.	Поощрять операторов за высокую стрессоустойчивость.
5	Концентрация внимания	Внедрить методы повышения концентрации (медитация, перерывы).	Улучшить эргономику рабочего места.	Поощрять операторов за высокую концентрацию.
6	Социальные навыки	Проводить тренинги по развитию социальных навыков.	Улучшить коммуникацию в коллективе.	Поощрять операторов за развитие социальных навыков.
7	Гибкость в переключении между задачами	Проводить обучение по эффективному переключению между задачами.	Улучшить планирование задач.	Поощрять операторов за гибкость в работе.
8	Лояльность к работодателю	Улучшить условия труда, внедрить программы мотивации.	Проводить регулярные опросы удовлетворенности сотрудников.	Поощрять операторов за лояльность.
9	Коммуникабельность и умение работать в команде	Проводить тренинги по развитию коммуникативных навыков.	Улучшить командную работу.	Поощрять операторов за развитие коммуникабельности.
10	Самодисциплина и самоконтроль	Внедрить системы обратной связи.	Проводить тренинги по самоанализу и самоконтролю.	Поощрять операторов за высокую самодисциплину.
11	Мотивация к выполнению задач	Разработать программы мотивации.	Улучшить условия труда.	Поощрять операторов за высокую мотивацию.
12	Уровень стремления к самосовершенствованию	Внедрить программы обучения и развития.	Поощрять профессиональный рост.	Поощрять операторов за стремление к самосовершенствованию.
13	Ответственность и исполнительность	Установить четкие правила и стандарты.	Проводить регулярные проверки выполнения задач.	Поощрять операторов за высокую ответственность.

Продолжение таблицы 31

1	2	3	4	5
14	Устойчивость к изменениям в рабочем процессе	Проводить тренинги по управлению изменениями.	Улучшить адаптивность операторов.	Поощрять операторов за высокую устойчивость к изменениям.
15	Знание технических аспектов работы	Проводить регулярное обучение и аттестацию.	Улучшить доступ к технической информации.	Поощрять операторов за повышение технических знаний.

Таблица 32 – Рекомендации для показателей оборудования ПС

№	Показатель	<i>Сильная отрицательная зависимость</i>	<i>Слабая отрицательная зависимость</i>	<i>Слабая положительная зависимость</i>
1	2	3	4	5
1	Общая эффективность оборудования	Провести аудит оборудования, внедрить программы технического обслуживания.	Улучшить планирование использования оборудования.	Поощрять операторов за эффективное использование оборудования.
2	Коэффициент использования режимного фонда времени	Оптимизировать графики работы оборудования.	Снизить простои.	Улучшить планирование использования оборудования.
3	Коэффициент использования планового фонда времени	Улучшить планирование использования оборудования.	Внедрить системы мониторинга.	Поощрять операторов за эффективное использование времени.
4	Коэффициент сменности работы	Увеличить количество смен для более эффективного использования оборудования.	Улучшить планирование смен.	Поощрять операторов за эффективное использование смен.
5	Коэффициент использования сменного режима	Оптимизировать сменный режим, внедрить гибкие графики работы.	Улучшить планирование смен.	Поощрять операторов за эффективное использование сменного режима.
6	Коэффициент использования рабочего времени	Улучшить планирование рабочего времени.	Минимизировать простои.	Поощрять операторов за эффективное использование рабочего времени.

Продолжение таблицы 32

1	2	3	4	5
7	Коэффициент интенсивной нагрузки	Сбалансировать нагрузку на оборудование.	Избегать перегрузок.	Поощрять операторов за эффективное использование оборудования.
8	Коэффициент использования оборудования	Улучшить планирование использования оборудования.	Снизить простои.	Поощрять операторов за эффективное использование оборудования.
9	Износ амортизации ОФ	Провести регулярное техническое обслуживание.	Обновить изношенное оборудование.	Поощрять операторов за бережное использование оборудования.
10	Коэффициент износа	Улучшить обслуживание оборудования.	Снизить износ.	Поощрять операторов за бережное использование оборудования.
11	Коэффициент использования парка наличного оборудования	Оптимизировать использование оборудования.	Снизить простои.	Поощрять операторов за эффективное использование оборудования.
12	Автоматизация оборудования	Внедрить современные системы автоматизации.	Обновить оборудование.	Поощрять операторов за использование автоматизированных систем.
13	Надежность оборудования	Улучшить техническое обслуживание.	Повысить надежность оборудования.	Поощрять операторов за бережное использование оборудования.
14	Уровень эргономики рабочего места	Улучшить эргономику рабочего места.	Снизить усталость операторов.	Поощрять операторов за соблюдение эргономических норм.
15	Техническое состояние оборудования	Провести регулярное техническое обслуживание.	Обновить оборудование.	Поощрять операторов за бережное использование оборудования.

Таблица 33 – Рекомендации для показателей процесса ПС

<i>№</i>	<i>Показатель процесса</i>	<i>Сильная отрицательная зависимость</i>	<i>Слабая отрицательная зависимость</i>	<i>Слабая положительная зависимость</i>
1	Скорость производства	Оптимизировать процессы, устранить узкие места, внедрить автоматизацию.	Улучшить планирование производства, снизить простои.	Поощрять операторов за высокую скорость выполнения задач.
2	Результативность	Улучшить контроль качества, внедрить системы мониторинга и обратной связи.	Провести обучение персонала, улучшить стандарты работы.	Поощрять операторов за высокую результативность.
3	Время цикла производства	Оптимизировать процессы, сократить время выполнения операций.	Улучшить планирование, снизить время простоя.	Поощрять операторов за сокращение времени цикла.
4	Количество брака и отходов	Улучшить контроль качества, внедрить системы предотвращения брака.	Провести обучение персонала, улучшить стандарты работы.	Поощрять операторов за снижение брака и отходов.
5	Эффективность	Оптимизировать процессы, устранить потери, внедрить методы бережливого производства (Lean).	Улучшить планирование, снизить простои.	Поощрять операторов за повышение эффективности.
6	Средние общие затраты	Оптимизировать использование ресурсов, снизить затраты на сырье и материалы.	Улучшить планирование, снизить потери.	Поощрять операторов за снижение затрат.
7	Наличие четкой инструкции	Разработать и внедрить четкие инструкции для всех операций.	Улучшить доступность инструкций, провести обучение персонала.	Поощрять операторов за соблюдение инструкций.
8	Норма времени на операцию	Оптимизировать процессы, сократить время выполнения операций.	Улучшить планирование, снизить время простоя.	Поощрять операторов за соблюдение норм времени.

Продолжение таблицы 33

<i>№</i>	<i>Показатель процесса</i>	<i>Сильная отрицательная зависимость</i>	<i>Слабая отрицательная зависимость</i>	<i>Слабая положительная зависимость</i>
9	Влияние внешних условий	Улучшить адаптацию к внешним условиям, внедрить системы мониторинга внешних факторов.	Улучшить планирование, учитывая внешние условия.	Поощрять операторов за эффективную работу в изменяющихся условиях.
10	Сложность операции	Упростить сложные операции, внедрить автоматизацию.	Провести обучение персонала, улучшить стандарты работы.	Поощрять операторов за эффективное выполнение сложных операций.
11	Ритмичность	Улучшить планирование производства, обеспечить равномерную загрузку оборудования и персонала.	Улучшить синхронизацию процессов, снизить простои.	Поощрять операторов за соблюдение ритмичности.
12	Соотношение количества сбоев и время их устранения	Улучшить техническое обслуживание, сократить время устранения сбоев.	Улучшить планирование, снизить количество сбоев.	Поощрять операторов за быстрое устранение сбоев.
13	Мощность потока	Оптимизировать использование оборудования, увеличить мощность потока.	Улучшить планирование, снизить простои.	Поощрять операторов за эффективное использование мощности потока.
14	Темп потока	Оптимизировать процессы, увеличить темп потока.	Улучшить планирование, снизить простои.	Поощрять операторов за соблюдение темпа потока.
15	Такт потока	Оптимизировать процессы, сократить такт потока.	Улучшить планирование, снизить время простоя.	Поощрять операторов за соблюдение такта потока.

Проведенное исследование взаимосвязей элементов ПС ООП позволило диагностировать возможные проблемы, и разработать механизмы оперативного реагирования на них, обеспечивая непрерывное улучшение производственной системы за счет своевременного внедрения

корректирующих действий и рекомендаций, соответствуя стандартам и принципам бережливого производства и цикла PDCA.

Разработанная база рекомендаций и корректирующих действий (РиКД), применяемая в случаях возникновения определенных состояний исследуемых показателей элементов ПС ООП представляет собой эффективный инструмент для диагностики проблем, оперативного реагирования и оптимизации процессов. Данная база составляет систематизированный набор мер, направленных на устранение выявленных проблем, оптимизацию процессов и повышение организационно-технологической эффективности производственной системы.

2.3 Разработка автоматизированной методики расчета комплексного показателя организационно-технологической эффективности производственной системы

2.3.1 Разработка и обоснование многокритериальных баз показателей качества для оценки производственной системы

Основой исследования производственной системы является взаимодействие между ее ключевыми элементами «оператор-оборудование-процесс». Оценка взаимодействия ключевых элементов формирует основу для определения организационно-технологической эффективности ПС.

На основании разработанной структурной модели функционирования ПС в подразделе 1.3 настоящей работы (рис.3) формируется организационно-технологическая модель производственной системы «оператор-оборудование-процесс» (рис. 15), включающая в себя группы показателей, влияющих на организационно-технологическую эффективность ПС ООП [51, 90, 102, 110, 156] (51).

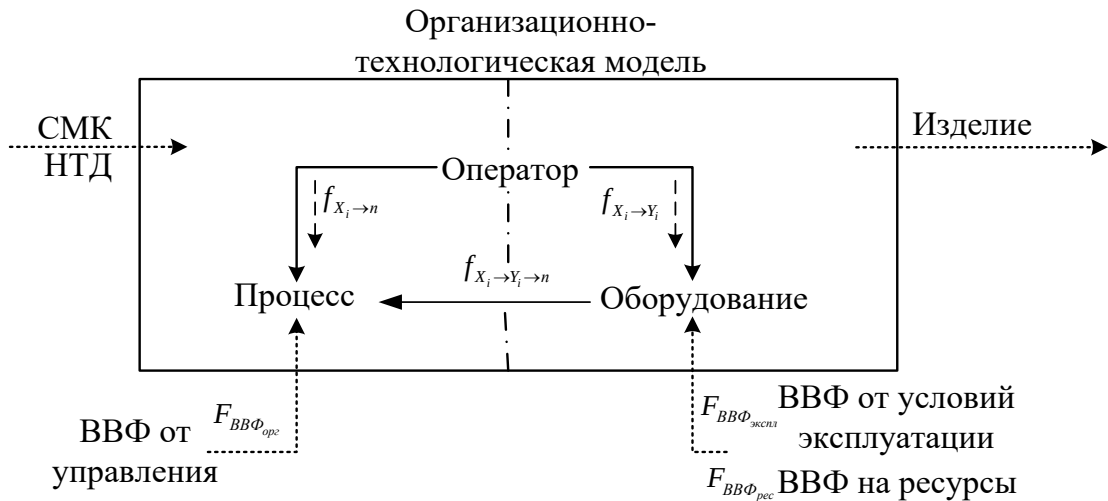


Рисунок 15 – Производственная система «оператор-оборудование-процесс»

$$Q_{OTЭ} = \left\{ \begin{array}{l} f_{X_n}(X_1, X_2, \dots, X_n) \\ f_{Y_n}(Y_1, Y_2, \dots, Y_n) \\ f_{Z_n}(Z_1, Z_2, \dots, Z_n) \\ F_{BB\Phi}(f_{BB\Phi_{орг}}, f_{BB\Phi_{экспл}}, f_{BB\Phi_{рес}}) \end{array} \right\}, \quad (51)$$

где, $Q_{OTЭ}$ – оценка организационно-технологической эффективности, f_{X_i} – система показателей оператора, f_{Y_i} – система показателей оборудования, f_{Z_i} – система показателей процесса, $f_{BB\Phi_{орг}}$ – система управляющих показателей ВВФ, $f_{BB\Phi_{экспл}}$ – система эксплуатационных ВВФ показателей, $f_{BB\Phi_{рес}}$ – система показателей ВВФ на ресурсную базу.

Организационно-технологическая модель ПС ООП, описывает взаимодействие ключевых элементов системы и их взаимосвязи в контексте организации производства и предназначена для оценки организационно-технологической эффективности (ОТЭ), оптимизации процессов, и обеспечения качества продукции.

Организационно-технологическая модель ПС ООП представляет собой комплексный инструмент для управления производственными процессами [165], обеспечивая соответствие стандартам бережливого производства, СМК и НТД [166-167], эффективное использование сырья, оборудования и человеческих ресурсов, а также анализ и учет внешних и внутренних воздействующих факторов. Модель направлена на устранение узких мест, минимизацию потерь, синхронизацию работы элементов ООП, что

способствует повышению эффективности, устойчивости производственной системы и обеспечению качества продукции в условиях изменяющейся внешней среды.

ПС ООП формируется как замкнутая система, где элементы оператор, оборудование и процесс взаимодействуют друг с другом, обеспечивая выполнение производственных задач, и поддерживая достаточный уровень организационно-технологической эффективности всей системы и минимизации влияния внешних факторов.

Для систематизации и структуризации данных по каждому исследуемому элементу производственной системы (ПС) формируется база показателей, характеризующих функционирование элементов «оператор-оборудование-процесс». Данная база включает ключевые параметры, отражающие эффективность, надежность и качество работы каждого элемента системы. Для обеспечения сопоставимости данных разрабатываются формулы расчета, которые позволяют количественно оценить каждый показатель [168-169]. Кроме того, вводится шкала нормирования, необходимая для приведения разрозненных единиц измерения к единой системе, обеспечивая создания унифицированной основы для дальнейшего корректного сравнения и анализа данных.

Разработана многокритериальная база показателей оператора ПС, в которой собраны 15 базовых показателей, которые могут быть дополнены или заменены в зависимости от специфики предприятия (табл. 34).

Таблица 34 – Многокритериальная база показателей оператора

№	Характеристики критериев	Формула	Описание	Шкала	Интерпретация шкалы
1	2	3	4	5	6
Критерии оператора технологической линии					
1	Уровень стресса (X_1)	$X_1 \langle X_{1_1}, X_{1_2}, X_{1_3} \rangle$	$X_{1.1}$ – Низкий, $X_{1.2}$ – Стабильный, $X_{1.3}$ – Высокий	Низкий – $X_{1.1}$	Низкий уровень $X_1 = 1,0$
				Стабильный – $X_{1.2}$	Средний уровень $X_1 = 0,5$
				Высокий – $X_{1.3}$	Высокий уровень $X_1 = 0,0$

Продолжение таблицы 34

1	2	3	4	5	6
2	Физическая усталость (X_2)	$X_2 \langle X_{2.1}, X_{2.2}, X_{2.3} \rangle$	$X_{2.1}$ – Низкая, $X_{2.2}$ – Средняя, $X_{2.3}$ – Высокая	Низкая – $X_{2.1}$	Низкий уровень $X_2 = 1,0$
				Средняя – $X_{2.2}$	Средний уровень $X_2 = 0,5$
				Высокая – $X_{2.3}$	Высокий уровень $X_2 = 0,0$
3	Опыт работы (X_3)	$X_3 \langle X_{3.1}, X_{3.2}, X_{3.3} \rangle$	$X_{3.1}$ – больше 3 лет, $X_{3.2}$ – от 1 до 3 лет, $X_{3.3}$ – меньше года.	Высокий уровень X_3 – больше 3 лет	Высокий уровень $X_3 = 1,0$
				Средний уровень X_3 – от 1 до 3 лет	Средний уровень $X_3 = 0,5$
				Низкий уровень X_3 – меньше года	Низкий уровень $X_3 = 0,0$
4	Эмоциональное состояние (X_4)	$X_4 \langle X_{4.1}, X_{4.2}, X_{4.3} \rangle$	$X_{4.1}$ – Хорошее, $X_{4.2}$ – Стабильное, $X_{4.3}$ – Плохое	Хорошее $X_{4.1}$	Хорошее $X_4 = 1,0$
				Стабильное $X_{4.2}$	Стабильное $X_4 = 0,5$
				Плохое $X_{4.3}$	Плохое $X_4 = 0,0$
5	Уровень мотивации (X_5)	$X_4 \langle X_{4.1}, X_{4.2}, X_{4.3} \rangle$	$X_{4.1}$ – Высокая, $X_{4.2}$ – Средняя, $X_{4.3}$ – Низкая	Высокая $X_{5.1}$	Высокая $X_5 = 1,0$
				Низкая $X_{5.2}$	Средняя $X_5 = 0,5$
				Стабильная $X_{5.3}$	Низкая $X_5 = 0,0$
6	Быстродействие (самодисциплина) (X_6)	$T_{op} = a + bH = a + H / V_{op}$	а – скрытое время реакции, в пределах 0,2 – 0,6 с. < b – время переработки одной единицы информации (0,15–0,35 м); H – количество инф-ции; V_{op} – средняя скорость переработки информации (2– 4 ед/с)	Высокий уровень $T_{op} < 6с$	Высокий уровень $X_6 = 1,0$
				Средний уровень $6с < T_{op} \leq 12с$	Средний уровень $X_6 = 0,5$
				Низкий уровень $36 < T_{op}$	Низкий уровень $X_6 = 0,0$

Продолжение таблицы 34

1	2	3	4	5	6
7	Вероятность безошибочного выполнения операций j вида (X ₇)	$P_j = (N_j - C_j) / n_j * T_j$	λ_j – интенсивность ошибок j-го вида; N _j , n _j – общее число выполненных операций j-го вида и допущенное при этом число ошибок; T _j – среднее время выполнения операций j-го вида. T _j – среднее время выполнения операции j вида	Высокая вероятность $90\% < P_j \leq 100\%$	Высокая вероятность X ₇ = 1,0
				Средняя вероятность $40\% < P_j \leq 60\%$	Средняя вероятность X ₇ = 0,5
				Низкая вероятность $0\% \leq P_j \leq 40\%$	Низкая вероятность X ₇ = 0,0
8	Интенсивность ошибок λ_j (X ₈)	$\lambda_j = \frac{n_j}{N_j T_j}$		Низкая вероятность $0\% \leq \lambda_j \leq 40\%$	Низкая вероятность X ₈ = 1,0
				Средняя вероятность $40\% < \lambda_j \leq 60\%$	Средняя вероятность X ₈ = 0,5
				Высокая вероятность $90\% < \lambda_j \leq 100\%$	Высокая вероятность X ₈ = 0,0
9	Восстанавливаемость (X ₉)	$P_e = P_k * P_{обн} * P_n$	Р _к – вероятность выдачи сигнала контрольной системой; Р _{обн} – вероятность обнаружения сигнала оператором; Р _н – вероятность исправления ошибочных действий при повторном выполнении всей операции	Высокая вероятность $80\% < P_e \leq 100\%$	Высокая вероятность X ₉ = 1,0
				Средняя вероятность $40\% < P_e \leq 80\%$	Средняя вероятность X ₉ = 0,5
				Низкая вероятность $0\% \leq P_e \leq 40\%$	Низкая вероятность X ₉ = 0,0
10	Лояльность к работодателю (X ₁₀)	$X_{10} \left\langle X_{10.1}, X_{10.2}, X_{10.3} \right\rangle$	X _{10.1} – лоялен, X _{10.2} – настроен положительно, X _{10.3} – не лоялен	Достаточный уровень X _{10.1}	Высокий уровень X ₁₀ = 1,0
				Нормальный уровень X _{10.2}	Нормальный уровень X ₁₀ = 0,5
				Низкий уровень X _{10.3}	Низкий уровень X ₁₀ = 0,0

Продолжение таблицы 34

1	2	3	4	5	6
11	Точность (X_{11})	$\Delta A = A_u + A_{on}$	Аи – истинное или номинальное значение параметра; Аоп – фактическое измеряемое или регулируемое оператором значение этого параметра.	Высокая точность $80\% < \Delta A \leq 100\%$	Высокая точность $X_{11} = 1,0$
				Средняя точность $40\% < \Delta A \leq 80\%$	Средняя точность $X_{11} = 0,5$
				Низкая точность $0\% < \Delta A \leq 40\%$	Низкая точность $X_{11} = 0,0$
12	Готовность к труду (Исполнительность) (X_{12})	$K_{py} = \tau_{cp} / \tau_{оп}$	тср – среднее значение времени реакции; топ – время реакции в данный момент работы (вычисляется по серии измерений)	Высокий уровень $K_{py} < 65с$	Высокий уровень $X_{12} = 1,0$
				Нормальный уровень $65с < K_{py} \leq 95с$	Нормальный уровень $X_{12} = 0,5$
				Низкий уровень $95с < T_{op}$	Низкий уровень $X_{12} = 0,0$
13	Время переналадки (X_{13})	$t_{nep} = t_{успр} + t_{уцио} + t_{напр} + t_{приаб} + t_{тр} + t_{сб} + t_{пр} + t_{др}$	туспр - установка приспособления; тусио - установка основного инструмента; тнапр - настройка и привязки; тприаб - обнуление инструмента; ттр - транспорт. заготовки и оснащения; тсб - сборка и комплектации; тпр - пробные ходов; тдр - другие действия.	Высокий уровень $t_{nep} < 5мин$	Высокий уровень $X_{13} = 1,0$
				Средний уровень $5мин < t_{nep} \leq 8мин$	Средний уровень $X_{13} = 0,5$
				Низкий уровень $8мин < t_{nep}$	Низкий уровень $X_{13} = 0,0$
14	Скорость работы (X_{14})	$K_{uc} = E_{\phi} / E_n$	Еф-количество фактически произведенной продукции, Ен нормированное количество произведенной продукции	Высокая скорость $80\% < K_{uc} \leq 100\%$	Высокая скорость $X_{14} = 1,0$
				Средняя скорость $35\% < K_{uc} \leq 80\%$	Средняя скорость $X_{14} = 0,5$
				Низкая скорость $0\% \leq K_{uc} \leq 35\%$	Низкая скорость $X_{14} = 0,0$

Продолжение таблицы 34

1	2	3	4	5	6
15	Социальные навыки (X_{15})	$X_{15} \langle X_{15_1}, X_{15_2}, X_{15_3} \rangle$	$X_{15.1}$ – коммуникабельность	Достаточный уровень $X_{15.1}$	Высокий уровень $X_{15} = 1,0$
			$X_{15.2}$ – коммуникабельность с отделом, $X_{15.3}$ – некоммуникабельность	Нормальный уровень $X_{15.2}$	Нормальный уровень $X_{15} = 0,5$
				Низкий уровень $X_{15.3}$	Низкий уровень $X_{15} = 0,0$

Для оценки ОТЭ показателей оператора (X_i) ПС разработана аддитивная свёртка (52):

$$S(X) = \sum_{i=1}^n X_i \cdot w_i, \quad (52)$$

где: $S(X)$ – итоговая оценка оператора производственной системы, X_i – значение i -го показателя оператора, w_i – вес i -го показателя, который отражает его важность в общей оценке.

Веса определены на основе статистического анализа, проведенного в пункте 2.2.1 подраздела 2.2 раздела 2 настоящей работы и должны удовлетворять условию нормировки: $\sum w_i = 1$

Для разработанных показателей оператора ПС $X_1, X_2, \dots, X_{15}$ и соответствующих им весов $w_1, w_2, \dots, w_{15}$, итоговая оценка S будет вычисляться как (53):

$$S(X) = w_1 \cdot X_1 + w_2 \cdot X_2 + \dots + w_{15} \cdot X_{15}, \quad (53)$$

где X_i – числовые значения каждого из 15 показателей оператора, w_i – веса, которые определяют, насколько важным является каждый показатель.

Если все показатели X_i равны 1, то аддитивная свертка $S(X)$ просто равна сумме весовых коэффициентов, поскольку сумма весовых коэффициентов нормирована на 1,0, то максимальное значение $S(X)$ также равно 1,0, исходя из этого, разработана шкала интерпретации оценки организационно-технологической эффективности для показателя оператор (X_i) ПС (табл. 35).

Таблица 35 – Шкала многокритериального параметра состояния оператора

<i>Шкала</i>	<i>Характеристика</i>	<i>Описание</i>
$0,81 < X_i < 1,0$	Высокий уровень	Характеризуется оптимальным уровнем показателя, обеспечивающим эффективную работу оператора, оборудования и процесса. Оператор демонстрирует квалификацию, мотивацию, знание охраны труда и техники безопасности, навыки командной работы, физическую подготовку, навыки работы с компьютером, коммуникативные навыки, творческий потенциал, стрессоустойчивость, уровень ответственности, навыки самоорганизации, адаптивность, уровень внимания к деталям, знания о производственных процессах, навыки работы с КИМ/КИП и оборудованием на наивысшем уровне.
$0,41 < X_i < 0,8$	Средний уровень	Характеризуется средним уровнем показателя, соответствующим базовым требованиям и позволяющим оператору эффективно выполнять свои задачи. Оператор демонстрирует квалификацию, мотивацию, знание охраны труда и техники безопасности, навыки командной работы, физическую подготовку, навыки работы с компьютером, коммуникативные навыки, стрессоустойчивость, уровень ответственности, навыки самоорганизации, знания о производственных процессах, навыки работы с инструментами и оборудованием на среднем уровне.
$0,0 < X_i < 0,4$	Низкий уровень	Характеризуется низким уровнем показателя, недостаточным для эффективной работы, может приводить к ошибкам, снижению производительности и повышенному риску опасных ситуаций. Оператор демонстрирует квалификацию, мотивацию, знание охраны труда и техники безопасности, физическую подготовку, стрессоустойчивость, уровень ответственности, уровень внимания к деталям, знания о производственных процессах, навыки работы с инструментами и оборудованием на низком уровне.

Далее, разработана многокритериальная база показателей оборудования ПС (табл. 39), обусловленная необходимостью комплексного подхода к оценке производственной системы, где элементы «оператор-оборудование» тесно взаимосвязаны. Показатели оборудования, позволяют оценить его вклад в общую эффективность производственного процесса, так, выделенные базовые показатели, могут быть дополнены или заменены в зависимости от специфики предприятия (табл. 36).

Таблица 36 – Многокритериальная база показателей оборудования (Y_i)

№	Характеристик и критериев	Формула	Описание	Шкала	Интерпретация шкалы
1	2	3	4	5	6
Критерии оборудования технологической линии					
1	Общая эффективность оборудования (Y_1)	$O.E.E. = A \cdot P \cdot Q \cdot 100\%$	А - Готовность, Р - Производительность, Q - Качество	Высокий уровень $80\% < O.E.E. \leq 100\%$	Высокий уровень $Y_1 = 1,0$
				Средний уровень $40\% < O.E.E. \leq 80\%$	Средний уровень $Y_1 = 0,5$
				Низкий уровень $0\% \leq O.E.E. \leq 40\%$	Низкий уровень $Y_1 = 0,0$
2	Коэффициент использования режимного фонда времени (Y_2)	$K_{реж} = T_{факт} / T_{реж} \cdot 100\%$	$T_{факт}$ — факт. фонд времени работы оборуд. (в стан/часах или стан/см); $T_{реж}$ — режимный фонд раб. вр. оборуд., рассчитанный из планового реж. раб. на предприятии с учетом коэф. сменности	Высокий коэф. $80\% < K_{реж} \leq 100\%$	Высокий коэф. $Y_2 = 1,0$
				Средний коэф. $40\% < K_{реж} \leq 80\%$	Средний коэф. $Y_2 = 0,5$
				Низкий коэф. $0\% \leq K_{реж} \leq 40\%$	Низкий коэф. $Y_2 = 0,0$
3	Коэффициент использования планового фонда времени (Y_3)	$K_{экс} = T_{факт} / T_{план}$	$T_{план}$ — плановый фонд раб. вр. оборуд., рассчитанный как макс. возможное раб. вр. оборуд.	Высокий коэф. $80\% < K_{экс} \leq 100\%$	Высокий коэф. $Y_3 = 1,0$
				Средний коэф. $40\% < K_{экс} \leq 80\%$	Средний коэф. $Y_3 = 0,5$
				Низкий коэф. $0\% \leq K_{экс} \leq 40\%$	Низкий коэф. $Y_3 = 0,0$
4	Коэффициент сменности работы (Y_4)	$K_{см} = T_{факт} / Ч_{заг} \cdot 100\%$	$T_{факт}$ — фактический фонд раб. вр. оборуд. (в стан/часах или стан/см); $Ч_{заг}$ — число станков, раб. в наиболее загруженную смену	Высокий коэф. $80\% < K_{см} \leq 100\%$	Высокий коэф. $Y_4 = 1,0$
				Средний коэф. $40\% < K_{см} \leq 80\%$	Средний коэф. $Y_4 = 0,5$
				Низкий коэф. $0\% \leq K_{см} \leq 40\%$	Низкий коэф. $Y_4 = 0,0$
5	Коэффициент использования сменного режима (Y_5)	$K_{исп.см.реж.} = K_{см}/n \cdot 100\%$	$K_{см}$ - Коэффициент сменности работы, n - число смен	Высокий коэф. $80\% < K_{см.реж} \leq 100\%$	Высокий коэф. $Y_5 = 1,0$
				Средний коэф. $40\% < K_{см.реж} \leq 80\%$	Средний коэф. $Y_5 = 0,5$
				Низкий коэф. $0\% \leq K_{см.реж} \leq 40\%$	Низкий коэф. $Y_5 = 0,0$

Продолжение таблицы 36

1	2	3	4	5	6
6	Коэффициент использования рабочего времени (Y ₆)	$K_{\text{мрaб}} = T_{\text{рaб}}/T_{\text{м}}$	T _{рaб} - фактический или плановый фонд раб. вр. T _м - расчетный фонд раб. вр. принятый при определении произв. мощности.	Высокий коэф. $80\% < K_{\text{мрaб}} \leq 100\%$	Высокий коэф. Y ₆ = 1,0
				Средний коэф. $40\% < K_{\text{мрaб}} \leq 80\%$	Средний коэф. Y ₆ = 0,5
				Низкий коэф. $0\% \leq K_{\text{мрaб}} \leq 40\%$	Низкий коэф. Y ₆ = 0,0
7	Коэффициент интенсивной нагрузки (Y ₇)	$K_{\text{инт}} = Q_{\text{факт}} / Q_{\text{уст}}$	Q _{факт} — фактический объем продукции в ед./вр.; Q _{уст} — установленная норма выработки (часовая мощность оборудования)	Высокий коэф. $80\% < K_{\text{мрaб}} \leq 100\%$	Высокий коэф. Y ₇ = 1,0
				Средний коэф. $40\% < K_{\text{мрaб}} \leq 80\%$	Средний коэф. Y ₇ = 0,5
				Низкий коэф. $0\% \leq K_{\text{мрaб}} \leq 40\%$	Низкий коэф. Y ₇ = 0,0
8	Автоматизация оборудования (Y ₈)	$K_a = (T_p - T_m) / T_p \cdot 100\%$	T _p – вр. изготовления ед. прод. без учёта орг. потерь, T _m – вр. ручной раб. человека-оператора на одну деталь	Высокий уровень $80\% < K_a \leq 100\%$	Высокий ур. Y ₈ = 1,0
				Средний уровень $40\% < K_a \leq 80\%$	Средний ур. Y ₈ = 0,5
				Низкий уровень $0\% \leq K_a \leq 40\%$	Низкий ур. Y ₈ = 0,0
9	Коэффициент использования оборудования (Y ₉)	$K_{\text{исп.об.}} = T_{\text{ф}} / T_{\text{н}} \cdot 100\%$	T _ф - фактически отработанное оборудованием время в часах; T _н - нормативный фонд времени в часах.	Высокий коэф. $80\% < K_{\text{исп.об.}} \leq 100\%$	Высокий коэф. Y ₉ = 1,0
				Средний коэф. $20\% < K_{\text{исп.об.}} \leq 50\%$	Средний коэф. Y ₉ = 0,5
				Низкий коэф. $0\% \leq K_{\text{исп.об.}} \leq 20\%$	Низкий коэф. Y ₉ = 0,0
10	Износ амортизации ОФ (Y ₁₀)	$I_{\text{ф}} = T_{\text{ф}} / T_{\text{н}} \cdot 100\%$	И _ф – физический износ, %, T _ф – фактический срок службы, %, T _н – нормативный срок службы, %	Низкий коэф. $0\% \leq I_{\text{ф}} \leq 40\%$	Низкий коэф. Y ₁₀ = 1,0
				Средний коэф. $40\% < I_{\text{ф}} \leq 80\%$	Средний коэф. Y ₁₀ = 0,5
				Высокий коэф. $80\% < I_{\text{ф}} \leq 100\%$	Высокий коэф. Y ₁₀ = 0,0
11	Коэффициент износа (Y ₁₁)	$K_{\text{из}} = \Phi_{\text{и}} / \Phi_{\text{перв}} \cdot 100\%$	Φ _и – стоимость износа ОФ, руб, Φ _{перв} – первоначальная или восстановительная стоимость ОФ, руб	Низкий коэф. $0\% \leq K_{\text{из}} \leq 40\%$	Низкий коэф. Y ₁₁ = 1,0
				Средний коэф. $40\% < K_{\text{из}} \leq 80\%$	Средний коэф. Y ₁₁ = 0,5
				Высокий коэф. $80\% < K_{\text{из}} \leq 100\%$	Высокий коэф. Y ₁₁ = 0,0

Продолжение таблицы 36

1	2	3	4	5	6
12	Коэффициент использования парка наличного оборудования (Y ₁₂)	$K_{\text{нал}} = O_{\text{дейст}} / O_{\text{общ}} \cdot 100\%$	O _{дейст} — кол-во действующего оборудования; O _{общ} — количество всего имеющегося оборудования, уст. /не уст.	Высокий коэф. $80\% < K_{\text{нал}} \leq 100\%$	Высокий коэф. Y ₁₂ = 1,0
				Средний коэф. $40\% < K_{\text{нал}} \leq 80\%$	Средний коэф. Y ₁₂ = 0,5
				Низкий коэф. $0\% \leq K_{\text{нал}} \leq 40\%$	Низкий коэф. Y ₁₂ = 0,0
13	Надежность оборудования (Y ₁₃)	$P(t) = \sum p_j(t), j = 1$	P(t) — надёжность системы на момент t, p _j (t) — надёжность j-го элемента системы.	Высокая $0,8 < P(t) \leq 1,0$	Высокая Y ₁₃ = 1,0
				Средняя $0,4 < P(t) \leq 0,8$	Средняя Y ₁₃ = 0,5
				Низкая $0,0 < P(t) \leq 0,4$	Низкая Y ₁₃ = 0,0
14	Уровень эргономики рабочего места (Y ₁₄)	$K_{\text{э}} = \sum T_{\text{осн}} / (\sum T_{\text{осн}} + \sum T_{\text{лишн}}) \cdot 100\%$	$\sum T_{\text{осн}}$ - суммарная продолжительность основных элементов операции, с; $\sum T_{\text{лишн}}$ - суммарная продолжительность лишних элементов операции	Высокий уровень $80\% < K_{\text{э}} \leq 100\%$	Высокий ур. Y ₁₄ = 1,0
				Средний уровень $40\% < K_{\text{э}} \leq 80\%$	Средний ур. Y ₁₄ = 0,5
				Низкий уровень $0\% \leq K_{\text{э}} \leq 40\%$	Низкий ур. Y ₁₄ = 0,0
15	Техническое состояние оборудования (Y ₁₅)	$\text{ИТСУ} = 100 \cdot \sum i(KB_i \text{ ОГП}_i) / 4$	KB _i – вес. коэф. для i-ой группы параметров тех. состояния в соответствии с прил. N6; ОГП _i - балльная оценка i-ой группы параметров тех. состояния с п. 3.4	Очень хорошее $85 < \text{ИТСУ} \leq 100$	Хорошее Y ₁₅ = 1,0
				Удовлетворительное $50 < \text{ИТСУ} \leq 70$	Среднее Y ₁₅ = 0,5
				Критическое $\text{ИТСУ} \leq 25$	Низкое Y ₁₅ = 0,0

Аналогично для оценки ОТЭ показателей оборудования (Y_i), как и для показателей оператора (X_i) ПС разработана аддитивная свёртка (54):

$$S(Y) = \sum_{i=1}^n Y_i \cdot w_i, \quad (54)$$

где: S(Y) – итоговая оценка оборудования производственной системы, Y_i – значение i-го показателя оборудования, w_i – вес i-го показателя, который отражает его важность в общей оценке.

Веса определены на основе статистического анализа, проведенного в пункте 2.2.1 подраздела 2.2 раздела 2 настоящей работы и должны удовлетворять условию нормировки: $\sum w_i=1$

Для разработанных показателей оборудования ПС $Y_1, Y_2, \dots, Y_{15}$ и соответствующих им весов $w_1, w_2, \dots, w_{15}$, итоговая оценка $S(Y)$ будет вычисляться как (55):

$$S(Y)=w_1 \cdot Y_1+w_2 \cdot Y_2+\dots+w_{15} \cdot Y_{15}, \quad (55)$$

где Y_i – числовые значения каждого из 15 показателей оборудования, w_i – веса, которые определяют, насколько важным является каждый показатель.

Если все показатели Y_i равны 1, то аддитивная свертка $S(Y)$ просто равна сумме весовых коэффициентов, поскольку сумма весовых коэффициентов нормирована на 1,0, то максимальное значение $S(Y)$ также равно 1,0, исходя из этого, разработана шкала интерпретации оценки организационно-технологической эффективности для показателя оборудования (Y_i) ПС (табл. 37).

Таблица 37 – Шкала многокритериального параметра состояния оборудования

<i>Шкала</i>	<i>Характеристика</i>	<i>Описание</i>
$0,81 < Y_i < 1,0$	Высокий уровень	Оборудование находится в идеальном состоянии, полностью соответствует всем техническим требованиям, не требует ремонта или обслуживания, обеспечивает максимальную производительность, качество и безопасность работы.
$0,41 < Y_i < 0,8$	Средний уровень	Оборудование находится в удовлетворительном состоянии, в целом соответствует техническим требованиям, может требовать периодического ремонта или обслуживания, работает удовлетворительно, обеспечивает удовлетворительную производительность и качество работы.

Продолжение таблицы 37

<i>Шкала</i>	<i>Характеристика</i>	<i>Описание</i>
$0,0 < Y_i < 0,4$	Низкий уровень	Оборудование имеет серьезные неисправности, требует срочного ремонта или замены, не способно обеспечить необходимую производительность и качество работы, представляет опасность для оператора и может привести к авариям и простоям в производстве

После детального анализа показателей оборудования, внимание переключается на технологические процессы, которые являются завершающим элементом производственной системы «оператор-оборудование-процесс». Формирование многокритериальной базы показателей процесса позволяет оценить такие аспекты, как скорость производства, время цикла, количество брака и уровень энергопотребления, отражающие эффективность взаимодействия оператора и оборудования, а также общую результативность производственной системы.

Разработана многокритериальная база показателей процесса ПС, в которой собраны 15 базовых показателей, которые могут быть дополнены или заменены в зависимости от специфики предприятия (табл. 38).

Таблица 38 – Многокритериальная база показателей процесса (Z_i)

<i>№</i>	<i>Характеристик и критериев</i>	<i>Формула</i>	<i>Описание</i>	<i>Шкала</i>	<i>Интерпретация шкалы</i>
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>
Критерии показателей процессов технологической линии					
1	Результативность (Z_1)	$R = N_{\text{факт}} / N_{\text{план}} * 100\%$	$N_{\text{факт}}$ – фактическое количество произведенной продукции $N_{\text{план}}$ – плановое количество продукции	Высокая R $80\% < R \leq 100\%$	Высокая $Z_1 = 1,0$
				Средняя R $40\% < R \leq 80\%$	Средняя $Z_1 = 0,5$
				Низкая R $0\% \leq R \leq 40\%$	Низкая $Z_1 = 0,0$
2	Эффективность (Z_2)	$\mathcal{E} = N_{\text{факт}} / 3 * 100\%$	$N_{\text{факт}}$ – фактическое количество 3 - затраты	Высокая Э $80\% < \mathcal{E} \leq 100\%$	Высокая $Z_2 = 1,0$
				Средняя Э $40\% < \mathcal{E} \leq 80\%$	Средняя $Z_2 = 0,5$
				Низкая Э $0\% \leq \mathcal{E} \leq 40\%$	Низкая $Z_2 = 0,0$

Продолжение таблицы 38

1	2	3	4	5	6
3	Скорость производства (Z_3)	$K_{uc} = E_{\phi} / E_n$	Еф-количество фактически произведенной продукции, E_n нормированное количество произведенной продукции	Высокая скорость $80\% < K_{uc} \leq 100\%$	Высокая $Z_3 = 1,0$
				Средняя скорость $40\% < K_{uc} \leq 80\%$	Средняя $Z_3 = 0,5$
				Низкая скорость $0\% \leq K_{uc} \leq 40\%$	Низкая $Z_3 = 0,0$
4	Сложность операции (Z_4)	$C = K \cdot N \cdot H \cdot P \cdot Y \cdot M \cdot P$	С - сложность технологического процесса; N - состав команды; H - трудоёмкость выполняемой операции; P - разнородность используемого инструмента; Y - разрядность выполняемой операции; M - количество используемого материала; P - количество связей; K – коэф., учитывающие влияние параметра на сложность процесса.	Низкая сложность, быстро выполняется $0\% \leq C \leq 40\%$	Низкая $Z_4 = 1,0$
				Средняя сложность $40\% < C \leq 80\%$	Средняя $Z_4 = 0,5$
				Высокая сложность, выполняется медленно $80\% < C \leq 100\%$	Высокая $Z_4 = 0,0$
5	Количество брака и отходов (Z_5)	$r = (p / o) \cdot 100\%$	г - частота дефектов; р - дефектные продукты; о - общее количество наблюдаемых продуктов.	Брак и дефекты почти отсутствуют $0\% \leq r \leq 40\%$	Низкое $Z_5 = 1,0$
				Брак и дефекты появляются редко $40\% < r \leq 80\%$	Среднее $Z_5 = 0,5$
				Брак и дефекты часто появляются $80\% < r \leq 100\%$	Высокое $Z_5 = 0,0$
6	Соотношение количества сбоев и время их устранения (Z_6)	$MTBF = t_{общ} / d$	$t_{общ}$ – общее время работы, d - количество отказов. часов/сбой	Оборудование работает без поломок долго $MTBF \geq 400$	Высокое $Z_6 = 1,0$
				Работа стабильна $MTBF \approx 200 - 400$	Среднее $Z_6 = 0,5$
				Оборудование работает поломок очень мало $MTBF \leq 200$	Низкое $Z_6 = 0,0$

Продолжение таблицы 38

1	2	3	4	5	6
7	Норма времени на операцию (Z_7)	$H_{вр} = T_{оп} (1 + (K(1) + K(2) + K(3)) / 100)$	Нвр - норма вр. на операцию в мин.; Топ - оперативное вр. на выполнение операции в мин.; К(1) - подготовительно-заключительное вр. от оперативного вр., %; К(2) – вр. обслуживания раб. места от оперативного вр., %; К(3) – вр. на отдых и личные надобности от оперативного вр., %	Норма времени наименьшее, операция выполняется быстро $H_{вр} \leq 3$	Малое $Z_7 = 1,0$
				Средняя норма $H_{вр} \approx 3-4$	Среднее $Z_7 = 0,5$
				Норма времени наибольшая, операция выполняется медленно $H_{вр} \geq 4$	Большое $Z_7 = 0,0$
8	Наличие четкой инструкции (Z_8)	$Z_8 \langle Z_{8_1}, Z_{8_2}, Z_{8_3} \rangle$	$Z_{8.1}$ – четко приписанные инструкции на ТП, $Z_{8.2}$ – инструкции на ТП есть, $Z_{8.3}$ – инструкции на ТП устарели/отсутствуют	Обеспечение тех. дисциплины в полном объеме $Z_{8.1}$	Да $Z_8 = 1,0$
				Тех. дисциплина выполняется $Z_{8.2}$	В целом, да $Z_8 = 0,5$
				Нарушение технологической дисциплины $Z_{8.3}$	Нет $Z_8 = 0,0$
9	Ритмичность (Z_9)	$K_p = \sum q_{ф} / \sum q_{пл} \cdot 100, \%$	$q_{ф}$ – фактический уровень выпуска продукции, $q_{пл}$ – плановый уровень выпуска продукции,	Высокая K_p $80\% < R \leq 100\%$	Высокая $Z_9 = 1,0$
				Средняя K_p $40\% < R \leq 80\%$	Средняя $Z_9 = 0,5$
				Низкая K_p $0\% \leq R \leq 40\%$	Низкая $Z_9 = 0,0$
10	Влияние внешних условий (Z_{10})	$Z_{10} \langle Z_{10_1}, Z_{10_2}, Z_{10_3} \rangle$	$Y_{10.1}$ – не влияет на работу, $Y_{10.2}$ – влияет на работу, $Y_{10.3}$ – сильно влияет на работу	Низкое влияние $Y_{10.1}$	Низкое $Z_{10} = 1,0$
				Среднее влияние $Y_{10.2}$	Среднее $Z_{10} = 0,5$
				Высокое влияние $Y_{10.3}$	Высокое $Z_{10} = 0,0$

Продолжение таблицы 38

1	2	3	4	5	6
11	Средние общие затраты (Z_{11})	$TC = TC/Q = FC + VC/Q = AFC + AVC$	AFC - Средние постоянные затраты AVC - Средние переменные затраты	Мин. затраты на реализацию $0\% \leq TC \leq 40\%$	Малые $Z_{11} = 1,0$
				Средние затраты на реализацию $40\% < TC \leq 80\%$	Средние $Z_{11} = 0,5$
				Макс. затраты на реализацию $80\% < TC \leq 100\%$	Большие $Z_{11} = 0,0$
12	Темп потока (Z_{12})	$T = n/t$	N – количество циклов, t – время затраченное на выполнение всех циклов	Быстрое производство	Высокий $Z_{12} = 1,0$
				Плановое производство Допускается отклонение +/- 10%	Средний $Z_{12} = 0,5$
				Медленное производство	Низкий $Z_{12} = 0,0$
13	Такт потока (Z_{13})	$t = t/N$	N – количество циклов, t – время затраченное на выполнение всех циклов	Чем меньше, тем больше операций выполняется	Низкий $Z_{12} = 1,0$
				Плановое выполнение Допускается отклонение +/- 10%	Средний $Z_{12} = 0,5$
				Чем больше, тем меньше операций выполняется	Высокий $Z_{12} = 0,0$
14	Мощность потока (Z_{14})	$M = T_{эф} \cdot N$	M - производственная мощность, N - паспортная производительность техники в единицу времени, $T_{эф}$ - плановый фонд её работы.	Стремится к наибольшей мощности ведущей операции	Высокий $Z_{14} = 1,0$
				Плановая мощность ведущей операции	Средний $Z_{14} = 0,5$
				Низкая мощность ведущей операции	Низкий $Z_{14} = 0,0$
15	Время цикла производства (Z_{15})	$T_{ц} = T_{ВРП} + T_{впр}$	$T_{ц}$ – длительностью производственного цикла; $T_{ВРП}$ – время рабочего периода, когда выполняются технологические операции; $T_{впр}$ – время перерывов	Стремится к наименьшему времени производства	Высокий $Z_{15} = 1,0$
				Плановая время производства	Средний $Z_{15} = 0,5$
				Медленное время производства	Низкий $Z_{15} = 0,0$

По аналогии с показателями процесса (X_i) и оборудования (Y_i), для показателей процесса (Z_i) ПС разработана аддитивная свёртка (56):

$$S(Z) = \sum_{i=1}^n Z_i \cdot w_i, \quad (56)$$

где: $S(Z)$ – итоговая оценка процесса производственной системы, Z_i – значение i -го показателя процесса, w_i – вес i -го показателя, который отражает его важность в общей оценке.

Веса определены на основе статистического анализа, проведенного в пункте 2.2.1 подраздела 2.2 раздела 2 настоящей работы и должны удовлетворять условию нормировки: $\sum w_i = 1$

Для разработанных показателей процесса ПС $Z_1, Z_2, \dots, Z_{15}$ и соответствующих им весов $w_1, w_2, \dots, w_{15}$, итоговая оценка S будет вычисляться как (57):

$$S(Z) = w_1 \cdot Z_1 + w_2 \cdot Z_2 + \dots + w_{15} \cdot Z_{15}, \quad (57)$$

где Z_i – числовые значения каждого из 15 показателей процесса, w_i – веса, которые определяют, насколько важным является каждый показатель.

Если все показатели Z_i равны 1, то аддитивная свертка $S(Z)$ просто равна сумме весовых коэффициентов, поскольку сумма весовых коэффициентов нормирована на 1,0, то максимальное значение $S(Z)$ также равно 1,0, исходя из этого, разработана шкала интерпретации оценки организационно-технологической эффективности для показателя процесса (Z_i) ПС (табл. 39).

Таблица 39 – Шкала многокритериального параметра состояния процесса

<i>Шкала</i>	<i>Характеристика</i>	<i>Описание</i>
$0,81 < Z_i < 1,0$	Высокий уровень	Процесс стабилен, оптимизирован и эффективен, обеспечивает высокую производительность, качество продукции и минимизацию отходов.
$0,41 < Z_i < 0,8$	Средний уровень	Процесс организован не в полной мере, обеспечивает удовлетворительную производительность и качество продукции, незначительное количество отходов, имеет потенциал для улучшения.
$0,0 < Z_i < 0,4$	Низкий уровень	Процесс не стабилен, не эффективен, обеспечивает низкую производительность и качество продукции, значительное количество отходов, требует пересмотра и перестройки.

Для общей оценки организационно-технологической эффективности (ОТЭ) производственной системы (ПС) на основе разработанных многокритериальных баз показателей элементов ПС «оператор-оборудование-процесс» и их аддитивных сверток, разработана обобщенная аддитивная свертка, объединяющая оценки оператора, оборудования и процесса в общую оценку ОТЭ, определяемая, как взвешенная сумма оценок оператора $S(X)$, оборудования $S(Y)$ и процесса $S(Z)$ (58):

$$S(OTЭ) = \sum_{i=1}^n X_i \cdot w_i + \sum_{i=1}^n Y_i \cdot w_i + \sum_{i=1}^n Z_i \cdot w_i \quad (58)$$

где: $S(X) = w_1 \cdot X_1 + w_2 \cdot X_2 + \dots + w_{15} \cdot X_{15}$ – оценка оператора,
 $S(Y) = w_1 \cdot Y_1 + w_2 \cdot Y_2 + \dots + w_{15} \cdot Y_{15}$ – оценка оборудования,
 $S(Z) = w_1 \cdot Z_1 + w_2 \cdot Z_2 + \dots + w_{15} \cdot Z_{15}$ – оценка процесса, w_i – весовые коэффициенты для оператора, оборудования и процесса, которые отражают их вклад в общую оценку ОТЭ.

Таблица 40 – Шкала оценки организационно-технологической эффективности производственной системы «оператор-оборудование-процесс»

<i>Шкала</i>	<i>Характеристика</i>	<i>Описание</i>
$2,8 < S_{OTЭ} < 3,0$	Высокий уровень	Система соответствует всем требованиям, демонстрирует высокую эффективность и производительность. <i>Рабочее место оператора максимально оптимизировано для комфорта и безопасности. Оборудование работает с высокой производительностью и надежностью. Технологический процесс оптимизирован для максимальной эффективности. Качество продукции стабильно высокое. Обеспечен высокий уровень безопасности труда. Управление процессами прозрачно и эффективно. Оператор имеет высокую квалификацию и готовность к работе</i>
$2,1 < S_{OTЭ} < 2,7$	Средний уровень	Система работает удовлетворительно, с некоторыми недостатками, которые могут быть устранены. <i>Рабочее место оператора требует улучшений в плане эргономики и безопасности. Оборудование работает стабильно, но требует периодического обслуживания. Технологический процесс нуждается в оптимизации для повышения эффективности. Качество продукции соответствует стандартам, но наблюдаются частые отклонения. Безопасность труда требует усиления контроля. Управление процессами требует улучшений. Оператор обладает достаточными знаниями и навыками, но нуждается в обучении.</i>

Продолжение таблицы 40

<i>Шкала</i>	<i>Характеристика</i>	<i>Описание</i>
$0,0 < S_{OTЭ} < 2,0$	Низкий уровень	Система работает неэффективно, с серьезными проблемами, которые требуют немедленного решения. Рабочее место оператора представляет угрозу для здоровья и безопасности. Оборудование работает с частыми поломками и не обеспечивает должного уровня производительности. Технологический процесс неэффективен и нуждается в полной переработке. Качество продукции не соответствует стандартам и неприемлемо. Безопасность труда не обеспечивается, что создает опасность для персонала. Управление процессами отсутствует. Оператор не имеет необходимой квалификации и не способен работать.

Оценка организационно-технологической эффективности производственной системы «оператор-оборудование-процесс» с адресной декомпозицией показателей разработана с учетом высокого уровня вариабельности для учета специфики исследуемой системы в различных отраслях. Вариативность объясняется возможностью выбора исследуемых параметров производственной системы: «оператор-оборудование-процесс», и пар ее элементов «оператор-оборудование», «оператор-процесс», «оборудование-процесс», а также определения необходимых показателей внутри параметров.

2.3.2 Разработка и верификация методики оценки организационно-технологической эффективности производственной системы

Осуществление расчета оценки ОТЭ реализуется в соответствии с разработанными аддитивными свёртками (52-58) и интерпретируются в соответствии с разработанными шкалами (табл. 35, 37, 39-40) представленным в виде алгоритма (рис. 16).

Для автоматизации разработан программный код на языке программирования python [170] (Приложение Г).

Алгоритм запускается с ввода исходных данных: X_i – показатели эффективности оборудования, Y_i – показатели эффективности оператора, Z_i – показатели эффективности процесса [171].

Далее осуществляется проверка значений X_i по ступенчатой логике:

Если $X_i > 1$, то расчет по формуле X_{im}/k , где:

X_{im} – измеренное значение, k – нормативный коэффициент.

Если условие $X_i > 1$ не выполнено, выполняется переход к следующему условию.

Если $X_i > 0,5$, то расчет по формуле $X_{im}/(k-0.5)$, если условие не выполнено, осуществляется переход к последнему условию.

Если $X_i > 0,25$, то расчет по формуле $X_{im}/(k-0.25)$, если условие не выполнено, выполняется переход к повторному вводу значений.

Аналогичная логика применяется для показателей Y_i и Z_i .

Цикл J внедрен для выполнения итеративной обработки данных с целью повышения точности, в котором осуществляется повторный сбор показателей X_i , Y_i , Z_i и пересчет оценок с учетом новых данных.

После получения данных для каждого показателя (X_i , Y_i , Z_i) осуществляется процедура фазификации, определяются степени принадлежности к термам (Низкий, Средний, Высокий). Активируются все подходящие правила из разработанной базы условий вариативности состояний элементов ПС ООП (Приложение Д), для каждого активированного правила определяется сила срабатывания как минимальная степень принадлежности среди условий.

Далее осуществляется агрегирование результатов, объединение выводов всех активированных правил и процедура дефазификации, используя метод центра тяжести для получения четкого числового значения ОТЭ по уровням, Низкий=0,3; Средний=0,6; Высокий=0,9.

Через цикл вариативности состояний ПС ООП, совмещенный с базой данных, осуществляется вывод сумм каждой группы показателей оператор (X_i), оборудование (Y_i), процесс и суммы ОТЭ (Z_i), и характеристика полученных уровней.

Таким образом, разработанный алгоритм автоматизированной оценки ОТЭ ПС ООП, достаточно гибкий, в связи с применением ступенчатой логики, позволяющей адаптировать оценку под разные сценарии, и наборы

2.4 Разработка функциональной модели организации и управления проектирования бережливой производственной системы

Основываясь на достигнутых результатах, можно заключить, что разработка функциональной модели организации и управления проектирования бережливой производственной системы (ПБПС) [172] является научно обоснованной. В рамках исследования вводится авторское понятие проектирования бережливой производственной системы (ПБПС), под которым понимается комплексный анализ и исследование производственной системы, включающей три ключевых элемента: «оператор-оборудование-процесс», с целью их оптимизации и улучшения. ПБПС направлена на устранение потерь, повышение организационно-технологической эффективности и качества производственных процессов, а также на внедрение современных цифровых технологий [173].

Проектируемая бережливая производственная система (ПБПС) представляет собой динамическую, непрерывно совершенствующуюся модель, за счет внедрения методов машинного обучения, инструментов и методов управления, учитывающая внешние, так и внутренние состояния производственной системы [174].

В соответствии с государственным стандартом ГОСТ Р 56404 – 2021 «Бережливое производство. Требования к системам менеджмента» [53] и серией стандартов ГОСТ Р ИСО 9000-9004 [66], модели организации производства и производственных систем реализуются на базе принципов непрерывного улучшения PDCA. Который является универсальным инструментом для управления процессами и обеспечения их постоянного совершенствования. В данном разделе предлагается адаптация цикла PDCA для разработки модели проектирования бережливой производственной системы, которая интегрирует требования стандартов бережливого производства и системы менеджмента качества (СМК), а также направлена на повышение организационно-технологической эффективности разработанной производственной системы «оператор-оборудование-процесс»

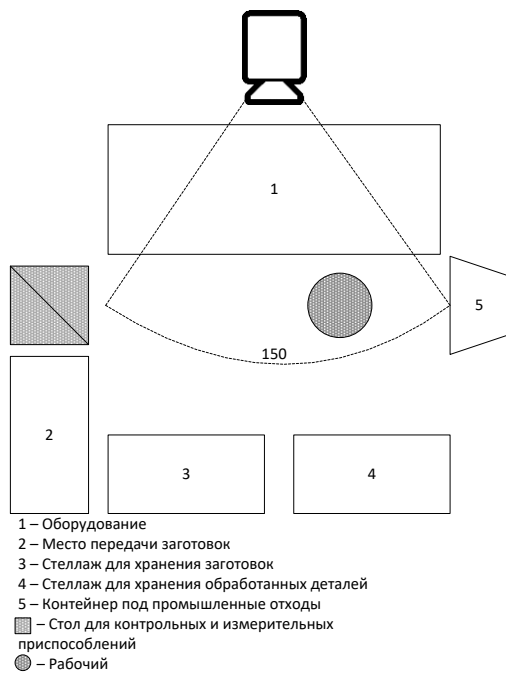
за счет внедрения современных методов управления, цифровизации и оптимизации процессов [175].

Разработка модели проектирования бережливой производственной системы с учётом интеграции традиционных и цифровых методов [176], а также комплексного анализа системы «оператор-оборудование-процесс», позволяет создать адаптивную и эффективную систему организации производства.

Для обеспечения синергетического эффекта процессов хронометража и оценки ОТЭ, разработанной в подразделе 2.3 настоящей работы, используется оптический стенд с ДМАХ, описанной в первом разделе. Данное решение обеспечивает автоматизированный сбор и анализ данных о работе ПС ООП (рис 17а-б). Разработанный авторский комплексный подход, включающий оптический стенд для контроля и непрерывной инспекции технологических процессов, позволяет автоматизировать формирование РикД по учету выявленных несоответствий, способствуя минимизации производственных потерь и рационализации ПС ООП в условиях ограниченного производственного плана с учетом параметров производственной среды.

Структурная и функциональная декомпозиция оптического стенда включает блок визуальной детекции, исполняющий функцию идентификации соответствующих и несоответствующих движений оператора и учитывающая другие характеристики технологического процесса для комплексного сбора информации о состоянии элементов ПС ООП.

Для достижения адаптивности проектируемой бережливой производственной системы в условиях синергии была разработана модель на основе адаптированного цикла PDCA для ПБПС на промышленных предприятиях (рис 18) [177-178].



a – Размещение оптического
стенда для визуальной детекции



б – Схема мониторинга и детекции
движений оператора

Рисунок 17 – Схема разворачивания оптического стенда для мониторинга
движений оператора

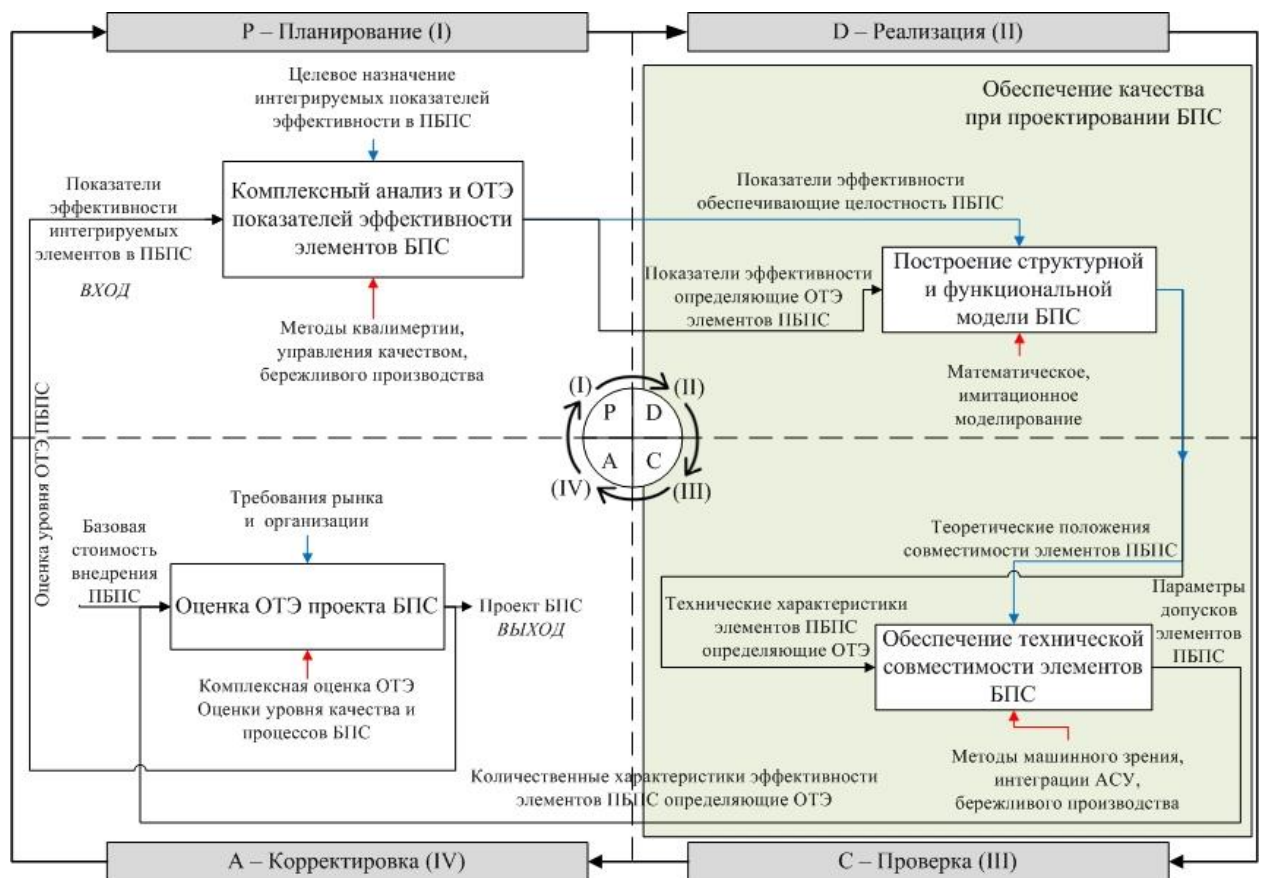


Рисунок 18 – Модель организации производства ПБПС

Модель представляет собой циклический процесс непрерывного улучшения. Обратная связь между этапами обеспечивает гибкость и адаптивность процесса проектирования, позволяя реагировать на изменения и оптимизировать БПС в соответствии с текущими условиями и потребностями. Ключевой целью является достижение максимальной ОТЭ за счет эффективного использования ресурсов и оптимизации производственных процессов [179-180]. Описание блоков модели ПБПС структурировано в таблице 41.

Таблица 41 – Описание блоков модели ПБПС

<i>Этап PDCA / Блок МБПС</i>	<i>Цель</i>	<i>Реализация</i>
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>
Plan (Планирование) – Блок I	Анализ текущего состояния ПС, выявление потерь и разработка цифровой основы для оптимизации ПС ООП через интеграцию данных и методов.	1 Комплексный анализ ОТЭ ПС ООП: оценка ОТЭ 2 Моделирование: анализ движений оператора и выявления избыточных действий. 3 Определение показателей эффективности: исходя из необходимых показателей ОТЭ формируется база показателей, для проектирования БПС 4 Разработка плана: приоритезация задач на основе данных
Do (Внедрение) – Блок II	Пилотная реализация изменений с минимальными рисками	1 Интеграция технологий: установка и наладка оптического стенда 2 Сбор данных в реальном времени 3 Динамическая адаптация: использование нечеткой логики для управления процессами через исследуемые показатели ОТЭ
Check (Проверка) – Блок III	Верификация ОТЭ через цифровые инструменты.	1 Анализ данных: сравнение плановых и фактических KPI по ОТЭ через дашборды 2 ML-анализ: выявление скрытых зависимостей 3 Оценка ОТЭ: пересчет индекса эффективности после изменений

Продолжение таблицы 41

1	2	3
Акт (Корректировка) – Блок IV	Стандартизация успешных решений и замыкание цикла.	1 Корректирующие действия: обновление цифровых моделей, обучение ML-моделей на новых данных 2 Стандартизация: документирование лучших практик 3 Масштабирование: внедрение изменений на других участках с учетом специфики

Разработанная адаптивная модель проектирования бережливой производственной системы (ПБПС), основанная на модифицированном цикле PDCA, обеспечивает синергетический эффект в условиях цифровизации промышленных предприятий. Модель направлена на повышение адаптивности производственной системы ООП за счет интеграции методов машинного зрения и оптического стенда, позволяя оптимизировать процессы ПС. Внедрение модели способствует повышению ОТЭ ПС за счет автоматизации анализа функционирования системы и минимизации потерь.

Методологическая основа модели базируется на принципах непрерывного улучшения (кайдзен) и адаптированного цикла PDCA, обеспечивая итеративность и гибкость в управлении производственными процессами. Разработанный подход позволяет учитывать требования стандартов бережливого производства, обеспечивая устойчивое развитие и повышение конкурентоспособности промышленных предприятий в условиях динамичной внешней среды.

Выводы по разделу 2

Второй раздел диссертационного исследования посвящен разработке моделей и методов проектирования бережливых производственных систем, что представляет собой значительный вклад в научно-практическую область управления производственными процессами. В рамках раздела проведено научно-практическое совершенствование существующих подходов к

проектированию БПС, что позволило создать адаптивную и эффективную модель управления, учитывающую современные требования к гибкости и цифровизации производственных систем. Особое внимание уделено разработке статистического инструментария, включая корреляционную матрицу для анализа сложно структурированных поведенческих факторов и параметров технологического процесса. Это обеспечило выявление ключевых взаимосвязей между элементами системы «оператор-оборудование-процесс», что позволило не только диагностировать проблемы, но и разработать базу рекомендаций и корректирующих действий (РиКД), направленных на минимизацию отклонений и повышение ОТЭ.

Важным результатом является разработка автоматизированной методики оценки ОТЭ, основанной на многокритериальном наборе показателей качества. Данная методика включает верифицированные алгоритмы анализа данных, которые позволяют автоматизировать процесс оценки состояния производственной системы и выдачи корректирующих действий. Использование методов машинного зрения и цифровых технологий обеспечивает высокую точность сбора и обработки данных, что способствует повышению объективности анализа и принятию обоснованных управленческих решений. Разработанная функциональная модель организации и управления проектирования БПС интегрирует традиционные методы бережливого производства с современными цифровыми технологиями, что обеспечивает гибкость и адаптивность системы в условиях динамичной производственной среды. Таким образом, результаты второго раздела представляют собой научно обоснованный подход к проектированию и управлению бережливymi производственными системами, который способствует повышению их эффективности и конкурентоспособности.

Разработанная модель проектируемой бережливой производственной системы – это современный и комплексный подход к организации производством, который сочетает в себе анализ, оптимизацию и внедрение цифровых технологий, направленных на улучшение элементов

производственной системы (оператор, оборудование, процесс) и является актуальной в условиях цифровизации, с учетом перехода на машинное зрение, нейронные сети и автоматизацию процессов. ПБПС обеспечивает не только повышение организационно-технологической эффективности и качества производства, но и устойчивое развитие предприятия в долгосрочной перспективе.

Внедрение разработанных моделей и методов позволяет не только оптимизировать текущие производственные процессы, но и обеспечить устойчивое развитие предприятия за счет непрерывного улучшения и адаптации к изменяющимся условиям внешней среды. Это подтверждает актуальность и практическую значимость проведенного исследования, а также открывает новые перспективы для дальнейшего развития методологии проектирования бережливых производственных систем с использованием методов машинного зрения и цифровых технологий.

Разработанная модель проектирования бережливой производственной системы с учётом интеграции традиционных и цифровых методов, а также комплексного анализа системы «оператор-оборудование-процесс», позволяет создать адаптивную и эффективную систему управления производством.

Раздел 3 Разработка информационно-управляющей модели обеспечения качества и методика принятия решений для проектируемой бережливой производственной системы

3.1 Разработка информационно-управляющей модели для проектирования бережливой производственной системы

3.1.1 Синтез методов и моделей для состояния и динамики организации бережливой производственной системы

Взаимодействие оператора, оборудования и процесса в рамках бережливой производственной системы (БПС) требует четкой координации и управления. Отсутствие единой информационной системы приводит к фрагментации данных, что существенно затрудняет проведение комплексного анализа и принятие обоснованных решений. Это, в свою очередь, снижает адаптивность производственной системы к изменяющимся внешним и внутренним условиям, что особенно критично при многономенклатурности организации и динамичности производственных систем [179-181].

Разработка информационно-управляющей модели (ИУМ) для бережливой производственной системы (ПС) представляет собой комплексный процесс, который включает в себя синтез различных методов и моделей (табл. 42), направленных на повышение организационно-технологической эффективности, оптимизацию производственных процессов и обеспечение адаптивности системы к изменяющимся условиям.

Таблица 42 – Модели и методы для реализации ИУМ

<i>Метод/Модель</i>	<i>Цель внедрения</i>	<i>Эффект</i>
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>
Методика оценки функционирования и качества ПС	Анализ текущего состояния ПС, выявление узких мест и определение ключевых параметров качества	Повышение качества продукции, снижение уровня брака и улучшение удовлетворенности клиентов

Продолжение таблицы 42

1	2	3
Динамическая модель автоматизированного хронометража	Точное измерение времени выполнения операций для оптимизации процессов	Снижение потерь времени, повышение производительности и эффективности использования ресурсов
Методика оценки организационно-технологической эффективности	Анализ эффективности взаимодействия оператора, оборудования и процесса	Повышение уровня автоматизации, оптимизация процессов и снижение издержек
База рекомендаций и корректирующих действий (РиКД)	Оперативное реагирование на отклонения и минимизация их влияния на процесс	Уменьшение времени простоя, повышение адаптивности системы и снижение затрат на исправление ошибок
Проектирование бережливой производственной системы (ПБПС)	Оптимизация потоков создания ценности и устранение потерь	Повышение общей эффективности системы, снижение издержек и улучшение качества продукции
Методы имитационного моделирования	Прогнозирование динамики системы и оценка влияния различных факторов	Повышение точности прогнозов, разработка стратегий оптимизации и снижение рисков
Интеграция оптического стенда	Автоматизированный хронометраж и анализ данных в режиме реального времени	Повышение точности измерений, оперативный контроль и улучшение качества данных
Методы машинного зрения	Анализ информации с оптического стенда для оценки функционирования и качества ПС	Автоматизация процесса оценки, повышение точности анализа и выдача рекомендаций (РиКД)
Алгоритмы машинного обучения и ИИ	Прогнозирование отклонений и оптимизация производственных параметров	Повышение точности прогнозов, минимизация влияния человеческого фактора и улучшение качества продукции

Для выделения ключевых зон оптимизации и повышения эффективности производственных процессов была разработана функциональная схема [182] организации БПС (рис. 19), базирующаяся на разработанной модели проектирования БПС в подразделе 2.4 настоящей работы и интегрирует в себя современные методы анализа и синтеза данных.

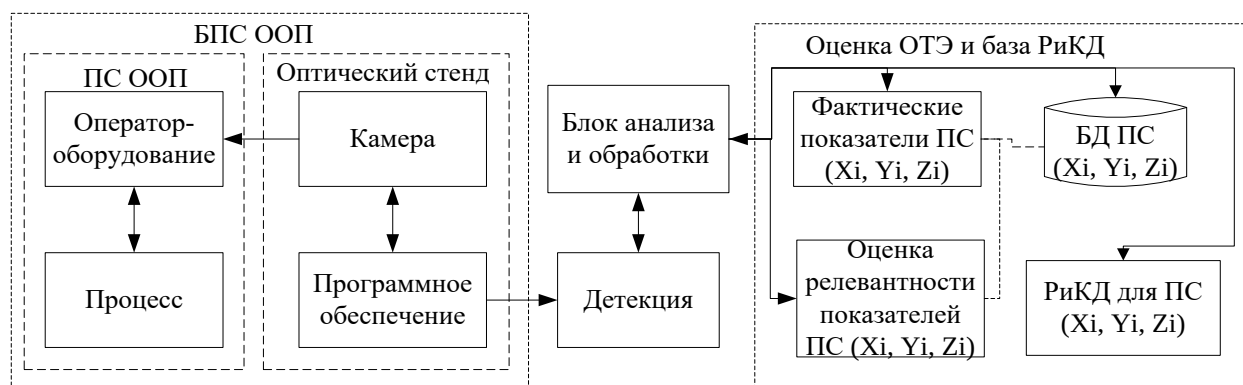


Рис. 19 – Схема организации производства

Синтез методов и моделей разработки информационно-управляющей модели (ИУМ) для бережливой производственной системы (ПС) позволяет создать комплексную систему, обеспечивающую высокий уровень организационно-технологической эффективности [183].

3.1.2 Структурная схема и архитектура распределенного хранилища данных информационно-управляющей модели

Информационно-управляющая модель (ИУМ) представляет собой комплексную систему, направленную на обеспечение качества выполнения предъявляемых требований в цифровой бережливой производственной системе (БПС) «оператор-оборудование-процесс» (ООП). ИУМ основана на принципах предикативного анализа и оптимизации производственных процессов, что позволяет минимизировать производственные потери и повысить организационно-технологическую эффективность ПС [184-86].

Архитектура ИУМ (рис. 20) использует микросервисную архитектуру с выделенными модулями для элементов ПС. Данные хранением данных в единой реляционной БД и включает в себя распределенные хранилища данных, которые обеспечивают сбор, обработку и анализ информации в режиме реального времени, интегрированные с центральной базой данных (ЦБД), позволяя осуществлять синхронизацию данных между различными компонентами системы [183, 187].

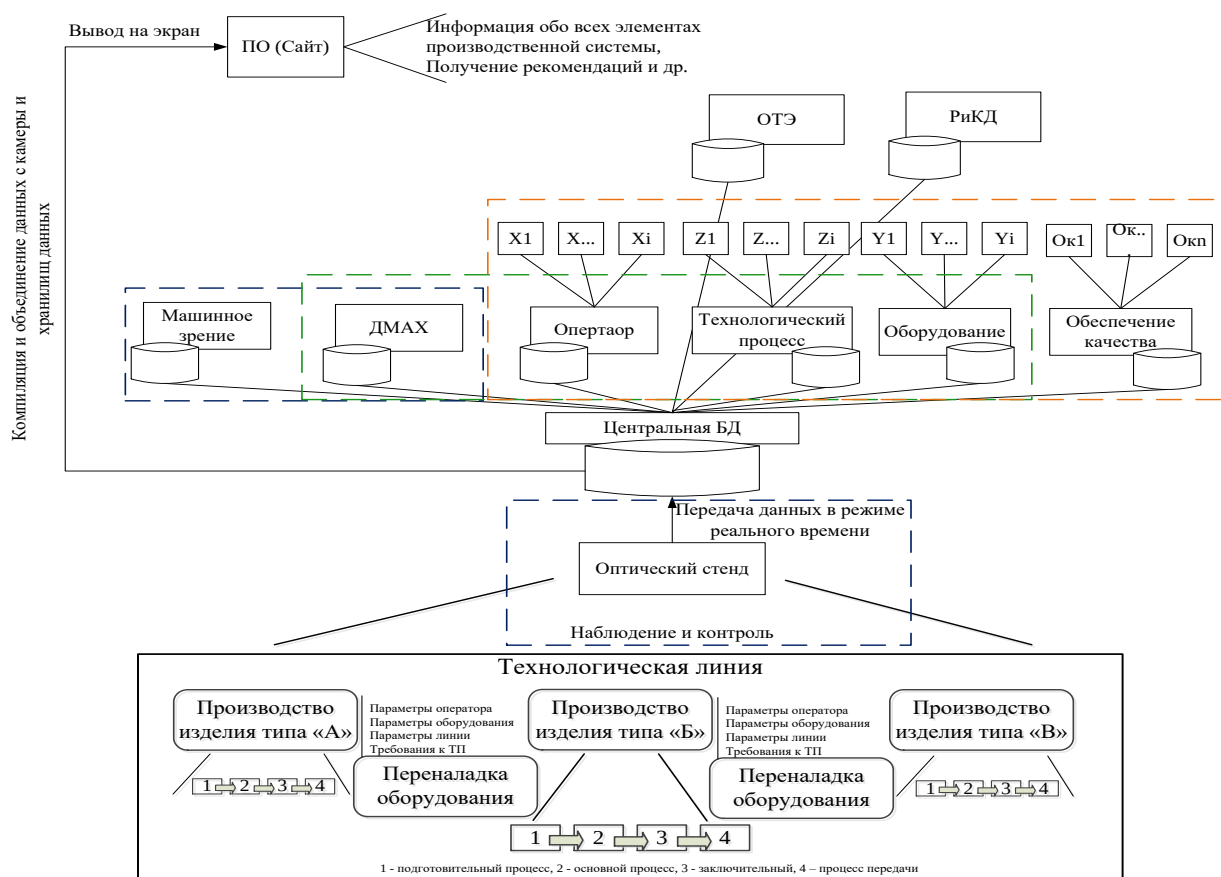


Рисунок 20 – Информационно-управляющая модель ОК ПС ООП

Разработанная ИУМ (табл. 43) использует распределенную архитектуру хранения данных, что позволяет обеспечить высокую доступность и отказоустойчивость системы. Данные, поступающие с оптического стенда, агрегируются в центральной базе данных (ЦБД), интегрированной с витринами данных, содержащие тематически структурированную информацию для элементов ПС ООП, что обеспечивает единую точку доступа для анализа и управления [188].

В рамках функционирования ИУМ учитывается методика принятия решений, основанная на предикативном анализе, позволяя прогнозировать возможные отклонения в ПС и принимать корректирующие действия до возникновения критических ситуаций, в соответствии с разработанной базой рекомендаций и корректирующих действий (РиКД). Методика ПРОУ включает в себя алгоритмы машинного обучения и искусственного интеллекта, которые анализируют данные в режиме реального времени и

выдают рекомендаций и корректирующих действий (РиКД) по оптимизации параметров производства.

Оптический стенд, описанный во втором разделе настоящей работы, является одним из основных элементов ИУМ, обеспечивая автоматизированный хронометраж и сбор данных о параметрах оператора, оборудования и технологического процесса. Получаемые данные с оптического стенда передаются в режиме реального времени в центральное хранилище, где обрабатываются с использованием библиотек машинного зрения на платформе PyCharm, обеспечивая высокую скорость обработки информации и соответствие установленным требованиям. Анализ полученных данных с оптического стенда, осуществляется с использованием методов машинного зрения: Обработка изображений: фильтрация (размытие, резкость), преобразование цветовых пространств (RGB). Детекция и распознавание объектов: алгоритмы детекции, методы машинного обучения, глубокое обучение (CNN), обучение с учетом обратной связи. Анализ изображений: извлечение признаков и характеристик, классификация изображений. Процессинг видео: распознавание действий, обнаружение и классификация объектов в реальном времени. Обработанные данные используются для оценки организационно-технологической эффективности и выдачи рекомендаций и корректирующих действий (РиКД) через методику ПРОУ.

Таблица 43 – Блоки работы ИУМ

<i>Блок ИУМ</i>	<i>Описание</i>
<i>1</i>	<i>2</i>
Сбор данных	Данные о параметрах оператора, оборудования и технологического процесса собираются с помощью оптического стенда и ДМАХ, установленных на производственной линии, что позволяет отслеживать состояние ПС в реальном времени. Эти данные включают в себя время выполнения операций, уровень брака, производительность оборудования и другие ключевые показатели.

Продолжение таблицы 43

1	2
Передача данных	Собранные данные передаются в центральное хранилище в режиме реального времени, обеспечивая оперативный доступ к информации для анализа и принятия решений.
Обработка данных	Собранные данные передаются в распределенные хранилища, где они обрабатываются с использованием алгоритмов машинного обучения и методов предикативного анализа. Библиотеки машинного зрения, интегрированные в систему, позволяют автоматически анализировать изображения с оптического стенда, выявляя дефекты продукции и отклонения от стандартов качества. Данные также анализируются на предмет выявления закономерностей и тенденций, что позволяет прогнозировать возможные сбои в производственном процессе и принимать превентивные меры.
Анализ и принятие решений	На основе анализа данных ИУМ формирует рекомендации по оптимизации производственных процессов. Это включает в себя выбор оптимальных параметров для оборудования, корректировку технологических процессов и переналадку оборудования, корректировку времени выполнения операций, изменение настроек оборудования или переналадку технологической линии. Модель обеспечивает автоматическое принятие решений в режиме реального времени, позволяя минимизировать время простоя и повысить производительность.
Реализация корректирующих действий	Модель обеспечивает автоматическое принятие решений, рекомендации и корректирующие действия (РиКД) передаются операторам и другим участникам ПС в режиме реального времени, позволяя оперативно устранять отклонения, минимизировать их влияние на качество продукции и время простоя.
Оптимизация и рационализация	ИУМ обеспечивает предикативный выбор параметров для оптимизации и рационализации производственных процессов. Это включает в себя минимизацию отходов, снижение энергопотребления и повышение качества продукции. Модель также учитывает требования к производственным процессам (ПП) для различных типов изделий (А, Б, В), что позволяет адаптировать производство под конкретные задачи.
Контроль и мониторинг	ИУМ обеспечивает непрерывный мониторинг всех элементов производственной системы, включая операторов, оборудование и технологические линии. Это позволяет своевременно выявлять отклонения от нормы и принимать корректирующие меры.

Информационно-управляющая модель (ИУМ) обеспечения качества в цифровой бережливой производственной системе (БПС) «оператор-оборудование-процесс» (ООП) представляет собой комплексную систему,

которая обеспечивает высокий уровень организационно-технологической эффективности [35, 154-155, 176].

Для развертывания ИУМ разработана структурная схема (рис. 21) для детализации и отображения элементов ИУМ с их физическими связям.

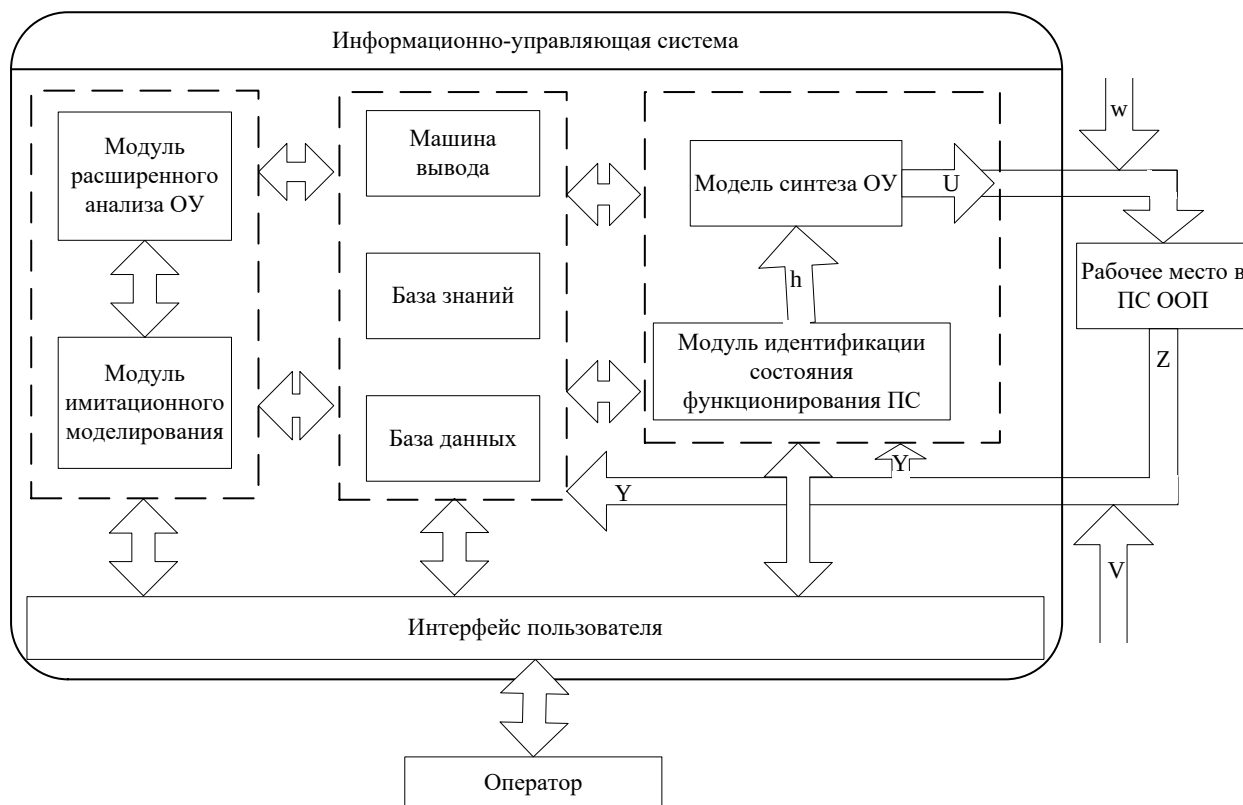


Рисунок 21 – Структурная схема ИУМ

Структурная схема ИУМ включает четыре модуля, базу знаний, машину вывода, базу данных и подсистему пользовательского интерфейса.

Модуль расширенного анализа ОУ обеспечивает получение условий существования решения задачи ОУ, определение всех возможных видов функций ОУ, нахождение границ областей видов функций, получение соотношений для расчета параметров функций ОУ при различных состояниях БПС ООП.

Модуль идентификации состояния функционирования позволяет идентифицировать текущие состояние производственной системы (ПС) с использованием: нечеткой логики и статистических моделей.

Модуль имитационного моделирования позволяет исследовать изменения в виртуальной среде и оптимизировать планирование ресурсов.

Модуль синтеза ОУ реализует процедуры оперативного синтеза управляющих воздействий в зависимости от текущего состояния функционирования ПС ООП [183, 189].

Аппаратное обеспечение ИУМ включает:

- технические средства канала управления (обеспечивают воздействие на производственную систему на основе решений ИУМ, реализуют автоматические корректировки),
- технические средства канала измерения (фиксируют текущее состояние ПС «оператор-оборудование-процесс»),
- персональный компьютер с установленными программными модулями, базой данных и базой знаний ИУМ.

3.1.3 Разработка фреймовой модели базы знаний и реляционной модели базы данных

Ядром ИУМ являются фреймовая база знаний и реляционная база данных [183, 187]. В базе знаний хранятся процедурные знания в виде фреймов, реализующих алгоритмическое обеспечение ИУМ. База данных предназначена для хранения исходных данных и результатов работы ИУМ. Функции системы управления базой данных реализованы в программных модулях ИУМ.

Разработка фреймовой модели базы знаний и реляционной модели базы данных для одной информационно-управляющей системы бережливого производства (БПС) преследует разные, но взаимодополняющие цели. Их совместное использование обеспечивает эффективность системы, особенно в контексте динамичного хронометража, оценки эффективности и выдачи рекомендаций.

Разработанная фреймовая база знаний (рис. 22) позволяет представить сложные зависимости в иерархической структуре ИУМ, обработать

логические правила и нечеткой логики, моделировать логику принятия решений для элементов ООП в БПС, а также учитывает поддержку сложных правил и иерархий с автоматизированной выдачей рекомендаций на основе множества факторов, а также динамически адаптироваться к изменяющимся условиям [125-129].

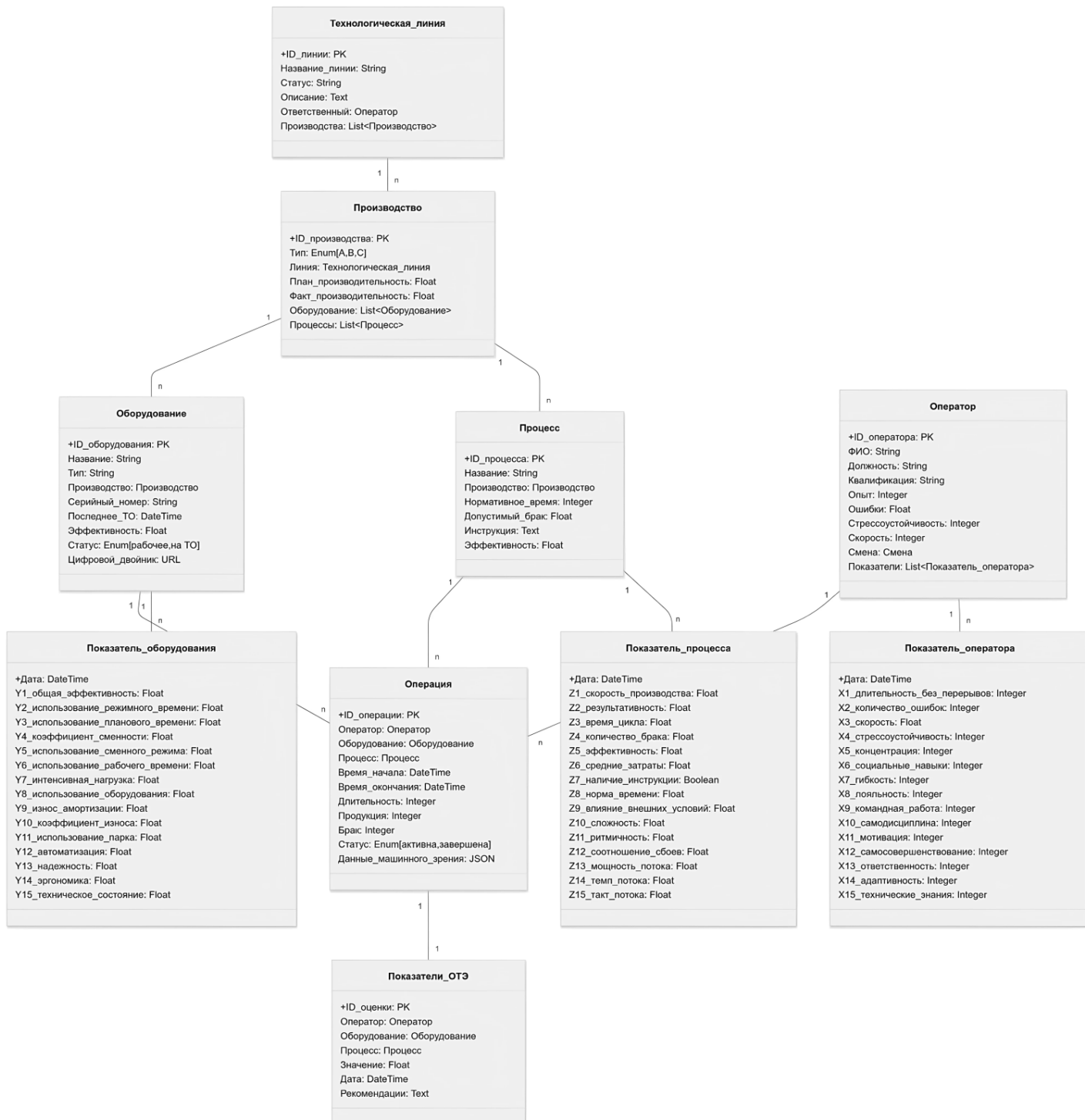


Рисунок 22 – Фреймовая база знаний для ИУМ

Разработанная реляционная модель базы данных (рис. 23) в свою очередь необходима для хранения структурированных данных, обеспечения быстрого доступа к историческим данным для аналитики элементов ООП в БПС, а также дает возможность интеграции с ERP/MES-системами [190] через SQL-запросы.

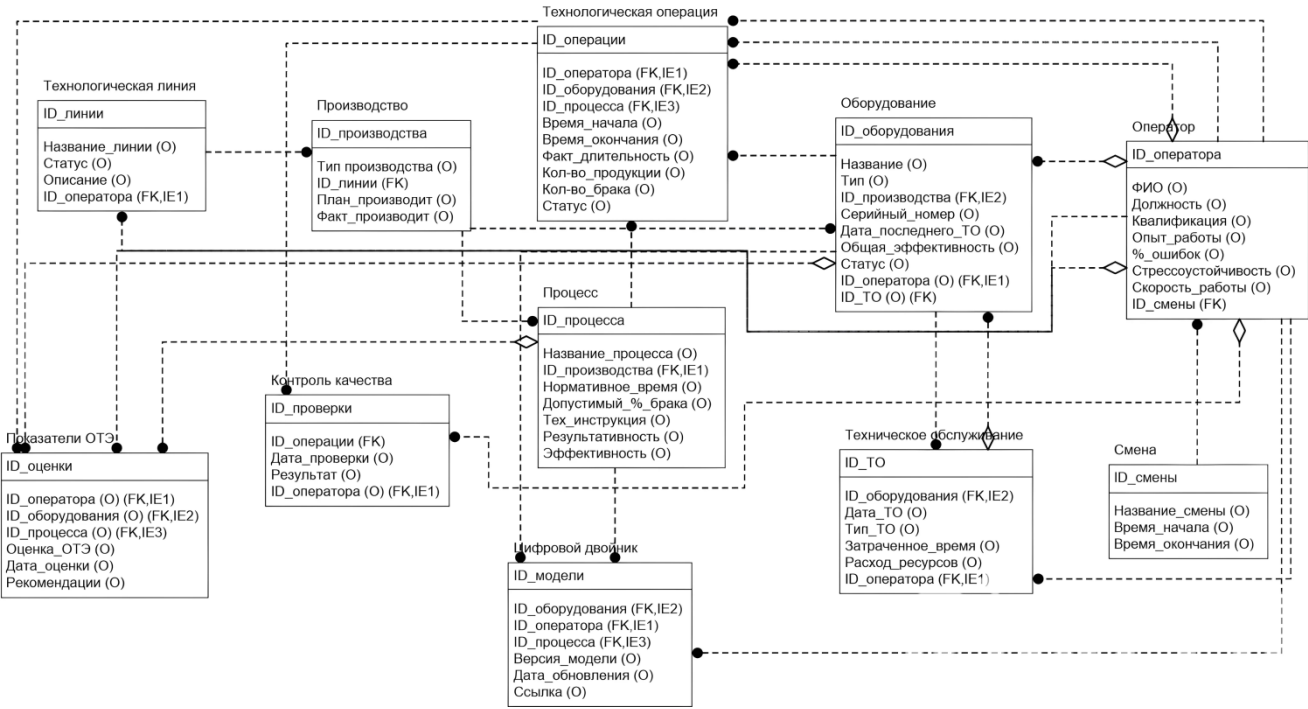


Рисунок 23 – Реляционная база данных для ИУМ

Так, фреймовая модель разработана для интеллектуальной обработки данных и принятия решений, а реляционная модель для надежного хранения и масштабируемости, и их комбинированное взаимодействие (табл. 44) позволяет реализовать динамический хронометраж в реальном времени, автоматически оценивать эффективность элементов ООП в БПС и генерировать адаптивные рекомендации для улучшения БПС.

Таблица 44 – Взаимодействие разработанных моделей

Аспект	Фреймовая модель	Реляционная модель
Данные	Обработывает качественные показатели (усталость, риски)	Хранит количественные метрики (время, % брака)

Продолжение таблицы 44

<i>Аспект</i>	<i>Фреймовая модель</i>	<i>Реляционная модель</i>
<i>Логика</i>	Правила нечеткой логики, адаптивные алгоритмы	CRUD-операции, JOIN-запросы
<i>Использование</i>	Принятие решений в реальном времени	Отчетность, долгосрочная аналитика
<i>Интеграция</i>	Экспертная система управления	Внешние BI-инструменты (Power BI, Tableau)

Разработанные базы обеспечивают функционирование ИУМ для предоставления статистической информации о работе БПС в режиме реального времени, включая данные хронометража, полученные с помощью динамической модели, разработанной в первом разделе настоящей работы, и показатели стабильности процессов, и оборудования, рассчитанные на основе критериев организационно-технологической эффективности, введенных во втором разделе настоящей работы.

В ИУМ также учитывается блок обеспечения качества, оснащенный когнитивным классификатором, анализирующим фактические данные с оптического стенда, сравнивая их с заданными нормами и выявляя отклонения. Используя алгоритмы машинного обучения и нейронные сети [191-192], система способна к самообучению, что позволяет дополнять базы данных рекомендациями по улучшению состояния элементов ООП в БПС, определять причины отклонений и предлагать решения для их устранения, минимизируя негативное воздействие на производственную систему.

3.2 Разработка методики принятия решений оперативного управления бережливой производственной системы

3.2.1 Разработка алгоритма для принятия решений оперативного управления бережливой производственной системы и ее автоматизация

Разработанная база РикД в подразделе 2.2 настоящей работы, и многокритериальная база элементов ПС ООП с автоматизированным расчетом оценки ОТЭ разработанным в подразделе 2.3 настоящей работы,

являются основанием для их интеграции и разработки методики принятия решений и выдачи РИКД для повышения организационно-технологической эффективности производственной системы [193]. Для реализации методики принятия решений оперативного управления (ПРОУ) БПС разработан алгоритм (рис. 24).

После классификации индикаторов алгоритм осуществляет обработку данных с помощью системы принятия решений, обращаясь к базе данных рекомендаций. Данная база содержит набор рекомендаций по корректировке работы ПС ООП, сопоставленных с различными комбинациями состояний индикаторов, подбирая наиболее подходящий набор рекомендаций, под полученные данные, обеспечивая минимизацию отклонений от заданных параметров [90, 163, 171, 194]. Для автоматизации получения РИКД разработан программный код на языке программирования python для реализации методики принятия решений оперативного управления (Приложение Е).

Разработанная база в сочетании с многокритериальной базой показателей элементов производственной системы «оператор-оборудование-процесс» (ПС ООП) представляет собой усовершенствованный научно-обоснованный инструмент для оценки организационно-технологической эффективности (ОТЭ) [171] и автоматизации процесса выдачи корректирующих мер, позволяя минимизировать влияние человеческого фактора и повысить точность диагностики проблем, что способствует повышению общей эффективности производственной системы (Приложение Ж).

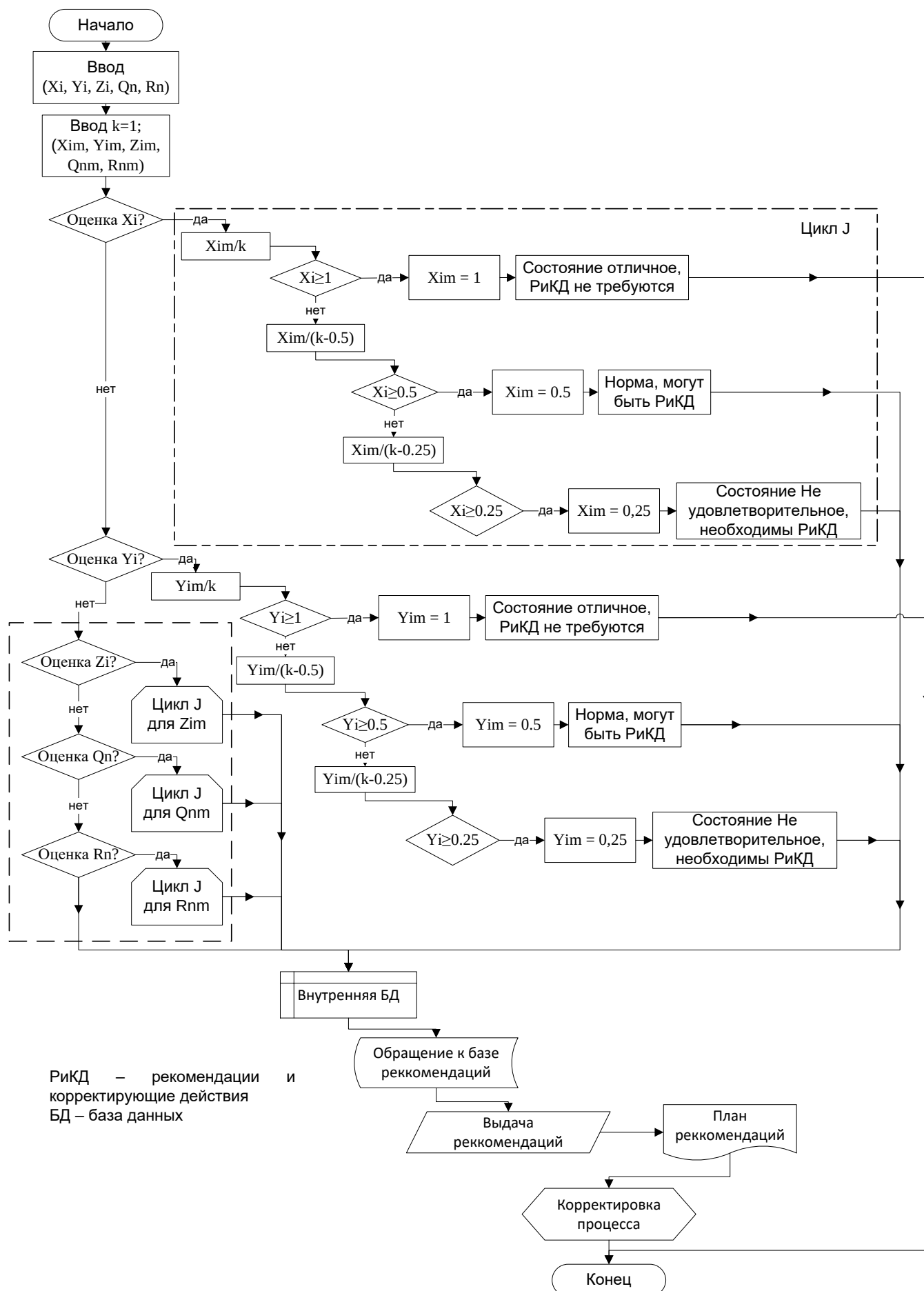


Рисунок 24 – Алгоритм методики ПРОУ БПС

3.2.2 Уровневая модель базы данных функционирования методики ПРОУ

Разработанная уровневая модель базы данных для оперативного управления бережливой производственной системой объединяет базу рекомендаций и корректирующих действий (РиКД) с автоматизированным расчетом оценки организационно-технологической эффективности (рис. 25).

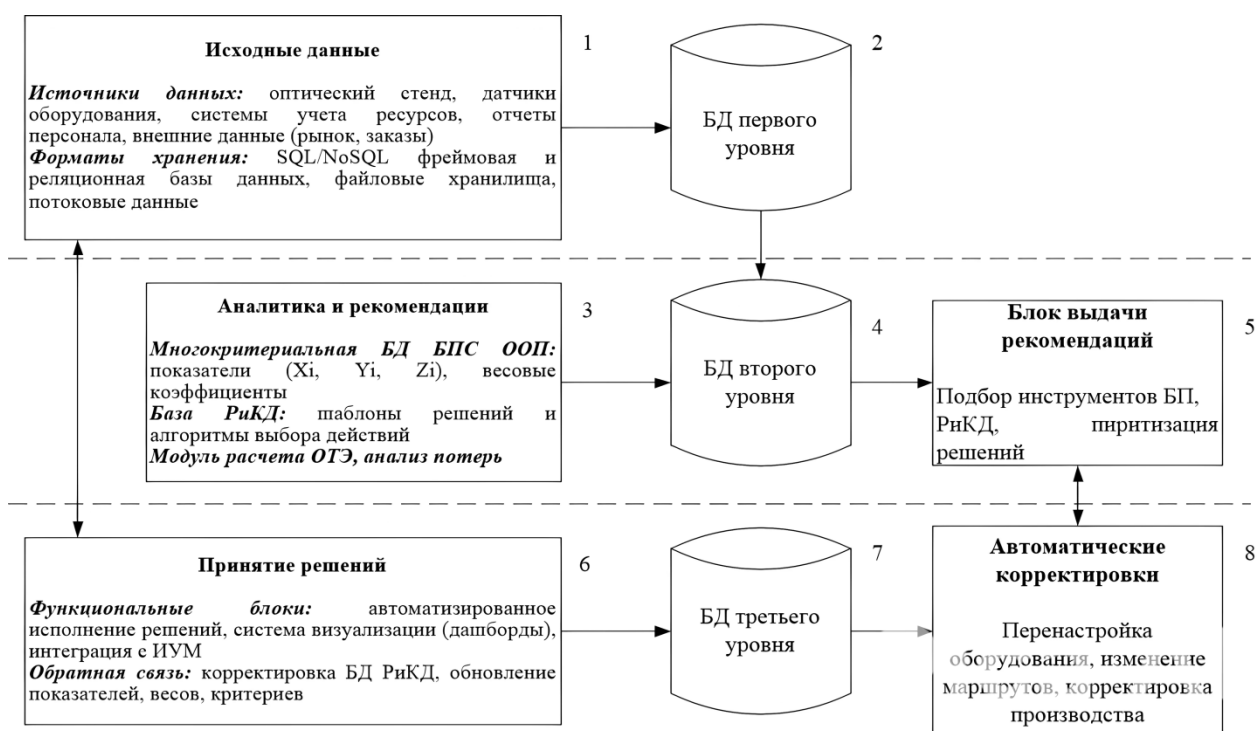


Рисунок 25 – Структура информационно-управляющей системы принятия решений оперативного управления для БПС

Модель функционирует как замкнутая саморегулирующаяся система, реализующая полный цикл «данные-анализ-решение-действие» [195]. На первом уровне происходит агрегация сырых данных в реальном времени от разнородных источников: промышленных датчиков, фиксирующих параметры работы оборудования; систем видеомониторинга, отслеживающих действия операторов; корпоративных информационных систем, при их наличии, предоставляющих данные о загрузке мощностей и выполнении заказов. Полученные данные структурируются и сохраняются в гибридном хранилище, сочетающем SQL-базы для транзакционных данных и NoSQL-решения для неструктурированной информации.

На втором уровне система переходит к аналитической обработке собранных данных. Специальные алгоритмы вычисляют ключевые показатели организационно-технологической эффективности элементов БПС ООП: оператор (X_i), оборудование (Y_i) и процесс (Z_i). Для каждого показателя применяются весовые коэффициенты, которые могут динамически корректироваться в зависимости от текущих производственных приоритетов. Параллельно модуль анализа потерь идентифицирует отклонения от эталонных значений, классифицируя их по типам muda (перепроизводство, ожидание, транспортировка и др.). Результаты анализа передаются в блок принятия решений, где происходит сопоставление выявленных проблем с базой знаний РикД.

Третий уровень системы отвечает за исполнение управляющих воздействий и обратную связь. На основе полученных рекомендаций система либо автоматически инициирует корректирующие действия (перенастройку оборудования, изменение логистических маршрутов), либо формирует задания для персонала с указанием конкретных инструментов бережливого производства (5S, канбан, SMED и пр.). Все принятые решения фиксируются в базе данных третьего уровня, что позволяет системе постоянно обучаться и совершенствовать алгоритмы анализа. Особенностью архитектуры является дублирование критически важных данных в резервной БД третьего уровня, что обеспечивает отказоустойчивость системы.

Ключевым преимуществом данной модели является ее адаптивность - система не только реагирует на текущие отклонения, но и прогнозирует потенциальные проблемы, используя исторические данные и методы предиктивной аналитики. Благодаря трехуровневой структуре достигается оптимальное распределение вычислительной нагрузки: первичная обработка данных может выполняться непосредственно в цеху, сложная аналитика - на корпоративных серверах, а стратегическое управление - в облачной среде. Это позволяет сократить время реакции на отклонения до 10-15 минут при одновременном снижении нагрузки на ИТ-инфраструктуру.

3.3 Разработка методики дистанционного мониторинга для повышения ОТЭ ПС ООП

3.3.1 Разработка архитектуры системы дистанционного мониторинга

Разработанная ИУМ БПС, включая уровневую архитектуру базы данных и алгоритмы оперативного управления, создает фундамент для перехода к системе дистанционного мониторинга. На основе синтезированных методов анализа состояния производства и распределенного хранилища данных формируется цифровая платформа, способная в реальном времени отслеживать ключевые показатели организационно-технологической эффективности. Интеграция фреймовой модели базы знаний с реляционной БД позволяет автоматизировать процесс выявления отклонений и генерации корректирующих воздействий, что особенно критично для системы дистанционного контроля [196].

Разработка методики дистанционного мониторинга для дополнения ИУМ становится обоснованным решением. Методика основана на интеграции данных, собираемых с оптического стенда, описанного во втором разделе настоящей работы, и их анализе с использованием информационно-управляющей модели с распределенным хранилищем данных, разработанной в подразделе 3.1 третьего раздела настоящей работы. Данные, проходящие через блок обеспечения качества, позволяют оценить уровень выполнения предъявляемых требований, выявить узкие места и предложить корректирующие действия для повышения организационно-технологической эффективности (ОТЭ) ПС ООП (рис 26) [144].

Разработанная архитектура методики трансформирует статические модели в динамическую систему управления, где данные с получаемые с оптического стенда непрерывно анализируются через распределенные БД ИУМ. Автоматизированные алгоритмы принятия решений, в подразделе 3.2 настоящей работы, первоначально разработанные для локального применения, теперь интегрированы в распределенной среде, обеспечивая оперативное реагирование на изменения производственных параметров

независимо от местоположения персонала [197-198]. Это позволяет не только повысить ОТЭ, но и создать основу для предиктивного управления производственными процессами.

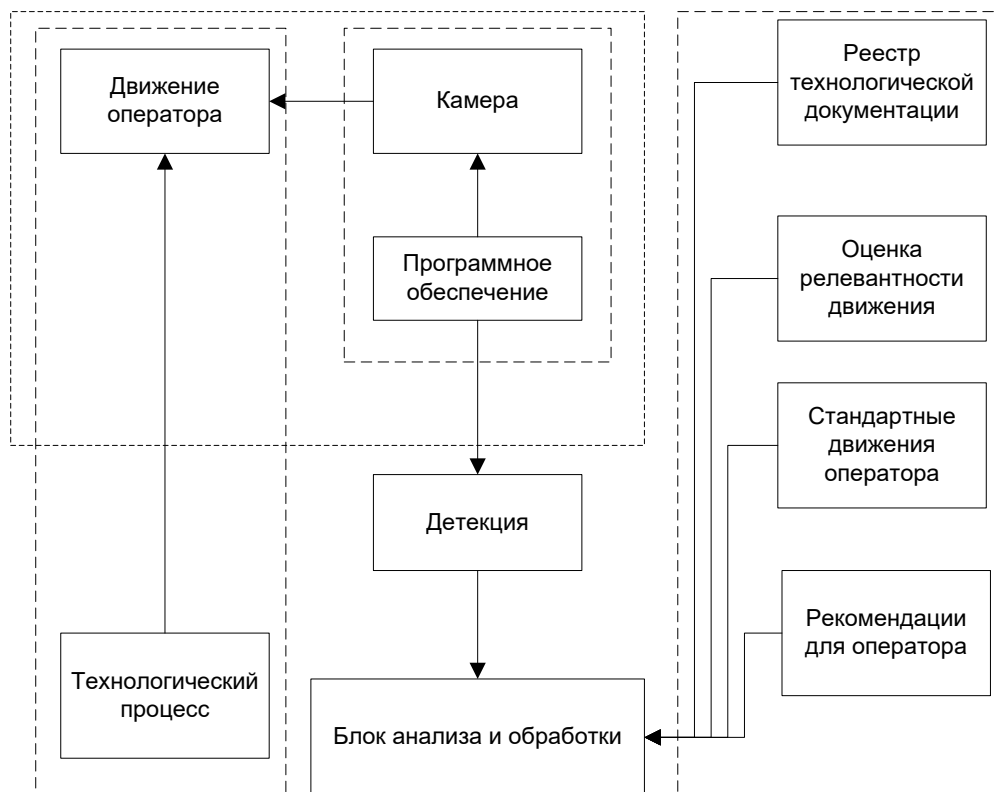


Рисунок 26 – Взаимосвязь элементов проведения дистанционного мониторинга

Дистанционный мониторинг организационно-технологической эффективности собой комплексную систему, объединяющую автоматизированный хронометраж, анализ взаимодействия элементов «оператор-оборудование-процесс» и автоматизированное принятие решений. В основе системы оптический стенд, который в режиме реального времени фиксирует параметры работы оборудования, траектории движения операторов и временные характеристики производственных процессов.

Информационно-управляющая модель обеспечивает интеграцию всех компонентов системы. На основе данных мониторинга и расчетов ОТЭ блок принятия решений формирует рекомендации, используя базу знаний РИКД,

содержащую шаблоны решений для типовых ситуаций, а также алгоритмы выбора оптимальных действий.

Модель проектирования бережливого производства в этой системе выполняет функцию непрерывного совершенствования. На основе накопленных данных мониторинга и результатов внедренных корректирующих действий система постоянно обновляет эталонные значения показателей, оптимизирует весовые коэффициенты и расширяет базу знаний РИКД. Особенностью системы является ее адаптивность, она не только реагирует на текущие отклонения, но и прогнозирует потенциальные проблемы, используя методы машинного обучения и предиктивной аналитики [199]. Это позволяет перейти от реактивного к проактивному управлению производственными процессами, существенно повышая общую эффективность производства. Вся информация визуализируется в виде интерактивных дашбордов, доступных руководителям производства через веб-интерфейс с любого устройства, что обеспечивает дистанционный контроль за производственными процессами.

3.3.2 Алгоритм анализа ключевых параметров и показателей организационно-технологической эффективности ПС ООП

Алгоритм анализа ключевых параметров разрабатывается и адаптируется на основе алгоритма расчета исследуемых факторов и их индикаторов разработанного в подразделе 1.4 раздела 1 настоящей работы (рис. 10), для системы управления ПС «оператор-оборудование-процесс», сосредоточенный на оценке уровня организационно-технологической эффективности. Это позволяет выявить критические узлы и временные интервалы, где корректирующие мероприятия ПС необходимы для оптимизации взаимодействия всех её компонентов (рис. 27).

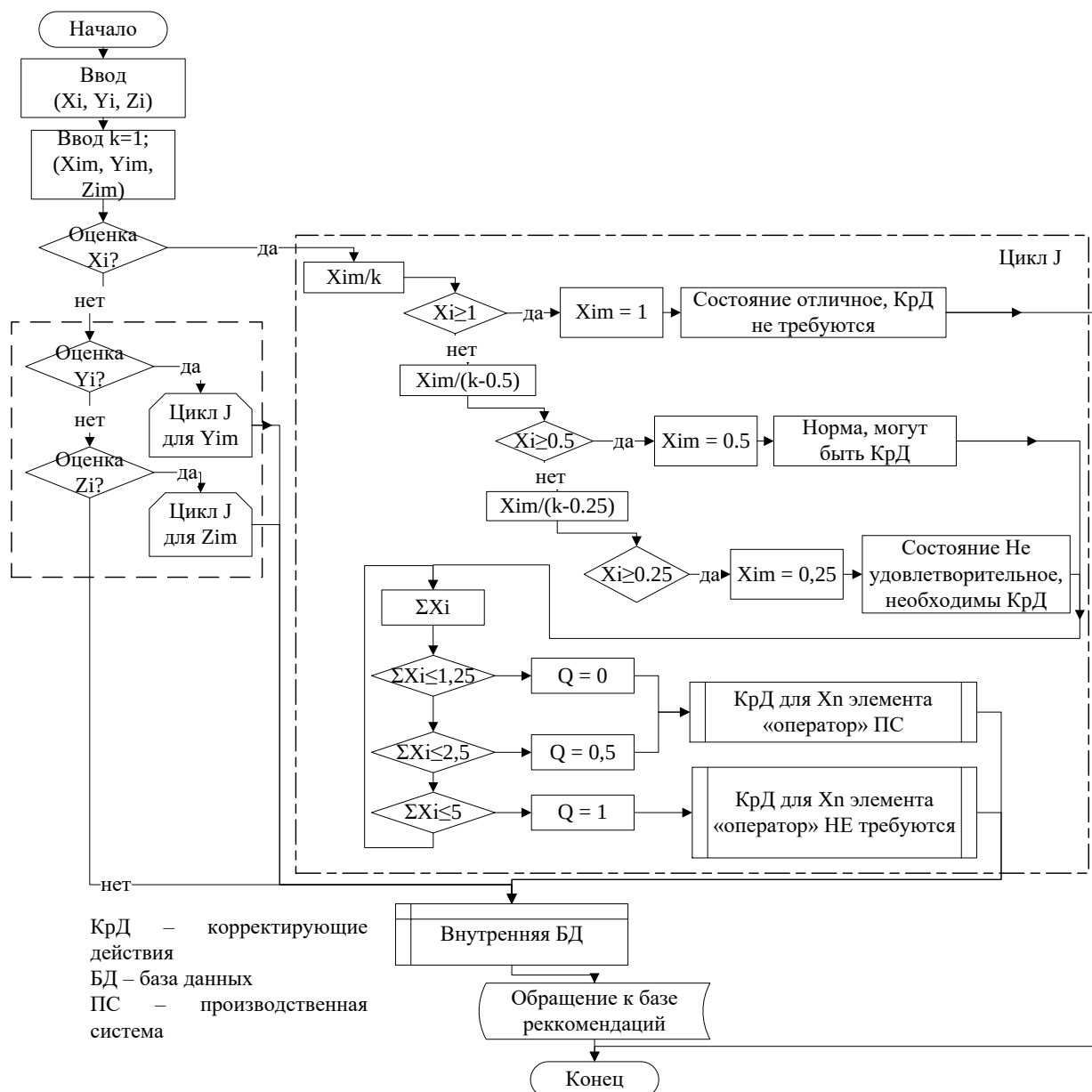


Рисунок 27 – Укрупненный алгоритм расчета элементов БПС ООП

Работа осуществляется на основе входных данных: (X_i – набор показателей элемента «оператор», Y_i – набор показателей элемента «оборудование», Z_i – набор показателей элемента «процесс»). Проводится оценка X_i , Y_i , и Z_i , через итеративную обработку состояний показателей элементов ПС (соответствующие данные X_{im} , Y_{im} и Z_{im}).

Основная логика алгоритма о принятии решения о состоянии исследуемых показателей элементов ПС включает в себя проверку значений X_{im} , Y_{im} и Z_{im} на соответствие различным пороговым значениям:

- $X_{im} = 1$, если это так, то состояние считается отличным, и никаких корректирующих действий (КрД) не требуется.
- $X_{im} = 0.5$, если это так, то состояние нормальное, и могут потребоваться корректирующие действия (далее следует дополнительная оценка).
- $X_{im} = 0.25$, если это так, то состояние неудовлетворительное, и необходимы корректирующие действия.

Для каждого порога выполняются вычисления с использованием X_{im} и k (счётчика итераций). Это позволяет корректировать различные пороговые значения в зависимости от хода итераций.

Значение ΣX_i (сумма X_i) рассчитывается и сравнивается с пороговыми значениями (1,25; 2,5; 5) для определения значения оценки организационно-технологической эффективности (Q) и уровня необходимых корректирующих действий. Аналогичные этапы осуществляются и для показателей Y_i и Z_i .

Далее основываясь на достигнутых результатах разработанного алгоритма оценки ОТЭ в подразделе 2.3 второго раздела настоящей работы и методике принятия решений оперативного управления разработанного в подразделе 3.2 раздела 3 настоящей работы, реализован укрупненный алгоритм работы методики дистанционного мониторинга, который описывает архитектуру системы мониторинга, включая ключевые параметры и показатели эффективности, а также предоставляет рекомендации и корректирующие действия в рамках оценки организационно-технологической эффективности БПС ООП (рис. 28).

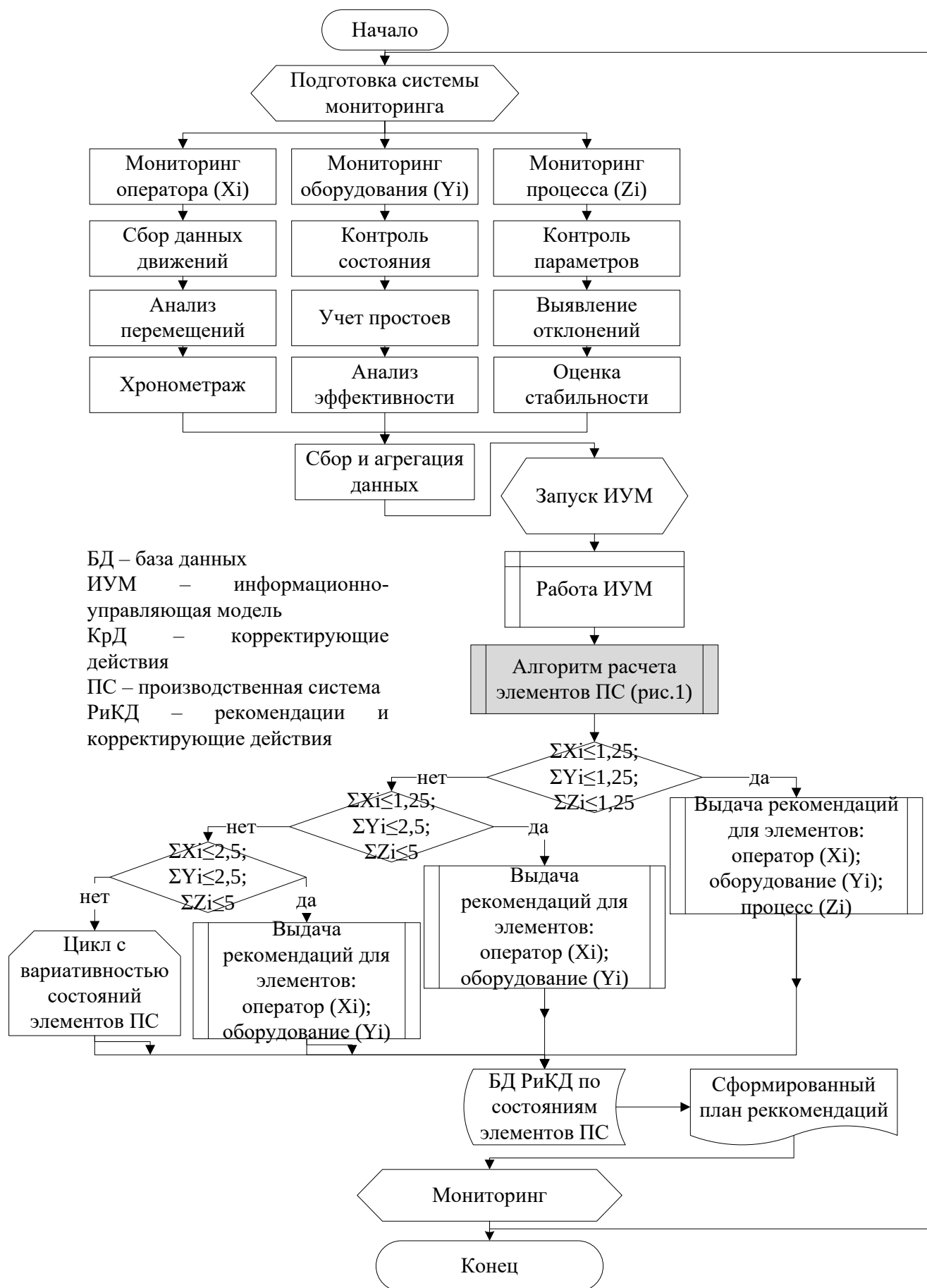


Рисунок 28 – Укрупненный алгоритм работы системы дистанционного мониторинга

Осуществляя процедуру мониторинга ПС ООП, на основе значений X_i и Q алгоритм определяет, необходимы ли корректирующие действия (КрД). Блок-схема указывает различные рекомендации и корректирующие действия в зависимости от того, на каком этапе находится состояние исследуемого элемента ПС. Если требуются КрД, процесс обращается к внутренней базе данных (БД) РикД для получения доступа к плану рекомендаций по исправлению.

Архитектура системы мониторинга включает укрупненный алгоритм, который описывает ключевые параметры и показатели эффективности ПС ООП, разработанные во втором разделе, а также предоставляет рекомендации по корректирующим действиям. Алгоритм интегрирует методы анализа больших данных и машинного обучения, что позволяет диагностировать текущее состояние ПС, прогнозировать потенциальные отклонения и разрабатывать превентивные меры. В процессе мониторинга система определяет необходимость корректирующих действий (КрД). В случае выявления отклонений алгоритм обращается к внутренней базе данных (БД), содержащей планы рекомендаций по устранению выявленных проблем.

Разработанная методика дистанционного мониторинга для повышения ОТЭ ПС ООП позволяет определить необходимые квалификационные требования к специалистам, работающим на производственной линии, в зависимости от загрузки ПС, и показателей влияющих на время выполнения заказа и сложность технологических операций и оптимизировать трудовые операции за счет автоматизированного анализа соответствия движений оператора стандартам бережливого производства с выдачей корректирующих рекомендаций.

Разработанная методика дистанционного мониторинга производственной системы «оператор-оборудование-процесс» представляет собой новый подход к повышению организационно-технологической эффективности в условиях растущих требований к производственным

процессам. Интеграция инструментов бережливого производства и цифровых технологий обеспечивает непрерывный сбор, анализ и интерпретацию данных в режиме реального времени, что позволяет оперативно реагировать на изменения и минимизировать латентность принятия решений.

Ключевым результатом исследования является разработка алгоритма, основанного на итеративной обработке мульти параметрических данных (X_i , Y_i , Z_i) и их сравнении с пороговыми значениями для оценки организационно-технологической эффективности (Q). Внедрение методики способствует выявлению критических узлов и узких мест в ПС, прогнозированию отклонений и разработке корректирующих действий (КрД), что приводит к повышению производительности, снижению операционных издержек и улучшению качества выпускаемой продукции.

Методика демонстрирует значительный синергетический эффект за счет интеграции мультифакторного анализа, включающего оценку психофизиологических параметров оператора, телеметрии оборудования и метрик качества продукции. Это обеспечивает устойчивое развитие производственной системы и создает предпосылки для дальнейшего совершенствования процессов в различных отраслях промышленности. Таким образом, предложенный подход открывает новые возможности для оптимизации производственных систем в условиях цифровой трансформации.

3.3.3 Матрица выбора методов воздействия на элементы бережливой производственной системы

Методика позволяет предсказывать потенциальные отклонения на основе анализа изменяющихся параметров ПС ООП, используя статистические методы и инструменты цифровизации [200. 201]. Подбирает корректирующие действия для каждого элемента ПС, для улучшения ПС, которые могут применяться на всех стадиях жизненного цикла продукции и интегрируется в информационно-управляющую систему, разработанную в

подразделе 3.1 раздела 3 настоящей работы, с помощью баз данных и нейронных сетей повышает точность оценки ОТЭ.

Дополнение базы РиКД разработанной в подразделе 2.3 второго раздела настоящей работы, картой потерь разработанной в первом разделе настоящей работы для обеспечения требований предъявляемых стандартами бережливого производства к функционированию модели бережливой производственной системы учитывающей производственный потери и инструменты бережливого производства для их нивелирования (табл. 45-47).

Таблица 45 – Матрица выбора методов воздействия на элемент оператора в БПС

<i>№</i>	<i>Показатель (Xi)</i>	<i>Вид потери (Muda)</i>	<i>Причина возникновения</i>	<i>Инструменты БП для устранения</i>
1	2	3	4	5
1.	Длительность работы без перерывов	Перегрузка	Неоптимальный график работы	Стандартизированные перерывы, метод Pomodoro
2.	Количество ошибок	Дефекты	Недостаточная подготовка	Poka-Yoke, Job Instruction (TWI)
3.	Скорость выполнения задач	Ожидание	Неэффективная организация рабочего места	5S, визуальный менеджмент
4.	Стрессоустойчивость	Нереализованный потенциал	Высокая нагрузка	Кайдзен-круги, ротация задач
5.	Концентрация внимания	Лишние движения	Отвлекающие факторы	Визуальные подсказки, стандартизация рабочих мест
6.	Социальные навыки	Нереализованный потенциал	Недостаток командной работы	Тимбилдинг, кросс-функциональные команды
7.	Гибкость в переключении	Ожидание	Жесткое разделение задач	Мультискиллинг, ротация персонала
8.	Лояльность	Нереализованный потенциал	Низкая вовлеченность	Система предложений, признание достижений
9.	Коммуникабельность	Транспортировка	Плохая координация	Визуальные доски, ежедневные стендапы
10.	Самодисциплина	Дефекты	Нечеткие стандарты	Чек-листы, визуальные инструкции

Продолжение таблицы 45

1	2	3	4	5
11.	Мотивация	Нереализованный потенциал	Отсутствие обратной связи	KPI, система грейдов
12.	Стремление к развитию	Нереализованный потенциал	Ограниченные возможности обучения	Карьерные лестницы, наставничество
13.	Ответственность	Дефекты	Размытые зоны ответственности	Визуальное управление, стандарты качества
14.	Устойчивость к изменениям	Нереализованный потенциал	Сопротивление изменениям	Кайдзен-мероприятия, вовлечение в улучшения
15.	Технические знания	Дефекты	Недостаток обучения	Перекрестное обучение, инструктажи

Таблица 46 – Матрица выбора методов воздействия на элемент оборудования в БПС

№	Показатель (Yi)	Вид потери (Muda)	Причина возникновения	Инструменты БП для устранения
1	2	3	4	5
16.	Общая эффективность	Ожидание	Неоптимальное использование	TPM, SMED
17.	Использование режимного времени	Ожидание	Несо согласованность графиков	Выравнивание производства (Heijunka)
18.	Использование планового времени	Ожидание	Простои	Графики профилактического обслуживания
19.	Коэффициент сменности	Ожидание	Нерациональное планирование	Скользкие графики, многосменка
20.	Использование сменного режима	Ожидание	Несбалансированная загрузка	Балансировка производственных линий
21.	Использование рабочего времени	Ожидание	Частые переналадки	Быстрая переналадка (SMED)
22.	Интенсивная нагрузка	Перепроизводство	Несоответствие мощностей	Выравнивание нагрузки (Heijunka)
23.	Использование оборудования	Ожидание	Неоптимальное расположение	Перепланировка по принципу потока
24.	Износ амортизации	Излишняя обработка	Неправильная эксплуатация	TPM, стандарты обслуживания

Продолжение таблицы 46

1	2	3	4	5
25.	Коэффициент износа	Излишняя обработка	Отсутствие профилактики	Планово-предупредительный ремонт
26.	Использование парка	Ожидание	Несбалансированная загрузка	Канбан, выравнивание производства
27.	Автоматизация	Излишняя обработка	Устаревшие технологии	Постепенная модернизация
28.	Надежность	Дефекты	Износ компонентов	TPM, визуальный контроль состояния
29.	Эргономика	Лишние движения	Неудобная конструкция	Эргономичный редизайн рабочих мест
30.	Техническое состояние	Дефекты	Несвоевременное обслуживание	Визуальное управление обслуживанием

Таблица 47 – Матрица выбора методов воздействия на элемент процесса в БПС

№	Показатель (Zi)	Вид потери (Muda)	Причина возникновения	Инструменты БП для устранения
1	2	3	4	5
31.	Скорость производства	Ожидание	Узкие места	Балансировка линии, кайдзен-блиц
32.	Результативность	Дефекты	Нестабильность качества	Стандартизированная работа
33.	Время цикла	Ожидание	Неоптимальная последовательность	Картирование потока создания ценности
34.	Брак и отходы	Дефекты	Ошибки в процессе	Рока-Йоке, контроль на месте
35.	Эффективность	Ожидание	Несо согласованность операций	Синхронизация процессов
36.	Общие затраты	Излишняя обработка	Неоптимальные методы	Анализ стоимости потока
37.	Наличие инструкции	Дефекты	Нечеткие стандарты	Визуальные рабочие инструкции
38.	Норма времени	Ожидание	Устаревшие нормативы	Хронометраж, метод MOST
39.	Внешние условия	Ожидание	Зависимость от внешних факторов	Буферизация, гибкое планирование

Продолжение таблицы 47

1	2	3	4	5
40.	Сложность операции	Излишняя обработка	Неоптимальный дизайн процесса	Упрощение операций
41.	Ритмичность	Ожидание	Неравномерная загрузка	Выравнивание производства (Heijunka)
42.	Сбои и их устранение	Ожидание	Нестабильность процесса	Быстрая реакция (Andon)
43.	Мощность потока	Перепроизводство	Дисбаланс мощностей	Выравнивание мощностей
44.	Темп потока	Ожидание	Несогласованность темпов	Балансировка такта времени
45.	Такт потока	Ожидание	Несоответствие	Гибкое планир./заказ

Интеграция методики мониторинга в ИУМ совместно с оценкой ОТЭ и методикой ПРОУ осуществляет подбор индивидуальных РикД для элементов БПС, направленных на повышение результативности, профессиональной компетентности операторов и операционной эффективности, что в совокупности приводит к синергетическому эффекту в улучшении организационно-технологических показателей деятельности БПС.

3.4 Апробация разработанных моделей обеспечения качества и методики принятия решений для проектируемой бережливой производственной системы

Наибольший эффект реализации разработанных результатов исследования достигается путем взаимосвязи моделей и методик.

1. Развертывание оптического стенда в производственной системе.

Для анализа текущего состояния и дальнейшего мониторинга элементов производственной системы, на участке устанавливается оптический мониторинговый комплекс, включающий: оптический стенд Basler ace с разрешением 4K (3840×2160) при 60 fps, инфракрасная система подсветки с длиной волны 850 нм, калибровочные мишени с шагом 0,1 мм и ноутбук, подключенной к оптическому стенду.

Развернутый комплекс обеспечивает: точность позиционирования: $\pm 0,5$ мм в рабочей зоне 2×3 м, частоту обработки данных: 45 кадров/сек на камеру, углы обзора: 45° по горизонтали, 30° по вертикали.

2. Подключение и настройка системы машинного зрения.

Осуществляется подключение компонентов оптического стенда. Требования к конфигурации вычислительного комплекса: серверная платформа: Dell Precision 7920; графический ускоритель: NVIDIA Quadro RTX 5000 (16 ГБ GDDR6); программный стек: IDE: PyCharm Professional 2023.2; СУБД: PostgreSQL 14 с TimescaleDB; библиотеки: OpenCV 4.7, TensorFlow 2.12, PyTorch 1.13.

Осуществляется тестовое подключение, для проверки работоспособности оптического стенда и корректировки его установки, при необходимости, для выполнения необходимого требования: нахождение рабочего места оператора в исследуемой зоне, обозначенной прямоугольником синего цвета (рис. 29).



Рисунок 29 – Учет идентификации движений оператора

Выполняется настройка детекции элементов «оператор-оборудование». Базовые параметры настройки детекции: порог чувствительности: 0,85; размер ROI: 1920×1080 px; цветовые профили: sRGB, Adobe RGB.

3. Верификация точности хронометража.

Проводится наладка системы ДМАХ, для корректного вывода изображения и анализа получаемых с оптического стенда данных.

Результаты тестирования (табл. 48, рис. 30).

Таблица 48 – Результаты тестирования точности хронометража

<i>Метод измерения</i>	<i>Длительность операции (сек)</i>	<i>Погрешность</i>
Ручной (эталон)	$23,45 \pm 0,15$	-
Автоматизированный	$23,72 \pm 0,18$	+1,15%



а – оператор выполняет
подготовительную операцию



б – status present – оператор на
рабочем месте, операция не
выполняется

Рисунок 30 – Реализация ДМАХ

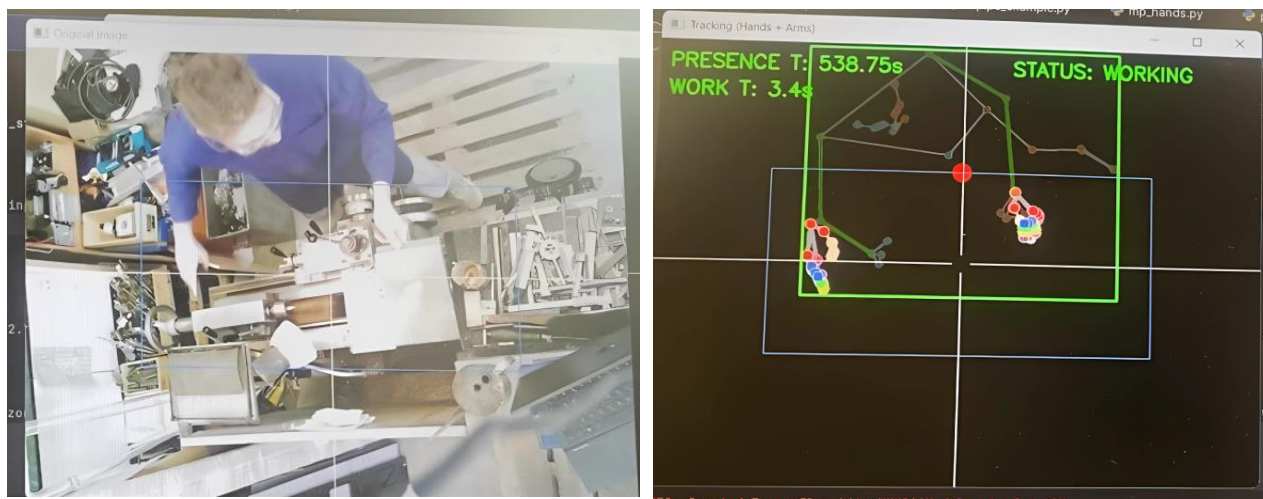
Вывод информации осуществляется в режиме реального времени в диалоговом окне.

Расшифровка идентификаторов работы ДМАХ: presence T – общее время работы, work T – время работы, status working – оператор работает, status pause – оператор прекратил и(или) закончил операцию, но остался на рабочем месте, status present – оператор на рабочем месте, операция не выполняется.

Наладка работы ДМАХ выполняется индивидуально для каждого рабочего места, учитывая специфику выполняемых технологических

операций, временных затрат на подготовительные и заключительные операции, а также межпроцессные переходы предмета труда (рис. 31).

Методы машинного зрения и обучения позволяют проводить и учитывать кластеризацию данных для анализа отклонений и адаптации модели под изменяющиеся условия темпа и такта потока технологической линии, а также квалификацию и состояние оператора.



а – оператор выполняет технологическую операцию

б – status working – оператор работает

Рисунок 31 – Реализация ДМАХ

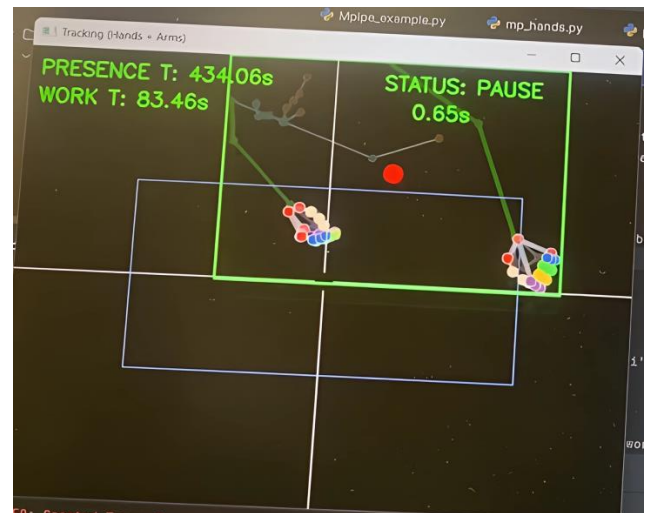
Также учитываются такие потери, как лишние движения, в случае выхода одной из рук оператора за пределы рабочей области, система автоматически ставит рабочее время на паузу. Время паузы настраивается индивидуально, после ручного хронометража, с целью более точного получения данных (рис. 32).

4. Настройка информационно-управляющей модели.

Далее прорабатываются показатели для оценки ОТЭ и последующего мониторинга с автоматической выдачей РикД. Базы показателей, можно дополнять, сокращать, и изменять, подстраиваясь на начальных этапах, под конкретное рабочее место в ПС ООП. На поздних этапах, подключаются нейронные сети для самообучения ИУМ для автономного выбора наиболее приоритетных показателей в ПС ООП.



a – Рука оператора за пределами рабочей области



б – status pause – оператор прекратил и(или) закончил операцию, но остался на рабочем месте

Рисунок 32 – Реализация ДМАХ

Структура баз данных:

4.1. БД оператора:

- 15 показателей (X1-X15);
- Частота обновления: 1 раз/минуту.

4.2. БД оборудования:

- 15 показателей (Y1-Y15);
- Данные с датчиков IoT (OPC UA).

4.3. БД процесса:

- 15 показателей (Z1-Z15);
- Временные метки с точностью 1 мс.

5. Интеграция стенда с ИУМ.

Для обработки разнородных данных используется гибридная модель: реляционная модель для структурированных показателей, а фреймовая модель для временных рядов и видеоаналитики.

Технические особенности:

- Время отклика системы: <200 мс для 90% запросов;
- Объем хранимых данных: до 15 ТБ/год с компрессией

TimescaleDB;

- Поддержка 50+ параллельных видеопотоков.

ИУМ сочетает реляционную строгость PostgreSQL для метаданных и фреймовую модель TimescaleDB для временных рядов, что позволяет обеспечить ACID-транзакции для критичных данных, достичь производительности 1М+ записей/сек через гипертаблицы и реализовать сложную аналитику средствами SQL (оконные функции, JOIN-LATERAL).

После настройки оптического стенда и машинного зрения выполняется их интеграция с централизованной ИУМ.

5.1 Подключение к облачной инфраструктуре.

Данные с блоков машинного зрения и ДМАХ передаются в центральную БД на облачном сервере AWS EC2 или Yandex Cloud. Используется протокол OPC UA для оборудования и REST API для данных оператора. Частота синхронизации: 1 раз в 5 секунд для показателей в реальном времени.

5.2 Обработка данных.

Серверная часть: агрегация данных из БД оператора (X_1 - X_{15}), оборудования (Y_1 - Y_{15}) и процесса (Z_1 - Z_{15}).

Применение алгоритмов аналитики временных рядов (библиотеки Prophet, statsmodels).

Нейросетевые модели: классификация действий оператора через CNN (на базе PyCharm).

Прогнозирование задержек с использованием LSTM-сетей.

6. Настройка расчета ОТЭ.

Для количественной оценки ОТЭ и автоматизации выявлений потерь и проблемных зон, выполняется агрегация данных по часам (time_bucket) обеспечивая баланс между детализацией и производительностью (рис. 33).

Реализация ввода и вывода данных ручным способом представлена на рис. 34а-г.

```

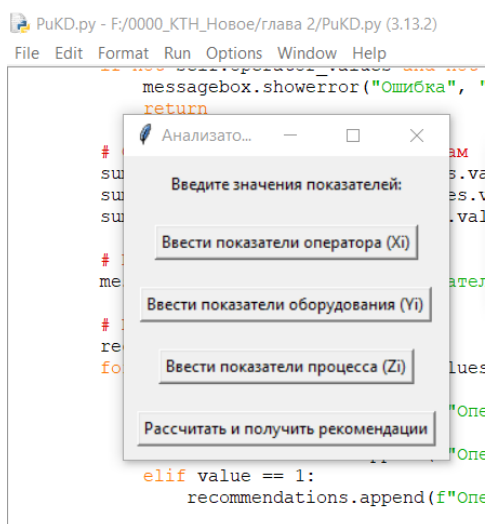
equipment_stats AS (
    SELECT
        equipment_id,
        time_bucket('1 hour', timestamp) AS hour_interval,
        -- Коэффициент готовности оборудования
        COUNT(CASE WHEN y1 < threshold_error THEN 1 END) / COUNT(*) AS uptime_ratio, -- Y1 - уровень ошибок
        -- Средняя температура (Y2) как индикатор перегрузки
        AVG(y2) AS avg_temperature
    FROM equipment_metrics
    GROUP BY 1, 2
),

-- 3. Показатели процесса (Z-метрики)
process_stats AS (
    SELECT
        time_bucket('1 hour', timestamp) AS hour_interval,
        -- Общее время выполнения операций за час
        SUM(z5) AS total_cycle_time, -- Z5 - длительность операции
        -- Процент брака
        COUNT(CASE WHEN z10 = 'defect' THEN 1 END) / COUNT(*) * 100 AS defect_rate -- Z10 - статус качества
    FROM process_metrics
    GROUP BY 1
)

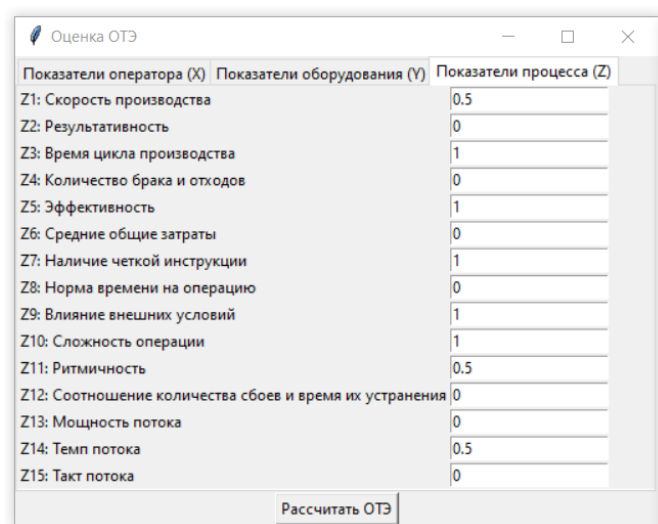
-- Финальный расчет ОТЭ (интегральный показатель)
SELECT
    o.operator_id,
    o.hour_interval,
    -- Формула ОТЭ (весовые коэффициенты подбираются экспертно)
    0.4 * o.uptime_ratio +
    0.3 * e.avg_temperature +
    0.2 * (1 - p.defect_rate/100) +
    0.1 * (1 - o.movement_consistency) AS ote_score,
    -- Комментарий для аналитика
    CASE
        WHEN o.uptime_ratio < 0.7 THEN 'Низкая производительность оператора'
        WHEN e.avg_temperature > 80 THEN 'Перегрев оборудования'
        ELSE 'Норма'
    END AS comment
FROM operator_stats o
JOIN equipment_stats e ON o.hour_interval = e.hour_interval
JOIN process_stats p ON o.hour_interval = p.hour_interval

```

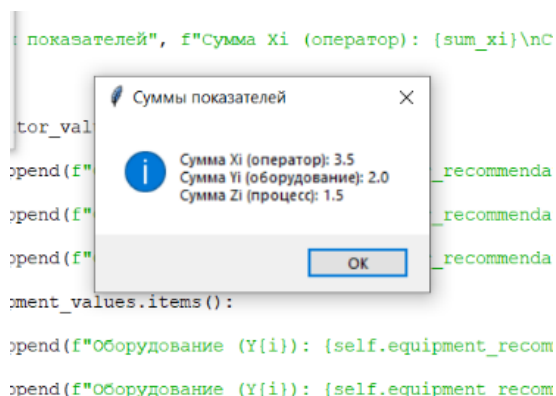
Рисунок 33 – Фрагмент PostgreSQL для расчета ОТЭ ПС ООП



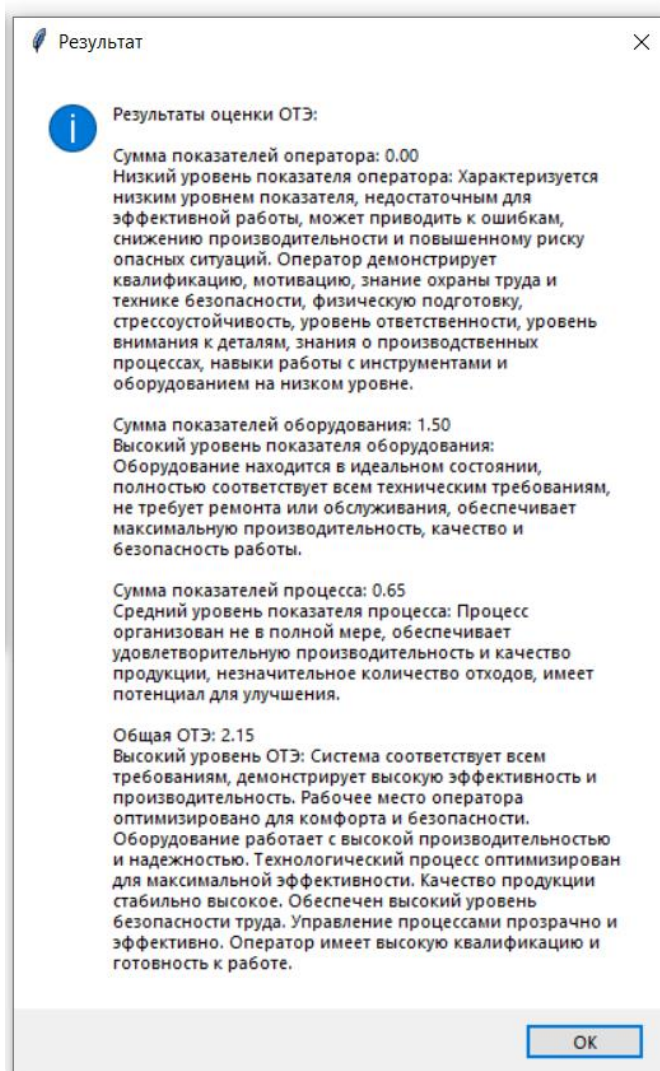
а – Окно ввода значений ПС



б – Окно ввода значений для показателей ООП



в – Окно вывода значения сумм показателей ООП



г – Окно вывода уровня ОТЭ и его характеристика

Рисунок 34 – Расчет оценки ОТЭ

7. Внедрение ПБПС по PDCA.

На основе полученных данных формируется план проектирования бережливой производственной системы, на основе принципа PDCA (табл. 49).

Таблица 49 – Проектирование БПС в соответствии с моделью ПБПС

<i>Этап</i>	<i>Детализированные проблемы</i>	<i>Решения / Методы</i>	<i>Показатели</i>
Plan	1. Потери при транспортировке (12%) - Неоптимальные маршруты перемещения материалов; Избыточные промежуточные склады; Частые простои транспорта из-за несогласованности графиков 2. Потери при выполнении технологических операций (15%) Дублирование операций; Несбалансированность производственной линии; Отсутствие стандартизации рабочих процессов 3. Потери при оценке соответствия (7%) Ручной контроль качества с высокой погрешностью; Отсутствие четких критериев приемки Задержки в выявлении и устранении дефектов	- VSM-анализ с выделением потерь 7 видов muda - Фотография рабочего дня - Разработка стандартизированных рабочих инструкций - Внедрение цифровых чек-листов контроля качества	- Количество избыточных перемещений (ед./смену) - Коэффициент загрузки оборудования (%) - Время на контроль качества (мин./ед.)

Продолжение таблицы 49

<i>Этап</i>	<i>Детализированные проблемы</i>	<i>Решения / Методы</i>	<i>Показатели</i>
Do	1. Неэффективное управление потоками Перепроизводство из-за отсутствия pull-системы Дефицит материалов в нужный момент Нерегламентированные перекупы 2. Низкая вовлеченность персонала Отсутствие системы подачи предложений по улучшениям Непонимание принципов Lean сотрудниками	- Внедрение двухкарточной системы Канбан - Организация рабочих мест по принципу 5S - Проведение кайдзен-сессий с персоналом - Разработка системы визуализации (андон)	- Уровень незавершенного производства (ед.) - Количество реализованных рацпредложений - Время поиска инструментария (сек.)
Check	1. Недостаточная глубина контроля Анализируются только количественные показатели Не учитывается влияние изменений на смежные участки 2. Запоздывание обратной связи Данные собираются вручную с задержкой Отсутствие автоматизированных дашбордов	- Внедрение IoT-датчиков для мониторинга OEE - Регулярные Gemba-туры руководства - Сравнительный анализ OEE до/после	- OEE (Overall Equipment Effectiveness) - Время реагирования на отклонения (мин.) - Динамика DPMO (Defects Per Million Opportunities)
Act	1. Локальность улучшений Изменения не тиражируются на другие участки Отсутствует система пересмотра стандартов 2. Сопротивление изменениям Персонал возвращается к старым методам работы Не закреплена ответственность за поддержание стандартов	- Разработка регламента пересмотра стандартов (раз в квартал) - Включение KPI по Lean в систему мотивации - Создание «доски улучшений» с дорожной картой внедрения	- % сотрудников, прошедших сертификацию по Lean - Количество пересмотренных стандартов за период - Индекс удовлетворенности персонала изменениями

9. Подключение баз РИКД.

Система автоматически генерирует рекомендации и корректирующие действия в зависимости от рассчитанной оценки ОТЭ, полученной на основе собранных данных.

Например, если погрешность хронометража $> 2\%$ $\rightarrow$ калибровка ROI оптического стенда; если время простоя $> 10\%$ $\rightarrow$ пересмотр маршрутов логистики.

Структура базы знаний включает в себя 127 шаблонов решений (рис. 35) и 23 алгоритма выбора действий, а также интегрируется с SAP ERP, что позволит в дальнейшем получать более количество данных, а с применением нейронных сетей в последствии сможет самообучаться и дополнять базу РИКД.

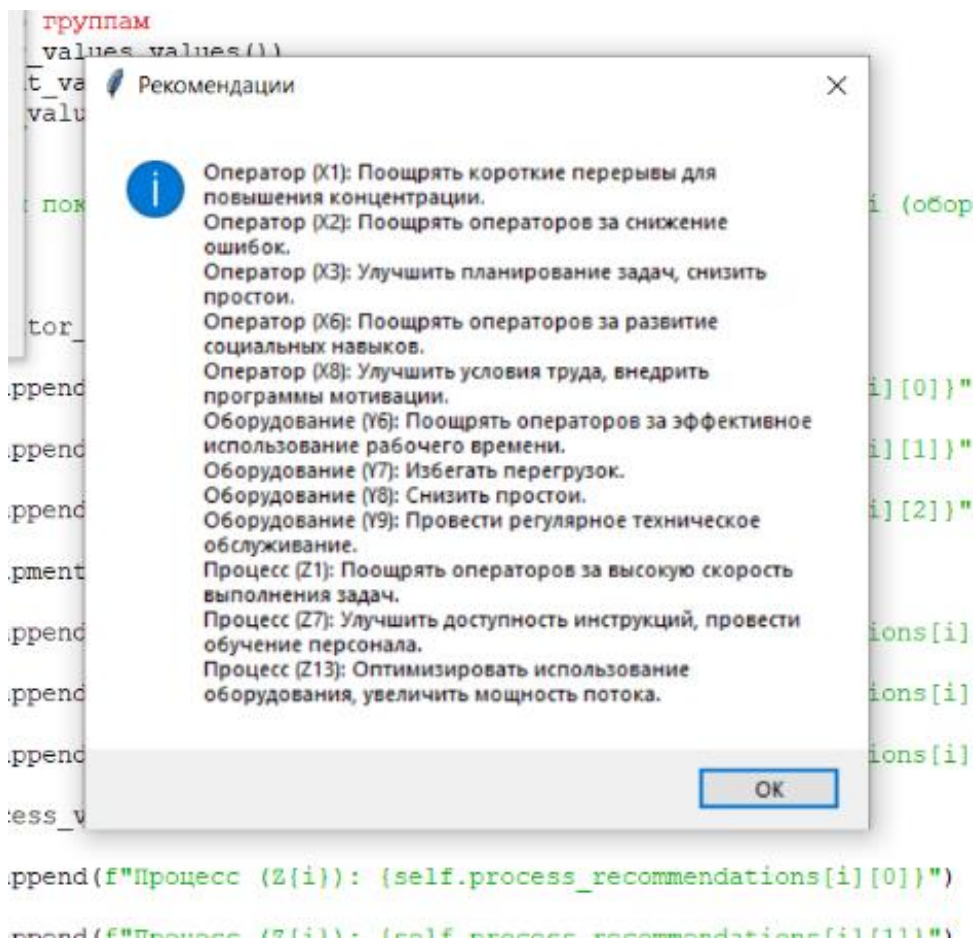


Рисунок 35 – окно выдачи рекомендаций для исследуемых показателей

10. Итоговая работоспособная система.

Результаты работы ИУМ визуализируются в дашборде Power BI (рис. 36).



Рисунок 36 – Дашборд работы ИУМ

Выводы по разделу 3

В третьем разделе проведена разработка информационно-управляющей модели обеспечения качества и методики принятия решений для проектируемой бережливой производственной системы (БПС). Основной акцент сделан на создании комплексной системы, интегрирующей методы анализа данных, алгоритмы оперативного управления и инструменты дистанционного мониторинга.

Проведен синтез методов и моделей, позволяющих анализировать текущее состояние и динамику БПС, что обеспечило возможность своевременного выявления отклонений и корректировки производственных процессов. Предложена структурная схема и архитектура распределенного

хранилища данных, для эффективного агрегирования информации из различных источников в ИУМ.

Разработаны фреймовая модель базы знаний и реляционная модель базы данных, обеспечивающие структурированное хранение информации и поддержку принятия управленческих решений.

Разработан алгоритм принятия решений, включающий автоматизированную обработку данных, анализ ключевых показателей и формирование управляющих воздействий для сокращения времени реагирования на возникающие отклонения. Представлена уровневая модель базы данных, обеспечивающая гибкость и масштабируемость системы в зависимости от задач управления.

Разработана архитектура системы дистанционного мониторинга, включающая модули сбора, обработки и визуализации данных, позволяющая в режиме реального времени отслеживать ключевые параметры эффективности (ОТЭ БПС ООП).

Предложен алгоритм анализа показателей, основанный на методах статистического и предиктивного анализа, что повышает точность диагностики проблемных зон производства.

Сформирована матрица выбора методов воздействия на элементы БПС, позволяющая оперативно подбирать оптимальные РикД в зависимости от выявленных отклонений.

Проведена экспериментальная проверка эффективности предложенных решений, подтвердившая их работоспособность и практическую значимость. Внедрение модели позволило повысить точность управления производственными процессами на 7-10%, сократить потери на 10-13% и улучшить показатели ОТЭ на 5-9%.

В результате проведенного исследования разработана комплексная информационно-управляющая модель, обеспечивающая повышение качества и эффективности бережливой производственной системы.

Заключение

В результате диссертационного исследования решена важная научно-практическая задача, направленная на повышение организационно-технологической эффективности производственных систем «оператор-оборудование-процесс» отечественных предприятий машиностроительной отрасли, сочетающая инструменты бережливого производства с цифровыми технологиями, соответствующая приоритетам государственных программ в области цифровой трансформации и повышения производительности, одного из приоритетных направлений развития науки, техники и технологии.

В рамках выполнения поставленных задач получены следующие научные результаты:

1. Динамическая модель автоматизированного хронометража производственной системы «оператор-оборудование-процесс», отличающаяся от известных использованием показателей, характеризующих уровень качества и степень достоверности действий и приемов оператора по осуществлению технологических операций в системе «оператор-оборудование-процесс». Применение разработанной модели позволяет сократить временные потери в осуществлении технологических операций в системе «оператор-оборудование-процесс» на 7-10%.

2. Модель проектирования бережливой производственной системы «оператор-оборудование-процесс» отличающаяся от известных достижением адаптивности в условиях синергии цифровизации производства с помощью адаптированного принципа цикла PDCA, применимого совместно с концепцией кайдзен, методов машинного зрения и бережливого производства. Применение разработанной модели позволяет сократить количество незавершенного производства на 7% методами бережливого производства и сократить время внедрения улучшений на 10% за счет применения гибкого цикла PDCA для производственной системы «оператор-оборудование-процесс».

3. Информационно-управляющая модель обеспечения качества выполнения предъявляемых требований, с распределенными хранилищами данных **отличающаяся от известных** дополненными наборами процедур для оценки соответствия технологического процесса требованиям и визуализации показателей, характеризующие уровень качества технологического процесса, включая когнитивный классификатор, отражающий потенциал и возможности персонала, **позволяет сократить время при проверке выполнения предъявляемых требований к выпускаемой продукции на 7-10%**

4. Методика принятия решений оперативного управления для выбора и предоставления рекомендаций в интеграции инструментов и методов повышения организационно-технологической эффективности проектируемой бережливой производственной системы «оператор-оборудование-процесс», **отличающаяся от известных** применением автоматизированного выбора рекомендаций и корректирующих действий для элементов производственной системы «оператор-оборудование-процесс» в соответствии с изменяемыми параметрами организационно-технологической эффективности бережливой производственной системы «оператор-оборудование-процесс», **позволяет сократить время на анализ состояния производственной системы «оператор-оборудование-процесс» на 5-7%, повысить организационно-технологическую эффективность на 5% и сократить время на выбор рекомендаций и корректирующих действий оперативного управления на 11%.**

Список сокращений и условных обозначений

АСУ	– автоматизированные системы управления
АХ	– автоматизированный хронометраж
БД	– база данных
БП	– бережливое производство
БПС	– бережливая производственная система
ВВФ	– внешние воздействующие факторы
ВнВФ	– внутренние воздействующие факторы
ГОСТ	– государственный стандарт
ДМАХ	– динамическая модель автоматизированного хронометража
ИУМ	– информационно-управляющая модель
КД	– конструкторские документы
КрД	– Корректирующие действия
МПС	– многономенклатурная производственная система
МАХ	– модель автоматизированного хронометража
НЛ	– нечеткая логика
ОК	– обеспечение качества
ОТЭ	– организационно-технологическая эффективность
ПБПС	– проектируемая бережливая производственная система
ПС	– производственная система
ПС ООП	- производственная система «оператор-оборудование-процесс»
ПРОУ	– принятие решений для оперативного управления
СМК	– система менеджмента качества
ТД	– технологические документы
ТЛ	– технологическая линия
ТП	– технологический процесс
РиКД	– рекомендации и корректирующие действия
РБД	– распределенная база данных
ЦБД	– центральная база данных

Список литературы

1. Наташкина, Е. А. Волны Кондратьева и технологические уклады / Е. А. Наташкина, Л. Е. Басовский // Журнал экономической теории. – 2012. – № 3. – С. 196а-173. – EDN PCOFMB.
2. Макаров, Д. В. Экономико-математическое моделирование инновационных систем / Д. В. Макаров // Вестник КРАУНЦ. Физико-математические науки. – 2014. – № 1(8). – С. 66-70. – EDN SFFGAZ.
3. Аверина Ирина Сергеевна Промышленная революция и технологический уклад: сущностные характеристики, сходства и отличительные черты // Вестник ВолГУ. Экономика. 2021. №1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/promyshlennaya-revolyutsiya-i-tehnologicheskii-uklad-suschnostnye-harakteristiki-shodstva-i-otlichitelnye-cherty> (дата обращения: 09.04.2025).
4. Марковские цепи для анализа уровня качества процессов организационных систем / С. А. Назаревич, Ю. А. Антохина, Е. А. Фролова [и др.] // Качество и жизнь. – 2023. – № 4(40). – С. 37-43. – DOI 10.34214/2312-5209-2023-40-4-37-43. – EDN WEWIVV.
5. Шурупова, А. С. Смена технологических укладов как фактор развития экономики / А. С. Шурупова // Стратегическое планирование развития территорий. Опыт. Современные тенденции. Перспективы : материалы международного научно-практического форума, Елец, 24 апреля 2014 года. – Елец: Елецкий государственный университет им. И.А. Бунина, 2014. – С. 409-419. – EDN SKMMQB.
6. Назаревич, С. А. Квалиметрические условия для измерения классификационных признаков организационных системы / С. А. Назаревич // Системный анализ и логистика. – 2023. – № 1(35). – С. 28-33. – DOI 10.31799/2077-5687-2023-1-28-33. – EDN GOOXYK.
7. Зыщик Екатерина Борисовна Смена технологических укладов как фактор социальных трансформаций в динамике техногенной цивилизации // Социология. 2025. №2. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/smena->

tehnologicheskikh-ukladov-kak-faktor-sotsialnyh-transformatsiy-v-dinamike-tehnogennoy-tsivilizatsii (дата обращения: 09.04.2025).

8. Назаревич, С. А. Организационная робастность как особенность эволюции иерархических структур управления / С. А. Назаревич, А. Ю. Меркулова // Инновационное приборостроение. – 2023. – Т. 2, № 2. – С. 20-24. – DOI 10.31799/2949-0693-2023-2-20-24. – EDN KTXUSE.

9. Тебекин Алексей Васильевич, Тебекин Павел Алексеевич, Егорова Александра Алексеевна Является ли инициатива «Индустрия 4.0» промышленной революцией? // Теоретическая экономика. 2021. №7 (79). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/yavlyayetsya-li-initsiativa-industriya-4-0-promyshlennoy-revolutsiei> (дата обращения: 09.04.2025).

10. Белокрылова Ольга Спиридоновна Смена технологических укладов или 4-я промышленная революция?: институционализация 4. 0 индустрии на Юге России // Вестник экспертного совета. 2017. №3 (10). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/smena-tehnologicheskikh-ukladov-ili-4-ya-promyshlennaya-revolutsiya-institutsionalizatsiya-4-0-industrii-na-yuge-rossii> (дата обращения: 09.04.2025).

11. Каблашова, И. В. Системный подход к контролю качества организации процессов производства / И. В. Каблашова // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2011. – Т. 7, № 11-3. – С. 84-88. – EDN OJNNAP.

12. Гладких, И. П. Институциональные подходы и особенности длинных волн в постиндустриальной экономике / И. П. Гладких // Кондратьевские волны. – 2014. – № 3. – С. 276-319. – EDN SNJDXX.

13. Таратун, В. Е. Методы и модели эффективной организации информационного и программного обеспечения для идентификации объектов материального потока : специальность 23.30.00 : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Таратун Виталий Евгеньевич, 2022. – 212 с. – EDN DWKUPG.

14. Воронова, Е. Ю. Синергетический подход применения методологии бережливого производства в минимизации непроизводственных затрат / Е. Ю. Воронова, А. А. Векшина // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. – 2023. – № 1(403). – С. 22-32. – DOI 10.47367/0021-3497_2023_1_22. – EDN IQIPYO.

15. Кондратьев, Э. Разумная производственная система (SPS): как ее спроектировать и построить? / Э. Кондратьев, Н. Гудз // Проблемы теории и практики управления. – 2017. – № 10. – С. 92-105. – EDN ZMQRKJ.

16. Фукина, С. П. Использование инновационных систем управления в обеспечении устойчивого развития промышленного предприятия / С. П. Фукина // Современные технологии управления. – 2013. – № 10(34). – С. 45-55. – EDN PTUIKI.

17. Хомякова, Е. В. Бережливое производство как способ повышения конкурентоспособности отечественных предприятий / Е. В. Хомякова // Менеджмент и бизнес-администрирование. – 2014. – № 3. – С. 134-139. – EDN SWKZSV.

18. Маслова, Г. Д. Бережливое производство для энергосистем и промышленных производств / Г. Д. Маслова // Приоритеты правового и социально-экономического развития в условиях цифровизации экономики В России и мире : Сборник научных статей. – Ульяновск : ИП Кеньшенская Виктория Валерьевна (издательство «Зебра»), 2025. – С. 45-48. – EDN UBEAWO.

19. Бережливое производство : Коллективная монография. Том ВЫПУСК 1. – Кемерово : Общество с ограниченной ответственностью «Западно-Сибирский научный центр», 2021. – 101 с. – ISBN 978-5-6040761-1-8. – EDN UJSNSF.

20. Вумек, Д. П. Бережливое производство : как избавиться от потерь и добиться процветания вашей компании : перевод с английского / Д. П. Вумек, Д. Т. Джонс ; Джеймс Вумек, Дэниел Джонс ; [пер. С. Турко]. – 5-е

изд.. – Москва : Альпина паблишерз, 2010. – (Серия «Модели менеджмента ведущих корпораций»). – ISBN 978-5-9614-1289-5. – EDN QUDODN.

21. Джордж, М. Л. Бережливое производство + шесть сигм : комбинируя качество шести сигм со скоростью бережливого производства / М. Л. Джордж ; Майкл Джордж ; пер. с англ. [Ю. Сундстрем]. – 3-е изд.. – Москва : Альпина Бизнес Букс, 2007. – 359 с. – (Серия «Модели менеджмента ведущих корпораций»). – ISBN 978-5-9614-0636-8. – EDN QSBQET.

22. Бережливое производство как инструментальный совершенствования производственной стратегии на отраслевых предприятиях / Е. М. Дебердиева, О. В. Ленкова, С. В. Фролова [и др.]. – Тюмень : Тюменский индустриальный университет, 2020. – 169 с. – ISBN 978-5-9961-2116-8. – EDN KKKICT.

23. Кирсанов, Н. Ю. Исторические аспекты развития lean-концепции / Н. Ю. Кирсанов, М. А. Савельева // Экономика и управление: проблемы, решения. – 2019. – Т. 8, № 1. – С. 65-69. – EDN MBKEVC.

24. Назаревич, С. А. Проблемы и ошибки при организации производства, решаемые методологией бережливого производства / С. А. Назаревич, А. В. Винниченко // Системный анализ и логистика. – 2021. – № 4(30). – С. 49-56. – DOI 10.31799/2077-5687-2021-4-49-56. – EDN FMXNEH.

25. Барсукова, К. В. Основы бережливого производства: ошибки, влекущие гибель проектов еще на стадии внедрения / К. В. Барсукова, Е. К. Погодина // Инновационная экономика и право. – 2022. – № 3(22). – С. 63-70. – DOI 10.53015/2782-263X_2022_3_63. – EDN XBEALJ.

26. Азаров, В. Н. Бизнес-процесс, как нейрон. Процессная архитектура, как нейронная сеть / В. Н. Азаров, А. В. Чекмарев // Качество. Инновации. Образование. – 2024. – № 4(192). – С. 61-77. – DOI 10.31145/1999-513x-2024-4-61-77. – EDN ERDCFK.

27. Волостнов, Б. И. Менеджмент в условиях цифровой трансформации машиностроения / Б. И. Волостнов // Проблемы машиностроения и автоматизации. – 2019. – № 1. – С. 4-20. – EDN YZZZAL.

28. Вагин, М. С. Тенденции развития инструментов бережливого производства / М. С. Вагин // Гуманитарные, социально-экономические и общественные науки. – 2024. – № 10. – С. 149-155. – DOI 10.24412/2220-2404-2024-10-4. – EDN FFQFYF.

29. Наугольнова, И. А. Теоретические основы промышленного инжиниринга предприятий / И. А. Наугольнова // Экономика, предпринимательство и право. – 2023. – Т. 13, № 9. – С. 3279-3290. – DOI 10.18334/erpp.13.9.119230. – EDN OAKTQO.

30. Сафаров, И. М. Цифровые двойники как инструмент оптимизации производственных процессов / И. М. Сафаров // Экономика и управление: проблемы, решения. – 2024. – Т. 7, № 9(150). – С. 104-114. – DOI 10.36871/ek.ur.p.r.2024.09.07.013. – EDN BGZSXC.

31. Назаревич, С. А. Дизайн организационной системы для анализа признаков формирования барьеров при реализации инновационного поведения / С. А. Назаревич // Системный анализ и логистика. – 2024. – № 2(40). – С. 31-35. – DOI 10.31799/2077-5687-2024-2-31-35. – EDN HRCNSD.

32. Пашина, Е. А. Эвристические модели в организационном дизайне для проектирования бережливого производства / Е. А. Пашина, С. А. Назаревич // Инновационное приборостроение. – 2024. – Т. 3, № 5. – С. 27-30. – DOI 10.31799/2949-0693-2024-5-27-30. – EDN KDDLJU.

33. Назаревич, С. А. Организационная квалиметрия. Управление на основе KPI / С. А. Назаревич // Математические методы и модели в высокотехнологичном производстве : Сборник тезисов докладов III Международного форума. В 2-х частях, Санкт-Петербург, 08 ноября 2023 года. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, 2023. – С. 183-186. – EDN DGZAUU.

34. Измайлов, М. К. Методы формирования производственного потенциала промышленного предприятия в цифровых условиях / М. К. Измайлов // Вестник Сибирского университета потребительской кооперации.

– 2023. – № 4(46). – С. 25-36. – DOI 10.48642/9027.2023.11.71.003. – EDN ULTWCH.

35. Назаревич, С. А. Бихевиористические модели организационно-технологической надежности / С. А. Назаревич // Моделирование и ситуационное управление качеством сложных систем : Вторая Всероссийская научная конференция, Санкт-Петербург, 14–22 апреля 2021 года. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, 2021. – С. 143-145. – DOI 10.31799/978-5-8088-1558-2-2021-2-143-145. – EDN DLNKCO.

36. Павлюченко, Ж. А. Сущность и задачи нормирования труда / Ж. А. Павлюченко // Вестник образовательного консорциума Среднерусский университет. Серия: Экономика и управление. – 2021. – № 18. – С. 102-104. – EDN CLURQK.

37. Бабанова, Е. В. Психолого-управленческая проблематика оценки эффективности трудовой деятельности персонала в организации / Е. В. Бабанова, Ю. Д. Коньчева // Самоуправление. – 2022. – № 3(131). – С. 143-146. – EDN SESIWC.

38. Шапаренко, Н. И. Особенность метода хронометража на ОАО «АВТОВАЗ» / Н. И. Шапаренко // Вестник Казанского технологического университета. – 2010. – № 2. – С. 430-435. – EDN LAJHSJ.

39. Шапаренко, Н. И. Эффективность использования автоматизации при проектировании нормативов по труду на предприятиях машиностроения / Н. И. Шапаренко // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2010. – № 1(41). – С. 126-131. – EDN LATPMH.

40. Разработка имитационной модели оценки режимов работы технологического процесса контроля качества изделий / А. А. Попов, А. К. Овсянкин, М. В. Хаперсков [и др.] // Информатизация и связь. – 2023. – № 3. – С. 43-47. – DOI 10.34219/2078-8320-2023-14-3-43-47. – EDN TWVCBX.

41. Кутнюк, И. В. Оптимизация основных бизнес-процессов компании / И. В. Кутнюк // Modern Economy Success. – 2024. – № 1. – С. 50-55. – EDN TWTBTM.

42. Харин, И. А. Анализ алгоритмов составляющих частей компилятора и его оптимизации / И. А. Харин, М. В. Раскатова // Computational Nanotechnology. – 2023. – Т. 10, № 2. – С. 26-35. – DOI 10.33693/2313-223X-2023-10-2-26-35. – EDN BDGKMA.

43. Винниченко, А.В. Динамическая модель автоматизированного хронометража производственной системы «оператор-оборудование-процесс» / А. В. Винниченко // Петербургский экономический журнал – 2025 – №1 – С. 18-27

44. Панушина, О. В. Реализация методов и инструментов бережливого производства с применением современных информационных технологий / О. В. Панушина // Производственные системы будущего: опыт внедрения Lean и экологических решений : Материалы международной научно-практической конференции, Кемерово, 13–14 апреля 2022 года / Под редакцией Т.В. Галаниной, М.И. Баумгартэна. – Кемерово: Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, 2022. – С. 110.1-110.5. – EDN DJHXV.

45. Гугл патенты / Remote monitoring systems and methods // URL: <https://patents.google.com/patent/US20120016607A1/en> (дата обращения: 09.04.2025).

46. Гугл патенты / Computer vision based monitoring system and method // URL: <https://patents.google.com/patent/US11120559B2/en> (дата обращения: 09.04.2025).

47. Гугл патенты / Integrated digital twin for an industrial facility // URL: <https://patents.google.com/patent/US10877470B2/en> (дата обращения: 09.04.2025).

48. Гугл патенты / Production line simulation rolling optimization system and method based on digital twin // URL:

<https://patents.google.com/patent/CN113361139A/en> (дата обращения: 09.04.2025).

49. Гугл патенты / Method of predicting and optimizing production // URL: <https://patents.google.com/patent/US6611735B1/en> (дата обращения: 09.04.2025).

50. Соломина, Е. А. Современное состояние сферы цифровых технологий на промышленных предприятиях / Е. А. Соломина, Д. А. Лампеева, Д. С. Чертищева // Актуальные вопросы современной экономики. – 2022. – № 10. – С. 768-777. – EDN JNFLVU.

51. Винниченко А. В. Структурирование функции качества сложных технических систем под воздействием макроэкономических трендов / А. В. Винниченко, С. А. Назаревич // Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении. – 2019. – № 1(3). – С. 16-22. – DOI 10.30987/article_5c9b8b2c2c3dd7.76768405.

52. ГОСТ Р 56020 Бережливое производство. Основные положения и словарь

53. ГОСТ Р 56404 Бережливое производство. Требования к системам менеджмента

54. ГОСТ Р 56406 Бережливое производство. Аудит. Вопросы для оценки системы менеджмента

55. ГОСТ Р 57524-2017 Бережливое производство. Поток создания ценности

56. ГОСТ Р 56405 Бережливое производство. Процесс сертификации систем менеджмента. Процедура оценки

57. ГОСТ Р 56407 Бережливое производство. Основные методы и инструменты

58. ГОСТ Р 57522 Бережливое производство. Руководство по интегрированной системе менеджмента качества и бережливого производства

59. ГОСТ Р 57523 Бережливое производство. Руководство по системе подготовки персонала

60. ГОСТ Р 58581 Бережливое производство. Особые требования по применению бережливого производства в авиационной промышленности и организациях, производящих соответствующие запасные части

61. Винниченко, А.В. Исследование адаптивности организации производства на рабочих местах и качества работ в производственной системе / А.В. Винниченко // Известия Самарского научного центра Российской академии наук – 2025 – №2 – С. 93-100

62. Попова, Е. С. Ключевые факторы реконфигурации промышленного производства / Е. С. Попова // Территория науки и образования. – 2024. – № 1. – С. 98-100. – EDN SAYUGX.

63. Крупина, Н. Н. Научная визуализация как основа цифрового менеджмента / Н. Н. Крупина // Вестник Тверского государственного университета. Серия: Экономика и управление. – 2023. – № 3(63). – С. 43-51. – DOI 10.26456/2219-1453/2023.3.043-051. – EDN BRQGDP.

64. Перминов, С. С. Эффективное управление запасами и снабжением в производственном бизнесе / С. С. Перминов // Modern Economy Success. – 2024. – № 2. – С. 320-326. – DOI 10.58224/2500-3747-2024-2-321-327. – EDN EOITNI.

65. Гращенкова, Н. В. Устойчивое развитие машиностроительного предприятия на основе интеграции систем менеджмента : специальность 08.00.05 «Экономика и управление народным хозяйством (по отраслям и сферам деятельности, в т.ч.: экономика, организация и управление предприятиями, отраслями, комплексами; управление инновациями; региональная экономика; логистика; экономика труда; экономика народонаселения и демография; экономика природопользования; экономика предпринимательства; маркетинг; менеджмент; ценообразование; экономическая безопасность; стандартизация и управление качеством продукции; землеустройство; рекреация и туризм)» : диссертация на соискание ученой степени кандидата экономических наук / Гращенкова Наталья Васильевна, 2022. – 178 с. – EDN ZHMWSW.

66. ГОСТ Р ИСО 9004 Менеджмент для достижения устойчивого успеха организации. Подход на основе менеджмента качества
67. ГОСТ Р ИСО 10015 Менеджмент организации. Руководящие указания по обучению
68. ГОСТ Р 54934 Системы менеджмента безопасности труда и охраны здоровья
69. ГОСТ Р ИСО 15746-1-2016 Системы промышленной автоматизации и интеграция. Интеграция возможностей усовершенствованного управления технологическими процессами и оптимизации для производственных систем. Часть 1. Структура и функциональная модель
70. Малышева, Т. В. Организация бережливого производства и качество продукции / Т. В. Малышева, А. И. Шинкевич. – Курск : Закрытое акционерное общество «Университетская книга», 2023. – 114 с. – ISBN 978-5-907776-69-2. – EDN APMQIV.
71. Попов, Н. К. Процессы цифровой трансформации машиностроительных предприятий / Н. К. Попов, П. А. Шиков, А. В. Горланов // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 3: Экономические, гуманитарные и общественные науки. – 2024. – № 1. – С. 24-29. – DOI 10.46418/2079-8210_2024_1_4. – EDN PRWWIJ.
72. О способах развития машиностроительного искусственного интеллекта для систем полного жизненного цикла изделий / А. В. Трищенко, В. Г. Осипов, Е. С. Лялин [и др.] // Перспективные направления развития финишных и виброволновых технологий : сборник трудов научного семинара, посвященного памяти заслуженного деятеля науки и техники РФ, доктора технических наук, почётного профессора ДГТУ А.П. Бабичева, Ростов-на-Дону, 25 февраля 2022 года. – Ростов-на-Дону: Донской государственный технический университет, 2022. – С. 231-238. – EDN VGCDWD.

73. Цифровизация агропромышленного комплекса и машиностроительный ИИ / О. О. Варламов, О. В. Кривошеев, А. В. Трищенко [и др.] // Мивар'22 : Сборник научных статей. – Москва : Издательский Дом «Инфра-М», 2022. – С. 390-398. – EDN AAFGTU.

74. Nazarevich, S. A. Model of an automated information control system based on key performance indicators for controlling production processes / S. A. Nazarevich, A. V. Vinnichenko, S. A. Morozov // Journal of Physics: Conference Series : II International Scientific Conference on Metrological Support of Innovative Technologies (ICMSIT II-2021), St.Petersburg, 03–06 марта 2021. Vol. 1889. – Krasnoyarsk: IOP Publishing Ltd, 2021. – P. 42068. – DOI 10.1088/1742-6596/1889/4/042068

75. Винниченко А. В. Исследование методов цифровизации для промышленного сектора / Винниченко А. В., Красовская Е.Д. // Системный анализ и логистика. – 2025 (принята к публикации 24.02.2025)

76. Винниченко А. В. Проектирование интегрированной автоматизированной системы управления / А. В. Винниченко, Е. Д. Красовская // Инновационное приборостроение. 2025. Т. 4, № 1. С. 22–28. DOI: 10.31799/2949-0693-2025-1-22-28

77. Винниченко А. В. Динамическая модель комбинированного агрегатирования процесса аддитивного производства / А. В. Винниченко // Моделирование и ситуационное управление качеством сложных систем : Вторая Всероссийская научная конференция, Санкт-Петербург, 14–22 апреля 2021 года. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, 2021. – С. 112-116. – DOI 10.31799/978-5-8088-1558-2-2021-2-112-116. – EDN NSVUJN.

78. Винниченко, А. В. Модель автоматизированной информационно-управляющей системы на основе ключевых показателей эффективности управления производственными процессами / А. В. Винниченко, С. А. Назаревич // Волновая электроника и инфокоммуникационные системы : Сборник статей XXIV Международной научной конференции, Санкт-

Санкт-Петербург, 31 мая – 04 2021 года. Том Часть 3. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, 2021. – С. 236-242. – EDN LRWCWY.

79. Винниченко А. В. Исследование численных характеристик при многономенклатурном производстве с многократным процессом переналадки производственных процессов / А. В. Винниченко // Взгляд молодых исследователей: экономика, управление, инновации 2022 : Сборник материалов общероссийской научно-практической конференции, Мытищи, 18–19 апреля 2022 года. – Москва: Научные технологии, 2022. – С. 19-24. – EDN ISUNVB.

80. Назаревич, С. А. Актуализация процессов прогнозирования развития сложных технических систем / С. А. Назаревич, А. В. Винниченко // Моделирование и ситуационное управление качеством сложных систем : Сборник докладов Научной сессии ГУАП, Санкт-Петербург, 08–12 апреля 2019 года. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, 2019. – С. 173-175. – EDN MYIOYU.

81. Красилова А. В. Исследование элементов системы управления предприятием / А. В. Красилова, А. В. Винниченко // Волновая электроника и инфокоммуникационные системы : Материалы XXV Международной научной конференции, Санкт-Петербург, 30 мая – 03 2022 года. Том Часть 1. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, 2022. – С. 172-175. – EDN XLDARQ.

82. Винниченко А. В. Проектирование структуры интеллектуальной системы управления на основе аппарата нечеткой логики / А. В. Винниченко // СОВРЕМЕННАЯ НАУКА и МОЛОДЫЕ УЧЁНЫЕ : сборник статей III Международной научно-практической конференции, Пенза, 07 июля 2020 года. – Пенза: «Наука и Просвещение» (ИП Гуляев Г.Ю.), 2020. – С. 29-33. – EDN QGXYFG.

83. Винниченко, А. В. Разработка модели автоматизированного

хронометража рабочих операций / А. В. Винниченко // Математические методы и модели в высокотехнологичном производстве : Сборник тезисов докладов II Международного форума, Санкт-Петербург, 09 ноября 2022 года. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, 2022. – С. 363-365. – EDN DFKOUO.

84. Винниченко А. В. Применимость модели обратного инжиниринга для задач унификации в процессах системного проектирования машиностроительных предприятий / А. В. Винниченко, С. А. Назаревич // SCIENCE AND EDUCATION: PROBLEMS AND INNOVATIONS : сборник статей V Международной научно-практической конференции, Пенза, 27 июля 2020 года. – Пенза: «Наука и Просвещение» (ИП Гуляев Г.Ю.), 2020. – С. 34-39. – EDN VCJWWG.

85. Силич, В. А. Проектирование сложной системы на основе объектно-ориентированного подхода / В. А. Силич, М. П. Силич // Известия Томского политехнического университета. – 2003. – Т. 306, № 2. – С. 99-103. – EDN HSMBKL.

86. Кутин Андрей Анатольевич, Остапенко Сергей Николаевич Принципы построения современных машиностроительных производств // Металлообработка. 2015. №4 (88). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/printsipy-postroeniya-sovremennyh-mashinostroitelnyh-proizvodstv> (дата обращения: 26.02.2025).

87. Ладощин, М. П. Трансформация форм и методов организации производства на предприятии машиностроения в условиях цифровизации / М. П. Ладощин // Экономинфо. – 2024. – Т. 19, № 4. – С. 19-29. – EDN BRWAGK.

88. Назаревич С. А. Методика повышения качества процесса анализа уровня зрелости развернутых процессов на основе моделей нечеткой логики / С. А. Назаревич, А. В. Винниченко // Системный анализ и логистика. – 2021. – № 1(27). – С. 3-9. – DOI 10.31799/2077-5687-2021-1-3-9

89. Nazarevich, S. A. Models of fuzzy logic in the processes of verification of the required level of automation of technological processes research and production complexes / S. A. Nazarevich, A. V. Vinnichenko // Journal of Physics: Conference Series : II International Scientific Conference on Metrological Support of Innovative Technologies (ICMSIT II-2021), St.Petersburg, 03–06 марта 2021. Vol. 1889. – Krasnoyarsk: IOP Publishing Ltd, 2021. – P. 42071. – DOI 10.1088/1742-6596/1889/4/042071.

90. Винниченко А. В. Исследование детерминант норм управляемости для систем мониторинга уровня качества технологических процессов / А. В. Винниченко // Метрологическое обеспечение инновационных технологий : Сборник статей V Международного форума, Санкт-Петербург, 02 марта 2023 года / Под редакцией В.В. Окрепилова. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, 2023. – С. 209-210. – EDN SONCFJ.

91. Марюхненко, В. С. Системный анализ состояния человека-оператора в автоматизированной системе управления / В. С. Марюхненко, С. А. Дудин, Т. В. Трускова // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2014. – № 2(42). – С. 143-150. – EDN SKDVST.

92. Туровский, Я. А. Прогнозирование функционального состояния человека-оператора для повышения надежности эргатических систем / Я. А. Туровский, А. С. Суровцев // Управление развитием крупномасштабных систем (MLSD'2023) : Труды Шестнадцатой международной конференции, Москва, 26–28 сентября 2023 года. – Москва: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2023. – С. 1577-1581. – DOI 10.25728/mlsd.2023.1577. – EDN WUBWPZ.

93. Тикунова, К. В. Разработка алгоритма определения степени утомляемости человека-оператора под воздействием вибрации / К. В. Тикунова, А. Н. Брысин, С. А. Микаева // Справочник. Инженерный журнал. – 2022. – № 2(299). – С. 47-52. – DOI 10.14489/hb.2022.02.pp.047-052. – EDN MVRULH.

94. Бараусов К.В. Исследование вероятностных отказов станков с ЧПУ в машиностроительном предприятии / К.В. Бараусов, А. В. Винниченко // Инновационное приборостроение. 2025. (принята к публикации 24.02.2025)
95. Суровцев, А. С. Интеллектуальная информационная система для повышения надежности эргатических систем и снижения риска травматизма человека-оператора / А. С. Суровцев // Инженерные технологии. – 2024. – № 2(6). – С. 82-86. – EDN DLDWMA.
96. Суровцев, А. С. Прогнозирование эффективности деятельности оператора для повышения надежности эргатических систем / А. С. Суровцев, И. А. Авцинов, Я. А. Туровский // Математические методы в технологиях и технике. – 2024. – № 4. – С. 102-105. – EDN CUDQEP.
97. Сарин, К. С. Гибридные алгоритмы анализа данных на основе компактных и точных нечетких систем типа Такаги-Сугено : специальность 05.13.17 «Теоретические основы информатики» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Сарин Константин Сергеевич. – Томск, 2016. – 143 с. – EDN HKOVAR.
98. Антохина, Ю. А. Модель оценки качества тренда методом нечеткой логики / Ю. А. Антохина, С. А. Назаревич, Д. С. Щукина // Компетентность. – 2024. – № 6. – С. 28-32. – DOI 10.24412/1993-8780-2024-6-28-32. – EDN IVSAZN.
99. Димитрова, Л.А. Метод оценки уровня зрелости организации на основе использования интеллектуальных информационных систем : диссертация ... кандидата технических наук : 2.5.22. / Димитрова Любовь Азатовна; [Место защиты: ФГАОУ ВО «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева»]. - Ростов-на-Дону, 2022. - 208 с. : ил.
100. Голодков, Ю. Э. Влияние факторов неопределенности на качество работы систем автоматического управления / Ю. Э. Голодков, А. В. Голодкова, М. Б. Руденко // Наука и бизнес: пути развития. – 2024. – № 2(152). – С. 12-16. – EDN BSTZSB.

101. Денисова Наталья Анатольевна, Подлипенская Лидия Евгеньевна, Козачишен Виталий Анатольевич Классификация психофизиологического состояния человека-оператора в режиме реального времени на базе данных, поступающих с датчиков индивидуального устройства // Научные технологии и оборудование в промышленности и строительстве. 2024. № 80. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/klassifikatsiya-psihofiziologicheskogo-sostoyaniya-cheloveka-operatora-v-rezhime-realnogo-vremeni-na-baze-dannyh-postupayuschih-s> (дата обращения: 07.02.2025).

102. Винниченко, А. В. Предиктивный анализ пиковых численных характеристик при переналадке групповых технологических процессов синхронизированного производства / А. В. Винниченко, С. А. Назаревич // Моделирование и ситуационное управление качеством сложных систем : Сборник докладов Третьей Всероссийской научной конференции, Санкт-Петербург, 18–22 апреля 2022 года. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, 2022. – С. 129-133. – EDN XMSGJX.

103. Винниченко А. В. Верификация автоматизации технологических процессов научно-производственных комплексов методом нечеткой логики / А. В. Винниченко // Математические методы и модели в высокотехнологичном производстве: Тезисы докладов I Международного форума, Санкт-Петербург, 10–11 ноября 2021 года. – С. 221-222.

104. Винниченко А. В. Дрейфующие модели оценки потенциала технологических систем и базовых процессов / А. В. Винниченко // Моделирование и ситуационное управление качеством сложных систем: Сб. докладов III ВНК, СПб, 18–22 апреля 2022 года. – С. 124-128.

105. Vinnichenko A. V. Development of a digital model to identify the movements of the process operator / A. V. Vinnichenko // Theory and Practice of Modern Science: the View of Youth, 24 ноября 2022 года. – Высшая школа технологии и энергетики федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский

государственный университет промышленных технологий и дизайна», 2023. – Р. 242-246. – EDN QPLQRZ.

106. Авцинов, И. А. Модель для оценки латентного времени действий оператора при стабилизации технологического процесса / И. А. Авцинов, А. С. Суровцев, Я. А. Туровский // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2018. – Т. 24, № 4. – С. 578-590. – DOI 10.17277/vestnik.2018.04.pp.578-590. – EDN VPEYAK.

107. Винниченко А. В. Исследование учета продолжительности трудовых операций и оценка технико-экономических показателей технологического процесса / А. В. Винниченко, С. А. Назаревич // Метрологическое обеспечение инновационных технологий : Сборник статей V Международного форума, Санкт-Петербург, 02 марта 2023 года / Под редакцией В.В. Окрепилова. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, 2023. – С. 211-212. – EDN WKRPDV.

108. Переходные процессы зрительных вызванных потенциалов в задачах интерфейсов человек-компьютер / Я. А. Туровский, А. С. Суровцев, С. А. Зайцев, А. С. Коновской // Сенсорные системы. – 2019. – Т. 33, № 2. – С. 157-165. – DOI 10.1134/S0235009219020100. – EDN ZDMAOT.

109. Vinnichenko, A. V. Drifting models for evaluating the functional properties of products of innovative value / A. V. Vinnichenko, S. A. Nazarevich, V. V. Kurlov // Journal of Physics: Conference Series : II International Scientific Conference on Metrological Support of Innovative Technologies (ICMSIT II-2021), St.Petersburg, 03–06 марта 2021 года. Vol. 1889. – Krasnoyarsk: IOP Publishing Ltd, 2021. – P. 42074. – DOI 10.1088/1742-6596/1889/4/042074. – EDN CLQHHV.

110. Винниченко А. В. Модель распределения трудовых ресурсов в гибридном поточном производстве / А. В. Винниченко // Компетентность. – 2024. – № 6. – С. 42-45. – DOI 10.24412/1993-8780-2024-6-42-45.

111. Кузнецов, Л. Ю. Разработка модели для решения задачи выравнивания загрузки оборудования на основе метода многокритериальной оптимизации / Л. Ю. Кузнецов // Самарские чтения (в память об академике А.А. Самарском) : Материалы международной конференции, Москва, 22–25 декабря 2021 года. – Москва: Общество с ограниченной ответственностью Издательство «Янус-К», 2022. – С. 131-133. – EDN IPUIXR.

112. Вишневский Дмитрий Александрович, Подлипенская Лидия Евгеньевна, Денисова Наталия Анатольевна, Бондарь Надежда Александровна Методика определения параметров математической модели динамики психофизиологического состояния оператора металлургического оборудования // Безопасность техногенных и природных систем. 2024. №1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/metodika-opredeleniya-parametrov-matematicheskoy-modeli-dinamiki-psihofiziologicheskogo-sostoyaniya-operatora-metallurgicheskogo> (дата обращения: 07.02.2025).

113. Кузнецов, Л. Ю. Математическое моделирование системы технологического обеспечения работоспособности автоматизированного оборудования / Л. Ю. Кузнецов // Самарские чтения (в память об академике А.А. Самарском) : Материалы международной конференции, Москва, 22–25 декабря 2021 года. – Москва: Общество с ограниченной ответственностью Издательство «Янус-К», 2022. – С. 134-139. – EDN YTWXSU.

114. Николаев, А. В. Улучшение качества работы промышленных предприятий за счет применения методов многокритериальной оптимизации в MES системах / А. В. Николаев, Л. Ю. Кузнецов // Самарские чтения (в память об академике А.А. Самарском) : Материалы международной конференции, Москва, 22–25 декабря 2021 года. – Москва: Общество с ограниченной ответственностью Издательство «Янус-К», 2022. – С. 191-192. – EDN NYUOSR.

115. Винниченко А. В. Разработка структуры вероятностной модели для многономенклатурного производства / А. В. Винниченко //

Инновационное приборостроение. – 2023. – Т. 2, № 5. – С. 18-22. – DOI 10.31799/2949-0693-2023-5-18-22.

116. Модель расчета релевантного числа испытаний для обеспечения приемлемого уровня рисков при оценке глубоких нейросетевых решений / Ю. А. Антохина, Я. А. Ивакин, В. А. Тушавин, Е. А. Фролова // Наука и бизнес: пути развития. – 2022. – № 4(130). – С. 160-163. – EDN WRHMK.

117. Пашина, Е. А. Когнитивные карты для определения временных издержек в технологическом процессе / Е. А. Пашина, С. А. Назаревич // Моделирование и ситуационное управление качеством сложных систем : Сборник докладов Четвертой Всероссийской научной конференции, Санкт-Петербург, 18–22 апреля 2023 года. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, 2023. – С. 205-208. – EDN MRGUJS.

118. Сергеев А. И. Алгоритмы параметрического синтеза, применяемые при проектировании гибких производственных систем на основе компьютерного моделирования / А. И. Сергеев, С. Е. Крылова, С. Ю. Шамаев, Т. Р. Мамуков // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2021. – Т. 23, № 2(100). – С. 106-114. – DOI 10.37313/1990-5378-2021-23-2-106-114. – EDN BRHHWB.

119. Федоров, В. А. Моделирование и оптимизация процесса загрузки оборудования заготовками в многономенклатурном производстве на основе группового метода : специальность 05.02.22 «Организация производства (по отраслям)» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Федоров Валерий Анатольевич. – Москва, 2022. – 153 с. – EDN WAGUCN.

120. Кривошеев, Олег Викторович. Технология распределения ресурсов производственных систем в условиях неполноты данных для высокотехнологичных отраслей промышленности : автореферат дис. ... кандидата технических наук : 05.13.01 / Кривошеев Олег Викторович; [Место

защиты: ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева»]. — Саров, 2022. — 24 с..

121. Юй Болинъ Автоматизация технологических процессов: перспективы, вызовы и пути повышения производственной эффективности // Universum: технические науки. 2024. №11 (128). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/avtomatizatsiya-tehnologicheskikh-protsessov-perspektivy-vyzovy-i-puti-povysheniya-proizvodstvennoy-effektivnosti> (дата обращения: 31.01.2025).

122. Разработка, внедрение и эксплуатация типового расчетного модуля системы автоматизированного нормирования труда на предприятиях ОПК / В. Г. Юнин, О. В. Кривошеев, С. В. Карпенко, А. И. Казаков // Ракетно-космическая техника. – 2016. – Т. 1, № 2(8). – С. 11. – EDN MMYSHC.

123. Дж. Джи, У. Паннаконг и Дж. Буддакулсомсири, «Модель на основе компьютерного зрения для автоматического изучения времени движения», *Comput. Mater. Contin.*, том 73, № 2, стр. 3557–3574, 2022. <https://doi.org/10.32604/cmc.2022.030418>

124. Ахмед, Н., Барчак, А.Л.К., Рашид, М.А. Прогнозирование времени выполнения задач с большими данными: сравнение производительности алгоритмов машинного обучения и аналитических моделей. *J Big Data* **9**, 67 (2022). <https://doi.org/10.1186/s40537-022-00623-1>

125. Соломаха, Г. М. Модуль автоматизированного управления системы мониторинга производственных процессов / Г. М. Соломаха, С. В. Хижняк // Программные продукты и системы. – 2020. – № 3. – С. 516-522. – EDN BZBGRB.

126. Мекшун, А. Н. Технологии мониторинга техники и оборудования в промышленном производстве / А. Н. Мекшун, Ю. Н. Мекшун, А. Ю. Мекшун // Вестник Курганской ГСХА. – 2021. – № 2(38). – С. 62-68. – DOI 10.52463/22274227_2021_38_57. – EDN WUQOAX.

127. Прохоров, М. А. Методические аспекты управления качеством информационного ресурса автоматизированной системы / М. А. Прохоров // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2024. – № 9. – С. 389-392. – DOI 10.24412/2071-6168-2024-9-389-390. – EDN BNDBMG.

128. Мокрушин, С.А. Разработка автоматизированной системы управления технологическим процессом стерилизации консервов в промышленном автоклаве // диссертация ... кандидата технических наук: 05.13.06/ С.А. Мокрушин, Место защиты: ФГБОУ ВО «Московский государственный университет пищевых производств». – Москва, 2019. – 176с.

129. Организация систем компьютерного зрения на основе применения методов теории нечетких множеств / П. И. Карасев, А. А. Х. Аль-Раммахи, Ю. Ю. Громов, Ю. В. Минин // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2021. – № 5. – С. 22-26. – DOI 10.25791/pribor.5.2021.1259. – EDN NYXXZF.

130. Кузнецов, Л. Ю. Организация процесса эффективного распределения производственных заказов на обслуживание и ремонт технологического оборудования машиностроительных производств : специальность 05.02.22 «Организация производства (по отраслям)» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Кузнецов Леонид Юрьевич, 2022. – 119 с. – EDN BIVIZQ.

131. Вэйдер, М. Инструменты бережливого производства: Мини-руководство по внедрению методик бережливого производства : справочник / М. Вэйдер. - 9-е изд. - Москва : Альпина Паблишер, 2016. - 125 с. - ISBN 978-5-9614-4793-4.

132. Лайкер, Д. К. Лидерство на всех уровнях бережливого производства: Практическое руководство / Лайкер Д.К. - М.:Альпина Паблишер, 2018. - 336 с. ISBN 978-5-9614-6858-8.

133. Фролов, В. П. Внедрение технологий бережливого производства в управлении производством и организацию рабочих мест : монография / В. П. Фролов. - 2-е изд.- Москва : Дашков и К, 2022. - 77 с. - ISBN 978-5-394-04750-3.

134. Ташкинов, А. Г. Развитие цифровой экономики с элементами бережливого производства на предприятии : монография / А.Г. Ташкинов — Москва : ИНФРА-М, 2025. — 193 с. — (Научная мысль). — DOI 10.12737/2131312. - ISBN 978-5-16-019622-0.

135. Хоббс Д.П. Внедрение бережливого производства. практическое рук. по оптимизации бизнеса /Деннис П. Хоббс; пер. с англ. П.В. Гомолко (гл. 1-3), А.Г. Петкевич; науч. ред. Д.В. Середа. – Минск: Гревцов Паблишер, 2007. – 352 с. - ISBN 978-985-6569-09-1

136. Теппинг Д., Шукер Т. Бережливый офис. Управление потоками создания ценности / Пер. с англ. А.Л. Раскина; Под науч. ред. Э.А. Башкардина. – М.: РИА «Стандарты и качество», 2009 – 208 с., ил. – (Серия «Бережливое управление») - ISBN 978-5-94938-074-1

137. Луйстер Т., Теппинг Д. Бережливое производство: от слов к делу / Пер. с англ. А.Л. Раскина; Под науч. ред. В.В. Брагина. – М.: РИА «Стандарты и качество», 2008 – 132 с., ил. – (Серия «Бережливое управление») - ISBN 978-5-94938-071-0

138. Оно Т. Производственная система Тойоты уходя от массового производства / Тайити Оно; пер. с англ. [А. Грязновой и А. Тягловой под ред. д.т.н. В.А. Лapidуса], предисл. Вячеслава Болтрукевича. — 4-е изд.. — Москва : Институт комплексных стратегических исследований, 2013. — 194 с. ил.; 22. — (Классика производственного менеджмента); ISBN 978-5-903148-39-4.

139. Лайкер Д. Корпоративная культура Toyota уроки для других компаний / Джеффри Лайкер, Майкл Хосеус; [сокр. пер. с англ.: М. Самсонова]. — 2-е изд.. — Москва : Оргпром, Альпина Паблишерз, 2011. —

353 с. ил.; 22. — (Модели менеджмента ведущих корпораций, Премия Сигео Синго, 2009); ISBN 978-5-9614-1676-3.

140. Синго С. Изучение производственной системы Тойоты с точки зрения организации производства перевод с английского / Сигео Синго; предисл. Вячеслава Болтрукевича. — 2-е изд, перераб.. — Москва : Институт комплексных стратегических исследований, 2014. — 280 с. ил.; 22. — ISBN 978-5-903148-35-6.

141. Всеобщая система управления. TMS [Total management system] [Текст] : создание прибыли в духе Кайдзен : [визуализация процесса, формирование команды, создание ценности, мышление постоянного совершенствования (Кайдзен), качество работы, создание прибыли] / [перевод с японского Алексея Суханова]. — Москва : Synergy book, 2019. — 201 с. : ил., портр., табл. : 25 см — (От экспертов «Тойота Мотор»); ISBN 978-5-4257-0406-1.

142. Всеобщая система управления. TMS созидание прибыли в духе Кайдзен, от экспертов «Тойота Мотор» / [перевод с японского Алексея Суханова]. — Москва : Synergy book, 2019 [т. е. 2018]. — 201 с. ил., портр., табл.; 25. — ISBN 978-5-4257-0406-1.

143. Имаи М. Гемба кайдзен путь к снижению затрат и повышению качества / Масааки Имаи; перевод с английского Д. Савченко, Т. Гутман. — 11-е изд.. — Москва : Альпина Паблишер, 2021. — 411, [2] с. ил.; 24. — (Бизнес); ISBN 978-5-9614-7111-3.

144. Имаи М. Стратегический кайдзен как изменить ДНК компании и стать лидером отрасли / Масааки Имаи; перевод с английского: [Мария Кульнева]. — Москва : Теории от практиков, 2022. — 221 с. ил., табл.; 25. — ISBN 978-5-6047582-1-2.

145. Озеров, Павел Иванович. «Гемба кайдзен» глазами нормировщика. Экономика труда в «бережливом» производстве = Экономика труда в «бережливом» производстве [Текст] : практическое пособие / Озеров

П. И.. — Ярославль : Изд-во Академии Пастухова, 2017. — 139 с. : ил., табл. : 21 см.; ISBN 978-5-901771-76-1.

146. Деннис П. Основы бережливого производства путеводитель по самой эффективной в мире системе производства / Паскаль Деннис; [пер. с англ. М. Мацковской]. — Москва : Олимп-Бизнес, издатель В. Стабников, 2013. — 205 с. ил.; 22. — ISBN 978-5-9693-0194-8.

147. Панушина, О. В. Реализация методов и инструментов бережливого производства с применением современных информационных технологий / О. В. Панушина // Производственные системы будущего: опыт внедрения Lean и экологических решений : Материалы международной научно-практической конференции, Кемерово, 13–14 апреля 2022 года / Под редакцией Т.В. Галаниной, М.И. Баумгартэна. – Кемерово: Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, 2022. – С. 110.1-110.5. – EDN DJHXV.

148. Бабушкин В. М. Адаптивное планирование организации производства промышленного предприятия / В. М. Бабушкин, И. Ш. Шарафеев, Р. З. Валиуллин, Г. Ф. Мингалеев // Computational Nanotechnology. – 2019. – Т. 6, № 3. – С. 47-53. – DOI 10.33693/2313-223X-2019-6-3-47-53. – EDN XEIODU.

149. Шинкевич, А. И. Формирование показателей производственной системы АО «Кварт» для модели машинного обучения / А. И. Шинкевич, М. Е. Надеждина, В. М. Бабушкин // Справочник. Инженерный журнал. – 2024. – № 12(333). – С. 52-57. – DOI 10.14489/hb.2024.12.pp.052-057. – EDN FFKEWC.

150. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022661716 Российская Федерация. Система управления производственным предприятием «Цифровое предприятие». Система управления персоналом (СПЖЦ.HRM) : № 2022619933 : заявл. 30.05.2022 : опубл. 24.06.2022 / О. В. Кривошеев, Р. А. Рыжов, С. А. Крючков [и др.] ; заявитель Федеральное государственное унитарное предприятие

«Российский федеральный ядерный центр - Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики». – EDN NTZXSZ.

151. Винниченко А. В. Исследование проблем внедрения бережливого производства на отечественных предприятиях / А. В. Винниченко, Е. Д. Красовская // Моделирование и ситуационное управление качеством сложных систем: Сборник докладов Научной сессии ГУАП, Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения (принята к публикации 09.01.2025)

152. Назаревич, С. А. Модели управления знаниями для процессов повышения качества функционирования организационных систем / С. А. Назаревич // Метрологическое обеспечение инновационных технологий: Сборник статей V Международного форума, Санкт-Петербург, 02 марта 2023 года / Под редакцией В.В. Окрепилова. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, 2023. – С. 173. – EDN UETCVV.

153. Назаревич, С. А. Модели управления знаниями и квалитетические детерминанты для гетерогенных организационных систем предприятий / С. А. Назаревич // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2025. – № 1. – С.235-243. – DOI: 10.24412/2071-6168-2025-1-235-236.

154. Назаревич, С. А. Показатели инновационного поведения для мониторинга состояния готовности организационной системы к проведению изменений / С. А. Назаревич // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2023. – Т. 21, № 1. – С. 126-133. – DOI 10.18503/1995-2732-2023-21-1-126-133. – EDN VFGPLY.

155. Токарев, М. С. Оценка качества управленческих решений в процессе функционирования организационно-технических систем / М. С. Токарев, А. В. Смирнов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2024. – № 10. – С. 233-236. – DOI 10.24412/2071-6168-2024-10-233-234. – EDN MBQMBG.

156. Назаревич, С. А. Проблемы применения показателей результативности и ключевых показателей эффективности для организационной системы / С. А. Назаревич // Инновационное приборостроение. – 2023. – Т. 2, № 4. – С. 16-22. – DOI 10.31799/2949-0693-2023-4-16-22. – EDN PFCTFZ.

157. Назаревич, С. А. Ключевые показатели эффективности в структурировании функции качества деятельности организационных систем предприятий радиоэлектронной отрасли / С. А. Назаревич // Метрологическое обеспечение инновационных технологий : IV Международный форум : сборник статей, Санкт-Петербург, 04 марта 2022 года / Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, 2022. – С. 210. – EDN BXZFTL.

158. Назаревич, С. А. Диссипативность в организационных системах: показатели и проблемы измерения / С. А. Назаревич // Инновационное приборостроение. – 2024. – Т. 3, № 5. – С. 23-26. – DOI 10.31799/2949-0693-2024-5-23-26. – EDN KINGYL.

159. Назаревич, С. А. Организационная квалиметрия. Управление на основе KPI / С. А. Назаревич // Математические методы и модели в высокотехнологичном производстве : Сборник тезисов докладов III Международного форума. В 2-х частях, Санкт-Петербург, 08 ноября 2023 года. – Санкт-Петербург: ГУАП, 2023. – С. 183-186. – EDN DGZAUU.

160. Черепашков, А. А. Методика оценки эффективности комплексных решений промышленной автоматизации / А. А. Черепашков, П. А. Самойлов // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2021. – Т. 23, № 3(101). – С. 13-17. – DOI 10.37313/1990-5378-2021-23-3-13-17. – EDN IAQESB.

161. Назаревич, С. А. Модели ключевых показателей эффективности для управления качеством процессов организационной структуры / С. А.

Назаревич // Автоматизация. Современные технологии. – 2022. – Т. 76, № 1. – С. 3-8. – DOI 10.36652/0869-4931-2022-76-1-3-8. – EDN BWNSTF.

162. Винниченко А. В. Корреляционная матрица для сложноструктурированных поведенческих факторов и параметров технологического процесса / А. В. Винниченко // Инновационное приборостроение. – 2023. – Т. 2, № 4. – С. 88-92. – DOI 10.31799/2949-0693-2023-4-88-92.

163. Лагереv, Д. Г. Автоматизация разработки управленческих решений в социально-экономических системах на основе применения нечетких когнитивных моделей / Д. Г. Лагереv // Современные наукоемкие технологии. – 2007. – № 11. – С. 78-79. – EDN IJFGJH.

164. Масленникова, Ю. Л. Разработка инструментов поддержки принятия решений при оперативном планировании опытного производства: специальность 05.02.22 «Организация производства (по отраслям)»: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Масленникова Юлия Леонидовна, 2022. – 142 с. – EDN GBCCWO.

165. Назаревич, С. А. Системный анализ модели итерационных циклов трансформаций для типологий организационных систем / С. А. Назаревич // Системный анализ и логистика. – 2024. – № S5(43). – С. 26-33. – DOI 10.31799/2077-5687-2024-5-26-33. – EDN RGVBNR.

166. Крылов, К.И. Информационное обеспечение стандартизации в Управлении качеством продукции // диссертация ... кандидата экономических наук: 5.2.3 / К.И. Крылов Место защиты: ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный экономический университет». – Санкт-Петербург, 2023. – 137с.

167. Винниченко, А. В. Анализ передвижения конструкторской документации на предприятиях приборостроительной отрасли на различных этапах жизненного цикла продукта / А. В. Винниченко, Е. Д. Красовская // Математические методы и модели в высокотехнологичном производстве : Сборник тезисов докладов IV Международного форума. В 2-х частях, Санкт-

Петербург, 06 ноября 2024 года. – Санкт-Петербург: ГУАП, 2024. – С. 300-303. – EDN IREQAN.

168. Истомина Ю. П. Использование статистических методов управления качеством в научно-исследовательской деятельности / Ю. П. Истомина, А. В. Винниченко // Метрологическое обеспечение инновационных технологий : Сборник статей V Международного форума, Санкт-Петербург, 02 марта 2023 года / Под редакцией В.В. Окрепилова. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, 2023. – С. 227. – EDN KSWAAP.

169. Винниченко, А. В. Альфа Кронбаха для анализа надежности в прогнозировании моделей машинного обучения / А. В. Винниченко, Ю. П. Истомина // Волновая электроника и инфокоммуникационные системы : Сборник статей XXVI Международная научная конференция. В 3-х частях, Санкт-Петербург, 29 мая – 02 2023 года. Том Часть 3. – Санкт-Петербург: ГУАП, 2023. – С. 151-155. – EDN CUCXMU.

170. Истомина Ю. П. Язык программирования Python как инструмент для планирования эксперимента / Ю. П. Истомина, А. В. Винниченко // Современные технологии в задачах управления, автоматизации и обработки информации : Сб. трудов XXXII Международной научно-технической конференции, Алушта, 14–20 сентября 2023 года. – Москва, 2023. – С. 100-101. – EDN RVAQUI.

171. Винниченко, А.В. Методика дистанционного мониторинга производственной системы «оператор-оборудование-процесс» / А. В. Винниченко // Известия Тульского государственного университета – 2025 – №3 – С. 18-25

172. Назаревич, С. А. Бережливая цифровизация организационных систем / С. А. Назаревич, В. А. Тушавин, Е. А. Фролова // Инновационное приборостроение. – 2022. – Т. 1, № 1. – С. 44-53. – EDN RZVEPT.

173. Винниченко А. В. Тактика проектирования бережливых производственных систем / А. В. Винниченко // Инновационное

приборостроение. – 2024. – Т. 3, № 2. – С. 18-21. – DOI 10.31799/2949-0693-2024-2-18-21.

174. Тушавин, Я. В. Модели управления качеством проектирования и соответствия / Я. В. Тушавин, В. А. Тушавин // Математические методы и модели в высокотехнологичном производстве : Сб. тезисов докладов III Международного форума. В 2-х частях, Санкт-Петербург, 08 ноября 2023 года. – Санкт-Петербург: ГУАП, 2023. – С. 167-169. – EDN QCRBND.

175. Г.Г. Куликов, А.В. Речкалов, А.В. Артюхов Методология системного моделирования адаптивного управления машиностроительным производством // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника», 2020. Т. 20, № 4. С. 115–125

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

177. Бабушкин, В. М. Апробация методов и средств адаптивного планирования жизненного цикла продукции на промышленных предприятиях / В. М. Бабушкин // Россия: тенденции и перспективы развития : Ежегодник. Материалы XXI Национальной научной конференции с международным участием, Москва, 16–17 декабря 2021 года / Отв. редактор В.И. Герасимов. Том Выпуск 17. Часть 1. – Москва: Институт научной информации по общественным наукам РАН, 2022. – С. 338-343. – EDN BFWWTR.

178. Бабушкин, В. М. Методы и средства адаптивного планирования организации бережливого цифрового производства : специальность 05.02.22 «Организация производства (по отраслям)» : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Бабушкин Виталий Михайлович, 2020. – 365 с. – EDN WTKMGL.

179. Tushavin, V. A. Methodological Approaches to Lean Digitalization / V. A. Tushavin, E. A. Frolova, S. A. Nazarevich // Components of Scientific and Technological Progress. – 2022. – No. 9(75). – P. 12-17. – EDN HLENVT.

180. Tushavin, V. A. Lean Production in Information Technology Services / V. A. Tushavin // Метрологическое обеспечение инновационных технологий : IV Международный форум : сб. статей, Санкт-Петербург, 04 марта 2022 года / Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения. – Санкт-Петербург: ГУАП, 2022. – P. 193. – EDN LRSICN.

181. Кривошеев, О. В. О возможности разработки единой интегрированной модели данных для управления жизненным циклом изделий машиностроения / О. В. Кривошеев // Современные тенденции развития инструментальных систем и металлообрабатывающих комплексов : Сборник трудов научно-технической конференции, посвященной памяти заслуженного деятеля науки и техники Российской Федерации, доктора технических наук, профессора А.А. Рыжкина, Ростов-на-Дону, 21 января 2021 года. – Ростов-на-Дону: Донской государственный технический университет, 2022. – С. 213-220. – EDN GJPCMO.

182. Савицкий, А.Ю. Модель планирования и постановки задач учитывающая возможность использования технологии цифровых двойников / А.Ю. Савицкий // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2025. – № 1. – С.25-33. – DOI: 10.24412/2071-6168-2025-1-25-26

183. Грибков, А. Н. Информационно-управляющая система динамическими режимами в многосекционных сушильных установках : специальность 05.11.16 «Информационно-измерительные и управляющие системы (по отраслям)» : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Грибков Алексей Николаевич. – Тамбов, 2006. – 16 с. – EDN NKFULP.

184. Винниченко А. В. Методы анализа качества в прогнозировании моделей машинного обучения / А. В. Винниченко, Ю. П. Истомина //

Инновационное приборостроение. – 2023. – Т. 2, № 4. – С. 11-15. – DOI 10.31799/2949-0693-2023-4-11-15. – EDN TUUQFQ.

185. Прилуцкий, М. Х. Распределение производственных ресурсов в задачах объемного планирования в условиях неполноты данных / М. Х. Прилуцкий, О. В. Кривошеев // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2022. – № 2(137). – С. 36-43. – DOI 10.46960/1816-210X_2022_2_36. – EDN KGVGUX.

186. Модель жизненного цикла системы защиты информации / А. А. Конев, Т. Е. Минеева, М. Л. Соловьев [и др.] // Безопасность информационных технологий. – 2018. – Т. 25, № 4. – С. 34-41. – EDN YQNKNV.

187. Мурсалимов Э. Ш. Разработка метода синтеза универсальной информационно-управляющей системы для робототехнических устройств автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук, специальность 05.13.18 <Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ> / Мурсалимов Эдуард Шамилович; [Ин-т автоматики и процессов управления ДВО РАН]. — Владивосток 2016. — 20 с. ил.; 21.

188. Делимова, И. С. Программное обеспечение для управления жизненным циклом, необходимое современному производству / И. С. Делимова, Д. М. Шпрехер // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2024. – № 12. – С. 437-441. – DOI 10.24412/2071-6168-2024-12-437-438. – EDN RAXDBM.

189. Ермакова, Ольга Владимировна. Совершенствование инструментария обеспечения качества проектирования и производства продукции машиностроения : автореферат дис. ... кандидата технических наук : 2.5.22. / Ермакова Ольга Владимировна; [Место защиты: ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет» ; Диссовет Д 212.271.XX (24.2.417.06)]. — Тула, 2023. — 20 с. : ил..

190. Винниченко А. В. Исследование и Разработка типового алгоритма внедрения ERP-систем / А. В. Винниченко, В. М. Алексеев //

Волновая электроника и инфокоммуникационные системы : Сборник статей XXVI Международная научная конференция. В 3-х частях, Санкт-Петербург, 29 мая – 02 2023 года. Том Часть 3. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, 2023. – С. 144-150. – EDN XYRQFR.

191. Шиков, П. А. Разработка концепции повышения эффективности функционирования предприятий легкой промышленности на основе создания информационных систем мониторинга производственных процессов : специальность 05.02.22 «Организация производства (по отраслям)» : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Шиков Павел Алексеевич, 2022. – 441 с. – EDN YBPOYJ.

192. Кривошеев, О. В. Интегрированная модель данных для СПЖЦ изделий машиностроения / О. В. Кривошеев // Мивар'22 : Сборник научных статей. – Москва : Издательский Дом «Инфра-М», 2022. – С. 414-419. – EDN RAAUUG.

193. Климачев, С. А. Методика принятия решений на основе компьютерного зрения и выбора Парето-оптимальной альтернативы технологических параметров производства / С. А. Климачев, Н. А. Соловьев // Информационные технологии. – 2023. – Т. 29, № 7. – С. 382-388. – DOI 10.17587/it.29.382-388. – EDN GDZHOU.

194. Винниченко, А. В. Разработка методики дистанционного мониторинга организации работы на местах в технологическом процессе / А. В. Винниченко // Математические методы и модели в высокотехнологичном производстве : Сборник тезисов докладов IV Международного форума. В 2-х частях, Санкт-Петербург, 06 ноября 2024 года. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, 2024. – С. 294-296. – EDN USVWVN.

195. Супрун, В. Н. Информационно-управляющая система для поддержки принятия решений при управлении качеством железнодорожных перевозок : специальность 05.13.01 «Системный анализ, управление и

обработка информации (по отраслям)»: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Супрун Владимир Николаевич. – Красноярск, 2006. – 23 с. – EDN NKFAXX.

196. Слепова, А. Ш. Применение систем массового обслуживания в проектировании систем прогнозирования / А. Ш. Слепова // Наука и бизнес: пути развития. – 2018. – № 3(81). – С. 104-107. – EDN YWFPGP.

197. Добрынин, С. Л. Мониторинг и предиктивная аналитика технологического оборудования на базе промышленного Интернета вещей / С. Л. Добрынин, В. Л. Бурковский // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2020. – Т. 16, № 5. – С. 7-12. – DOI 10.36622/VSTU.2020.16.5.001. – EDN DTASGG.

198. Егоркин Г.Ю. Проблемы и перспективы внедрения дистанционного мониторинга технологического оборудования на машиностроительном предприятии / Егоркин Г.Ю., Макеев Е.В. // Экономика и предпринимательство. – 2023. – № 8 – С. 1053-1056

199. Гречников, Ф. А. Разработка и мониторинг математической модели конкурентоспособности промышленного предприятия / Ф. А. Гречников, И. Н. Хаймович // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2024. – № 9. – С. 85-89. – DOI 10.24412/2071-6168-2024-9-85-86.

200. Винниченко А. В. Комбинаторика цифровых решений для задач бережливого производства / А. В. Винниченко // Системный анализ и логистика. – 2023. – № 1(35). – С. 59-66.

201. Меркулова, А. Ю. Оптимизация производственных процессов на основе 20 ключей Кобаяси и инструментов бережливого производства / А. Ю. Меркулова, С. А. Назаревич // Моделирование и ситуационное управление качеством сложных систем: Сб. докладов Четвертой Всероссийской научной конференции, Санкт-Петербург, 18–22 апреля 2023 года. – Санкт-Петербург: ГУАП, 2023. – С. 182-185.

Приложение А. Результаты патентного анализа для систем АХ

<i>Регистрационный номер патента</i>	<i>Название</i>	<i>Описание</i>	<i>Ссылка</i>
1	2	3	4
Использование сенсоров и IoT			
US20120016607A1	Системы и методы дистанционного мониторинга	Система для мониторинга промышленного процесса, содержащая один или более датчиков, подключенных к одному или более рабочим компонентам промышленного процесса; станция удаленного мониторинга, содержащая компьютер и базу данных; и соединение между одним или более датчиками и станцией удаленного мониторинга, при этом станция удаленного мониторинга находится по меньшей мере на расстоянии около 100-2500 миль от промышленного процесса, например 500-1000 миль.	https://patents.google.com/patent/US20120016607A1/en
Компьютерное зрение			
US11120559B2	Система и метод мониторинга на основе компьютерного зрения	Система мониторинга включает датчики, которые отслеживают активность на обозначенной территории. Датчики включают визуальные датчики, которые ведут видеозапись. Локальная система обработки данных, расположенная на обозначенной территории или поблизости от нее, получает сигналы от датчиков. Местная система обработки обрабатывает и анализирует сигналы от датчиков для получения сообщений, описывающих активность на обозначенной территории, отслеживаемую датчиками. Сообщения не содержат аудио-, визуальной или другой прямой идентифицирующей информации, которая непосредственно раскрывает личность лиц, находящихся на указанной территории. Станция мониторинга за пределами обозначенной территории принимает сообщения, создаваемые местной системой обработки, и предоставляет эти сообщения в распоряжение внешних наблюдателей.	https://patents.google.com/patent/US11120559B2/en
Цифровые двойники			

US10877470B2	Интегрированный цифровой двойник для промышленного объекта	Способ мониторинга технологического процесса на промышленном предприятии включает в себя создание интегрированного цифрового двойника (DT) предприятия, реализованного с помощью компьютерной системы, которая использует алгоритм агрегирования, включающий в себя множество взаимосвязанных статических моделей промышленного предприятия, включая датчики, подключенные к технологическому оборудованию, и модель технологической схемы, а также динамические модели промышленного предприятия, в том числе модели динамического моделирования и модели машинного обучения. Алгоритм агрегирования, использующий выходные данные статических и динамических моделей, генерирует агрегированное представление, включающее оповещения о производительности по крайней мере одного технологического оборудования и производственного процесса на основе текущих показателей производительности производственного процесса.	https://patents.google.com/patent/US10877470B2/en
1	2	3	4
CN113361139A	тема и метод оптимизации прокатки на основе моделирования производственной линии с использованием цифрового двойника	Изобретение относится к технической области моделирования производственных линий, в частности к системе оптимизации прокатки для моделирования производственных линий и способу, основанному на цифровом двойнике, в котором базовый модуль системы оптимизации снабжен модулем механизма моделирования дискретных событий, модулем интерфейса интеграции данных и модулем механизма моделирования данных процесса. Схема производственной линии оценивается и анализируется более эффективно и надежно, а также проводится оптимизация производства в цехе.	https://patents.google.com/patent/CN113361139A/en
Искусственный интеллект			

US6611735B1	Метод прогнозирования и оптимизации производства	Процесс прогнозирования и оптимизации производства на заводе, выпускающем продукцию из поступающих материалов. Поступающие материалы классифицируются по различным физическим характеристикам и стоимости. Желаемая или заказанная продукция также классифицируется по цене и физическим требованиям. Информация о поступающих материалах и продукции вводится в базу данных, доступную для вычислительного устройства. Затем вычислительное устройство рассчитывает оптимальный производственный процесс, просчитывая несколько производственных циклов и выбирая цикл с оптимальной рентабельностью. Вычислительное устройство запрограммировано с помощью нелинейных уравнений, полученных в результате регрессионного анализа данных, собранных с образцов поступающих материалов и продукции.	https://patents.google.com/patent/US6611735B1/en
--------------------	---	---	--

Приложение Б. Карта потерь

№	Вид потерь	Элемент производс твенного процесса	Описание	Элемент методологии бережливого производства
1	2	3	4	5
1	Перепр изводств о	Планиров ание	Из-за чего возникает: Неточное прогнозирование спроса, занижение данных о запасах, отсутствие синхронизации между отделами планирования и производства, недостаточная гибкость планирования. Где возникает: Завышенное производство деталей, необходимость хранения излишков, увеличение затрат на складское пространство и логистику, возможность брака при хранении, снижение оборачиваемости запасов, неэффективное использование ресурсов.	* Demand Planning: Точное прогнозирование спроса, учет сезонности и трендов, использование исторических данных. * Kanban: Оптимизация запасов, использование сигнальных карт для заказа материалов по мере необходимости, что снизит излишки на складе. * Heijunka: Выравнивание объема производства по времени, исключение пиковых нагрузок и простоев. * Pull-система: Производство по требованию, отсутствие излишков на складе.
		Заготовка	Из-за чего возникает: Неправильное планирование закупок, недостаточная оптимизация запасов, неучтенные потери материалов, неэффективная система контроля качества. Как действует: Завышенное количество заготовленных материалов, проблемы с хранением, увеличение затрат на логистику, повышенная вероятность брака, снижение оборачиваемости запасов, увеличение сроков поставки.	* Kanban: Оптимизация запасов материалов, сокращение времени поставки. * JIT (Just In Time): Поставка материалов непосредственно перед их использованием, минимизация запасов. * Управление запасами: Оптимизация уровня запасов, использование методов ABC-анализа.
		Обработка	Из-за чего возникает: Неэффективная организация работы станков, неправильная настройка оборудования, недостаточная квалификация операторов, отсутствие системы контроля качества. Как действует: Излишняя обработка деталей, необходимость доработки брака, повышение затрат на производство, увеличение времени цикла, снижение производительности, неэффективное использование оборудования.	* SMED (Single Minute Exchange of Die): Сокращение времени переналадки оборудования, повышение гибкости производства. * 5S: Организация рабочего места, устранение лишних движений, повышение производительности. * Стандартизация операций: Унификация операций, снижение риска ошибок.
		Сборка	Из-за чего возникает: Неэффективное планирование сборки, отсутствие синхронизации между операторами, недостаточная гибкость в изменении количества собираемых деталей, неправильная организация рабочего места. Как действует: Излишняя сборка готовых изделий, проблемы с хранением и логистикой, снижение оборачиваемости запасов, увеличение затрат на производство, повышение риска брака при сборке, неэффективное использование ресурсов.	* Kanban: Оптимизация потока деталей для сборки, сокращение запасов на рабочем месте. * Pull-система: Сборка деталей по требованию, исключение излишних запасов. * Визуализация потока: Оптимизация последовательности сборки, снижение времени цикла.

2	Ожидание	Планирование	Из-за чего возникает: Несогласованность планов между отделами, отсутствие четкой последовательности операций, недостаточная гибкость планирования, отсутствие системы мониторинга выполнения заданий. Как действует: Простой оборудования в ожидании необходимых материалов или деталей, простой операторов в ожидании следующего этапа работы, увеличение времени цикла, снижение производительности, повышение затрат на производство.	* Визуализация потока: Создание карты потока ценности, чтобы выявить проблемы с ожиданием. * Heijunka: Выравнивание производства, чтобы избежать пиковых нагрузок и простоев. * Pull-система: Производство по требованию, исключение излишков на складе
		Заготовка	Из-за чего возникает: Задержки с поставками материалов, неэффективная система хранения и логистики, недостаточная гибкость в закупочной политике, отсутствие системы мониторинга поставок. Как действует: Простой оборудования в ожидании необходимых материалов, простой операторов в ожидании заготовки деталей, увеличение времени цикла, снижение производительности, повышение затрат на производство.	* JIT (Just In Time): Поставка материалов непосредственно перед их использованием, минимизация запасов. * Kanban: Оптимизация запасов материалов, сокращение времени поставки. * Управление запасами: Оптимизация уровня запасов, использование методов ABC-анализа
		Обработка	Из-за чего возникает: Неэффективная организация рабочего места, неправильная настройка оборудования, недостаточная квалификация операторов, отсутствие системы контроля качества, задержки с переналадкой оборудования. Как действует: Простой оборудования в ожидании следующей операции, простой операторов в ожидании завершения предыдущей операции, увеличение времени цикла, снижение производительности, повышение затрат на производство	* SMED (Single Minute Exchange of Die): Сокращение времени переналадки оборудования, повышение гибкости производства. * 5S: Организация рабочего места, устранение лишних движений, повышение производительности, чтобы оператору было удобно и быстро производить переналадку * Стандартизация операций: Унификация операций, снижение риска ошибок
		Сборка	Из-за чего возникает: Неэффективная организация рабочего места, недостаточная координация между операторами, неправильная последовательность сборки, недостаточная гибкость в изменении количества собираемых деталей. Как действует: Простой операторов в ожидании необходимых деталей, простой оборудования в ожидании следующей операции, увеличение времени цикла, снижение производительности, повышение затрат на производство	* Kanban: Оптимизация потока деталей для сборки, сокращение запасов на рабочем месте. * Pull-система: Сборка деталей по требованию, исключение излишних запасов. * Визуализация потока: Оптимизация последовательности сборки, снижение времени цикла

3	Запасы	Планирование	Из-за чего возникает: Неточное прогнозирование спроса, недостаточная гибкость планирования, отсутствие системы мониторинга запасов, неучтенные потери материалов. Как действует: Излишнее производство деталей, необходимость хранения излишков, увеличение затрат на складское пространство и логистику, возможность брака при хранении, снижение оборачиваемости запасов, неэффективное использование ресурсов.	* Demand Planning: Точное прогнозирование спроса, с учетом сезонности и трендов на рынке. * Kanban: Оптимизация запасов, использование сигнальных карт для заказа материалов по мере необходимости, что снизит излишки на складе. * Heijunka: Выравнивание производства, чтобы избежать пиковых нагрузок и простоев.
		Заготовка	Из-за чего возникает: Неправильное планирование закупок, недостаточная оптимизация запасов, неучтенные потери материалов, неэффективная система контроля качества. Как действует: Излишнее количество заготовленных материалов, проблемы с хранением, увеличение затрат на логистику, повышенная вероятность брака, снижение оборачиваемости запасов, увеличение сроков поставки.	* Kanban: Оптимизация запасов материалов, сокращение времени поставки. Внедрение системы Kanban для заказа материалов по мере необходимости, что снизит излишки на складе. * JIT (Just In Time): Поставка материалов непосредственно перед их использованием, минимизация запасов. * Управление запасами: Оптимизация уровня запасов, использование методов ABC-анализа.
		Обработка	Из-за чего возникает: Неэффективная организация рабочего места, неправильная настройка оборудования, отсутствие системы контроля качества, неэффективное использование ресурсов. Как действует: Излишнее производство деталей, необходимость хранения излишков, увеличение затрат на складское пространство и логистику, возможность брака при хранении, снижение оборачиваемости запасов, неэффективное использование ресурсов.	* 5S: Организация рабочего места, устранение лишних движений, повышение производительности. * SMED (Single Minute Exchange of Die): Сокращение времени переналадки оборудования, повышение гибкости производства. * Стандартизация операций: Унификация операций, снижение риска ошибок.
		Сборка	Из-за чего возникает: Неэффективное планирование сборки, недостаточная координация между операторами, неправильная последовательность сборки, недостаточная гибкость в изменении количества собираемых деталей. Как действует: Излишняя сборка готовых изделий, проблемы с хранением и логистикой, снижение оборачиваемости запасов, увеличение затрат на производство, повышение риска брака при сборке, неэффективное использование ресурсов.	* Kanban: Оптимизация потока деталей для сборки, сокращение запасов на рабочем месте. Внедрение системы Kanban для заказа материалов по мере необходимости, что снизит излишки на складе. * Pull-система: Сборка деталей по требованию, исключение излишних запасов. * Визуализация потока: Оптимизация последовательности сборки, снижение времени цикла.

4	Излишняя транспортировка	Планирование	Из-за чего возникает: Неэффективное планирование потока материалов, отсутствие четкой последовательности операций, недостаточная гибкость планирования, неучтенные потери времени на перемещение материалов. Как действует: Излишние перемещения материалов между складами и рабочими местами, увеличение времени цикла, повышение риска повреждения материалов, повышение затрат на логистику, снижение производительности.	* Визуализация потока: Создание карты потока ценности, чтобы выявить проблемы с перемещением материалов. * Heijunka: Выравнивание производства, чтобы избежать пиковых нагрузок и простоев. * Pull-система: Производство по требованию, исключение излишков на складе.
		Заготовка	Из-за чего возникает: Неэффективная система хранения и логистики, отсутствие централизованного склада, недостаточная гибкость в закупочной политике, неучтенные потери времени на перемещение материалов. Как действует: Излишние перемещения материалов между складами и рабочими местами, увеличение времени цикла, повышение риска повреждения материалов, повышение затрат на логистику, снижение производительности.	* JIT (Just In Time): Поставка материалов непосредственно перед их использованием, минимизация запасов. * Kanban: Оптимизация запасов материалов, сокращение времени поставки. * Управление запасами: Оптимизация уровня запасов, использование методов ABC-анализа.
		Обработка	Из-за чего возникает: Неэффективная организация рабочего места, неправильная настройка оборудования, отсутствие системы контроля качества, неучтенные потери времени на перемещение деталей. Как действует: Излишние перемещения деталей между станками и рабочими местами, увеличение времени цикла, повышение риска повреждения деталей, повышение затрат на логистику, снижение производительности.	* 5S: Организация рабочего места, устранение лишних движений, повышение производительности, чтобы оператору было удобно и быстро производить переналадку. * SMED (Single Minute Exchange of Die): Сокращение времени переналадки оборудования, повышение гибкости производства, что позволит уменьшить простои. * Стандартизация операций: Унификация операций, снижение риска ошибок.
		Сборка	Из-за чего возникает: Неэффективное планирование сборки, недостаточная координация между операторами, неправильная последовательность сборки, неучтенные потери времени на перемещение деталей. Как действует: Излишние перемещения деталей между рабочими местами, увеличение времени цикла, повышение риска повреждения деталей, повышение затрат на логистику, снижение производительности.	* Kanban: Оптимизация потока деталей для сборки, сокращение запасов на рабочем месте. * Pull-система: Сборка деталей по требованию, исключение излишних запасов. * Визуализация потока: Оптимизация последовательности сборки, снижение времени цикла.
5	Излишнее перемещение людей	Планирование	Из-за чего возникает: Неэффективное планирование рабочих мест, отсутствие четкого потока информации, недостаточная координация между отделами, отсутствие систематического анализа движений персонала. Как действует: Операторы тратят лишнее время на перемещения между рабочими местами, складами и отделами, увеличивается время цикла, снижается производительность, повышается утомляемость персонала.	* Визуализация потока: Создание карты потока ценности, чтобы выявить проблемы с перемещением персонала. * Heijunka: Выравнивание производства, чтобы избежать пиковых нагрузок и простоев. * Pull-система: Производство по требованию, исключение излишков на складе.

		Заготовка	Из-за чего возникает: Неэффективная организация склада, отсутствие централизованного склада, недостаточная гибкость в закупочной политике, неучтенные потери времени на перемещение материалов. Как действует: Операторы тратят лишнее время на перемещения между складами и рабочими местами, увеличивается время цикла, снижается производительность, повышается утомляемость персонала.	* JIT (Just In Time): Поставка материалов непосредственно перед их использованием, минимизация запасов. * Kanban: Оптимизация запасов материалов, сокращение времени поставки, что снизит необходимость в походах на склад. * Управление запасами: Оптимизация уровня запасов, использование методов ABC-анализа.
		Обработка	Из-за чего возникает: Неэффективная организация рабочего места, отсутствие системы контроля качества, неправильная настройка оборудования, неучтенные потери времени на перемещение деталей. Как действует: Операторы тратят лишнее время на перемещения между станками и рабочими местами, увеличивается время цикла, снижается производительность, повышается утомляемость персонала.	* 5S: Организация склада и рабочего места, чтобы сократить необходимость перемещений оператора. * SMED (Single Minute Exchange of Die): Сокращение времени переналадки оборудования, повышение гибкости производства. * Стандартизация операций: Унификация операций, снижение риска ошибок.
		Сборка	Из-за чего возникает: Неэффективное планирование сборки, недостаточная координация между операторами, неправильная последовательность сборки, неучтенные потери времени на перемещение деталей. Как действует: Операторы тратят лишнее время на перемещения между рабочими местами, увеличивается время цикла, снижается производительность, повышается утомляемость персонала.	Инструменты бережливого производства: * Kanban: Оптимизация потока деталей для сборки, сокращение запасов на рабочем месте их заказа по мере необходимости, что снизит необходимость в походах на склад. * Pull-система: Сборка деталей по требованию, исключение излишних запасов. * Визуализация потока: Оптимизация последовательности сборки, снижение времени цикла.
		Планирование	Из-за чего возникает: Неправильная спецификация материалов, недостаточный контроль качества на этапе поставки, отсутствие системы предотвращения брака, неправильное планирование обучения персонала. Как действует: Повышение риска появления дефектов на последующих этапах производства, необходимость дополнительных затрат на исправление брака, снижение качества продукции, увеличение времени цикла, снижение удовлетворенности клиентов.	* Визуализация потока: Создание карты потока ценности, чтобы выявить проблемы с качеством на этапе планирования. * Стандартизация операций: Унификация операций, снижение риска ошибок. * Обучение персонала: Повышение квалификации операторов, чтобы они могли правильно использовать оборудование и материалы.
6	Дефекты			

		Заготовка	Из-за чего возникает: Неправильное хранение материалов, недостаточный контроль качества на этапе приемки, неправильная упаковка материалов, отсутствие системы предотвращения брака. Как действует: Появление дефектов в материалах перед их использованием, необходимость дополнительных затрат на исправление брака, снижение качества продукции, увеличение времени цикла, снижение удовлетворенности клиентов.	* 5S: Организация склада, чтобы материала хранились правильно и не повреждались. * SPC (Statistical Process Control): Статистический контроль процесса для отслеживания качества материалов. * Обучение персонала: Повышение квалификации операторов, чтобы они могли правильно хранить и использовать материалы.
		Обработка	Из-за чего возникает: Неправильная настройка оборудования, отсутствие системы контроля качества, недостаточная квалификация операторов, отсутствие системы предотвращения брака. Как действует: Появление дефектов в деталях во время обработки, необходимость дополнительных затрат на исправление брака, снижение качества продукции, увеличение времени цикла, снижение удовлетворенности клиентов.	* SMED (Single Minute Exchange of Die): Сокращение времени переналадки оборудования, что снижает риск ошибок при настройке. * SPC (Statistical Process Control): Статистический контроль процесса для отслеживания качества деталей. * Обучение персонала: Повышение квалификации операторов, чтобы они могли правильно использовать оборудование и выполнять операции.
		Сборка	Из-за чего возникает: Неправильная последовательность сборки, недостаточный контроль качества на этапе сборки, недостаточная координация между операторами, отсутствие системы предотвращения брака. Как действует: Появление дефектов в готовых изделиях, необходимость дополнительных затрат на исправление брака, снижение качества продукции, увеличение времени цикла, снижение удовлетворенности клиентов.	* Визуализация потока: Создание карты потока ценности, чтобы выявить проблемы с качеством на этапе сборки. * Стандартизация операций: Унификация операций, снижение риска ошибок. * Обучение персонала: Повышение квалификации операторов, чтобы они могли правильно выполнять операции сборки.
	7	Излишняя обработка	Из-за чего возникает: Неправильное определение необходимых операций, отсутствие системы анализа излишних операций, недостаточное внимание к требованиям клиента, отсутствие системы предотвращения излишней обработки. Как действует: Проведение лишних операций, не добавляющих ценности для клиента, увеличение времени цикла, снижение производительности, повышение затрат на производство.	* Визуализация потока: Создание карты потока ценности, чтобы выявить излишние операции на этапе планирования. * Value Stream Mapping: Анализ потока ценности, чтобы определить необходимые и излишние операции. * Стандартизация операций: Унификация операций, снижение риска излишних действий.

8		Заготовка	Из-за чего возникает: Неправильное хранение материалов, недостаточное контроль качества на этапе приемки, отсутствие системы предотвращения излишней обработки материалов. Как действует: Проведение лишних операций с материалами, не добавляющих ценности для клиента, увеличение времени цикла, снижение производительности, повышение затрат на производство.	* 5S: Организация склада, чтобы материала хранились правильно и не повреждались. * Стандартизация операций: Унификация операций с материалами, снижение риска излишних действий. * Обучение персонала: Повышение квалификации операторов, чтобы они могли правильно использовать материалы.
		Обработка	Из-за чего возникает: Неправильная настройка оборудования, отсутствие системы контроля качества, недостаточная квалификация операторов, отсутствие системы предотвращения излишней обработки деталей. Как действует: Проведение лишних операций с деталями, не добавляющих ценности для клиента, увеличение времени цикла, снижение производительности, повышение затрат на производство.	* SMED (Single Minute Exchange of Die): Сокращение времени переналадки оборудования, что снижает риск излишних операций при настройке. * Стандартизация операций: Унификация операций с деталями, снижение риска излишних действий. * Обучение персонала: Повышение квалификации операторов, чтобы они могли правильно использовать оборудование и выполнять операции.
		Сборка	Из-за чего возникает: Неправильная последовательность сборки, недостаточный контроль качества на этапе сборки, недостаточная координация между операторами, отсутствие системы предотвращения излишней обработки деталей. Как действует: Проведение лишних операций при сборке, не добавляющих ценности для клиента, увеличение времени цикла, снижение производительности, повышение затрат на производство.	* Визуализация потока: Создание карты потока ценности, чтобы выявить излишние операции на этапе сборки. * Стандартизация операций: Унификация операций сборки, снижение риска излишних действий. * Обучение персонала: Повышение квалификации операторов, чтобы они могли правильно выполнять операции сборки.
	Неиспользованный человеческий потенциал	Планирование	Из-за чего возникает: Недостаточная вовлеченность операторов: Планирование происходит без учета опыта и знаний операторов. Операторы не могут использовать свои навыки и знания для оптимизации процесса.	* Стандартизированная работа, * 5S, * Стандартный операционный метод (COM), * Генри-Борд, Мозговой штурм
		Заготовка	Из-за чего возникает: Неэффективное использование ресурсов: Операторы не могут эффективно использовать ресурсы, так как им не предоставлена информация о необходимости заготовки, о типах материалов и т.д. Операторы вынуждены тратить время на поиск информации, что приводит к задержкам в производстве.	* Канбан, * Система вытягивания (Pull System), * Стандартизированная работа, * 5S, * Визуализация

		Обработка	Из-за чего возникает: Ограниченная ответственность: Операторы не имеют возможности влиять на процесс обработки, что снижает их мотивацию и интерес. Операторы не могут в полной мере использовать свои навыки и знания для оптимизации процесса	* Автономное управление, * Стандартный операционный метод (COM), * SMED (Single Minute Exchange of Die): Сокращение времени переналадки оборудования, * Система качества, * Постоянное улучшение (Kaizen)
		Сборка	Из-за чего возникает: Недостаточная обратная связь: Операторы не получают информацию о результатах своей работы, что ограничивает их возможность для самосовершенствования. Операторы не могут определить и устранить проблемы в сборке, потому что не знают о них	* Стандартизированная работа, * Визуализация, * Постоянное улучшение, * Система предложений (Kaizen), * SMED (Single Minute Exchange of Die): Сокращение времени переналадки оборудования, * Автономное управление

Приложение В. Программный код реализации ДМАХ

```
from datetime import datetime
mp_drawing = mp.solutions.drawing_utils
mp_drawing_styles = mp.solutions.drawing_styles
mp_hands = mp.solutions.hands
cap = cv2.VideoCapture(0) # For webcam input:
#cap = cv2.VideoCapture('5b.mp4')
#fps = cap.get(cv2.CAP_PROP_FPS); #print ('FPS:', fps)
frame_width = int(cap.get(3))
frame_height = int(cap.get(4))
#out = cv2.VideoWriter('Tracking.avi',cv2.VideoWriter_fourcc('M','J','P','G'), 29,
(frame_width,frame_height))
crosshair = True # Crosshair mode
Rx, Ry = 200, 100 # Dimensions of work zone of cam
Cx = 0
Cy = 0
total_presence_time, current_presence_time = 0, time.time()
total_working_time, current_working_time = 0, time.time()
pause_time, current_pause_time = 0, 0
Status = "
Pause = False
with mp_hands.Hands(model_complexity=0, min_detection_confidence=0.5,
min_tracking_confidence=0.5) as hands:
    while cap.isOpened():
        ret, image = cap.read()
        if not ret:
            print(«Can't receive frame from cam1 (stream end?). Exiting ...»)
            break
        # Отслеживание кистей рук
        image.flags.writeable = False # To improve performance, optionally mark the image
as not writeable to pass by reference.
        image = cv2.cvtColor(image, cv2.COLOR_BGR2RGB)
        results = hands.process(image)
        image.flags.writeable = True # Draw the hand annotations on the image.
        image = cv2.cvtColor(image, cv2.COLOR_RGB2BGR)
        hands_image = np.zeros((frame_height,frame_width,3), np.uint8)
        if results.multi_hand_landmarks:
            for hand_landmarks in results.multi_hand_landmarks:
                mp_drawing.draw_landmarks(
                    hands_image,
                    hand_landmarks,
                    mp_hands.HAND_CONNECTIONS,
```

```

        mp_drawing_styles.get_default_hand_landmarks_style(),
        mp_drawing_styles.get_default_hand_connections_style()
    )
    # Обработка изображения с таймерами
    hands_image2 = cv2.cvtColor(hands_image, cv2.COLOR_BGR2GRAY)
    if np.sum(hands_image2) != 0: # Оператор присутствует на экране, если есть
    хотя бы один пиксель
        Status = 'PRESENT'
        x, y, w, h = cv2.boundingRect(hands_image2)
        Cx = round(w / 2) + x
        Cy = round(h / 2) + y
        cv2.rectangle(hands_image, (x, y), (x + w, y + h), (0, 255, 0), 2)
        cv2.circle(hands_image, (Cx, Cy), 10, (0, 0, 255), -1)
        if Cx >= round(frame_width / 2) - Rx and Cx <= round(frame_width / 2) + Rx
    and Cy >= round(
        frame_height / 2) - Ry and Cy <= round(frame_height / 2) + Ry: #
Оператор в рабочей зоне
        Status = 'WORKING'
        Pause = True
        pause_time = 0
        current_pause_time = time.time()
        total_working_time += time.time() - current_working_time
        current_working_time = time.time()
    else: # Оператор вышел из рабочей зоны, но все еще в объективе
        current_working_time = time.time()
        if Pause: # Если работали до выхода
            pause_time += time.time() - current_pause_time
            current_pause_time = time.time()
            if pause_time >= 3: # Если время приостановки работы вышло
                pause_time = 0
                Pause = False
                total_working_time = 0
                Status = 'PRESENT'
            else: # Если время приостановки работы еще есть
                Status = 'PAUSE'
        else: # Если оператор не в рабочей зоне, но в объективе камеры
            Status = 'PRESENT'
            total_working_time = 0
            total_presence_time += time.time() - current_presence_time
            current_presence_time = time.time()
    else: # Оператора нет на экране, изображение пустое
        current_presence_time = time.time()

```

```

current_working_time = time.time()
if Pause: # Если оператор внезапно пропал из рабочей зоны по разным
причинам
    pause_time += time.time() - current_pause_time
    current_pause_time = time.time()
    if pause_time >= 3: # Если время приостановки работы вышло
        pause_time = 0
        Pause = False
        total_working_time = 0
        Status = 'OUT OF FRAME'
    else: # Если время приостановки работы еще есть
        Status = 'PAUSE'
else: # Если оператор не в объективе камеры
    Status = 'OUT OF FRAME'
    total_working_time = 0
# Отображение информации
img = hands_image
cv2.putText(img, 'PRESENCE T: ' + str(round(total_presence_time, 2)) + 's', (10,
30), cv2.FONT_HERSHEY_SIMPLEX, 0.7, (0, 255, 0), 2)
cv2.putText(img, 'WORK T: ' + str(round(total_working_time, 2)) + 's', (10, 60),
cv2.FONT_HERSHEY_SIMPLEX, 0.7, (0, 255, 0), 2)
cv2.putText(img, 'STATUS: ' + Status, (frame_width-270, 30),
cv2.FONT_HERSHEY_SIMPLEX, 0.7, (0, 255, 0), 2)
if Status == 'PAUSE':
    cv2.putText(img, str(round(pause_time, 2)) + 's', (frame_width - 240, 60),
cv2.FONT_HERSHEY_SIMPLEX, 0.7, (0, 255, 0), 2)
#Отображение прицела
if crosshair:
    # Draw crosshair cam
    # horizontal
    for i in [img, image, hands_image2]:
        cv2.line(i, (0, round(frame_height / 2)), (round(frame_width / 2) - 10,
round(frame_height / 2)),
                (255, 255, 255), 1) # left part
        cv2.line(i, (round(frame_width / 2) + 10, round(frame_height / 2)),
                (frame_width, round(frame_height / 2)),
                (255, 255, 255), 1) # right part
    # vertical
    cv2.line(i, (round(frame_width / 2), 0), (round(frame_width / 2),
round(frame_height / 2) - 10),
            (255, 255, 255), 1) # top part
    cv2.line(i, (round(frame_width / 2), round(frame_height / 2) + 10),

```

```

        (round(frame_width / 2), frame_height),
        (255, 255, 255), 1) # bottom part
    # Draw zone
    cv2.rectangle(i, (round(frame_width / 2) - Rx, round(frame_height / 2) - Ry),
        (round(frame_width / 2) + Rx, round(frame_height / 2) + Ry), (255,
155, 0), 1)
    """
    cv2.line(img, (0, round(frame_height / 2)), (round(frame_width / 2) - 10,
round(frame_height / 2)),
        (255, 255, 255), 1) # left part
    cv2.line(img, (round(frame_width / 2) + 10, round(frame_height / 2)),
        (frame_width, round(frame_height / 2)),
        (255, 255, 255), 1) # right part
    # vertical
    cv2.line(img, (round(frame_width / 2), 0), (round(frame_width / 2),
round(frame_height / 2) - 10),
        (255, 255, 255), 1) # top part
    cv2.line(img, (round(frame_width / 2), round(frame_height / 2) + 10),
        (round(frame_width / 2), frame_height),
        (255, 255, 255), 1) # bottom part
    # Draw zone
    cv2.rectangle(img, (round(frame_width / 2) - Rx, round(frame_height / 2) - Ry),
        (round(frame_width / 2) + Rx, round(frame_height / 2) + Ry), (255, 155,
0), 1)
    """
    cv2.imshow('IMG', img)
    cv2.imshow('Image', image)
    #cv2.imshow('Hands', hands_image)
    cv2.imshow('Hands2', hands_image2)
    #out.write(frame)
    # Клавиши управления
    if cv2.waitKey(1) & 0xFF == ord('x'):
        if not crosshair:
            crosshair = True
        else:
            crosshair = False
    if cv2.waitKey(5) & 0xFF == 27: # ESCAPE
        break
cap.release()
#out.release()
cv2.destroyAllWindows()

```

Приложение Г. Автоматизированный расчет оценки ОТЭ ПС ООП

```
import tkinter as tk
from tkinter import ttk
from tkinter import messagebox
# Весовые коэффициенты для каждого показателя
weights = {
    'X': [0.1] * 15, # Веса для показателей человека-оператора
    'Y': [0.1] * 15, # Веса для показателей оборудования
    'Z': [0.1] * 15 # Веса для показателей состояния процесса
}
# Названия показателей для оператора (X)
x_labels = [
    «Длительность работы без перерывов»,
    «Количество ошибок при выполнении задач»,
    «Скорость выполнения задач»,
    «Стрессоустойчивость»,
    «Концентрация внимания»,
    «Социальные навыки»,
    «Гибкость в переключении между задачами»,
    «Лояльность к работодателю»,
    «Коммуникабельность и умение работать в команде»,
    «Самодисциплина и самоконтроль»,
    «Мотивация к выполнению задач»,
    «Уровень стремления к самосовершенствованию»,
    «Ответственность и исполнительность»,
    «Устойчивость к изменениям в рабочем процессе»,
    «Знание технических аспектов работы»
]
# Названия показателей для оборудования (Y)
y_labels = [
    «Общая эффективность оборудования»,
    «Коэффициент использования режимного фонда времени»,
    «Коэффициент использования планового фонда времени»,
    «Коэффициент сменности работы»,
    «Коэффициент использования сменного режима»,
    «Коэффициент использования рабочего времени»,
    «Коэффициент интенсивной нагрузки»,
    «Коэффициент использования оборудования»,
    «Износ амортизации ОФ»,
    «Коэффициент износа»,
    «Коэффициент использования парка наличного оборудования»,
    «Автоматизация оборудования»,
```

```

    «Надежность оборудования»,
    «Уровень эргономики рабочего места»,
    «Техническое состояние оборудования»
]
# Названия показателей для процесса (Z)
z_labels = [
    «Скорость производства»,
    «Результативность»,
    «Время цикла производства»,
    «Количество брака и отходов»,
    «Эффективность»,
    «Средние общие затраты»,
    «Наличие четкой инструкции»,
    «Норма времени на операцию»,
    «Влияние внешних условий»,
    «Сложность операции»,
    «Ритмичность»,
    «Соотношение количества сбоев и время их устранения»,
    «Мощность потока»,
    «Темп потока»,
    «Такт потока»
]
# Функция для расчета аддитивной свертки
def calculate_ote():
    try:
        # Суммируем взвешенные показатели для каждой группы
        sum_X = sum([float(entries_X[i].get()) * weights['X'][i] for i in range(15) if
entries_X[i].get()])
        sum_Y = sum([float(entries_Y[i].get()) * weights['Y'][i] for i in range(15) if
entries_Y[i].get()])
        sum_Z = sum([float(entries_Z[i].get()) * weights['Z'][i] for i in range(15) if
entries_Z[i].get()])
        # Общая сумма ОТЭ
        total_ote = sum_X + sum_Y + sum_Z
        # Формируем результат в зависимости от введенных данных
        result_message = «Результаты оценки ОТЭ:\n\n»
        # Проверка и вывод для оператора
        if any(entries_X[i].get() for i in range(15)):
            if sum_X > 0.71:
                operator_status = «Высокий уровень показателя оператора:
Характеризуется оптимальным уровнем показателя, обеспечивающим
эффективную работу оператора, оборудования и процесса. Оператор

```

демонстрирует квалификацию, мотивацию, знание охраны труда и технике безопасности, навыки командной работы, физическую подготовку, навыки работы с компьютером, коммуникативные навыки, творческий потенциал, стрессоустойчивость, уровень ответственности, навыки самоорганизации, адаптивность, уровень внимания к деталям, знания о производственных процессах, навыки работы с КИМ/КИП и оборудованием на наивысшем уровне.»

elif 0.31 <= sum_X <= 0.7:

operator_status = «Средний уровень показателя оператора: Характеризуется средним уровнем показателя, соответствующим базовым требованиям и позволяющим оператору эффективно выполнять свои задачи. Оператор демонстрирует квалификацию, мотивацию, знание охраны труда и технике безопасности, навыки командной работы, физическую подготовку, навыки работы с компьютером, коммуникативные навыки, стрессоустойчивость, уровень ответственности, навыки самоорганизации, знания о производственных процессах, навыки работы с инструментами и оборудованием на среднем уровне.»

else:

operator_status = «Низкий уровень показателя оператора: Характеризуется низким уровнем показателя, недостаточным для эффективной работы, может приводить к ошибкам, снижению производительности и повышенному риску опасных ситуаций. Оператор демонстрирует квалификацию, мотивацию, знание охраны труда и технике безопасности, физическую подготовку, стрессоустойчивость, уровень ответственности, уровень внимания к деталям, знания о производственных процессах, навыки работы с инструментами и оборудованием на низком уровне.»

result_message += f»Сумма показателей оператора: {sum_X:.2f}\n{operator_status}\n\n»

Проверка и вывод для оборудования

if any(entries_Y[i].get() for i in range(15)):

if sum_Y > 0.71:

equipment_status = «Высокий уровень показателя оборудования: Оборудование находится в идеальном состоянии, полностью соответствует всем техническим требованиям, не требует ремонта или обслуживания, обеспечивает максимальную производительность, качество и безопасность работы.»

elif 0.31 <= sum_Y <= 0.7:

equipment_status = «Средний уровень показателя оборудования: Оборудование находится в удовлетворительном состоянии, в целом соответствует техническим требованиям, может требовать периодического ремонта или обслуживания, работает удовлетворительно, обеспечивает удовлетворительную производительность и качество работы.»

else:

equipment_status = «Низкий уровень показателя оборудования: Оборудование имеет серьезные неисправности, требует срочного ремонта или

замены, не способно обеспечить необходимую производительность и качество работы, представляет опасность для оператора и может привести к авариям и простоям в производстве.»

```
result_message += f»Сумма показателей оборудования:  
{sum_Y:.2f}\n{equipment_status}\n\n»
```

```
# Проверка и вывод для процесса
```

```
if any(entries_Z[i].get() for i in range(15)):
```

```
    if sum_Z > 0.71:
```

```
        process_status = «Высокий уровень показателя процесса: Процесс  
стабилен, оптимизирован и эффективен, обеспечивает высокую  
производительность, качество продукции и минимизацию отходов.»
```

```
    elif 0.31 <= sum_Z <= 0.7:
```

```
        process_status = «Средний уровень показателя процесса: Процесс  
организован не в полной мере, обеспечивает удовлетворительную  
производительность и качество продукции, незначительное количество отходов,  
имеет потенциал для улучшения.»
```

```
    else:
```

```
        process_status = «Низкий уровень показателя процесса: Процесс не  
стабилен, не эффективен, обеспечивает низкую производительность и качество  
продукции, значительное количество отходов, требует пересмотра и перестройки.»
```

```
result_message += f»Сумма показателей процесса:  
{sum_Z:.2f}\n{process_status}\n\n»
```

```
# Характеристика общей ОТЭ
```

```
if 2.0 <= total_ote <= 3.0:
```

```
    ote_status = «Высокий уровень ОТЭ: Система соответствует всем  
требованиям, демонстрирует высокую эффективность и производительность.  
Рабочее место оператора оптимизировано для комфорта и безопасности.  
Оборудование работает с высокой производительностью и надежностью.  
Технологический процесс оптимизирован для максимальной эффективности.  
Качество продукции стабильно высокое. Обеспечен высокий уровень безопасности  
труда. Управление процессами прозрачно и эффективно. Оператор имеет высокую  
квалификацию и готовность к работе.»
```

```
    elif 1.0 <= total_ote < 2.0:
```

```
        ote_status = «Средний уровень ОТЭ: Система работает удовлетворительно, с  
некоторыми недостатками, которые могут быть устранены. Рабочее место  
оператора требует улучшений в плане эргономики и безопасности. Оборудование  
работает стабильно, но требует периодического обслуживания. Технологический  
процесс нуждается в оптимизации для повышения эффективности. Качество  
продукции соответствует стандартам, но наблюдаются частые отклонения.  
Безопасность труда требует усиления контроля. Управление процессами требует  
улучшений. Оператор обладает достаточными знаниями и навыками, но нуждается  
в обучении.»
```

else:

ote_status = «Низкий уровень ОТЭ: Система работает неэффективно, с серьезными проблемами, которые требуют немедленного решения. Рабочее место оператора представляет угрозу для здоровья и безопасности. Оборудование работает с частыми поломками и не обеспечивает должного уровня производительности. Технологический процесс неэффективен и нуждается в полной переработке. Качество продукции не соответствует стандартам и неприемлемо. Безопасность труда не обеспечивается, что создает опасность для персонала. Управление процессами отсутствует. Оператор не имеет необходимой квалификации и не способен работать.»

```
result_message += f»Общая ОТЭ: {total_ote:.2f}\n{ote_status}»
```

```
# Вывод результатов
```

```
messagebox.showinfo(«Результат», result_message)
```

```
except ValueError:
```

```
messagebox.showerror(«Ошибка», «Пожалуйста, введите числовые значения для всех показателей.»)
```

```
# Создание основного окна
```

```
root = tk.Tk()
```

```
root.title(«Оценка ОТЭ»)
```

```
# Создание вкладок для каждой группы показателей
```

```
notebook = ttk.Notebook(root) # Используем ttk.Notebook
```

```
notebook.pack(fill='both', expand=True)
```

```
# Вкладка для показателей человека-оператора
```

```
frame_X = tk.Frame(notebook)
```

```
notebook.add(frame_X, text=«Показатели оператора (X)»)
```

```
entries_X = []
```

```
for i in range(15):
```

```
label = tk.Label(frame_X, text=f»X{i+1}: {x_labels[i]}»)
```

```
label.grid(row=i, column=0, sticky=«w»)
```

```
entry = tk.Entry(frame_X)
```

```
entry.grid(row=i, column=1)
```

```
entries_X.append(entry)
```

```
# Вкладка для показателей оборудования
```

```
frame_Y = tk.Frame(notebook)
```

```
notebook.add(frame_Y, text=«Показатели оборудования (Y)»)
```

```
entries_Y = []
```

```
for i in range(15):
```

```
label = tk.Label(frame_Y, text=f»Y{i+1}: {y_labels[i]}»)
```

```
label.grid(row=i, column=0, sticky=«w»)
```

```
entry = tk.Entry(frame_Y)
```

```
entry.grid(row=i, column=1)
```

```
entries_Y.append(entry)
```

```

# Вкладка для показателей состояния процесса
frame_Z = tk.Frame(notebook)
notebook.add(frame_Z, text=«Показатели процесса (Z)»)
entries_Z = []
for i in range(15):
    label = tk.Label(frame_Z, text=f»Z{i+1}: {z_labels[i]}»)
    label.grid(row=i, column=0, sticky=«w»)
    entry = tk.Entry(frame_Z)
    entry.grid(row=i, column=1)
    entries_Z.append(entry)
# Кнопка для расчета ОТЭ
button_calculate = tk.Button(root, text=«Рассчитать ОТЭ», command=calculate_ote)
button_calculate.pack()
# Запуск основного цикла обработки событий
root.mainloop()

```

Приложение Д. Условия вариативности состояний элементов ПС ООП

Формирование нечетких правил: Правила формируются по принципу «минимального уровня» среди трех компонентов с весовыми коэффициентами:

$$\text{if } \sum_{i=1}^n X_i \leq 1,0 \text{ and } \sum_{i=1}^n Y_i \leq 1,0 \text{ and } \sum_{i=1}^n Z_i \leq 1,0; \text{ then } S_{OTЭ} \leq 3,0, \quad (1Д)$$

где if $X_i \leq 1,0$ and $Y_i \leq 1,0$ and $Z_i \leq 1,0$ then $S_{OTЭ} \leq 3,0 \rightarrow S_{OTЭ} = \text{Высокий}$ уровень.

Полная система нечетких правил:

Все показатели высокие:

Если $X_i = \text{Высокий}$ И $Y_i = \text{Высокий}$ И $Z_i = \text{Высокий} \rightarrow OTЭ = \text{Высокий}$

Два высоких, один средний:

Если $X_i = \text{Высокий}$ И $Y_i = \text{Высокий}$ И $Z_i = \text{Средний} \rightarrow OTЭ = \text{Высокий}$

Если $X_i = \text{Высокий}$ И $Y_i = \text{Средний}$ И $Z_i = \text{Высокий} \rightarrow OTЭ = \text{Высокий}$

Если $X_i = \text{Средний}$ И $Y_i = \text{Высокий}$ И $Z_i = \text{Высокий} \rightarrow OTЭ = \text{Высокий}$

Один высокий, два средних:

Если $X_i = \text{Высокий}$ И $Y_i = \text{Средний}$ И $Z_i = \text{Средний} \rightarrow OTЭ = \text{Средний}$

Если $X_i = \text{Средний}$ И $Y_i = \text{Высокий}$ И $Z_i = \text{Средний} \rightarrow OTЭ = \text{Средний}$

Если $X_i = \text{Средний}$ И $Y_i = \text{Средний}$ И $Z_i = \text{Высокий} \rightarrow OTЭ = \text{Средний}$

Один высокий, один средний, один низкий:

Если $X_i = \text{Высокий}$ И $Y_i = \text{Средний}$ И $Z_i = \text{Низкий} \rightarrow OTЭ = \text{Средний}$

Если $X_i = \text{Высокий}$ И $Y_i = \text{Низкий}$ И $Z_i = \text{Средний} \rightarrow OTЭ = \text{Средний}$

Если $X_i = \text{Средний}$ И $Y_i = \text{Высокий}$ И $Z_i = \text{Низкий} \rightarrow OTЭ = \text{Средний}$

Если $X_i = \text{Средний}$ И $Y_i = \text{Низкий}$ И $Z_i = \text{Высокий} \rightarrow OTЭ = \text{Средний}$

Если $X_i = \text{Низкий}$ И $Y_i = \text{Высокий}$ И $Z_i = \text{Средний} \rightarrow OTЭ = \text{Средний}$

Если $X_i = \text{Низкий}$ И $Y_i = \text{Средний}$ И $Z_i = \text{Высокий} \rightarrow OTЭ = \text{Средний}$

Все показатели средние:

Если $X_i = \text{Средний}$ И $Y_i = \text{Средний}$ И $Z_i = \text{Средний} \rightarrow OTЭ = \text{Средний}$

Два средних, один низкий:

Если $X_i = \text{Средний}$ И $Y_i = \text{Средний}$ И $Z_i = \text{Низкий}$ $\rightarrow$ ОТЭ = Низкий

Если $X_i = \text{Средний}$ И $Y_i = \text{Низкий}$ И $Z_i = \text{Средний}$ $\rightarrow$ ОТЭ = Низкий

Если $X_i = \text{Низкий}$ И $Y_i = \text{Средний}$ И $Z_i = \text{Средний}$ $\rightarrow$ ОТЭ = Низкий

Один средний, два низких:

Если $X_i = \text{Средний}$ И $Y_i = \text{Низкий}$ И $Z_i = \text{Низкий}$ $\rightarrow$ ОТЭ = Низкий

Если $X_i = \text{Низкий}$ И $Y_i = \text{Средний}$ И $Z_i = \text{Низкий}$ $\rightarrow$ ОТЭ = Низкий

Если $X_i = \text{Низкий}$ И $Y_i = \text{Низкий}$ И $Z_i = \text{Средний}$ $\rightarrow$ ОТЭ = Низкий

Все показатели низкие:

Если $X_i = \text{Низкий}$ И $Y_i = \text{Низкий}$ И $Z_i = \text{Низкий}$ $\rightarrow$ ОТЭ = Низкий

Приложение Е. Методика ПРОУ БПС

```
import tkinter as tk
from tkinter import messagebox, simpledialog
class ProductionSystemAnalyzer:
    def __init__(self, root):
        self.root = root
        self.root.title(«Анализатор производственной системы»)
        # Базы рекомендаций для оператора (Xi)
        self.operator_recommendations = {
            1: [«Внедрить регулярные перерывы для снижения усталости.»,
                «Использовать метод Pomodoro (помидора) для управления временем.», «Поощрять
                короткие перерывы для повышения концентрации.»],
            2: [«Провести обучение по стандартам работы, внедрить чек-листы.»,
                «Улучшить контроль качества, внедрить системы мониторинга.», «Поощрять
                операторов за снижение ошибок.»],
            3: [«Оптимизировать процессы, внедрить автоматизацию.», «Улучшить
                планирование задач, снизить простои.», «Поощрять операторов за высокую
                скорость выполнения задач.»],
            4: [«Проводить тренинги по управлению стрессом.», «Создать комфортные
                условия работы.», «Поощрять операторов за высокую стрессоустойчивость.»],
            5: [«Внедрить методы повышения концентрации (медитация, перерывы).»,
                «Улучшить эргономику рабочего места.», «Поощрять операторов за высокую
                концентрацию.»],
            6: [«Проводить тренинги по развитию социальных навыков.», «Улучшить
                коммуникацию в коллективе.», «Поощрять операторов за развитие социальных
                навыков.»],
            7: [«Проводить обучение по эффективному переключению между
                задачами.», «Улучшить планирование задач.», «Поощрять операторов за гибкость в
                работе.»],
            8: [«Улучшить условия труда, внедрить программы мотивации.»,
                «Проводить регулярные опросы удовлетворенности сотрудников.», «Поощрять
                операторов за лояльность.»],
            9: [«Проводить тренинги по развитию коммуникативных навыков.»,
                «Улучшить командную работу.», «Поощрять операторов за развитие
                коммуникабельности.»],
            10: [«Внедрить системы обратной связи.», «Проводить тренинги по
                самоанализу и самоконтролю.», «Поощрять операторов за высокую
                самодисциплину.»],
            11: [«Разработать программы мотивации.», «Улучшить условия труда.»,
                «Поощрять операторов за высокую мотивацию.»],
```

12: [«Внедрить программы обучения и развития.», «Поощрять профессиональный рост.», «Поощрять операторов за стремление к самосовершенствованию.»],

13: [«Установить четкие правила и стандарты.», «Проводить регулярные проверки выполнения задач.», «Поощрять операторов за высокую ответственность.»],

14: [«Проводить тренинги по управлению изменениями.», «Улучшить адаптивность операторов.», «Поощрять операторов за высокую устойчивость к изменениям.»],

15: [«Проводить регулярное обучение и аттестацию.», «Улучшить доступ к технической информации.», «Поощрять операторов за повышение технических знаний.»],

}

Базы рекомендаций для оборудования (Yi)

self.equipment_recommendations = {

1: [«Провести аудит оборудования, внедрить программы технического обслуживания.», «Улучшить планирование использования оборудования.», «Поощрять операторов за эффективное использование оборудования.»],

2: [«Оптимизировать графики работы оборудования.», «Снизить простои.», «Улучшить планирование использования оборудования.»],

3: [«Улучшить планирование использования оборудования.», «Внедрить системы мониторинга.», «Поощрять операторов за эффективное использование времени.»],

4: [«Увеличить количество смен для более эффективного использования оборудования.», «Улучшить планирование смен.», «Поощрять операторов за эффективное использование смен.»],

5: [«Оптимизировать сменный режим, внедрить гибкие графики работы.», «Улучшить планирование смен.», «Поощрять операторов за эффективное использование сменного режима.»],

6: [«Улучшить планирование рабочего времени.», «Минимизировать простои.», «Поощрять операторов за эффективное использование рабочего времени.»],

7: [«Сбалансировать нагрузку на оборудование.», «Избегать перегрузок.», «Поощрять операторов за эффективное использование оборудования.»],

8: [«Улучшить планирование использования оборудования.», «Снизить простои.», «Поощрять операторов за эффективное использование оборудования.»],

9: [«Провести регулярное техническое обслуживание.», «Обновить изношенное оборудование.», «Поощрять операторов за бережное использование оборудования.»],

10: [«Улучшить обслуживание оборудования.», «Снизить износ.», «Поощрять операторов за бережное использование оборудования.»],

11: [«Оптимизировать использование оборудования.», «Снизить простои.», «Поощрять операторов за эффективное использование оборудования.»],

12: [«Внедрить современные системы автоматизации.», «Обновить оборудование.», «Поощрять операторов за использование автоматизированных систем.»],

13: [«Улучшить техническое обслуживание.», «Повысить надежность оборудования.», «Поощрять операторов за бережное использование оборудования.»],

14: [«Улучшить эргономику рабочего места.», «Снизить усталость операторов.», «Поощрять операторов за соблюдение эргономических норм.»],

15: [«Провести регулярное техническое обслуживание.», «Обновить оборудование.», «Поощрять операторов за бережное использование оборудования.»],

}

Базы рекомендаций для процесса (Zi)

self.process_recommendations = {

1: [«Оптимизировать процессы, устранить узкие места, внедрить автоматизацию.», «Улучшить планирование производства, снизить простои.», «Поощрять операторов за высокую скорость выполнения задач.»],

2: [«Улучшить контроль качества, внедрить системы мониторинга и обратной связи.», «Провести обучение персонала, улучшить стандарты работы.», «Поощрять операторов за высокую результативность.»],

3: [«Оптимизировать процессы, сократить время выполнения операций.», «Улучшить планирование, снизить время простоя.», «Поощрять операторов за сокращение времени цикла.»],

4: [«Улучшить контроль качества, внедрить системы предотвращения брака.», «Провести обучение персонала, улучшить стандарты работы.», «Поощрять операторов за снижение брака и отходов.»],

5: [«Оптимизировать процессы, устранить потери, внедрить методы бережливого производства (Lean).», «Улучшить планирование, снизить простои.», «Поощрять операторов за повышение эффективности.»],

6: [«Оптимизировать использование ресурсов, снизить затраты на сырье и материалы.», «Улучшить планирование, снизить потери.», «Поощрять операторов за снижение затрат.»],

7: [«Разработать и внедрить четкие инструкции для всех операций.», «Улучшить доступность инструкций, провести обучение персонала.», «Поощрять операторов за соблюдение инструкций.»],

8: [«Оптимизировать процессы, сократить время выполнения операций.», «Улучшить планирование, снизить время простоя.», «Поощрять операторов за соблюдение норм времени.»],

9: [«Улучшить адаптацию к внешним условиям, внедрить системы мониторинга внешних факторов.», «Улучшить планирование, учитывая внешние

условия.», «Поощрять операторов за эффективную работу в изменяющихся условиях.»],

10: [«Упростить сложные операции, внедрить автоматизацию.», «Провести обучение персонала, улучшить стандарты работы.», «Поощрять операторов за эффективное выполнение сложных операций.»],

11: [«Улучшить планирование производства, обеспечить равномерную загрузку оборудования и персонала.», «Улучшить синхронизацию процессов, снизить простои.», «Поощрять операторов за соблюдение ритмичности.»],

12: [«Улучшить техническое обслуживание, сократить время устранения сбоев.», «Улучшить планирование, снизить количество сбоев.», «Поощрять операторов за быстрое устранение сбоев.»],

13: [«Оптимизировать использование оборудования, увеличить мощность потока.», «Улучшить планирование, снизить простои.», «Поощрять операторов за эффективное использование мощности потока.»],

14: [«Оптимизировать процессы, увеличить темп потока.», «Улучшить планирование, снизить простои.», «Поощрять операторов за соблюдение темпа потока.»],

15: [«Оптимизировать процессы, сократить такт потока.», «Улучшить планирование, снизить время простоя.», «Поощрять операторов за соблюдение такта потока.»],

}

self.create_widgets()

def create_widgets(self):

tk.Label(self.root, text=«Введите значения показателей:»).grid(row=0, column=0, padx=10, pady=10)

self.operator_button = tk.Button(self.root, text=«Ввести показатели оператора (Xi)», command=self.input_operator_values)

self.operator_button.grid(row=1, column=0, padx=10, pady=10)

self.equipment_button = tk.Button(self.root, text=«Ввести показатели оборудования (Yi)», command=self.input_equipment_values)

self.equipment_button.grid(row=2, column=0, padx=10, pady=10)

self.process_button = tk.Button(self.root, text=«Ввести показатели процесса (Zi)», command=self.input_process_values)

self.process_button.grid(row=3, column=0, padx=10, pady=10)

self.calculate_button = tk.Button(self.root, text=«Рассчитать и получить рекомендации», command=self.calculate_and_recommend)

self.calculate_button.grid(row=4, column=0, padx=10, pady=10)

self.operator_values = {}

self.equipment_values = {}

self.process_values = {}

def input_operator_values(self):

self.operator_values = self.input_values(«оператора (Xi)», 15)

```

        messagebox.showinfo(«Успех», «Значения показателей оператора введены.»)
def input_equipment_values(self):
    self.equipment_values = self.input_values(«оборудования (Yi)», 15)
    messagebox.showinfo(«Успех», «Значения показателей оборудования
введены.»)
def input_process_values(self):
    self.process_values = self.input_values(«процесса (Zi)», 15)
    messagebox.showinfo(«Успех», «Значения показателей процесса введены.»)
def input_values(self, element, count):
    values = {}
    for i in range(1, count + 1):
        while True:
            value = simpledialog.askfloat(f»Показатель {i}», f»Введите значение
показателя {i} для {element} (0, 0.5, 1) или нажмите 'Отмена', чтобы пропустить:»)
            if value is None: # Пользователь нажал «Отмена»
                break
            if value in [0, 0.5, 1]:
                values[i] = value
                break
            else:
                messagebox.showerror(«Ошибка», «Значение должно быть 0, 0.5 или 1.»)
    return values
def calculate_and_recommend(self):
    if not self.operator_values and not self.equipment_values and not
self.process_values:
        messagebox.showerror(«Ошибка», «Пожалуйста, введите значения хотя бы
для одного показателя.»)
    return
    # Суммирование значений по группам
    sum_xi = sum(self.operator_values.values())
    sum_yi = sum(self.equipment_values.values())
    sum_zi = sum(self.process_values.values())
    # Вывод сумм
    messagebox.showinfo(«Суммы показателей», f»Сумма Xi (оператор):
{sum_xi}\nСумма Yi (оборудование): {sum_yi}\nСумма Zi (процесс): {sum_zi}»)
    # Выдача рекомендаций
    recommendations = []
    for i, value in self.operator_values.items():
        if value == 0:
            recommendations.append(f»Оператор (X{i}):
{self.operator_recommendations[i][0]}»)
        elif value == 0.5:

```

```

        recommendations.append(f»Оператор                                (X{i}):
{self.operator_recommendations[i][1]}»)
        elif value == 1:
            recommendations.append(f»Оператор                                (X{i}):
{self.operator_recommendations[i][2]}»)
        for i, value in self.equipment_values.items():
            if value == 0:
                recommendations.append(f»Оборудование                    (Y{i}):
{self.equipment_recommendations[i][0]}»)
            elif value == 0.5:
                recommendations.append(f»Оборудование                    (Y{i}):
{self.equipment_recommendations[i][1]}»)
            elif value == 1:
                recommendations.append(f»Оборудование                    (Y{i}):
{self.equipment_recommendations[i][2]}»)
        for i, value in self.process_values.items():
            if value == 0:
                recommendations.append(f»Процесс                        (Z{i}):
{self.process_recommendations[i][0]}»)
            elif value == 0.5:
                recommendations.append(f»Процесс                        (Z{i}):
{self.process_recommendations[i][1]}»)
            elif value == 1:
                recommendations.append(f»Процесс                        (Z{i}):
{self.process_recommendations[i][2]}»)
        # Вывод рекомендаций
        if recommendations:
            messagebox.showinfo(«Рекомендации», «\n».join(recommendations))
        else:
            messagebox.showinfo(«Рекомендации», «Нет данных для выдачи
рекомендаций.»)
if __name__ == «__main__»:
    root = tk.Tk()
    app = ProductionSystemAnalyzer(root)
    root.mainloop()

```

Приложение Ж. Свидетельство о государственной регистрации программы
для ЭВМ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2025618091

Программа методики выбора и предоставления
рекомендаций для повышения организационно-
технологической эффективности проектируемой
производственной системы «оператор-оборудование-
процесс»

Правообладатель: *Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования «Санкт-
Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения» (RU)*

Автор(ы): *Винниченко Александра Валерьевна (RU)*



Заявка № 2025616847

Дата поступления 01 апреля 2025 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 04 апреля 2025 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат 0692e7c1a6300b154f2401670bca2026
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 «СПб 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
Ректор ГУАП,
доктор экономических наук,
профессор


Ю.А. Антохина
МП
«21» 10 2024 г.



АКТ О ВНЕДРЕНИИ
результатов диссертационной работы
Винниченко Александры Валерьевны

«Модели методики проектирования бережливых производственных систем методами машинного зрения», представленной на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.5.22 Управление качеством продукции. Стандартизация. Организация производства

Комиссия в составе:

Председатель – заведующий кафедрой инноватики и интегрированных систем качества, д-р техн. наук, доцент Е.А. Фролова

Члены комиссии:

Чабаненко А.В., доцент, канд. техн. наук, доцент кафедры инноватики и интегрированных систем качества;

Смирнова В.О., доцент, канд. техн. наук, доцент кафедры инноватики и интегрированных систем качества;

Щеников Я.А., доцент, канд. техн. наук, доцент кафедры инноватики и интегрированных систем качества;

составили настоящей акт о том, что результаты диссертационной работы «Модели методики проектирования бережливых производственных систем методами машинного зрения», представленной на соискание учёной степени кандидата технических наук:

- динамическая модель автоматизированного хронометража производственной системы «оператор-оборудование-процесс»;
- модель проектирования бережливой производственной системы «оператор-оборудование-процесс»;

- информационно-управляющая модель обеспечения качества выполнения предъявляемых требований с распределенными хранилищами данных;
 - методика принятия решений оперативного управления для выбора и предоставления рекомендаций в интеграции инструментов и методов повышения организационно-технологической эффективности проектируемой бережливой производственной системы «оператор-оборудование-процесс»;
- использованы в деятельности Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения».

Материалы диссертационные работы Винниченко Александры Валерьевны были использованы в учебном процессе в дисциплинах «Технология и организация бережливого производства», «Средства и методы управления качеством», «Контроль качества бережливого производства», «Управление процессами», «Автоматизированные производственные системы», «Обработка нечеткой информации в системах поддержки принятия решений», «Проектирование бережливого продукта», читаемых на кафедре №5 инноватики и интегрированных систем качества для студентов направлений «Управление качеством», «Инноватика», «Стандартизация и метрология» уровня бакалавриата и магистратуры.

Председатель комиссии
заведующий кафедрой инноватики и интегрированных систем качества,
д-р техн. наук, доцент
Е.А. Фролова

Члены комиссии:

доцент кафедры
инноватики и интегрированных систем качества
канд. техн. наук, доцент
А.В. Чабаненко

доцент кафедры
инноватики и интегрированных систем качества
канд. техн. наук, доцент
В.О. Смирнова

доцент кафедры
инноватики и интегрированных систем качества
канд. техн. наук, доцент
Я.А. Щеников

Приложение II. Акт внедрения о внедрении результатов диссертационной работы в АО «Микротехника»



УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор

АО «Микротехника»

Г.А. Арустамов

«27» марта 2025 года



АКТ

внедрения в АО «НИИ «Масштаб» научных результатов диссертационной работы
«МОДЕЛИ И МЕТОДИКИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ БЕРЕЖЛИВЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ
СИСТЕМ МЕТОДАМИ МАШИННОГО ЗРЕНИЯ»
Винниченко Александры Валерьевны

Комиссия в составе:

Председатель комиссии:

Начальник службы качества, к.т.н Пипия Георгий Тенгизович

Члены комиссии:

Начальник специального конструкторского бюро, к.т.н Кроуз Константин Михайлович

Главный конструктор Романов Виктор Анатольевич

составила настоящий акт о том, что в АО «Микротехника» внедрены следующие результаты диссертационной работы, а именно:

— динамическая модель автоматизированного хронометража производственной системы «оператор-оборудование-процесс»;

— информационно-управляющая модель обеспечения качества выполнения предъявляемых требований с распределенными хранилищами данных.

Комиссия установила: внедрение указанных результатов позволяет временные потери в осуществлении технологических операций в системе «оператор-оборудование-процесс» на 10% и сократить время при проверке выполнения предъявляемых требований к выпускаемой продукции на 7-10%.

Научные результаты диссертационной работы введены на рабочие места производственной системы и применены для повышения организационно-технологической эффективности технологических линий организации.

Председатель комиссии

Начальник службы качества, к.т.н

Члены комиссии:

Главный конструктор

Начальник специального конструкторского бюро, к.т.н

Пипия Г.Т.

Романов В.А.

Кроуз К.М.

«27» марта 2025 года

Приложение К. Акт внедрения о внедрении результатов диссертационной работы в АО «НИИ «Масштаб»

УТВЕРЖДАЮ

Заместитель генерального директора

АО «НИИ «Масштаб» по научной работе

кандидат технических наук

А.Г. Фортинский

«09» апреля 2025 года



АКТ

внедрения в АО «НИИ «Масштаб» научных результатов диссертационной работы
Винниченко Александры Валерьевны:

- модель проектирования бережливой производственной системы «оператор-оборудование-процесс»;
- информационно-управляющая модель обеспечения качества выполнения предъявляемых требований с распределенными хранилищами данных.

Комиссия в составе: председателя комиссии, советника генерального директора, доктора технических наук, кандидата военных наук, доцента Билятдинова К.З. и членов комиссии: начальника научно-системного центра Гагарина С.П. и начальника научно-технического отдела Хрусталева Е.В. в период с 10.03.2025 по 10.04.2025 провела проверку реализации научных результатов диссертационной работы Винниченко А.В. и установила: внедрение указанных результатов позволяет сократить количество незавершенного производства на 7%, методами бережливого производства и сократить время внедрения улучшений на 10% за счет применения гибкого цикла PDCA для производственной системы «оператор-оборудование-процесс» и сократить время при проверке выполнения предъявляемых требований к выпускаемой продукции на 7-10%.

Научные результаты диссертационной работы введены на рабочие места производственной системы и применены для повышения организационно-технологической эффективности технологических линий организации.

Председатель комиссии:

Советник генерального директора АО «НИИ «Масштаб»

доктор технических наук, кандидат военных наук, доцент К.З. Билятдинов

Члены комиссии:

Начальник научно-системного центра

Начальник научно-технического отдела

«09» апреля 2025 года

ВЕРНО (Одобрено решением НТС. Протокол НТС № 9 от 17.04.2025):

Секретарь научно-технического совета АО «НИИ «Масштаб»

Начальник научно-технического отдела

«09» апреля 2025 г.



Е.В. Хрусталёва

Приложение Л. Акт внедрения о внедрении результатов диссертационной
работы в ООО «А-РИАЛ»



УТВЕРЖАЮ

генеральный директор ООО «А-РИАЛ»

А.А. Тагutieв

10 » апреля 2025 года

АКТ

внедрения в ООО «А-РИАЛ» научных результатов диссертационной работы

Винниченко Александры Валерьевны

“МОДЕЛИ И МЕТОДИКИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ БЕРЕЖЛИВЫХ
ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ СИСТЕМ МЕТОДАМИ МАШИННОГО ЗРЕНИЯ”

Комиссия в составе: председателя комиссии, генерального директора Тагutieва А.А. и членов комиссии: главного конструктора Васильева В. Ю. и главного инженера ГИС и БАС Вагизова М. Р. в период с 10.03.2025 по 10.04.2025 провела проверку реализации научных результатов диссертационной работы, а именно:

- динамической модели автоматизированного хронометража производственной системы «оператор-оборудование-процесс»;
- методики принятия решений оперативного управления для выбора и предоставления рекомендаций в интеграции инструментов и методов повышения организационно-технологической эффективности проектируемой бережливой производственной системы «оператор-оборудование-процесс».

Комиссия установила: внедрение указанных результатов позволили сократить временные потери в осуществлении технологических операций в системе «оператор-оборудование-процесс» на 9%, сократить время на анализ состояния производственной системы «оператор-оборудование-процесс» на 5-7%, повысить организационно-технологическую эффективность на 5% и сократить время на выбор рекомендаций и корректирующих действий оперативного управления на 11%.

Научные результаты диссертационной работы введены на рабочие места производственной системы и применены для повышения организационно-технологической эффективности технологических процессов в организации.

Председатель комиссии:

Генеральный директор ООО «А-РИАЛ»

А. А. Тагutieв

Члены комиссии:

Главный конструктор

В. Ю. Васильев

Главный инженер ГИС и БАС, д-р техн.наук

М. Р. Вагизов

10 апреля 2025 года