

На правах рукописи



Винниченко Александра Валерьевна

МОДЕЛИ И МЕТОДИКИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ БЕРЕЖЛИВЫХ
ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ СИСТЕМ МЕТОДАМИ МАШИННОГО ЗРЕНИЯ

Специальность 2.5.22. «Управление качеством продукции. Стандартизация.
Организация производства»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург, 2025

Работа выполнена на кафедре инноватики и интегрированных систем качества федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения».

- Научный руководитель:** **Назаревич Станислав Анатольевич**
кандидат технических наук, доцент
- Официальные оппоненты:** **Остапенко Сергей Николаевич,**
доктор технических наук, профессор,
помощник генерального директора по качеству
Акционерного общества «Концерн воздушно-
космической обороны «Алмаз - Антей»,
Гинцяк Алексей Михайлович,
кандидат технических наук, доцент высшей школы
проектной деятельности и инноваций в промышленности
федерального государственного автономного
образовательного учреждения высшего образования
«Санкт-Петербургский политехнический университет
Петра Великого»
- Ведущая организация:** Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Самарский национальный исследовательский
университет имени академика С.П. Королева», 443086,
г. Самара, ул. Московское шоссе, д. 34.

Защита состоится «26» июня 2025 г., в 11-00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.384.02 при федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения» по адресу: 190000, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 67, лит. А.

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

Автореферат разослан «12» мая 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.2.384.02
Кандидат технических наук, доцент



С.А. Назаревич

I. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. На сегодняшний день приоритетным и глобальным вызовом 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 синтеза, моделирование 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 п. 1, 17, 23, 25 паспорта специальности 2.5.22 – «Управление качеством продукции. Стандартизация. Организация производства».

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., основные результаты получены в рамках выполнения государственного задания министерства науки и высшего образования РФ, соглашение № FSRF-2023-0003, «Фундаментальные основы построения помехозащищенных систем космической и спутниковой связи, относительной навигации, технического зрения и аэрокосмического мониторинга».

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.

II. ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение содержит обоснование актуальности темы, цель, задачи, объект и предмет исследования, положения, выносимые на защиту и результаты апробации.

Первый раздел описывает разработку динамической модели автоматизированного хронометража производственной системы (ПС) «оператор-оборудование-процесс» (ООП). Проведен анализ существующих организационных структур и схем управления производственными операциями в ПС ООП, в соответствии со стандартами, регламентирующими подходы к организации бережливого производства. Разработана структурная модель, определяющая ключевые зоны исследования ПС (рис. 1) и факторы, влияющие на эффективность системы.

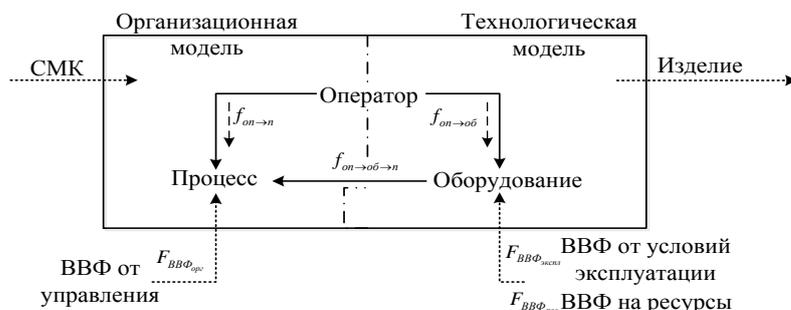


Рисунок 1 – Структурная модель ТЛ

По результатам технологического аудита ПС ООП определены производственные потери (таб.1), методы и инструменты бережливого производства (БП), которые рекомендованы к применению для минимизации возникающих потерь, и повышения организационно-технологической эффективности (ОТЭ).

Для повышения эффективности технологических процессов и минимизации выявленных потерь, разработана динамическая модель автоматизированного хронометража (ДМАХ), в виде множественной линейной регрессии, учитывающая уровень качества и степень достоверности действий оператора в ПС ООП. В качестве показателей эффективности и достоверности разработаны, исследованы факторы и их индикаторы (X, Y, Z, Q, R) установлена зависимость скорости выполнения операций (V) от факторов X, Y, Z, Q, R (1), группа исследуемых факторов и декомпозиция индикаторов представлена в таблице 2.

Таблица 1 – Фрагмент карты потерь ПС ООП

№	Вид потерь	Элемент производственного процесса	Описание	Элемент методологии бережливого производства
1	2	3	4	5
1	Ожидание	Заготовка	Задержки с поставками материалов, система хранения и логистики, недостаточная гибкость в закупочной политике, отсутствие системы мониторинга поставок.	* 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
...
8	Перепроизводство	Заготовка	Неправильное планирование закупок, недостаточная оптимизация запасов, неучтенные потери материалов, неэффективная система контроля качества.	* 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.

$$V = \beta_0 + \beta_1 * X_1 + \beta_2 * X_2 + \dots + \beta_5 * X_5 + \beta_6 * Y_1 + \dots + \beta_{10} * Y_5 + \beta_{11} * Z_1 + \dots + \beta_{14} * Z_4 + \beta_{15} * Q + \beta_{16} * R + \varepsilon, \quad (1)$$

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.

Модель предназначена для оценки производительности оператора, как единичного показателя качества оценки релевантности действий оператора к требованиям технологического процесса.

Таблица 2 – Группы исследуемых факторов и декомпозиция индикаторов

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_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	$X_{5,3} = 1,0$

Для оценки состояний элементов ПС предложен подход, базирующийся на применении модели нечетких множеств, что позволяет повысить ОТЭ на основании учета мультипараметрических показателей. Определены уровни состояния оператора, оборудования и процесса, интерпретация которых осуществляется через трапециевидные функции принадлежности. Разработанные условия принятия решений обеспечивают адаптивность

системы управления ПС, за счет реализации итеративных алгоритмов, позволяя оперативно корректировать параметры элементов ПС ООП, в соответствии с полученными результатами ДМАХ.

При анализе переходов показателей ПС на более высокие уровни состояния учитываются релевантные параметры и индикаторы, отражающие компоненты и критерии готовности к переходу на следующий уровень. В таблице 3 и на рисунке 2 представлены ключевые условия принятия решений для классификации рассматриваемых показателей ПС ООП.

Таблица 3 – Уровни состояния оператора ТЛ

Уровень состояния оператора	Хар-ка	Интервалы	Условия принятия решения	Дефазификатор нечеткого множества
Уровень 1 Критичное состояние	X ₁	[0-0,45)	X _{1,1} = {(0;0); (0;0,06); (0,125;1); (0,3;1); (0;0,375); (0,45;0)}	Медленное время выполнения операции, в соответствии с нормой выработки
	X ₂	[0-0,4)	X _{2,1} = {(0,0;0); (0;0,1); (0,2;1,0); (0,3;1,0); (0;0,35); (0,4;0)}	Технологическая операция выполняется неправильно
	X ₃	[0-0,3)	X _{3,1} = {(0,0;0); (0;0,125); (0,225;1,0); (0,275;1,0); (0;0,3); (0,35;0)}	Технологическая операция сложная
	X ₄	[0-0,4)	X _{4,1} = {(0,0;0); (0;0,175); (0,25;1,0); (0,3;1,0); (0;0,35); (0,4;0)}	Высокий уровень стресса, сильно влияющий на работу
...
Уровень 3 Хорошее состояние	X ₁	[0,7-1)	X _{1,3} = {(0,7;0); (0;0,75); (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;0,80); (0;0,85); (0,9;1); (1,0;1,0)}	Технологическая операция выполняется правильно
	X ₃	[0,75-1)	X _{3,3} = {(0,75;0); (0;0,8); (0;0,85); (0,875;1); (1,0;1,0)}	Технологическая операция легкая
	X ₄	[0,7-1)	X _{4,3} = {(0,7;0); (0;0,75); (0;0,8); (0,825;1,0); (1,0;1,0)}	Низкий уровень стресса, или его отсутствие не влияющее на работу

ДМАХ и укрупненный алгоритм реализации (рис.3) позволяет автоматизировать процессы учета норм рабочего времени и определять взаимосвязи между факторами: производительности оператора, изменении условий труда, технологического процесса, оказывающими влияние на совокупность критериев элементов ПС ООП, с учетом динамики внешних и внутренних воздействующих факторов, а также определять группы производственных потерь. Применение ДМАХ при реализации технологических операций (рис. 4 а, б), сокращает временные потери на 7-10%.

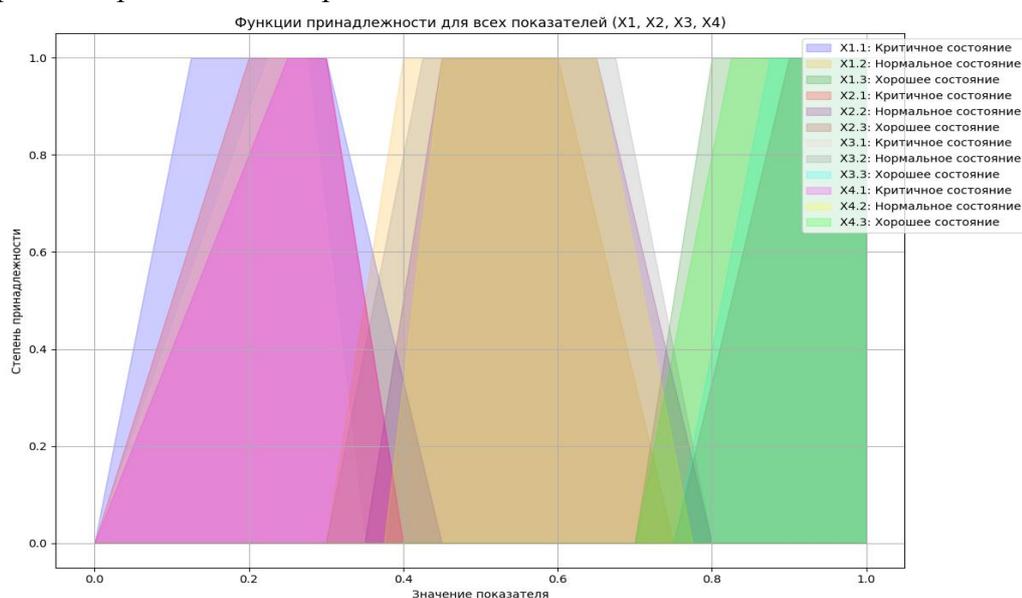


Рисунок 2 – Модель уровней состояния оператора

Во втором разделе описана разработка модели проектирования бережливой производственной системы для организации производства с использованием оптического стенда, для верификации технологических операций в рамках бережливой ПС ООП.

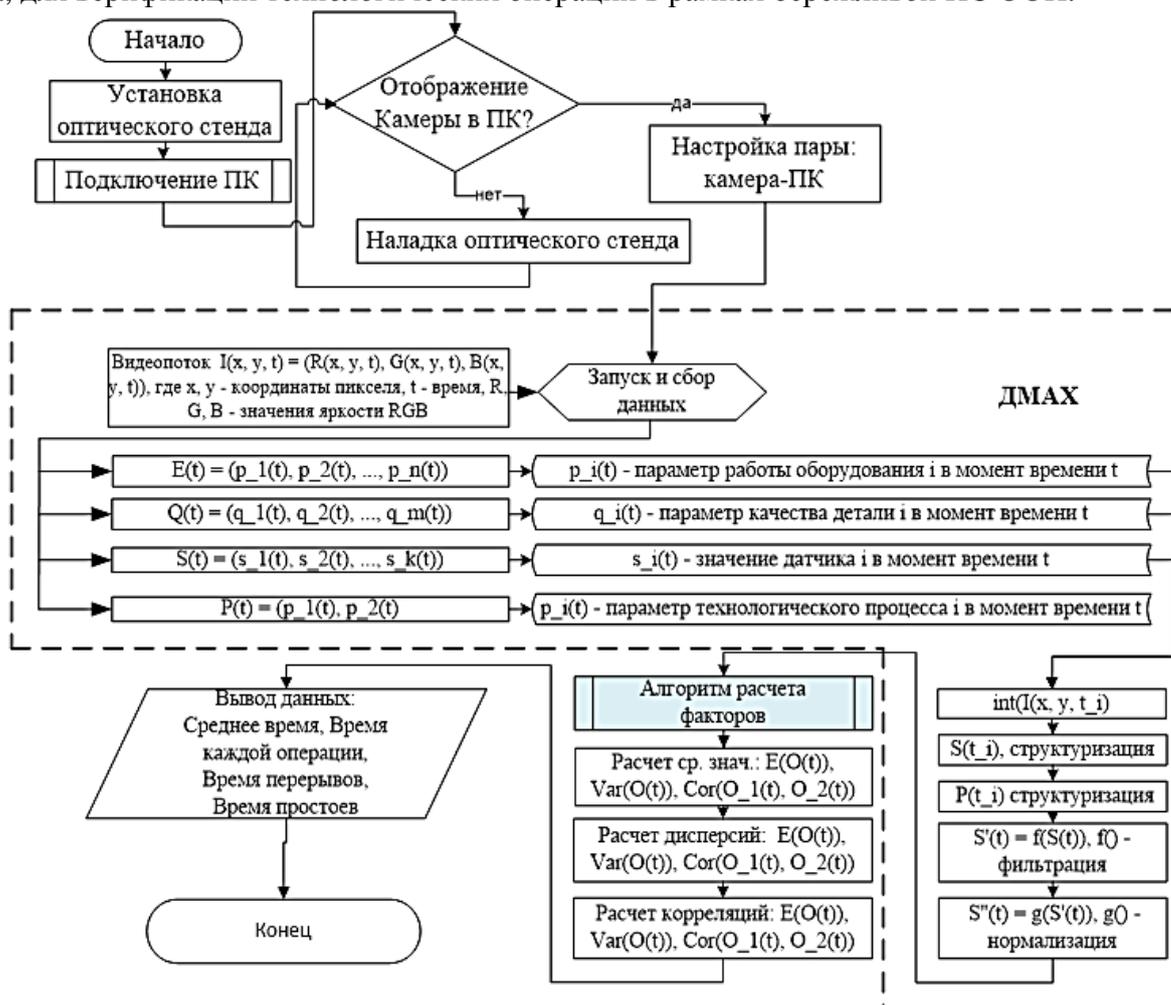
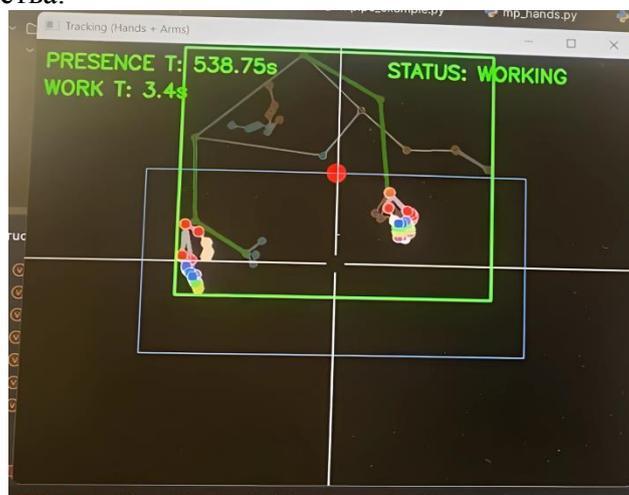


Рисунок 3 – Укрупненный алгоритм работы ДМАХ

Вводится авторское понятие – проектирование бережливой производственной системы (ПБПС), применимое для процессов развертывания новых технологических линий или управления результатами трансформации и модернизации организационно-технологической ПС ООП, с учетом стандартов бережливого производства.



а – Рабочее место ПС ООП



б – результаты ДМАХ

Рисунок 4 – Реализация ДМАХ

На основании данных о факторах, влияющих на производительность элементов ООП полученный в первом разделе, проведен корреляционный анализ (рис. 5) выявлены сильные и слабые закономерности между элементами ПС ООП и определены приоритетные рекомендации для управления.

		№ n/n			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
		Показатели оборудования ПС			Общая эффективность оборудования	Кэф. исп. режимного фонда времени	Кэф. исп. планового фонда времени	Кэф. исп. сменности работы	Кэф. исп. сменного режима	Кэф. исп. рабочего времени	Кэф. исп. интенсивности нагрузки	Кэф. исп. оборудования	Износ амортизации ОФ	Кэф. исп. износа	Кэф. 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. №2	В.К. №3	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
					0,07	0,07	0,08	0,06	0,06	0,05	0,08	0,06	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

Рисунок 5 – Корреляционная матрица пары ПС «оператор-оборудование»

Для подтверждения репрезентативности показателей, формирующих приоритетные рекомендации, проведена редукция данных с помощью факторно-дисперсионного анализа (табл. 4-5) и определены структурные классификации взаимосвязей между элементами ПС ООП.

Таблица 4– Фрагмент факторно-дисперсионного анализа показателей оператора ПС

№	Поведенческие факторы оператора ПС	Физический	Психологич	Время	Dфакт
		Фактор А	Фактор Б	Фактор В	
1	2	3	4	5	6
1	Длит. работы без перерывов	0,33	-0,01	0,10	2,92%
2	Кол-во 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%

Полученные методом редукции данные являются основанием для разработки базы рекомендаций и корректирующих действий (РиКД) по улучшению условий труда элементов ПС ООП (табл. 6), осуществляющих создание ценности в технологических процессах, обучение сотрудников и повышения общей производительности, повышения результативности и эффективности организационной системы с учетом принципов и стандартов бережливого производства, дополненных моделью ПБПС.

Таблица 5– 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	О.Е.Е.	-0,02	-0,06	0,23	-0,12	2,92%
2	Кэф. исп. режим. фонда вр.	-0,06	0,04	0,24	-0,12	2,06%
3	Кэф. исп. план. фонда вр.	-0,11	0,32	-0,04	0,05	2,11%

Таблица 6 – Фрагмент базы рекомендаций и корректирующих действий для показателей оператора ПС

№	Показатели оператора ПС	Сильная отрицательная зависимость	Слабая отрицательная зависимость	Слабая положительная зависимость
1	Длительность работы без перерывов	Внедрить регулярные перерывы для снижения усталости.	Использовать метод Pomodoro (помидора) для управления временем.	Поощрять короткие перерывы для повышения концентрации.

...
15	Количество ошибок при выполнении задач	Провести обучение по стандартам работы, внедрить чек-листы.	Улучшить контроль качества, внедрить системы мониторинга.	Поощрять операторов за снижение ошибок.

Полученные результаты взаимодействия ключевых элементов позволяют сформировать структурное описание ОТЭ ПС следующим выражением (2):

$$Q_{OTЭ} = \left. \begin{array}{l} f_{X_n}(X_1, X_2, \dots, X_n) \\ f_{Y_n}(Y_1, Y_2, \dots, Y_n) \\ f_{Z_n}(Z_1, Z_2, \dots, Z_n) \\ F_{ВВФ}(f_{ВВФ_{орг}}, f_{ВВФ_{экспл}}, f_{ВВФ_{рес}}) \end{array} \right\}, \quad (2)$$

где $Q_{OTЭ}$ – оценка организационно-технологической эффективности, f_{X_n} – система показателей оператора, f_{Y_n} – система показателей оборудования, f_{Z_n} – система показателей процесса, $f_{ВВФ_{орг}}$ – система управляющих показателей ВВФ, $f_{ВВФ_{экспл}}$ – система эксплуатационных ВВФ показателей, $f_{ВВФ_{рес}}$ – система показателей ВВФ на ресурсную базу.

ПС ООП рассматривается как система, где элементы ООП, взаимодействуют друг с другом, обеспечивая выполнение производственных задач, и поддерживают достаточный уровень ОТЭ всей системы, минимизируют влияние внешних факторов. По каждому исследуемому элементу ПС формируется база показателей (табл. 7), характеризующих функционирование элементов ООП, описывающая ключевые характеристики и параметры каждого элемента ПБПС, также разработана интервальная шкала, позволяющая количественно оценить влияние каждого фактора на ОТЭ ПБПС. Высокая степень варибельности подбора оцениваемых параметров позволяет применять алгоритм к различным ПС с разной степенью многономенклатурности производства. (рис. 6).

Таблица 7 – Фрагмент многокритериальной базы показателей оператора ПС

№	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 $X_1 = 0,0$
2.
3.	Скорость работы (X_{14})	$K_{ис} = E_{ф} / E_{н}$	Еф-количество фактически произведенной продукции, E_n нормированное количество произведенной продукции	Высокая скорость $80\% < K_{ис} \leq 100\%$	Высокая скорость $X_{14} = 1,0$
				Средняя скорость $35\% < K_{ис} \leq 80\%$	Средняя скорость $X_{14} = 0,5$
				Низкая скорость $0\% \leq K_{ис} \leq 35\%$	Низкая скорость $X_{14} = 0,0$

Для общей оценки ОТЭ ПС, на основе разработанных многокритериальных баз показателей элементов ПС ООП 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 $S(Z)$ (3):

$$S(OTЭ) = \sum_{i=1}^n X_i \cdot w_i + \sum_{i=1}^n Y_i \cdot w_i + \sum_{i=1}^n Z_i \cdot w_i \quad (3)$$

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.

Разработан авторский комплексный подход обеспечивающий автоматизированный сбор и анализ данных о ПС ООП (рис 7 а,б), использующий оптический стенд с ДМАХ, для контроля путем непрерывной инспекции элементов ООП и параметров технологических процессов, включая автоматизированное формирование корректирующих действий по учету выявленных несоответствий для минимизации производственных потерь и рационализации ПС ООП, в условиях ограниченного производственного плана, с учетом параметров производственной среды.

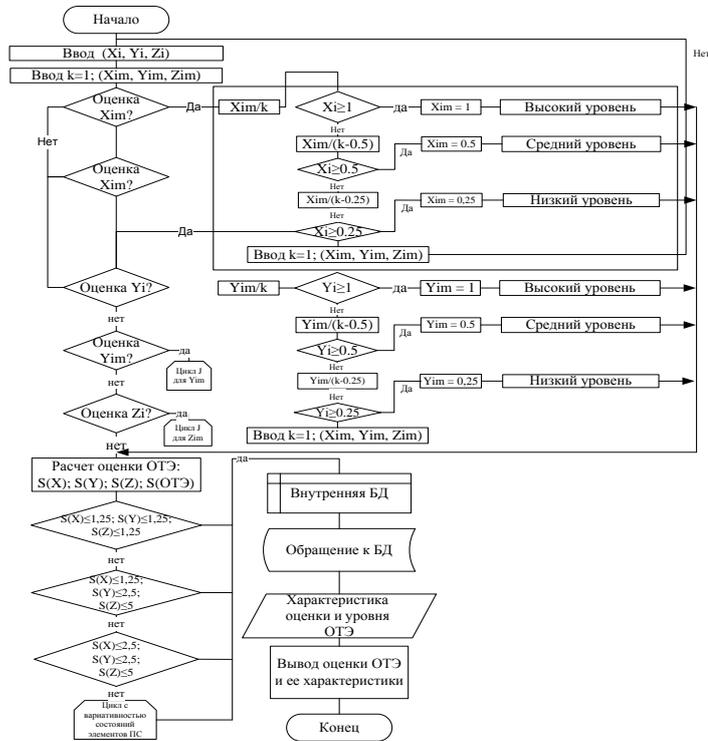
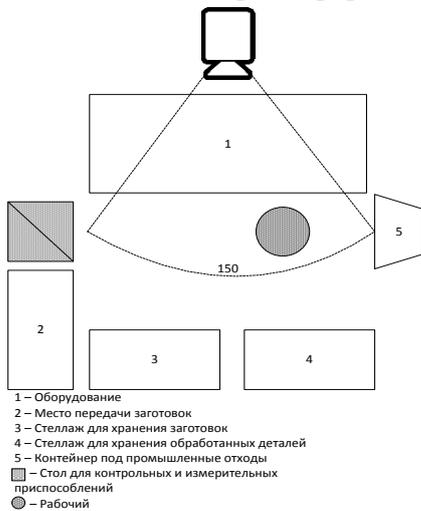


Рисунок 6 – Фрагмент алгоритма оценки ОТЭ

Структурная декомпозиция оптического стенда включает, блок визуальной детекции, подключенный к базе данных по учету движений оператора в зависимости от выполняемой технологической операции, и выполняет функцию идентификации соответствующих и несоответствующих движений оператора, учитывая характеристики технологического процесса для комплексного сбора информации о состоянии элементов ПС ООП.



а – Размещение оптического стенда для визуальной детекции



б – Схема развертывания оптического стенда для мониторинга движений оператора

Рисунок 7 – Структурная декомпозиция оптического стенда

Для достижения адаптивности проектируемой бережливой производственной системы в условиях синергии была разработана модель на основе адаптированного цикла PDCA для ПБПС на промышленных предприятиях (рис. 8). Модель представляет собой циклический процесс непрерывного улучшения, обеспечивая гибкость и адаптивность процесса проектирования для достижения максимальной ОТЭ за счет рационализации процессов ПС и использования ресурсов.

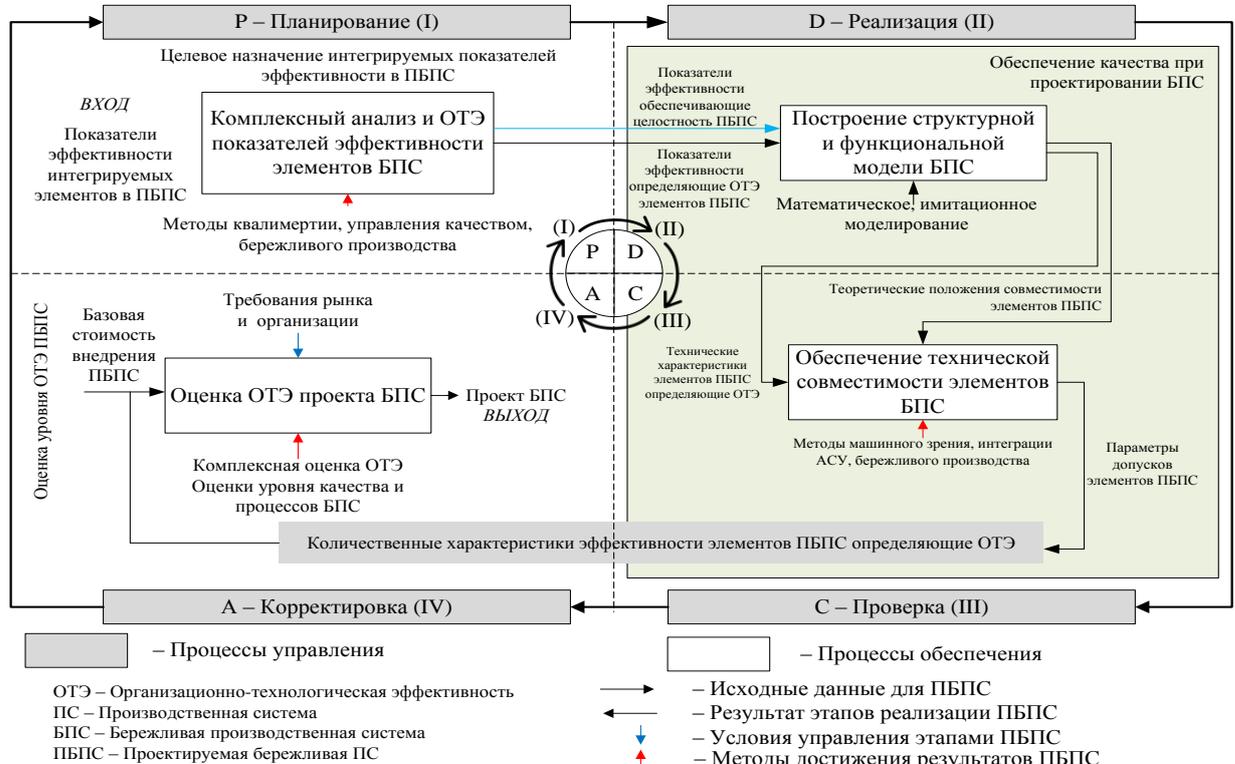


Рисунок 8 – Модель организации производства ПБПС

В третьем разделе представлена разработка информационно-управляющей модели ИУМ, обеспечения качества выполнения предъявляемых требований в цифровой БПС ООП. Модель включает распределенные хранилища данных и методику принятия решений, обеспечивая предикативный выбор параметров для оптимизации и рационализации БПС ООП. Для выделения ключевых зон оптимизации и повышения эффективности производственных процессов была разработана функциональная схема организации БПС, базирующаяся на разработанной модели проектирования БПС.

Разработанная ИУМ (рис. 9) 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.

Ядром ИУМ являются фреймовая база знаний, где хранятся процедурные знания в виде фреймов, реализующих алгоритмическое обеспечение ИУМ, и реляционная база данных (рис. 11), предназначенная для хранения исходных данных и результатов работы ИУМ. Функции системы управления базой данных реализованы в программных модулях ИУМ, где фреймовая модель разработана для интеллектуальной обработки данных и принятия решений, а реляционная модель для надежного хранения и масштабируемости. Комбинированное взаимодействие разработанных моделей позволяет реализовать ДМАХ в реальном времени, автоматизировать оценку ОТЭ элементов ООП в БПС и генерировать адаптивные рекомендации для улучшения БПС.

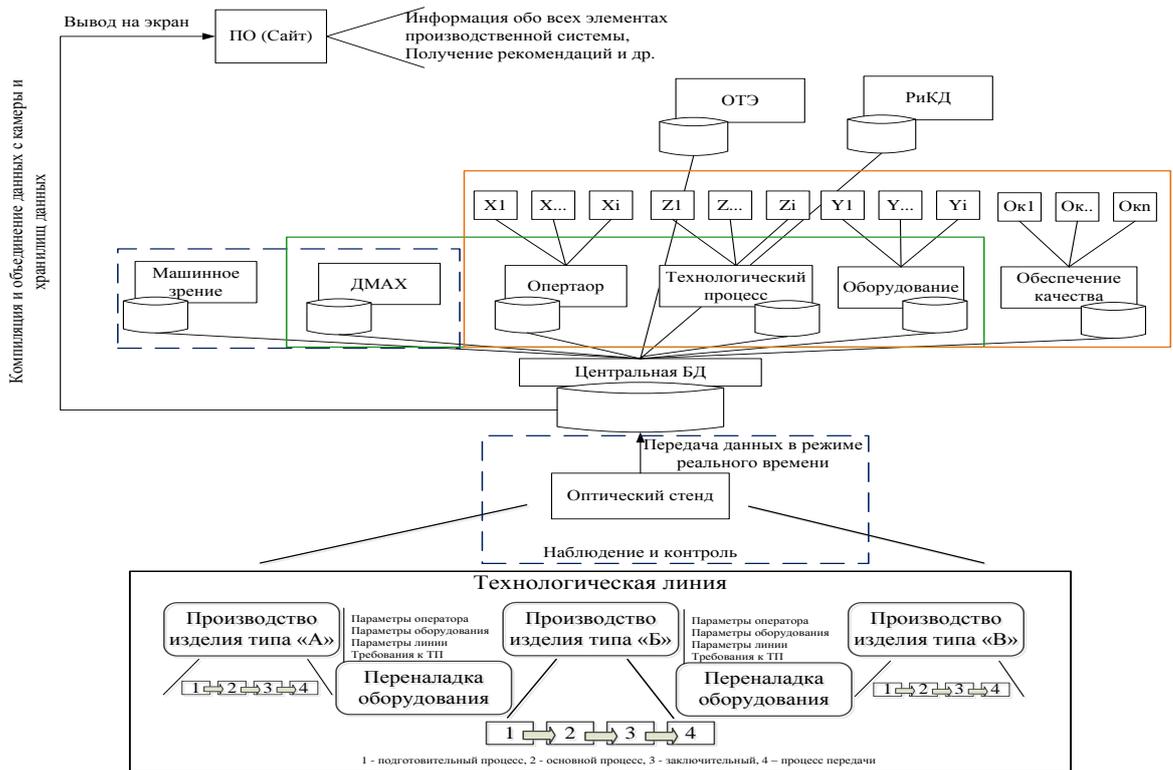


Рисунок 9 – Информационно-управляющая модель ОК

В рамках функционирования ИУМ учитывается методика принятия решений (ПРОУ), основанная на предикативном анализе, позволяющая прогнозировать возможные отклонения в ПС и принимать корректирующие действия до возникновения критических ситуаций, в соответствии с разработанной базой РиКД. Методика ПРОУ включает в себя алгоритмы машинного обучения, которые анализируют данные в режиме реального времени и формируют РиКД для повышения ОТЭ и рационализации процессов БПС и элементов ООП. Для реализации методики ПРОУ БПС разработан алгоритм (рис. 11) представляющий собой усовершенствованный научно-обоснованный инструмент для оценки ОТЭ и автоматизации процесса выдачи корректирующих мер, позволяющая минимизировать влияние человеческого фактора и повысить точность диагностики проблем, что способствует повышению ОТЭ БПС.

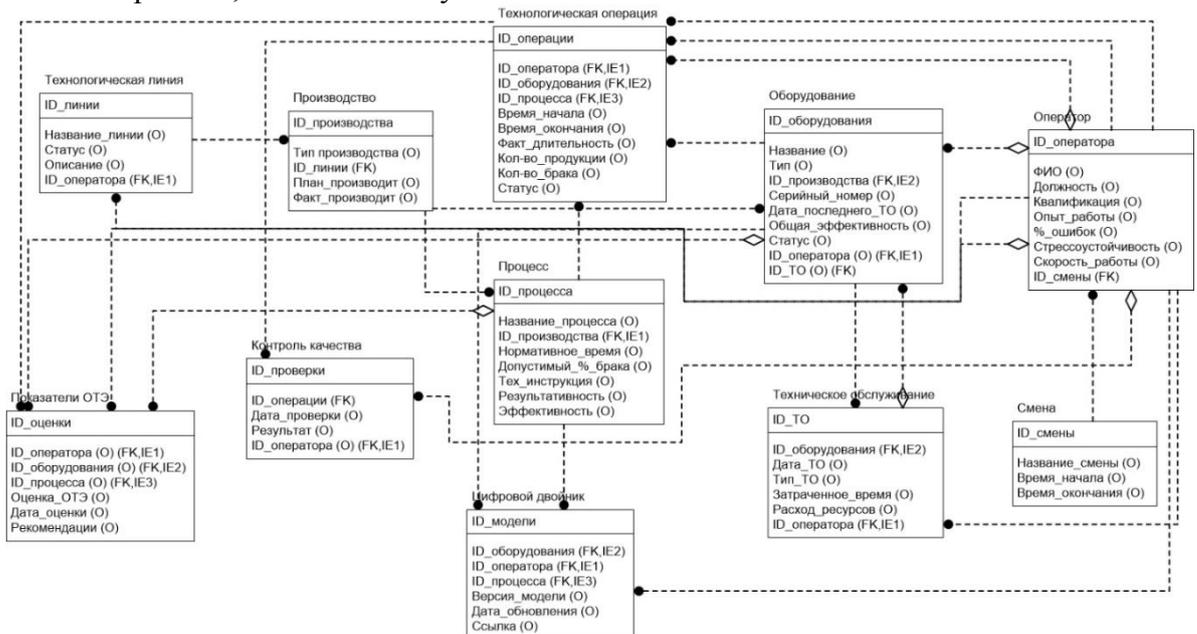


Рисунок 10 – Реляционная база данных для ИУМ

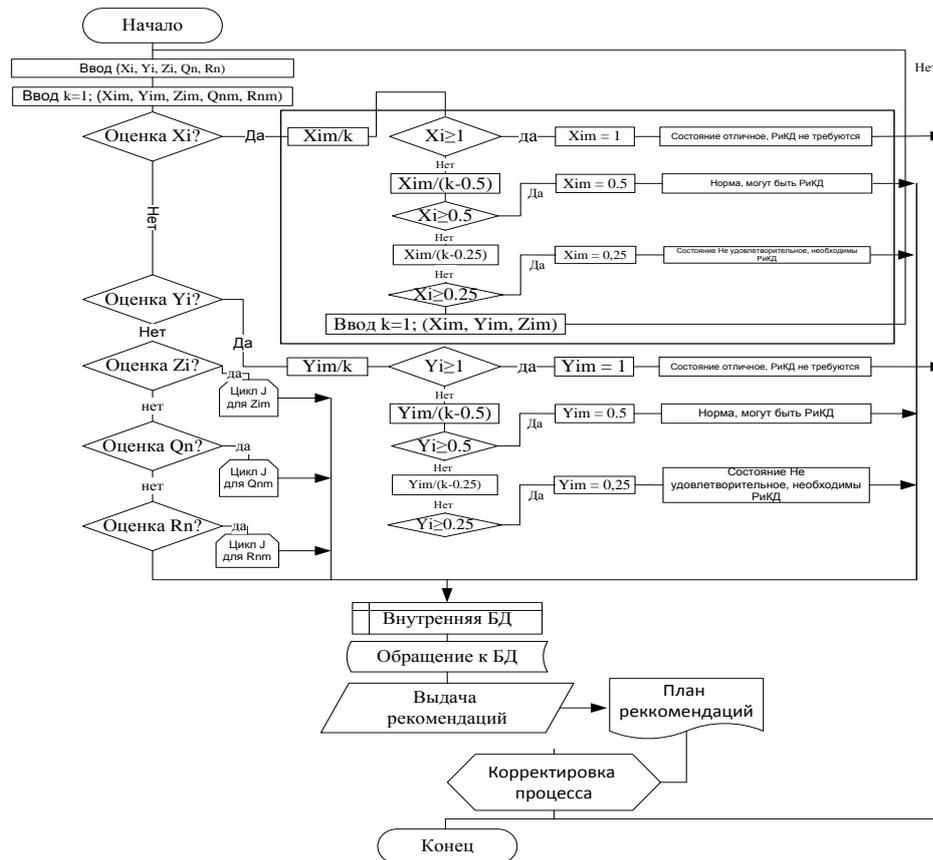
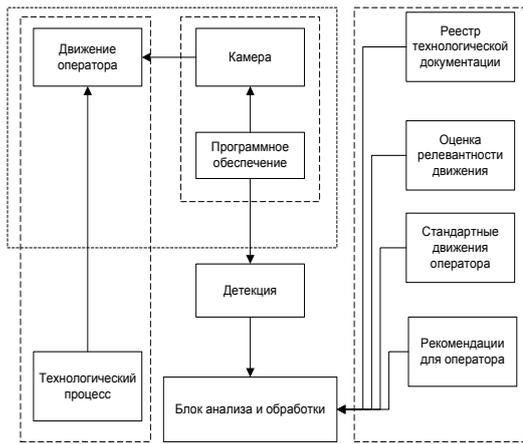


Рисунок 11 – Укрупненный алгоритм методики принятия решений оперативного управления

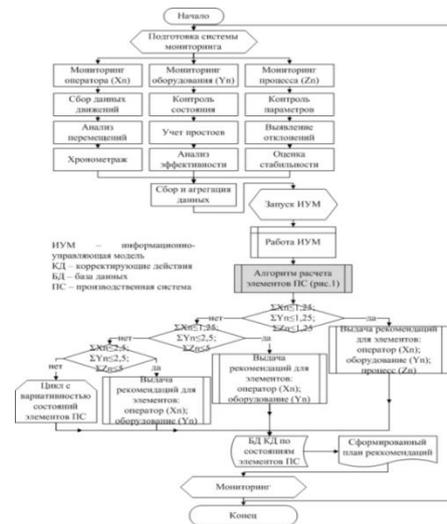
Разработанная ИУМ БПС, включая уровневую архитектуру базы данных и алгоритмы оперативного управления, создает фундамент для перехода к системе дистанционного мониторинга. Данные, проходящие через блок обеспечения качества, позволяют оценить уровень выполнения предъявляемых требований, выявить узкие места и предложить корректирующие действия для повышения ОТЭ ПС ООП. 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, первоначально разработанные для локального применения, интегрируются в распределенной среде, обеспечивая оперативное реагирование на изменения производственных параметров независимо от местоположения персонала.

Основываясь на достигнутых результатах разработан укрупненный алгоритм работы методики дистанционного мониторинга, который описывает архитектуру системы мониторинга (рис. 12 а), включая ключевые параметры и показатели эффективности, а также предоставляет рекомендации и корректирующие действия в рамках оценки организационно-технологической эффективности БПС ООП (рис. 12 б).

Разработанный алгоритм методики дистанционного мониторинга объединяет методы анализа данных и машинного обучения, что позволяет диагностировать текущее состояние БПС, прогнозировать потенциальные отклонения на основе анализа изменяющихся параметров ПС ООП, используя статистические методы и инструменты цифровизации и в случае обнаружения, алгоритм обращается к внутренней базе данных (БД), содержащей планы рекомендаций по устранению выявленных несоответствий и определяет необходимость корректирующих действий (КрД), подбирая действия для каждого элемента ПС на всех стадиях жизненного цикла продукции и интегрируется в ИУМ, с помощью баз данных и нейронных сетей, повышая точность оценки ОТЭ.



а – Структурно-функциональная модель системы мониторинга



б – Фрагмент алгоритма работы методики дистанционного мониторинга

Рисунок 12 – Архитектура системы мониторинга и укрупненный алгоритм методики дистанционного мониторинга

Для корректной работы ИУМ при проектировании БПС, дополняется база РИКД картой потерь для обеспечения требований предъявляемых стандартами бережливого производства к функционированию модели БПС, учитывающей производственные потери и инструменты бережливого производства для их нивелирования (табл. 8).

Таблица 8 – Матрица выбора методов воздействия на элемент оператора в БПС

№	Показатель (Xi)	Вид потери (Muda)	Причина возникновения	Инструменты БП для устранения
1	Длительность работы без перерывов	Перегрузка	Неоптимальный график работы	Стандартизированные перерывы, метод Pomodoro
2	Количество ошибок	Дефекты	Недостаточная подготовка	Poka-Yoke, Job Instruction (TWI)
...
14	Скорость выполнения задач	Ожидание	Неэффективная организация рабочего места	5S, визуальный менеджмент
15	Стрессоустойчивость	Нереализованный потенциал	Высокая нагрузка	Кайдзен-круги, ротация задач

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

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%.**

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ИЗЛОЖЕНО В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ:

Публикации в ведущих рецензируемых научных изданиях

1. 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
2. Винниченко, А.В. Динамическая модель автоматизированного хронометража производственной системы «оператор-оборудование-процесс» / А. В. Винниченко // Петербургский экономический журнал – 2025 – №1 – С. 18-27
3. Винниченко, А.В. Методика дистанционного мониторинга производственной системы «оператор-оборудование-процесс» / А. В. Винниченко // Известия Тульского государственного университета – 2025 – №3 – С. 18-25
4. Винниченко, А.В. Модель распределения трудовых ресурсов в гибридном поточном производстве / А. В. Винниченко // Компетентность. – 2024. – № 6. – С. 42-45.

Статьи в изданиях индексируемых в реферативных базах

5. Vinnichenko, A.V. 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.
6. Vinnichenko, A.V. 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.

Учебные издания

7. Применение инструментов управления качеством для основных процессов научно-производственных предприятий: учебно-методическое пособие / С. А. Назаревич, А. В. Винниченко, Санкт-Петербург: Изд-во ГУАП, 2021. - 93 с.

Статьи и материалы конференций

8. Винниченко, А.В. Тактика проектирования бережливых производственных систем / А.В. Винниченко // Инновационное приборостроение. – 2024. – Т. 3, № 2. – С. 18-21.
 9. Винниченко, А.В. Разработка структуры вероятностной модели для многономенклатурного производства / А. В. Винниченко // Инновационное приборостроение. – 2023. – Т. 2, № 5. – С. 18-22.
 10. 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.
 11. Винниченко, А.В. Комбинаторика цифровых решений для задач бережливого производства / А. В. Винниченко // Системный анализ и логистика. – 2023. – № 1(35). – С. 59-66.
 12. Винниченко, А.В. 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.
 13. Винниченко, А.В. 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.
 14. 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.
- Тезисы и доклады на научно-практических конференциях*
15. Винниченко, А.В. Разработка цифровой модели для идентификации движений оператора технологического процесса / А. В. Винниченко // Теория и практика современной науки: взгляд молодежи. – СПб ГУ промышленных технологий и дизайна», 2023. – С. 242-246.
 16. 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: Сб. статей V Международного форума, Санкт-Петербург: ГУАП, 02 марта 2023 года. – С. 211-212.
 17. Винниченко, А.В. Исследование детерминант норм управляемости для систем мониторинга уровня качества технологических процессов / А. В. Винниченко // Метрологическое обеспечение инновационных технологий: Сб. статей V Международного форума, Санкт-Петербург: ГУАП, 02 марта 2023 года. – С. 209-210.
 18. Винниченко, А.В. Разработка модели автоматизированного хронометража рабочих операций / А.В. Винниченко // Математические методы и модели в высокотехнологичном производстве: Сб. тезисов докладов II Международного форума, Санкт-Петербург: ГУАП, 09 ноября 2022 года – С. 363-365.
 19. 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 всероссийской научной конференции, Санкт-Петербург: ГУАП, 18–22 апреля 2022 года. – С. 124-128.
 20. Винниченко, А.В. Исследование численных характеристик при номенклатурном производстве с итеративными процессами переналадки производственного оборудования / А.В. Винниченко // Волновая электроника и инфокоммуникационные системы: Материалы XXV международной научной конференции, Санкт-Петербург: ГУАП, 30 мая – 03 2022 года. Том Часть 1. – С. 156-162.
 21. Винниченко, А.В. Винниченко, А. В. Разработка методики дистанционного мониторинга организации работы на местах в технологическом процессе / А. В. Винниченко // Математические методы и модели в высокотехнологичном производстве: Сб. тезисов докладов IV Международного форума. В 2-х частях, Санкт-Петербург, 06 ноября 2024 года. Санкт-Петербург: ГУАП, 2024. – С. 294-296.
 22. 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: ГУАП, –11 ноября 2021 года. – С. 221-222.
- Авторские свидетельства, патенты, информационные карты, алгоритмы*
23. Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ: «Программа методики выбора и предоставления рекомендаций для повышения организационно-технологической эффективности проектируемой производственной системы «оператор-оборудование-процесс»» / А.В. Винниченко // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ. Заявка № 2025618091 от 04.04.2025