

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«БАЛТИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
«ВОЕНМЕХ» ИМ. Д.Ф. УСТИНОВА»

На правах рукописи



МАЖАЙЦЕВ Евгений Александрович

**МОДЕЛИ И АЛГОРИТМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННО-
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ КОМПЛЕКСАМИ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ**

Специальность 2.2.11. Информационно-измерительные и управляющие системы

Диссертация на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор
Семенова Е.Г.

Санкт-Петербург – 2026

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	6
1 АНАЛИЗ ПРОБЛЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКИМ СОСТОЯНИЕМ ПТК ПРИБОРОСТРОЕНИЯ	19
1.1 Основные понятия, классификации и нормативная база	19
1.2 Производственно-технологический комплекс приборостроения как объект управления	25
1.3 Архитектура ИИУС производственно-технологического комплекса приборостроения	31
1.4 Задачи поддержки принятия решений в ИИУС ПТК	35
1.5 Методы обработки первичных данных для оценки технического состояния ПТК	42
1.6 Локализация критических неисправностей и измерение характеристик состояния ПТК	48
1.6.1 Наиболее вероятные места возникновения критических неисправностей	48
1.6.2 Измерение количественных и качественных характеристик технического состояния	50
1.6.3 Кластеризация мест критической уязвимости	52
1.7 Сравнительный анализ подходов к управлению ПТК и постановка научной задачи	55
1.8 Обобщенная постановка научной задачи исследования	58
1.9 Выводы по главе 1	60
2 МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ОЦЕНКИ И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ СОСТОЯНИЯ ПТК	61
2.1 Постановка задачи математического моделирования состояния ПТК в составе ИИУС	62

2.2 Критерий эффективности функционирования ИИУС ПТК	64
2.3 Традиционная статистическая модель управления ПТК приборостроения .	69
2.4 Уточнённые статистические модели управления ПТК.....	71
2.5 Связь статистических моделей управления с выбором плана контроля.....	76
2.6 Модель гибридного цифрового двойника как источник прогнозной оценки состояния	78
2.7 Математическая модель динамической оценки рисков эксплуатации ПТК	82
2.8 Алгоритмическое обеспечение расчёта характеристик контроля	83
2.9 Накопление данных эксплуатационного мониторинга и аппроксимация расчётных зависимостей	85
2.10 Выводы по главе 2	87
3 МЕТОДИКА РАСЧЁТА ПЛАНА КОНТРОЛЯ И УПРАВЛЕНИЯ СОСТОЯНИЕМ ПТК	89
3.1 Назначение и место методики в общем контуре ИИУС ПТК.....	89
3.2 Выбор характеристик плана контроля по критерию среднего уровня брака	90
3.3 Стоимостная оптимизация плана контроля	92
3.4 Расчет квазиоптимального плана при неопределённых параметрах ПТК....	96
3.5 Интеграция методики с динамической оценкой рисков и предиктивным обслуживанием	99
3.6 Программно-алгоритмическая реализация методики в ИИУС ПТК.....	101
3.7 Робастное агрегирование интервальных оценок технического состояния ПТК	103
3.8 Предиктивное обслуживание и формирование управляющих действий....	109
3.9 Пример применения методики для ПТК с выбором модели разладки.....	110
3.10 Подготовка исходных данных и проверка корректности расчета	112

3.11 Выводы по главе 3	114
4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА МОДЕЛЕЙ, МЕТОДИК И АЛГОРИТМОВ	116
4.1 Цель, задачи и структура экспериментальной проверки	117
4.2.1 Объект и данные эксперимента	119
4.2.2 Схема проверки и сравниваемые модели	120
4.2.3 Программа эксперимента	121
4.2.4 Результаты	122
4.3 Верификация статистических моделей управления по средним длинам серий	124
4.4 Проверка критерия среднего уровня брака и сравнение планов контроля .	126
4.5 Экспериментальная оценка стоимостной оптимизации плана контроля....	129
4.6 Проверка динамической оценки рисков эксплуатации ПТК.....	131
4.7 Сценарное моделирование состояний S0-S3 и проверка робастного агрегирования.....	133
4.8 Анализ чувствительности результатов к параметрам методики.....	136
4.9 Сопоставление оценок состояния для различных типов оборудования	138
4.10 Апробация методик на комплексе сборки печатных узлов	140
4.10.1 Объект и источник данных	141
4.10.2 Оптимизация плана статистического контроля сборочно-монтажной операции	141
4.10.3 Перенос критерия между механизмами разладки	144
4.10.4 Робастное агрегирование каналов мониторинга участка	145
4.10.5 Гибридная модель цифрового двойника канала контроля пасты	149
4.11 Внешняя проверка гибридного двойника на реальных данных износа инструмента.....	152
4.12 Выводы по главе 4	155

ЗАКЛЮЧЕНИЕ	156
Список сокращений и условных обозначений.....	161
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	162
Приложение А. Алгоритмы расчёта характеристик плана контроля	172
Приложение Б. Документы о внедрении результатов диссертационного исследования	179
Приложение В. Объекты интеллектуальной собственности	187

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования

Импортозамещение и достижение технологического лидерства относятся сегодня к первоочередным задачам национальной экономики. Решить их невозможно без ресурсосберегающих технологий, средств автоматизации и цифровизации производственно-технологических комплексов (ПТК) приборостроения, а также без развития информационно-измерительных и управляющих систем (ИИУС) [1, 2, 3].

Интеллектуальные системы управления и автоматизации, в том числе опирающиеся на нейросетевые и гибридные модели, включены в перечень приоритетных направлений научно-технологического развития страны, утверждённый Указом Президента Российской Федерации от 18 июня 2024 г. № 529. Этим же документом к важнейшим наукоёмким технологиям отнесено нарастающее внедрение автоматизации в высокотехнологичные отрасли промышленности, частью которого выступают и цифровые двойники.

По имеющимся оценкам, к 2030 году доля рынка, закреплённая за отечественными программно-аппаратными комплексами (ПАК) и программным обеспечением, должна выйти за 78%, а объём применения российского ПО в автоматизированных системах управления технологическими процессами (АСУ ТП) – вырасти относительно 2023 года более чем в 2,1 раза. При этом использовать цифровые двойники [4] в производстве сегодня намерены менее 8% предприятий при потенциальном охвате свыше 60%, а ёмкость отечественного рынка промышленной робототехники в 2026 году исчисляется десятками миллиардов рублей.

Под производственно-технологическим комплексом приборостроения понимается объединённый общей ИИУС набор технологического оборудования и средств измерения, контроля и диагностики. Сбор, обработку и анализ данных о состоянии оборудования такая система выполняет непрерывно – на протяжении жизненного цикла, от проектирования и изготовления до испытаний и

эксплуатации. Совокупность этих функций образует единый программно-модельный компонент ИИУС, связанный с контролируемым оборудованием потоками данных диагностики и мониторинга. Его назначение состоит в оценивании текущего состояния, прогнозировании невязки физической модели, оценке неопределённости параметра контроля и формировании рекомендаций для статистического контроля и предиктивного обслуживания.

На практике методы управления ПТК развиваются неравномерно. Цифровые двойники и нейросетевые модели внедряются преимущественно опытным путём – стандартизация цифровых двойников в производстве уже получила развитие, в том числе в серии ISO 23247, однако такие документы задают главным образом архитектурную основу и не заменяют прикладной научно-методический аппарат интеграции гибридных моделей, статистического контроля и предиктивного обслуживания в составе конкретной ИИУС ПТК приборостроения.

Исходя из этого возникает противоречие, связанное с тем, что промышленная автоматизация и цифровизация производства требует непрерывной диагностики, прогнозирования и управления техническим состоянием ПТК. При этом большинство существующих решений построенных на базе цифровых двойников и нейросетевых моделях фрагментарны и с критериями эффективности производственных процессов практически не связаны.

Предлагаемые модель, методика и алгоритмы составляют научно-методический инструментарий, в котором гибридный цифровой двойник, оценка неопределённости контролируемого параметра, процедура выбора плана контроля и предиктивное обслуживание сведены в один контур управления техническим состоянием ПТК приборостроения.

Степень разработанности темы определяют результаты работ, перечисленных ниже:

– Концепция цифровых двойников, способы построения физико-математических моделей технологических процессов и их увязка с системами управления ПТК прорабатывались В.В. Борисовым, А.И. Боровковым, С.А. Губаревым, В.А. Сарычевым, В.Г. Крыжановским, В.В. Речкаловым, Е.Г.

Семенов, М. Grieves, J. Vickers, W. Kritzinger. Современная литература различает цифровую модель, цифровую тень и цифровой двойник по уровню связи виртуального и физического объекта; серия ISO 23247 формирует общую рамку цифрового двойника для производства. Совместное использование детерминированных и нейросетевых моделей образует самостоятельное направление, начало которому положено работой D.C. Psichogios и L.H. Ungar (1992), где нейронная сеть дополняет модель первых принципов [5]; внесение физического знания непосредственно в функцию потерь формализовано М. Raissi, Р. Perdikaris и G.E. Karniadakis (2019) [6], а применение гибридных схем к прогнозированию остаточного ресурса развито М. Arias Chao, С. Kulkarni, К. Goebel и О. Fink (2022) [7]. Вместе с тем применительно к ИИУС ПТК приборостроения недостаточно формализована архитектура гибридного цифрового двойника, в которой физическая модель исправного состояния, нейросетевая коррекция невязки и оценка σ используются далее при выборе характеристик статистического контроля процесса.

– Обнаружение и классификация неисправностей, равно как и применение нейронных сетей для прогноза остаточного ресурса, исследованы И.А. Биргером, В.В. Ключевым, Б.В. Павловым, В.И. Евсеевым, В.Ф. Шевченко, В.М. Балашовым, R. Isermann. Из этих трудов вырос подход к построению нейросетевого алгоритма диагностики; однако раннее выявление разладок по невязкам гибридных моделей и типизация неисправностей по спектральным признакам освещены недостаточно.

– Теоретическую базу интегрального критерия эффективности управления ПТК образуют методы оптимального управления и принятия решений при неопределённости из работ А.А. Красовского [8], В.А. Липатникова, А.М. Летова [9], С.В. Богословского, Б.Т. Полякова, С.Н. Васильева, R. Bellman [10], L. Zadeh [11], R. Kalman [12]. Задача обоснованного выбора характеристик плана контроля восходит к экономической модели проектирования контрольных карт А.Д. Duncan [13] (1956); её недостатки, связанные с завышенной частотой ложных сигналов, отмечены W.H. Woodall [14] (1986), после чего Е.М. Saniga [15] (1989) предложил экономико-статистическое проектирование – минимизацию затрат при

ограничениях на средние длины серий, а Р. Mackin и D.C. Montgomery [16] (1996) – многокритериальный выбор плана, не требующий оценивания стоимости ложных тревог. Учёт надёжности оборудования в проектировании карт развит Р.К. Banerjee и М.А. Rahim [17] (1988), М. Ben-Daya и М.А. Rahim (2000) [18], S. Panagiotidou и G. Nenes (2009) [19]. Общим для перечисленных работ является выражение показателя эффективности в стоимостной форме либо через характеристики средних длин серий; показатель, выраженный непосредственно в долях брака, не требующий задания стоимостных коэффициентов и сопряжённый с прогнозной оценкой σ гибридного цифрового двойника, не получил завершённой формализации применительно к единому контуру ИИУС ПТК приборостроения.

Таким образом, несмотря на значительный задел в области цифровых двойников, технической диагностики и статистического управления процессами, в известных работах не решена задача построения гибридной модели, показатель эффективности которой выражен непосредственно через характеристики продукции и сопряжён с процедурой статистического контроля процесса, а формализация этих процессов применительно к единому контуру ИИУС ПТК приборостроения не завершена. Это определяет актуальность темы диссертационного исследования.

Объект исследования – процессы диагностики, мониторинга и управления техническим состоянием ПТК приборостроения на стадиях их жизненного цикла.

Предмет исследования – модели, критерии, алгоритмы и программно-информационное обеспечение оценивания, прогнозирования и управления техническим состоянием ПТК приборостроения в составе информационно-измерительной и управляющей системы.

Улучшаемым свойством объекта исследования является эффективность функционирования ИИУС ПТК приборостроения, понимаемая как способность системы обеспечивать заданный уровень качества продукции при минимальных потерях от брака и регламентированной частоте ложных остановок. Количественной мерой этого свойства в работе служит средний уровень брака за межрегулируемый период, описываемый моделью формирования уровня брака

Q во второй главе, а средствами целенаправленного воздействия на него – модель гибридного цифрового двойника, процедура выбора характеристик плана контроля и методика ситуационного мониторинга.

Цель работы – повышение эффективности функционирования ИИУС ПТК приборостроения за счёт разработки научно-методического инструментария обработки данных диагностики и мониторинга, обеспечивающего прогнозирование технического состояния, выбор параметров статистического контроля и формирование решений по предиктивному обслуживанию ПТК.

Научная задача – разрешение противоречия между требуемой точностью прогнозирования технического состояния ПТК приборостроения и необходимостью сохранения интерпретируемости прогноза при ограниченном объёме данных эксплуатационного мониторинга, отсутствием количественной меры эффективности интеграции цифровых двойников в ИИУС, а также отсутствием средств согласования разнородных и конфликтующих оценок состояния, поступающих по измерительным каналам ИИУС, в единое управляющее решение.

Частные задачи исследования:

- анализ возможностей и путей совершенствования информационно-измерительной и управляющей системы производственно-технологических комплексов приборостроения с учётом применения цифровых двойников и предиктивной аналитики;
- разработка математической модели гибридного цифрового двойника компонентов ПТК, основанной на нейросетевой коррекции невязки физической модели исправного состояния оборудования;
- разработка методики ситуационного мониторинга, прогнозирования и предиктивного обслуживания производственно-технологических комплексов приборостроения на основе робастного агрегирования интервальных оценок состояния, поступающих от измерительных каналов ИИУС, гибридного цифрового двойника и экспертных источников;

- разработка модели формирования уровня годной продукции ПТК приборостроения за межрегулируемый период и обоснование на её основе критерия эффективности функционирования ИИУС;

- разработка алгоритмического обеспечения ИИУС ПТК приборостроения: алгоритма расчёта характеристик плана контроля по критерию Q , алгоритма квазиоптимального выбора плана при интервально заданных параметрах ПТК и алгоритма робастного агрегирования интервальных оценок технического состояния на основе генетического алгоритма;

- создание программно-информационного обеспечения предиктивного обслуживания ПТК по предложенным моделям и критериям эффективности с экспериментальным подтверждением результатов.

Научные результаты, выносимые на защиту:

- **модель гибридного цифрового двойника компонента** производственно-технологического комплекса приборостроения, основанная на нейросетевой коррекции невязки физической модели исправного состояния и предназначенная для формирования в составе ИИУС прогноза технического состояния, оценки неопределённости контролируемого параметра и диагностического индикатора деградации [20, 21];

- **модель формирования уровня годной продукции ПТК** приборостроения за межрегулируемый период, связывающая уровень годной продукции $G = 1 - Q$ (где Q – средний уровень брака за период) с характеристиками плана контроля, надёжностью оборудования и механизмом статистического управления состоянием ПТК [22, 23];

- **методика ситуационного мониторинга, прогнозирования и предиктивного обслуживания ПТК** приборостроения, основанная на алгоритме робастного агрегирования интервальных оценок состояния по данным ИИУС, гибридного цифрового двойника и экспертных источников; методика обеспечивает классификацию состояния объекта по ситуациям S_0-S_3 и выбор управляющего действия [24-26].

В совокупности перечисленные научные результаты составляют научно-методический инструментарий, повышающий эффективность функционирования ИИУС ПТК приборостроения за счёт совместного использования гибридных цифровых двойников, статистического управления и робастного ситуационного мониторинга. Три результата образуют единый замкнутый контур управления техническим состоянием ПТК: модель гибридного цифрового двойника формирует прогноз состояния компонентов оборудования, оценку σ , диагностическую невязку и прогноз остаточного ресурса; модель формирования уровня брака и статистические модели управления связывают эти оценки с характеристиками плана контроля, минимизирующими уровень брака при заданной надёжности; методика ситуационного мониторинга агрегирует интервальные оценки состояния, задаёт управляющее действие: изменение плана контроля, запуск регулировки, назначение формата предиктивного обслуживания или аварийный останов.

В качестве методов исследования использовался системный анализ, математическое и алгоритмическое моделирование, теория применения нейросетевых моделей, статистическое управление процессами, а также теория принятия решений. Помимо этого, были применены теория принятия решений в условиях неопределённости и генетические алгоритмы; отдельно применены методы обработки и агрегирования экспертных и интервальных оценок.

Научная новизна результатов исследования заключается в следующем:

– Разработана модель гибридного цифрового двойника компонентов ПТК, построенная на принципе нейросетевой коррекции физической модели исправного состояния оборудования. В отличие от гибридных схем, ориентированных преимущественно на повышение точности прогноза или оценивание ненаблюдаемых параметров, в предложенной модели параметры физической составляющей разделены на конструктивные, режимные и деградационные; физическая модель описывает отклик исправного оборудования, а нейросетевая часть прогнозирует физически ограниченную невязку, используемую как диагностический индикатор, чувствительный к накоплению повреждений при контроле режимных факторов и качества данных. Это обеспечивает снижение

ошибки прогноза при аддитивном характере расхождения физической модели с объектом и сохраняет физическую интерпретируемость прогноза за счёт разделения его на физически обоснованную составляющую и ограниченную по размаху коррекцию. Преимущество модели возрастает при сокращении объёма данных эксплуатационного мониторинга, что подтверждено экспериментально.

- Разработан критерий согласования физической и нейросетевой частей цифрового двойника, заданный двухкомпонентной функцией потерь, в которой штрафная составляющая ограничивает диапазон нейросетевой коррекции величиной, согласованной со среднеквадратическим отклонением σ контролируемого параметра. В результате модель цифрового двойника и показатель эффективности ИИУС оказываются связаны общим параметром σ , используемым как при верификации физической непротиворечивости прогноза, так и при выборе характеристик плана статистического контроля.

- Разработана модель формирования уровня годной продукции ПТК приборостроения за межрегулировочный период, связывающая уровень годной продукции $G = 1 - Q$ (где Q – средний уровень брака за период) с характеристиками плана контроля, надёжностью оборудования и механизмом статистического управления состоянием ПТК. В отличие от известных стоимостных и экономико-статистических моделей проектирования контрольных карт, модель не требует задания стоимостных коэффициентов, согласована с моделью цифрового двойника и использует в явном виде параметр надёжности оборудования и эффективность обнаружения разладки. На модели построена процедура двухкритериального выбора характеристик плана контроля через поверхность отклика $Q(n, k)$ и Парето-оптимизацию.

- Разработана методика ситуационного мониторинга, прогнозирования и предиктивного обслуживания ПТК, в основе которой лежит оригинальный алгоритм робастного агрегирования интервальных оценок с двухуровневой постановкой задачи (базовая выпуклая задача как эталон + расширенная смешанная с бинарными признаками включения источников и асимметрией потерь). В отличие от линейного усреднения и OWA-агрегирования, методика обеспечивает не только

согласование интервальной информации, но и её использование в контуре ИИУС для классификации ситуаций и формирования управляющего действия.

Обоснованность и достоверность полученных научных результатов обеспечиваются:

– корректностью применяемого математического аппарата, апробированного в теории нейронных сетей, статистическом управлении процессами, робастном агрегировании интервальных оценок, теории принятия решений, а также в имитационном моделировании;

– отсутствием противоречий между полученными результатами и известными положениями теории цифровых двойников, а также теории диагностики технических систем.

Результатами имитационного и вычислительного моделирования, а также вычислительным экспериментом, выполненным на данных ресурсных испытаний подшипниковых узлов – представителя класса критических неисправностей, обоснование выбора которого дано в разделе 1.6, которые синтезированы по физически обоснованной модели усталостной деградации. Сюда же относится практическая апробация моделей, методики и алгоритмов при диагностике, мониторинге и предиктивном обслуживании ПТК приборостроения. Помимо имитационного моделирования, все три научных результата проверены на реальных данных действующей линии поверхностного монтажа печатных узлов плат, а первый результат дополнительно – на реальных данных износа режущего инструмента. Такой выбор объектов эмпирической проверки заложен целенаправленно для верификации математического аппарата, который изложен в главах 2-3 на примере подшипникового узла, а также для количественного подтверждения на объекте с принципиально иным механизмом отказа – сборочно-монтажном оборудовании, что демонстрирует не подгонку модели под частный случай, а переносимость разработанного аппарата между разнородными классами технологического оборудования приборостроения. Достоверность третьего результата дополнительно проверена аналитически для базовой задачи агрегирования интервальных оценок. Доказана выпуклость, расширенная

постановка сверена с аналитическим решением базовой модели, а устойчивость проверена при шумах, выбросах, дрейфе и отказе отдельных измерительных каналов. Полученная агрегированная оценка состояния увязана с ситуационной классификацией по параметрам S_0 - S_3 и выбором управляющего действия.

Сформирована область применимости, которая охватывает ПТК с доступными регулярными данными мониторинга, выделяется критический компонент с параметризуемой физической моделью, а статистические характеристики контролируемого параметра поддаются оценке на горизонте между регулировками.

Теоретическая значимость результатов исследования состоит в:

- развитии научно-методического аппарата построения цифровых двойников ПТК, так как предложенное разделение параметров физической модели на конструктивные, режимные и деградационные вместе с формализацией правил в области аналитических и нейросетевых компонент расширяет известные подходы к гибридизации моделей состояния высокотехнологичного оборудования;
- дополнении теории статистического управления производственными процессами за счет введённого показателя $G = 1 - Q$, который связывает уровень годной продукции с параметрами надёжности оборудования T_0 и характеристиками плана контроля n , k , чего не предусматривают классические экономико-статистические модели контрольных карт;
- развитии способов робастного агрегирования интервальных оценок за счет двухуровневой постановки задачи (базовая выпуклая как эталон и расширенная смешанная с бинарными признаками включения источников) даёт математический аппарат ситуационного принятия решений S_0 - S_3 , отсутствующий в известных схемах линейного и OWA-агрегирования.

Практическая значимость заключается в:

- повышении точности и физической интерпретируемости прогнозирования состояния оборудования благодаря предложенной модели гибридного цифрового двойника, причём преимущество по точности проявляется при аддитивном характере расхождения физической модели с объектом и

ограниченном объёме данных; это подтверждено вычислительным экспериментом на данных ресурсных испытаний подшипниковых узлов и внешней проверкой на реальном открытом наборе износа инструмента, где гибридная модель устойчиво превосходит физическую и не уступает нейросетевой при большей интерпретируемости;

- поддержке непрерывной подстройки модели цифрового двойника под меняющиеся условия без ручной перенастройки;

- сокращении времени нерегламентированного простоя оборудования ПТК приборостроения;

- снижении среднего уровня брака продукции – на реальных данных действующей производственной линии предложенный план обеспечивает снижение на 36,1% относительно карт Шухарта [27] и на 22,9% относительно карты кумулятивных сумм CUSUM за счёт предложенной модели формирования уровня годной продукции и построенной на ней процедуры двухкритериального выбора характеристик плана контроля;

- создании зарегистрированных в установленном порядке программных модулей обработки аналоговых сигналов для цифровых двойников ПТК и оптимального агрегирования интервальных экспертных оценок при принятии групповых решений о техническом состоянии оборудования;

- алгоритмическом обеспечении ИИУС ПТК приборостроения, доведённом до программной реализации – алгоритмы расчёта плана контроля по критерию, квазиоптимального выбора плана при интервально заданных параметрах и робастного агрегирования интервальных оценок состояния допускают прямое встраивание в расчётный контур ИИУС.

Личный вклад соискателя состоит в том, что выносимые на защиту научные результаты – модель гибридного цифрового двойника компонента ПТК, модель формирования среднего уровня брака продукции ПТК приборостроения, положенная в основу критерия эффективности функционирования ИИУС, и методика ситуационного мониторинга, прогнозирования и предиктивного обслуживания ПТК на основе алгоритма робастного агрегирования интервальных

оценок – получены им самостоятельно. Диссертантом лично получены аналитические соотношения, разработаны и апробированы алгоритмы и программные модули, выполнены вычислительные эксперименты с обработкой их результатов; публикации научных результатов выполнены лично соискателем.

Апробация. Результаты диссертации представлялись и обсуждались на следующих научных мероприятиях:

- Всероссийской молодежной научной конференции «Информационные технологии в высокотехнологичных производствах (ВТП)» (СПб, 2025, 2026).

- Конференции Молодежного научно-инженерного центра (СПб, 2025, 2026).

- XVII Международной Молодёжной научно-технической конференции «Молодежь. Техника. Космос.» (СПб, 2025).

- Научно-технической конференции «Будущее предприятия – в творчестве молодых.» (СПб, 2025, 2026).

- Международной научной конференции «Развитие науки и образования в условиях глобализации и цифровой трансформации» (г. Бишкек, Кыргызская Республика, 2025).

- XLIV Международной научно-практической конференции «Фундаментальные и прикладные научные исследования: актуальные вопросы, достижения и инновации» (г. Пенза, 2021).

Реализация и внедрение результатов исследования. Разработанные в диссертации модель, методика и алгоритмы внедрены в ЗАО «Институт телекоммуникаций», АО «Концерн «Океанприбор», АО «Центр технологии судостроения и судоремонта», апробированы в НИР ПАО «Интелтех». Полученные результаты включены в учебный процесс ФГБОУ ВО «БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова» по дисциплинам «Цифровые двойники в технических системах» и «Основы искусственного интеллекта».

Область исследования соответствует пунктам 1 – научное обоснование перспективных информационно-измерительных и управляющих систем, систем их контроля, испытаний и метрологического обеспечения, повышение эффективности

существующих систем, 3 – математическое, алгоритмическое, информационное, программное и аппаратное обеспечение информационно-измерительных и управляющих систем, и 6 – методы анализа, диагностики, идентификации и управления техническим состоянием информационно-измерительных и управляющих систем, в том числе с использованием технологий искусственного интеллекта, паспорта научной специальности 2.2.11 «Информационно-измерительные и управляющие системы».

Публикации. По теме диссертации опубликовано 18 работ, из них 7 – в рецензируемых научных журналах из перечня ВАК Минобрнауки РФ (К2), в том числе без соавторов – 2, получено 2 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Объем и структура диссертации. Работа включает введение, четыре главы, заключение, список литературы из 118 наименований и 3 приложения. Объем основного текста изложен на 152 страницах, в него входят 50 таблиц и 44 рисунка; с учётом приложений общий объем диссертации достигает 188 страниц.

1 АНАЛИЗ ПРОБЛЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКИМ СОСТОЯНИЕМ ПТК ПРИБОРОСТРОЕНИЯ

1.1 Основные понятия, классификации и нормативная база

Переходя к анализу производственно-технологических комплексов приборостроения и построенных на их основе информационно-измерительных и управляющих систем, необходимо зафиксировать понятийный аппарат, классификации и нормативную базу, на которые опирается настоящее исследование. Это обеспечивает единство терминологии и связывает предлагаемые в работе решения с действующими стандартами в области надёжности, технической диагностики и управления техническим состоянием.

Под техническим состоянием объекта понимается, согласно ГОСТ 27.002-2015 [28], «состояние объекта, характеризующее совокупностью установленных в документации параметров, описывающих его способность выполнять требуемые функции в рассматриваемых условиях». В соответствии с ГОСТ 27.002-2015 [28] различают исправное состояние – «состояние объекта, в котором он соответствует всем требованиям, установленным в документации на него»; работоспособное состояние – «состояние объекта, в котором он способен выполнять требуемые функции»; неработоспособное состояние – «состояние объекта, в котором он не способен выполнять хотя бы одну требуемую функцию по причинам, зависящим от него или из-за профилактического технического обслуживания»; и предельное состояние – «состояние объекта, в котором его дальнейшая эксплуатация недопустима или нецелесообразна, либо восстановление его работоспособного состояния невозможно или нецелесообразно». Особое место занимает предотказное состояние – работоспособное состояние, при котором значения контролируемых параметров приблизились к границам поля допуска, а вероятность отказа существенно возросла; его своевременное распознавание составляет основную задачу предиктивного управления. Определения перечисленных состояний сведены в таблице 1.

Таблица 1 – Виды технического состояния объекта

Вид технического состояния	Определяющий признак (по ГОСТ 27.002-2015)
Исправное	Соответствие всем требованиям нормативно-технической документации
Работоспособное	Способность выполнять требуемые функции при возможном несоответствии отдельным несущественным требованиям
Предотказное	Работоспособное состояние с приближением контролируемых параметров к границам допуска и повышенной вероятностью отказа
Неработоспособное	Несоответствие хотя бы одного параметра, определяющего выполнение заданных функций, требованиям документации
Предельное	Недопустимость или нецелесообразность дальнейшей эксплуатации

Отказом называется событие, заключающееся в нарушении работоспособного состояния объекта. По характеру возникновения отказы разделяют на внезапные, наступающие скачкообразно, и постепенные (параметрические), развивающиеся вследствие монотонного изменения контролируемых параметров. Именно постепенные отказы поддаются прогнозированию и являются основным объектом систем мониторинга технического состояния. Развитие постепенного отказа во времени описывается кривой « $P-F$ » начиная от момента P , в котором зарождающийся дефект становится обнаружимым, до момента F наступления функционального отказа проходит интервал упреждения, в течение которого возможны выявление дефекта и предупреждающее воздействие. Пример такого отказа представлен на рисунке 1. Ширина этого интервала определяет требования к периодичности и чувствительности контроля.

Согласно ГОСТ 20911-89 [29], техническое диагностирование – это «определение технического состояния объекта», а техническая диагностика в целом – «теория, методы и средства определения технического состояния объектов». Прогнозирование технического состояния – это предсказание состояния на предстоящий интервал времени, способствующая заблаговременно определить вероятность изменения текущего состояния работы оборудования или его конкретного объекта.

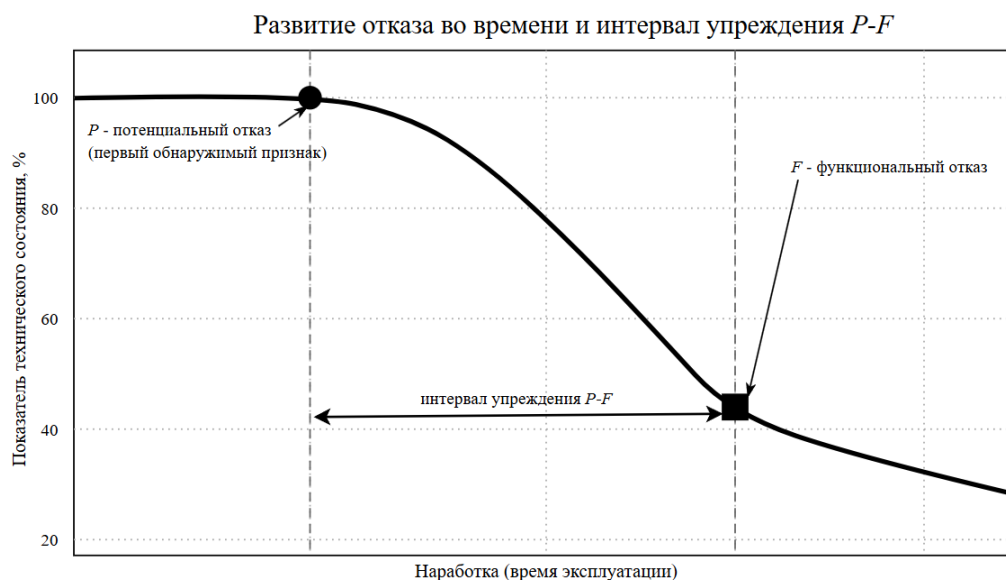


Рисунок 1 – Развитие постепенного отказа во времени и интервал упреждения $P-F$

Способность объекта к диагностированию описывает контролепригодность, а также безотказность, ремонтпригодность и сохраняемость что в совокупности образует надёжность объекта (ГОСТ 27.002-2015). Обобщённая траектория деградации, служащая основой прогноза остаточного ресурса, показана на рисунке 2. За приработкой следует продолжительный этап нормальной эксплуатации, затем ускоренная деградация, и дальше предельное состояние. Пересечение предотказного порога, в частности, необходимо для сигнала к предупреждающему воздействию. Достижение предельного порога требует вывода объекта из эксплуатации.

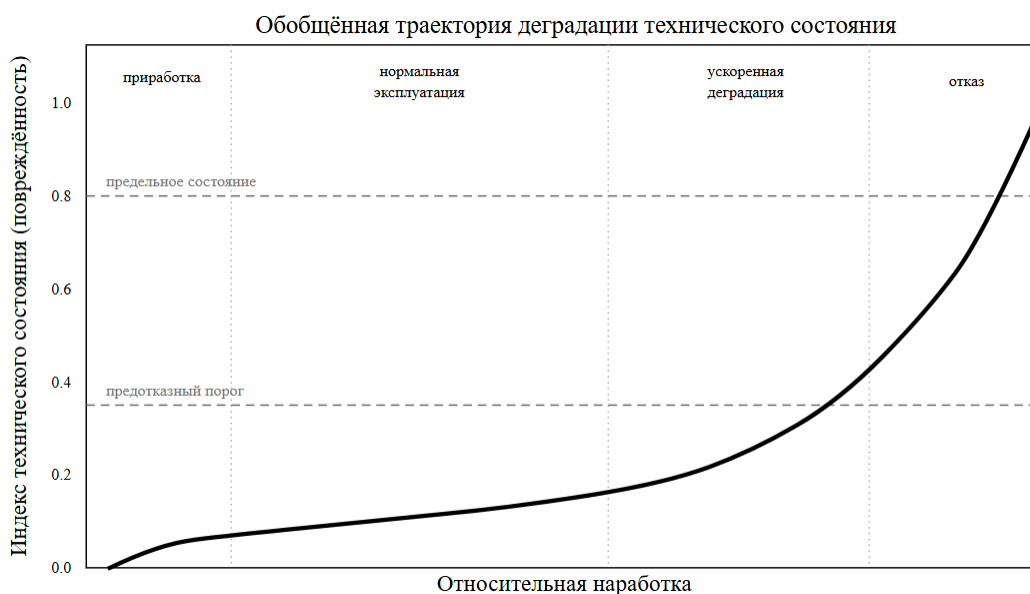


Рисунок 2 – Обобщённая траектория деградации технического состояния

Согласно ГОСТ 18322 [30], техническое обслуживание – это «комплекс технологических операций и организационных действий по поддержанию работоспособности или исправности объекта при использовании по назначению, ожидании, хранении и транспортировании». Развитие систем технического обслуживания и ремонта прошло несколько этапов. Первоначально применялось реактивное обслуживание, когда отказ устраняется уже по факту его возникновения. На смену ему пришло обслуживание по регламенту с проведением плановых работ через фиксированные интервалы наработки. Дальнейшее развитие привело к обслуживанию по фактическому техническому состоянию, при котором работы назначаются в момент достижения контролируемым параметром диагностического порога, и к предиктивному обслуживанию, где основанием служит прогноз момента достижения такого порога, что даёт возможность планировать вмешательство заблаговременно. Моменты вмешательства для различных стратегий продемонстрированы на рисунке 3, а сопоставление самих стратегий приведено в таблице 2. Переход к обслуживанию по состоянию и к предиктивному обслуживанию сокращает одновременно число внезапных отказов и объём избыточных профилактических работ, однако требует развитой измерительной инфраструктуры и достоверных моделей технического состояния [31-35]. Именно этим определяется актуальность настоящего исследования.

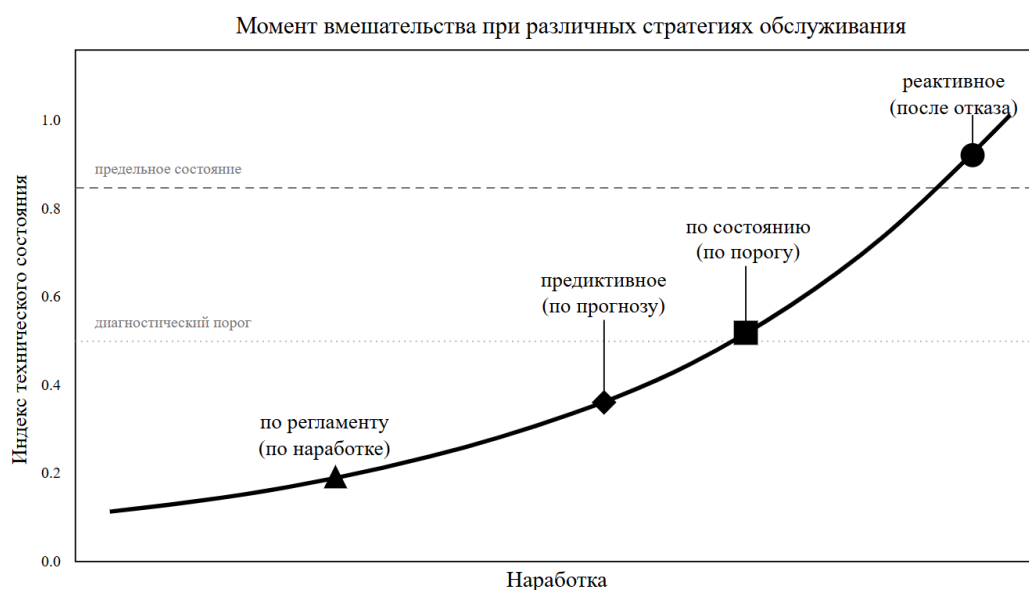


Рисунок 3 – Момент вмешательства при различных стратегиях технического обслуживания

Сопоставление рассмотренных стратегий обслуживания приведено в таблице 2.

Таблица 2 – Сравнение стратегий технического обслуживания

Стратегия обслуживания	Принцип назначения работ	Основной недостаток
Реактивное	По факту наступившего отказа	Внезапные простои, вторичные повреждения
По регламенту (по наработке)	Через фиксированные интервалы наработки	Избыточные работы либо пропуск досрочных отказов
По фактическому состоянию	При достижении диагностического порога	Требуется непрерывного контроля состояния
Предиктивное	По прогнозу достижения порога	Требуется достоверных прогнозных моделей и данных

Одним из ключевых инструментов реализации предиктивного управления является технология цифрового двойника – синхронизируемое с реальным объектом виртуальное представление, объединяющее модели объекта с данными измерений и воспроизводящее его состояние и поведение на протяжении жизненного цикла. Исходное определение, данное специалистами NASA, трактует цифровой двойник как интегрированную мультифизическую вероятностную имитацию, зеркалящую «жизнь» реального аппарата по данным датчиков и истории эксплуатации [26]. Согласно классификации Kritzinger и др. [23], по уровню интеграции данных различают:

- цифровую модель, обмен данными с которой выполняется вручную;
- цифровую тень, обновляемую автоматически по данным от физического объекта;
- цифровой двойник, в котором автоматический обмен данными осуществляется в обе стороны – от объекта к модели и в обратном направлении [23], представленном на рисунке 4.

По объекту моделирования двойники разделяют на двойники компонента, подсистемы и системы; по способу построения – на физические, основанные на данных и гибридные; по стадии жизненного цикла – на проектные, производственные и эксплуатационные [36-40].

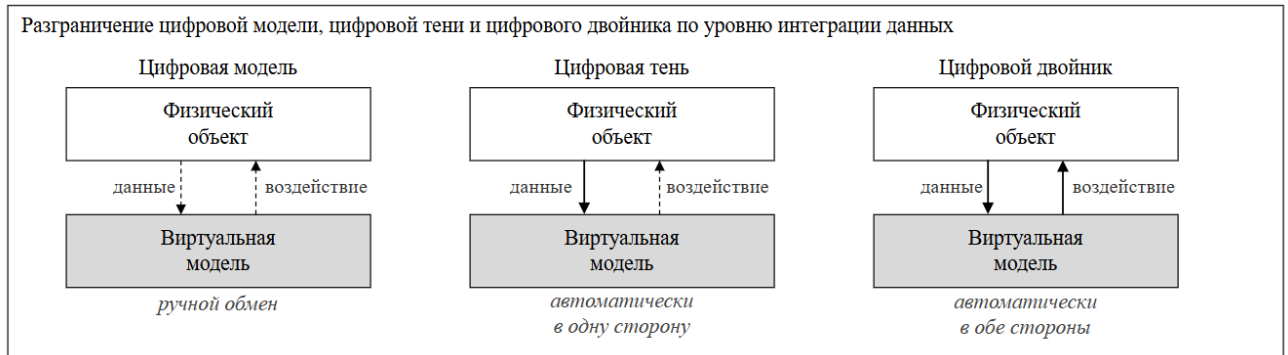


Рисунок 4 – Разграничение цифровой модели, цифровой тени и цифрового двойника по уровню интеграции данных

Цифровой двойник встраивается в типовую функциональную архитектуру системы мониторинга технического состояния, стандартизованную ISO 13374 [41] и включающую последовательность блоков сбора данных, их обработки, обнаружения состояния, оценки технического состояния, прогнозирования и выработки рекомендаций, представленной на рисунке 5. Первые блоки образуют слой восприятия и преобразуют сигналы датчиков в информативные признаки, средние блоки реализуют диагностику и оценку состояния, а завершающие – прогнозирование и поддержку принятия решений. Такая декомпозиция обеспечивает совместимость измерительной аппаратуры, диагностических алгоритмов и программных средств различных производителей и служит методологической основой для построения информационно-измерительных и управляющих систем, рассматриваемых далее.

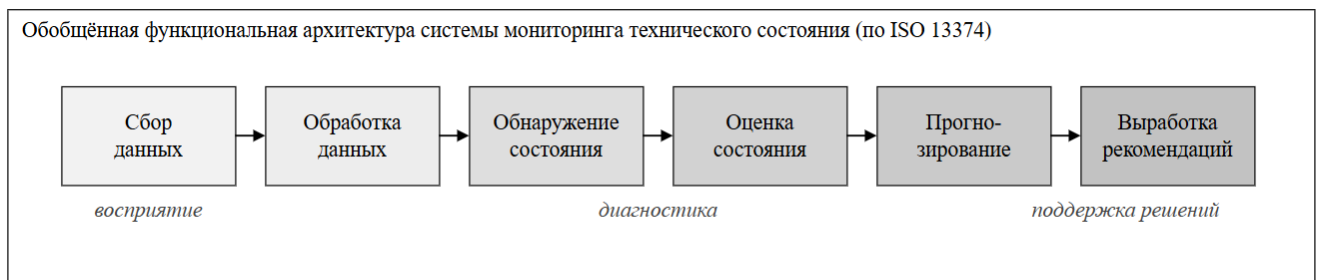


Рисунок 5 – Обобщённая функциональная архитектура системы мониторинга технического состояния (по ISO 13374)

Настоящее исследование опирается на действующие стандарты в области надёжности и технической диагностики, а именно:

- ГОСТ 27.002-2015 [28], устанавливающий термины и определения надёжности;
- ГОСТ 20911-89 [29], определяющий термины технической диагностики;
- ГОСТ 18322 [30], регламентирующий систему технического обслуживания и ремонта.

Также исследование оперирует данными международных стандартов мониторинга технического состояния ISO 17359 [42], задающий общие требования, ISO 13374 [41], стандартизирующий обработку данных мониторинга, и ISO 13381 [43], посвящённый прогнозированию технического состояния. Использование единой терминологии этих стандартов обеспечивает сопоставимость получаемых результатов с общепринятой практикой управления техническим состоянием технических объектов.

1.2 Производственно-технологический комплекс приборостроения как объект управления

Производственно-технологические комплексы приборостроения принадлежат классу сложных технических систем. Технологическая точность, метрологическое обеспечение [44] – деление средств измерений на классы точности и способы нормирования метрологических характеристик – и эксплуатационная надёжность оборудования образуют для них единую задачу управления [45, 46]. В производстве контролируют не один параметр, а совокупность взаимосвязанных признаков, таких как геометрические отклонения, температурные режимы, вибрационные характеристики, качество обработки, состояние исполнительных узлов, результаты выборочного контроля, данные регламентных проверок и т.д. ПТК в работе рассматривается не как отдельный станок или измерительный канал, а как объект, в котором технологический процесс, оборудование и информационно-измерительная система образуют общий контур принятия решений.

Производственно-технологический комплекс приборостроения понимается в работе как совокупность технологического оборудования, измерительных каналов, средств технической диагностики, программно-математических моделей состояния, подсистем статистического контроля и блоков принятия решений. Объединяет их общая информационно-измерительная и управляющая система, где ПТК выступает не только физическим оборудованием, но и объектом информационного контура мониторинга, прогнозирования и управления техническим состоянием.

Для приборостроительного производства существенна не столько сама фиксация отказа оборудования, сколько выявление той стадии, на которой отказ еще не наступил, но статистические характеристики процесса уже изменились. На практике именно эта стадия является наиболее значимой так как выпуск продукции продолжается, внешний признак аварии отсутствует, однако вероятность брака и вероятность последующей регулировки возрастают. Следовательно, ИИУС должна работать не только как система регистрации события, но и как расчетный механизм, позволяющий оценивать приближение к разладке и заранее менять режим контроля.

Состояние ПТК в момент времени t представляется вектором из m контролируемых параметров. К таким параметрам относятся технологические величины, диагностические признаки, выходы цифрового двойника, параметры статистического контроля и показатели риска. Формально состояние можно записать в виде формулы:

$$X(t) = \{x_1(t), x_2(t), \dots, x_m(t)\}, \quad (1.1)$$

где $x_i(t)$ – i -я компонента вектора состояния, $i = 1, \dots, m$.

$$H(t) = \{X(\tau), U(\tau), D(\tau): \tau < t\}, \quad (1.2)$$

где $\tau < t$ — моменты времени, предшествующие текущему;

$U(\tau)$ – ранее сформированные управляющие воздействия;

$D(\tau)$ – диагностические решения и признаки, полученные средствами ИИУС.

Тогда управление ПТК можно представить как отображение по формуле:

$$U(t) = F(X(t), H(t), M(t), R(t)), \quad (1.3)$$

где $M(t)$ – совокупность моделей, используемых в ИИУС, включая цифровой двойник, статистические модели управления и модели риска;

$R(t)$ – ограничения, связанные с технологическим регламентом, допустимым уровнем брака, безопасностью, стоимостью остановов и доступностью ремонтных ресурсов.

Под управлением ПТК в работе понимается управление техническим состоянием и качеством функционирования по данным ИИУС, включающее выбор характеристик плана контроля, обнаружение разладки, оценку перехода в предотказное состояние, решение о регулировке, назначение предиктивного обслуживания, ограничение выпуска при недопустимом уровне риска и аварийный останов при критическом состоянии. Такое понимание отделяет рассматриваемую задачу от собственно диагностики и приводит к правилу – если диагностика устанавливает текущее состояние, а прогнозирование описывает возможное его развитие, то управление определяет, какое действие должна выполнить система.

Развитие ИИУС ПТК всё чаще связывают с применением цифровых двойников. Рамочные принципы построения цифрового двойника в производстве закреплены в международной практике серией ISO 23247 [20, 22, 24, 25], где заданы общая архитектура, требования и порядок информационного обмена между сущностями двойника. Отечественным аналогом в этой области выступает ГОСТ Р 57700.37-2021 [47], согласно которому целью создания цифрового двойника изделия является выполнение технических и тактико-технических требований к изделию, снижение себестоимости и сроков разработки опытных образцов. В исследовании цифровой двойник рассматривается как программно-модельный компонент ИИУС, который синхронизируется с физическим объектом посредством данных мониторинга и служит для оценки текущего состояния, прогноза невязки, оценки неопределённости и поддержки управляющих решений.

Цифровой двойник включён в двусторонний информационный контур, где обновление модели и принятие решений опираются на текущее состояние физической системы. Именно поэтому под гибридным цифровым двойником в

работе понимается не любая прогностическая модель, а элемент ИИУС, связанный с мониторингом, статистическим контролем и предиктивным обслуживанием.

Соответствующие уровни представления ПТК в составе ИИУС обобщены в таблице 3.

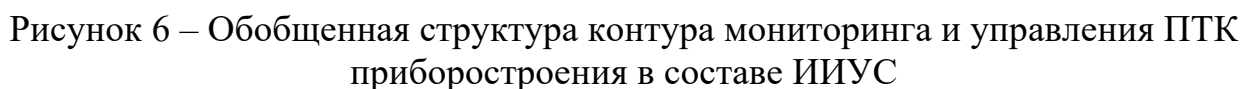
Таблица 3 – Уровни представления ПТК приборостроения в составе ИИУС

Уровень представления	Содержание уровня	Типовые данные	Функциональная роль
Физический уровень	Оборудование, оснастка, исполнительные механизмы, датчики	Вибрация, температура, токи, геометрические параметры	Источник первичных данных
Измерительный уровень	Каналы сбора, нормализации и синхронизации данных	Временные ряды, интервальные оценки, показатели достоверности	Основа диагностики и мониторинга
Модельный уровень	Физические модели, цифровой двойник, LSTM-модуль, статистические модели	$Y_{phys}, Y_{res}, Y_{hyb}, \sigma, RUL, P_{отк}$	Формирование прогноза и неопределенности
Статистический уровень	Контрольные карты, СМУ 1, СМУ 2, критерий Q	$q_0, q_1, L_0, L_1, n, k, A$	Выбор плана контроля
Рисковый уровень	Динамическая матрица рисков, интеграционный и эксплуатационный риск	$P_i(t), C_i(t), R_i(t), R_{int}$	Поддержка риск-ориентированных решений
Управляющий уровень	Регулировка, изменение плана контроля, ТО, останов	Решение по состояниям S_0-S_3	Замыкание контура управления

С учетом указанных уровней ПТК целесообразно рассматривать как иерархическую систему, в которой физический объект, измерительная подсистема, цифровая модель, статистический контроль и блок управляющих решений связаны общим информационным потоком.

На рисунке 6 представлена обобщенная структура контура мониторинга.\

Оценивать эффективность управления ПТК только вероятностями ошибок первого и второго рода недостаточно, потому что такая оценка показывает, как часто ошибается контрольная карта, но не отвечает на инженерный вопрос – какой уровень брака сформируется за период между регулировками оборудования. Требуется критерий, выраженный в технологически интерпретируемых величинах и учитывающий надёжность оборудования, качество обнаружения разладки и



Переход от мониторинга к управлению требует ситуационного представления состояния ПТК – сопоставления диагностических признаков не одному порогу срабатывания, а одному из нескольких качественно различных состояний.

- соответствует нормальной эксплуатации,

- разладка технологического процесса,
- предотказное состояние оборудования,
- отказ или недопустимый риск отказа.

Каждому состоянию сопоставляется управляющее действие определяющее сохранение текущего плана контроля, пересчет характеристик контроля, регулировку, назначение предиктивного обслуживания или аварийный останов. Формальное правило перехода между состояниями и выбора управляющего действия разработано в разделе 3.8.

Перечень ситуационных состояний ПТК и отвечающих им управляющих действий сведён в таблице 4.

Таблица 4 – Ситуационные состояния ПТК и соответствующие управляющие действия

Ситуация	Содержание состояния	Информационные признаки	Управляющее воздействие
S_0	Налаженное состояние, нормальная эксплуатация	Параметры в пределах допуска; низкий риск; $Q \leq Q_{\text{доп}}$	Контроль по текущему плану
S_1	Разладка технологического процесса	Рост q , изменение σ , выход выборочного среднего за границы	Регулировка; пересчет n и k
S_2	Предотказное состояние	Рост невязки ЦД, снижение RUL , переход в оранжевую зону риска	Предиктивное обслуживание
S_3	Отказ или недопустимый риск	Красная зона риска; критическое превышение порогов	Аварийный останов, ремонт

Таким образом, ПТК в исследовании рассматривается как объект, для которого необходимо одновременно решать задачи измерения, обработки данных, моделирования, статистического контроля, оценки риска и принятия управляющих решений.

Общая логика исследования может быть представлена следующей последовательностью:

данные ИИУС $\rightarrow$ гибридный цифровой двойник $\rightarrow$ оценка состояния и $\sigma \rightarrow$ критерий $Q \rightarrow$ план контроля $\rightarrow$ ситуационное решение. (1.4)

Эта последовательность задаёт внутреннюю связность изложения. Первая глава обосновывает объект и архитектуру ИИУС, вторая глава формирует

математические модели и критерии, третья глава разрабатывает методику мониторинга, агрегирования и предиктивного обслуживания, а четвёртая глава содержит экспериментальную проверку и практические рекомендации.

1.3 Архитектура ИИУС производственно-технологического комплекса приборостроения

Под информационно-измерительной и управляющей системой ПТК приборостроения понимается программно-аппаратный комплекс, объединяющий сбор, синхронизацию и фильтрацию измерительных данных с их интерпретацией и последующим применением для управления техническим состоянием оборудования и качеством выпускаемой продукции. От изолированной системы сбора данных её отличает необходимость замыкать контур – измерение, оценка состояния, прогноз, решение, воздействие.

При построении архитектуры такой системы приходится учитывать четыре особенности приборостроительных ПТК.

Первая – неоднородность источников данных, так как одновременно используются аналоговые датчики, цифровые каналы станков, системы технического зрения, результаты контрольных измерений, журналы технологических режимов и экспертно-регламентные оценки.

Вторая особенность заключается в том, что каналы различаются частотой обновления и достоверностью. Третья касается способа получения параметров, где часть измеряется непосредственно в процессе использования, другая доступна лишь через модельные оценки – например, через цифровой двойник или нейросетевой прогноз. Четвёртая особенность – это требования к управляющему решению оставаться интерпретируемым для инженерно-технического персонала и согласованным с действующими регламентами контроля.

Исходя из этого можно сделать вывод что ИИУС ПТК работает как совокупность взаимосвязанных подсистем измерения, предварительной обработки, цифрового двойника, статистического контроля, оценки рисков и поддержки принятия решений. Концепция предлагаемого решения определяется следующим.

На вход ИИУС поступает множество измерительных потоков по формуле:

$$Z(t) = \{z_1(t), z_2(t), \dots, z_r(t)\}, \quad (1.5)$$

где $z_j(t)$ – исходный измерительный поток j -го канала для r параметров.

$$z_j(t) = \{y_j(t), f_j, \Delta t_j, \delta_j, p_{miss,j}, r_j(t)\}. \quad (1.6)$$

где $y_j(t)$ – измеренное значение параметра;

f_j – частота опроса канала;

Δt_j – шаг дискретизации по времени;

δ_j – заявленная погрешность измерения;

$p_{miss,j}$ – вероятность пропуска отсчёта;

$r_j(t)$ – текущий коэффициент достоверности канала.

Потребность в таком описании вытекает из дальнейшего применения данных так как они нужны не только для визуального мониторинга, но и для расчёта интервальных оценок состояния. Измерения выполняются с погрешностью, но модель при этом имеет вид:

$$O_j(t) = [y_j(t) - \delta_j(t), y_j(t) + \delta_j(t)]. \quad (1.7)$$

Особое место в архитектуре занимает блок предварительной обработки, на который возложены проверка корректности приёма данных, синхронизация временных меток, фильтрация выбросов, восстановление пропусков, нормализация параметров и расчёт показателей достоверности. Для приборостроительных ПТК значение этого блока трудно переоценить, так как измерительные каналы здесь различаются шкалами, классами точности и временными задержками.

Целевой состав функциональных подсистем ИИУС ПТК приборостроения, включающий модели и алгоритмы, разрабатываемые в главах 2 и 3, представлен в таблице 5.

Таблица 5 – Функциональные подсистемы ИИУС ПТК приборостроения

Подсистема ИИУС	Входные данные	Выходные данные	Основная функция
Измерительная подсистема	Сигналы датчиков, данные станков, результаты контроля	Временные ряды $Z(t)$	Получение первичных данных

Продолжение таблицы 5

Подсистема ИИУС	Входные данные	Выходные данные	Основная функция
Предобработка	$Z(t)$, метаданные каналов	Очищенные и синхронизированные данные	Фильтрация, нормализация, оценка достоверности
Гибридный цифровой двойник	Данные мониторинга, физическая модель, режимы	Y_{hyb} , Y_{res} , σ , RUL	Прогноз состояния и неопределенности
Статистический контроль	σ , q_0 , q_1 , L_0 , L_1 , A	План контроля n, k ; критерий Q	Выбор характеристик контроля
Оценка рисков	$P_i(t)$, $C_i(t)$, интервалы состояния	Динамическая зона риска	Риск-ориентированное решение
Поддержка решений	$O^*(t)$, $S(t)$, Q , риск	Управляющее действие	Регулировка, ТО, останов

Модельный уровень ИИУС представлен гибридным цифровым двойником, объединяющим физическую модель и нейросетевую коррекцию невязки, как показано на схеме рисунка 7, а детальная разработка модели приведена в разделе 2.6.

Статистический уровень архитектуры обеспечивает расчет характеристик плана контроля. Для традиционной СМУ и уточнённых СМУ 1/СМУ 2 средние длины серий выборок L_0 и L_1 зависят от характеристик контрольной карты, параметров разладки и механизма изменения распределения контролируемого параметра [48]. Эти зависимости далее используются для расчета критерия Q и стоимостного функционала оптимизации плана контроля.

Рисковый уровень архитектуры связан с динамической матрицей рисков. Связка цифрового двойника, LSTM-прогноза вероятности отказа и динамической матрицы рисков предложена в работе [49]. Такой подход согласуется с общей архитектурой работы, поскольку переводит прогноз технического состояния в инженерно понятную область решения – плановое обслуживание, повышенный мониторинг, внеплановое ТО или останов. Этот блок следует использовать как развитие управляющего уровня ИИУС, а не как отдельный несвязанный результат.

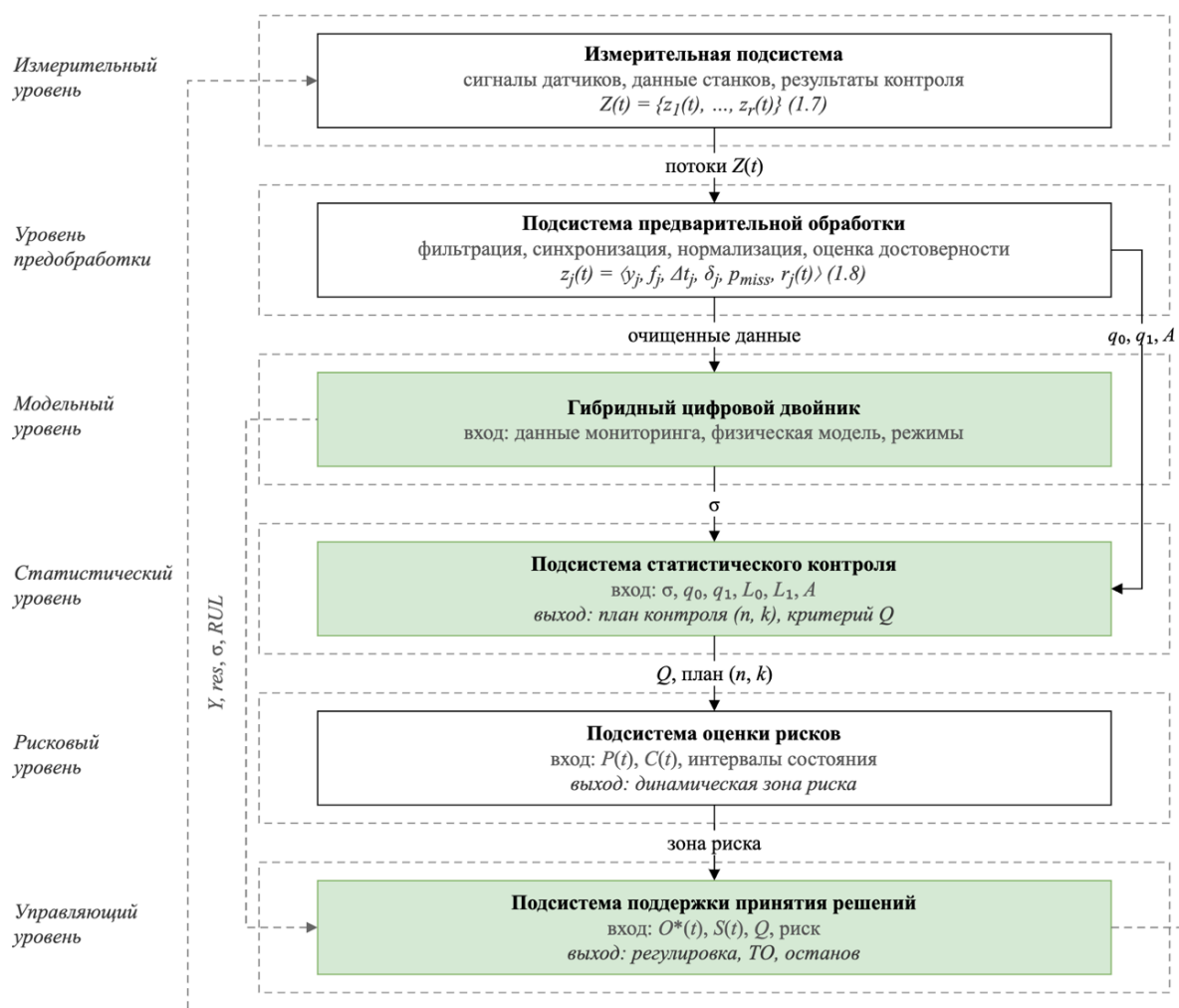


Рисунок 7 – Многоуровневая архитектура ИИУС ПТК приборостроения

Представленная архитектура описывает состав и связи подсистем, но не даёт критериев, по которым можно проверить корректность конкретных проектных решений, принимаемых при разработке моделей в главах 2 и 3 – например, почему выбрана та или иная статистическая модель управления или почему агрегирование должно учитывать достоверность источников. Чтобы сделать эти критерии явными и проверяемыми, ниже сформулированы требования к ИИУС ПТК, вытекающие из особенностей объекта управления и из структуры научных результатов работы.

Сформулированные требования к ИИУС ПТК обобщены в таблице 6.

Таблица 6 – Требования к ИИУС ПТК приборостроения

Требование	Содержание	Причина необходимости
Синхронизация данных	Приведение измерений к единой временной шкале	Разные каналы имеют задержки и частоты обновления

Продолжение таблицы 6

Требование	Содержание	Причина необходимости
Учет неопределенности	Переход от точечных значений к интервалам	Погрешность измерений и неопределенность прогноза
Интерпретируемость	Сохранение физической части модели	Необходимость инженерного доверия к решению
Связь с качеством	Оценка влияния состояния на уровень брака	Цель управления – выпуск годной продукции
Риск-ориентированность	Учет вероятности и последствий отказа	Не все отклонения одинаково опасны
Ситуационное управление	Выбор действия по S_0 - S_3	Переход от мониторинга к управлению

Из требований, обобщённых в таблице 6, следует, что архитектура ИИУС ПТК должна обеспечивать не только сбор данных, но и их преобразование в значимую информацию, на основе которой будет формироваться управленческое решение. Для этого в системе должны быть реализованы три перехода – от измерений к состоянию, от состояния к критерию эффективности и от критерия и ситуации к управляющему воздействию. Именно эти переходы определяют последовательность дальнейшего изложения.

Первый из этих переходов обеспечивают блок гибридного цифрового двойника и предварительная обработка данных, второй реализуется через критерий среднего уровня брака Q совместно с уточнёнными статистическими моделями управления, а третий формируется методикой робастного агрегирования интервальных оценок и ситуационной классификацией S_0 - S_3 . Взятые вместе, перечисленные элементы образуют научно-методический инструментарий управления ПТК.

1.4 Задачи поддержки принятия решений в ИИУС ПТК

Информационно-измерительная и управляющая система производственно-технологического комплекса не сводится к регистрации параметров оборудования. В условиях цифровизации приборостроительного производства от неё требуется преобразование первичных измерений в управленчески значимые решения, а именно установить, находится ли объект в налаженном состоянии, выявить

разладку, оценить приближение предотказного состояния, сформировать рекомендацию по регулировке или обслуживанию.

В классической постановке статистического управления технологическим процессом сигналом к вмешательству служит выход контролируемой статистики за границы регулирования; этому принципу отвечают классические контрольные карты Шухарта – самый простой и широко применяемый инструмент статистического управления процессом, где границы регулирования определяются через среднее значение и среднее квадратическое отклонение контролируемого параметра [50]. Однако для приборостроительных ПТК такого подхода не всегда достаточно, поскольку разладка здесь способна проявляться не только сдвигом математического ожидания, но и ростом межпартийной дисперсии, а решение о вмешательстве нередко приходится принимать раньше, чем статистика достигнет границы – по прогнозу деградации и оценке риска отказа.

Учитывая сказанное, далее предлагается ситуационный подход [51, 52] к поддержке принятия решений. Ситуацией называется формализованное описание текущего состояния ПТК на основе данных измерений, истории наблюдений, выходных значений цифрового двойника, статистических характеристик плана контроля, уровня риска. Пороговое правило допускает лишь одно основание для действия. Ситуационный подход шире – он позволяет назначать разные управляющие действия в зависимости от совокупности признаков.

Формально ситуация в момент времени t задается кортежем по формуле:

$$S(t) = \langle O^*(t), Q(t), R(t), RUL(t), L_0(t), L_1(t), B(t) \rangle, \quad (1.8)$$

где $O^*(t)$ – агрегированная интервальная оценка технического состояния ПТК;

$Q(t)$ – расчетный средний уровень брака за межрегулировочный период;

$R(t)$ – интегральная оценка эксплуатационного или интеграционного риска;

$RUL(t)$ – прогноз остаточного ресурса;

$L_0(t), L_1(t)$ – средние длины серий при налаженном и разлаженном состояниях;

$B(t)$ – среднее число партий или циклов, изготавливаемых при налаженном ПТК.

Такой состав ситуации выбран потому, что он объединяет результаты всех основных блоков работы и позволяет связать диагностику с управлением.

Решение ИИУС в ситуационной постановке определяется отображением по формуле:

$$D(t) = \Psi(S(t), \Omega, C), \quad (1.9)$$

где Ψ – правило принятия решения;

Ω – множество технологических, метрологических и организационных ограничений;

C – множество допустимых управляющих действий.

К таким действиям относятся сохранение текущего режима контроля, сужение или расширение контрольных границ, изменение объема выборки, запуск регулировки, назначение предиктивного обслуживания, перевод оборудования в режим повышенного мониторинга или аварийный останов.

Предлагаемая структура поддержки принятия решений имеет два уровня. Нижний уровень реализует вычисление диагностических и статистических признаков. Он работает с измерительными потоками, цифровым двойником, контрольными картами, оценкой средних длин серий и рисковыми индексами. Верхний уровень осуществляет ситуационную классификацию и выбирает управляющее действие. Такое разделение позволяет не смешивать задачу вычисления признаков с задачей принятия решения и упрощает последующую программную реализацию.

Важно подчеркнуть, что ситуационная классификация не заменяет статистическое управление, а надстраивается над ним. Критерий Q и статистические модели управления определяют количественные характеристики контроля, а ситуационная логика определяет, когда и какое действие должно быть выполнено. Например, если агрегированная оценка состояния остается в зоне S_0 , ИИУС сохраняет текущий план контроля. Если фиксируется переход в S_1 , выполняется пересчет характеристик плана контроля по критерию Q и может быть

назначена регулировка. При переходе в S_2 приоритет получает предиктивное обслуживание, поскольку задача состоит уже не только в снижении брака, но и в предотвращении отказа оборудования.

Для обоснования выбора ситуационного подхода, был проведен анализ известных методов поддержки принятия решений, которые применяются или упоминаются далее в работе – пороговым правилом, контрольными картами, экспертными методами FMEA [53] и FTA [54], нейросетевым прогнозированием и динамической матрицей рисков. Сравнение этих методов по используемой информации, преимуществам и ограничениям для ПТК приборостроения приведено в таблице 7.

Таблица 7 – Сравнение подходов к поддержке принятия решений в ИИУС ПТК

Метод поддержки решений	Используемая информация	Преимущества	Ограничения для ПТК
Пороговое правило	Один контролируемый параметр и фиксированный порог	Простота реализации, высокая скорость реакции	Не учитывает историю, неопределенность и конфликт каналов
Контрольные карты	Выборочные средние, дисперсии, контрольные границы	Статистическая интерпретация ошибок первого и второго рода	Требует корректной модели разладки
FMEA/FTA	Экспертная структура отказов и последствий	Понятность для инженерного персонала	Статичность, слабая связь с текущими данными ИИУС
Нейросетевой прогноз	История временных рядов и признаки деградации	Учет нелинейности и долгосрочных зависимостей	Необходимость обучения и контроля интерпретируемости
Динамическая матрица рисков	Вероятность отказа, последствия, критичность объекта	Связывает риск с управляющим действием	Требует достоверной оценки вероятности отказа
Предлагаемый ситуационный подход	$O^*(t), Q(t), R(t), RUL(t), L_0, L_1$	Увязывает мониторинг, статистический контроль, риск и управление	Требует согласования порогов и правил перехода

В таблице 7 показано, что каждый из известных подходов решает только часть общей задачи. Пороговые правила удобны для оперативного контроля, но слишком грубы для многоканальных данных. Контрольные карты обеспечивают строгую статистическую базу, однако их эффективность зависит от правильного выбора модели разладки. FMEA и FTA хорошо описывают последствия отказов, но

являются статическими и не отражают текущую траекторию деградации. Нейросетевые модели и цифровые двойники дают прогноз, но сами по себе не определяют план контроля и экономически обоснованное управляющее действие. Поэтому далее используется интегральная ситуационная схема, в которой перечисленные инструменты не конкурируют, а выполняют разные функции в едином контуре ИИУС.

Ситуационное решение удобно представить через четыре класса S_0 - S_3 . Для каждого класса задаются диагностические признаки, критерии перехода и управленческая реакция. Такая форма особенно полезна для приборостроительных ПТК, поскольку позволяет различать разладку технологического процесса и предотказное состояние оборудования. Эти явления близки, но разладка может приводить к росту брака без немедленного отказа оборудования, а предотказное состояние может быть связано с деградацией узла, которая пока не проявилась в выпуске брака, но требует обслуживания.

Соответствие ситуаций S_0 - S_3 диагностическим признакам и управляющим действиям приведено в таблице 8.

Таблица 8 – Ситуации S_0 - S_3 и управляющие действия ИИУС ПТК

Состояние	Содержательная интерпретация	Основные признаки	Решение ИИУС
S_0	Налаженное состояние	Показатели качества и риска находятся в пределах нормы	Сохранить текущий план контроля; продолжить мониторинг
S_1	Разладка технологического процесса	Признаки статистической разладки технологического процесса	Пересчитать n и k ; выполнить регулировку; усилить контроль
S_2	Предотказное состояние	Признаки приближения предотказного состояния оборудования	Назначить предиктивное ТО; подготовить резерв; ограничить режим
S_3	Отказ или недопустимый риск	Признаки критического или аварийного состояния	Останов, ремонт, исключение некорректных данных из обучения

Переходы между состояниями должны быть формализованы не только по точечным значениям признаков, но и по интервальным оценкам. Это связано с тем, что измерительная информация поступает с погрешностью, а прогноз цифрового двойника имеет неопределенность. Поэтому для состояния $S(t)$ целесообразно использовать агрегированный интервал $O^*(t) = [x_1(t), x_2(t)]$. Если верхняя граница

интервала приближается к границе предотказного состояния, ИИУС должна инициировать раннее предупреждение даже тогда, когда центр интервала еще не пересек порог. Такой подход снижает риск пропуска опасного состояния и согласуется с задачей предиктивного обслуживания.

Переход между ситуациями формализуется пороговыми областями H_0 , H_1 , H_2 в пространстве нормированного индекса технического состояния $H(t)$. Полное правило классификации, связывающее эти пороги с показателями остаточного ресурса и эксплуатационного риска, разрабатывается в разделе 3.8.

Порог H_0 обозначает границу нормальной эксплуатации, H_1 – границу предотказной зоны, H_2 – критическую границу, а $R_{кр}$ – критический уровень риска. Значения H_0 , H_1 , H_2 назначают по эксплуатационной статистике оборудования, технологическим допускам, регламентам обслуживания и допустимому уровню брака, поэтому в методике они выступают настраиваемыми параметрами, конкретные значения которых задают при внедрении на ПТК.

Ситуационный подход помимо прочего связан с динамической оценкой рисков. Риск отдельного объекта мониторинга определяется как произведение вероятности отказа на дискретный уровень последствий, а интегральный риск ПТК – как взвешенную сумму рисков входящих в его состав объектов [49]. Такая модель динамической оценки рисков разрабатывается в разделе 2.7.

Если риск переходит из допустимой зоны в нежелательную или недопустимую, ситуационный блок ИИУС должен инициировать переход из S_1 в S_2 или из S_2 в S_3 . Таким образом, динамическая матрица рисков не является самостоятельной надстройкой, а включается в общую методику принятия решений.

Поддержка принятия решений в ИИУС ПТК в общем виде опирается на последовательное формирование признаков состояния по данным измерительных каналов и цифрового двойника, расчёт статистических показателей и оценок риска, согласование разнородных оценок в единую интервальную характеристику, определение текущей ситуации и выбор соответствующего управляющего действия с последующей обратной связью для уточнения модели. Программно-алгоритмическая реализация этой последовательности представлена в разделе 3.6.

На рисунке 8 показан общий контур ситуационной поддержки принятия решений. Его принципиальная особенность состоит в наличии обратной связи – после выполнения регулировки, технического обслуживания или останова в систему возвращается информация о фактическом эффекте действия. Благодаря этому ИИУС получает возможность корректировать не только текущие оценки состояния, но и параметры цифрового двойника, статистических моделей и порогов ситуационной классификации.

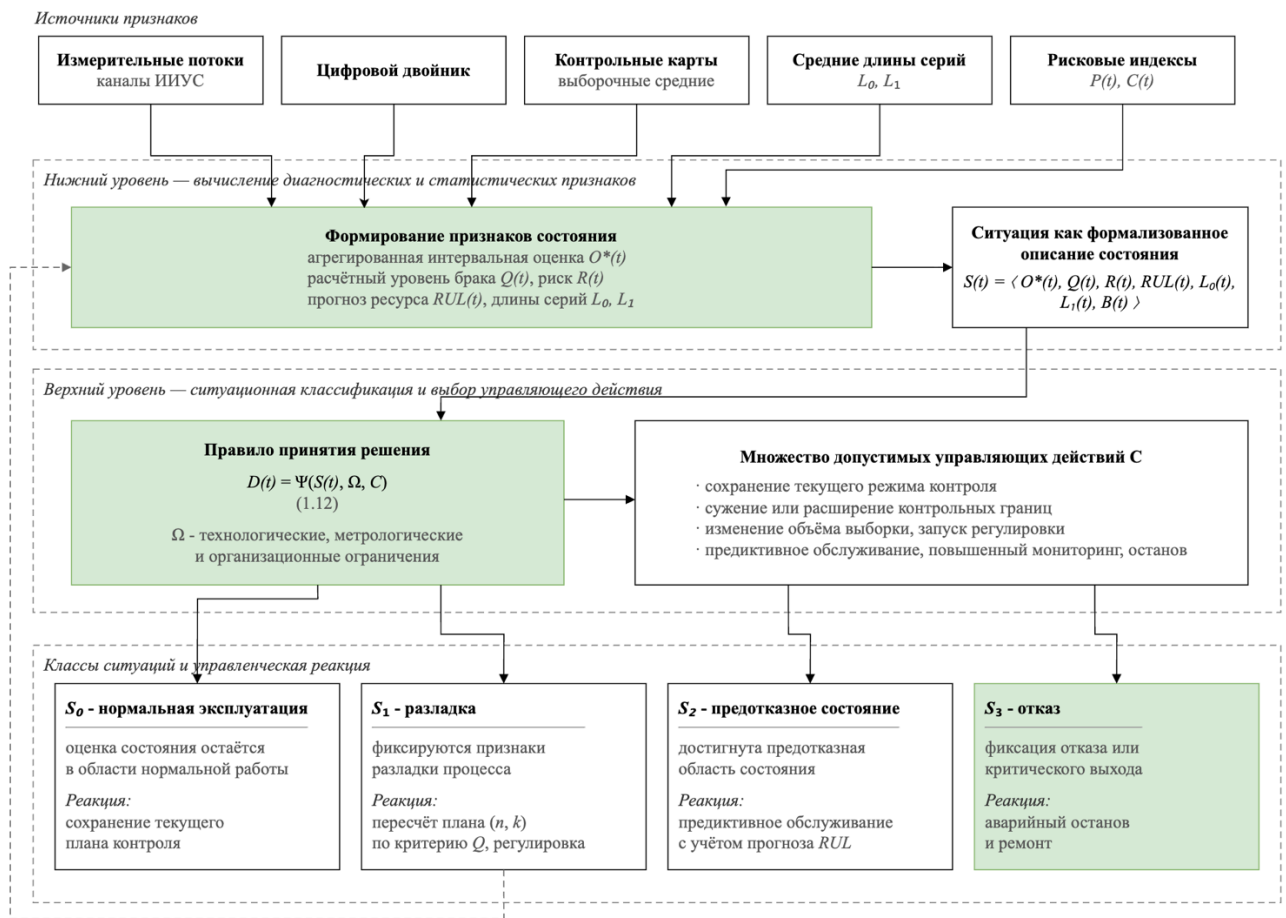


Рисунок 8 – Структура ситуационной поддержки принятия решений в ИИУС ПТК

Методика принятия решений должна учитывать, что разные управляющие действия имеют различную стоимость и различное время реализации. Сужение контрольных границ относительно дешево, но может увеличить число ложных сигналов. Увеличение объема выборки повышает достоверность контроля, но увеличивает затраты и время измерений. Регулировка оборудования может снизить уровень брака, но приводит к остановке или переналадке. Предиктивное обслуживание требует планирования ресурсов, зато предотвращает аварийный

отказ. Поэтому блок принятия решений должен работать не только по принципу «обнаружено/не обнаружено», но в том числе с учетом критерия эффективности и риска.

1.5 Методы обработки первичных данных для оценки технического состояния ПТК

Точность прогнозирования и обоснованность принимаемых решений в ИИУС ПТК определяются в первую очередь качеством первичных данных, поступающих на вход расчётного контура. Измерительная информация в приборостроительном производстве разнородна – часть параметров поступает от аналоговых датчиков, часть от цифровых контроллеров, часть формируют программные модели, а часть задают экспертно-регламентные процедуры.

В задачах предиктивного обслуживания и статистического управления ошибки первичной обработки особенно опасны. Несогласованность временных меток способна породить ложную корреляцию между параметрами и пропуски данных при этом нередко принимают за стабилизацию состояния. Выбросы в свою очередь вызывают ложную тревогу и ненужную регулировку, а избыточное сглаживание удаляет слабые признаки начальной деградации. Отсюда вытекает требование к обработке данных в ИИУС ПТК с необходимостью подавлять помехи, сохраняя при этом диагностически значимую информацию и обеспечивая целостность данных.

Чтобы устранить перечисленные источники ошибок, обработку данных формализуют как последовательность из пяти шагов – описание исходного измерительного потока, приведение каналов к единой временной сетке, фильтрацию аномальных наблюдений, нормализацию и переход к интервальному представлению измерения.

Исходный измерительный поток j -го канала в общем виде задают последовательностью по формуле:

$$Z_j = \{(t_k, y_j(t_k), \delta_j(t_k), s_j(t_k))\}_{k=1}^{N_j}, \quad (1.10)$$

где t_k – момент k -го измерения;

$y_j(t_k)$ – измеренное значение;

$\delta_j(t_k)$ – погрешность измерения в этот момент;

$s_j(t_k)$ – статус валидности отсчёта (1 – валидно, 0 – пропуск или брак);

N_j – общее число измерений j -го канала.

Чтобы обрабатывать многоканальные данные совместно, их приводят к единой временной сетке $T = \{\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_N\}$. Синхронизированное значение j -го канала записывают как:

$$\tilde{y}_j(\tau_k) = A_j(Z_j, \tau_k), \quad (1.11)$$

где A_j – оператор синхронизации j -го канала к сетке T .

После синхронизации выполняют фильтрацию и проверку аномальных наблюдений. Простейший вариант сводится к выявлению выброса по робастному z -критерию [55]:

$$z_j^{rob}(\tau_k) = \frac{|\tilde{y}_j(\tau_k) - med(\tilde{y}_j)|}{1,4826 \cdot MAD_j}, \quad (1.12)$$

где MAD_j – медианное абсолютное отклонение по выбранному окну. В программной реализации MAD домножают на коэффициент 1,4826 – это стандартный множитель состоятельности, приравнивающий MAD к среднеквадратическому отклонению для нормально распределённых данных. Наблюдение считается подозрительным, если z_j превышает пороговое значение $z_{крит}$ (принято $z_{крит} = 3,5$). При наличии выбросов медианная мера отклонения предпочтительна, а среднее и стандартное отклонение сами искажаются аномальными значениями. Далее следует нормализация. Признаки, используемые цифровым двойником и нейросетевым модулем, приводят к нормированной форме:

$$\hat{y}_j(t) = \frac{\tilde{y}_j(t) - \mu_j}{\sigma_j}, \quad (1.13)$$

где μ_j и σ_j вычисляются по участку налаженной работы или по обучающей выборке. При этом значения μ_j и σ_j должны регулярно пересматриваться, поскольку в условиях деградации оборудования и изменения режимов возможен концептуальный дрейф данных. Если нормировка остается фиксированной слишком долго, ИИУС может начать интерпретировать изменение режима как аномалию или, наоборот, пропускать деградацию.

С третьим научным результатом обработку данных связывает интервальное представление, при котором каждое измерение задаётся не точкой, а интервалом:

$$O_j(t) = [\hat{y}_j(t) - \kappa_j \delta_j(t), \hat{y}_j(t) + \kappa_j \delta_j(t)], \quad (1.14)$$

где κ_j – коэффициент доверия или масштабирования неопределенности. Именно такие интервалы далее поступают в блок робастного агрегирования. Поэтому интервальное представление не является декоративным: оно обеспечивает формальную передачу метрологической неопределенности из измерительного уровня в уровень принятия решений.

$$r_j(t) = r_j^{miss}(t) \cdot r_j^{noise}(t) \cdot r_j^{sync}(t) \cdot r_j^{phys}(t), \quad (1.15)$$

где r_j^{miss} отражает наличие пропусков;

r_j^{noise} – уровень шума;

r_j^{sync} – качество синхронизации;

а r_j^{phys} – физическую согласованность с моделью исправного состояния.

Коэффициент определяет вес источника при агрегировании интервальных оценок, благодаря чему вклад недостоверных каналов снижается без вмешательства оператора.

Описанная последовательность обработки данных обобщена в таблице 9, где для каждого этапа указаны вход, основная операция, выход и значение для дальнейшего исследования.

Таблица 9 – Последовательность обработки первичных данных в ИИУС ПТК

Этап обработки	Вход	Основная операция	Выход	Значение для исследования
Сбор данных	Аналоговые и цифровые сигналы	Регистрация значений и меток времени	Z_j	Формирует измерительную основу ИИУС
Синхронизация	Разновременные потоки	Приведение к единой сетке времени	u_j	Устраняет рассогласование каналов
Фильтрация	Зашумленные значения	Удаление помех и выбросов	Очищенный ряд	Снижает ложные тревоги
Восстановление пропусков	Ряды пропусками	Интерполяция или модельная реконструкция	Полный ряд	Обеспечивает непрерывность цифрового двойника

Продолжение таблицы 9

Этап обработки	Вход	Основная операция	Выход	Значение для исследования
Нормализация	Очищенные значения	Приведение к сопоставимым шкалам	$\hat{y}_j(t)$	Позволяет объединять разнородные признаки
Интервализация	$\hat{y}_j(t), \delta_j(t)$	Формирование $[a_j, b_j]$	O_j	Передает неопределенность в метод агрегирования
Оценка достоверности	Статусы и качество данных	r_j	Вес канала	Используется в робастном агрегировании

Таблица 9 показывает, что обработка первичных данных представляет собой не один фильтр, а цепочку преобразований. Каждый этап должен сохранять информацию, необходимую для последующего управления. Например, при восстановлении пропусков важно не просто заполнить отсутствующие значения, но и передать в систему признак того, что значение восстановлено, а не измерено. В противном случае цифровой двойник и блок агрегирования будут рассматривать синтетически восстановленный канал как полностью достоверный, что может привести к завышенной уверенности решения.

Отдельного внимания заслуживает межсенсорная согласованность. Когда два канала измеряют физически связанные явления, например рост вибрации и разогрев узла трения – их динамика должна оставаться согласованной в пределах допустимого временного лага. Для пары каналов j и l вычисляют коэффициент согласованности:

$$\rho_{jl}(t) = \text{corr}(\varphi_j(t - w:t), \varphi_l(t - w:t)), \quad (1.16)$$

где $\rho_{jl}(t)$ – коэффициент согласованности между каналами j и l ; φ_j, φ_l – нормированные сигналы этих каналов (см. формулу 1.13); w – ширина скользящего окна корреляции, число отсчётов. Снижение $\rho_{jl}(t)$ ниже порогового значения 0,7 указывает на конфликт источников, который учитывается штрафным слагаемым в целевой функции агрегирования (раздел 3.7).

Ключевое значение для цифрового двойника имеет невязка, то есть разность между измеренным параметром и прогнозом модели исправного состояния:

$$e_j(t) = \hat{y}_j(t) - \hat{y}_{j,phys}(t). \quad (1.17)$$

Если физическая модель корректно описывает исправное состояние, рост невязки становится диагностическим индикатором деградации. Отождествлять невязку с повреждённостью некорректно, так как в неё входят шум датчика, ошибка синхронизации, изменение режима, неполнота самой физической модели что в конечном итоге приведет к деградации. По указанной причине использованию невязки как признака предшествует проверка качества данных и режимной сопоставимости.

Первичная обработка данных включает четыре функции: подготовка данных для гибридного цифрового двойника, формирование статистических параметров для расчёта плана контроля, построение интервальных оценок для робастного агрегирования и оценка достоверности данных для динамической матрицы рисков и ситуационного блока принятия решений. Такое распределение функций делает блок обработки данных сквозным элементом всей работы. На рисунке 9 представлена наглядная последовательность обработки первичных данных.

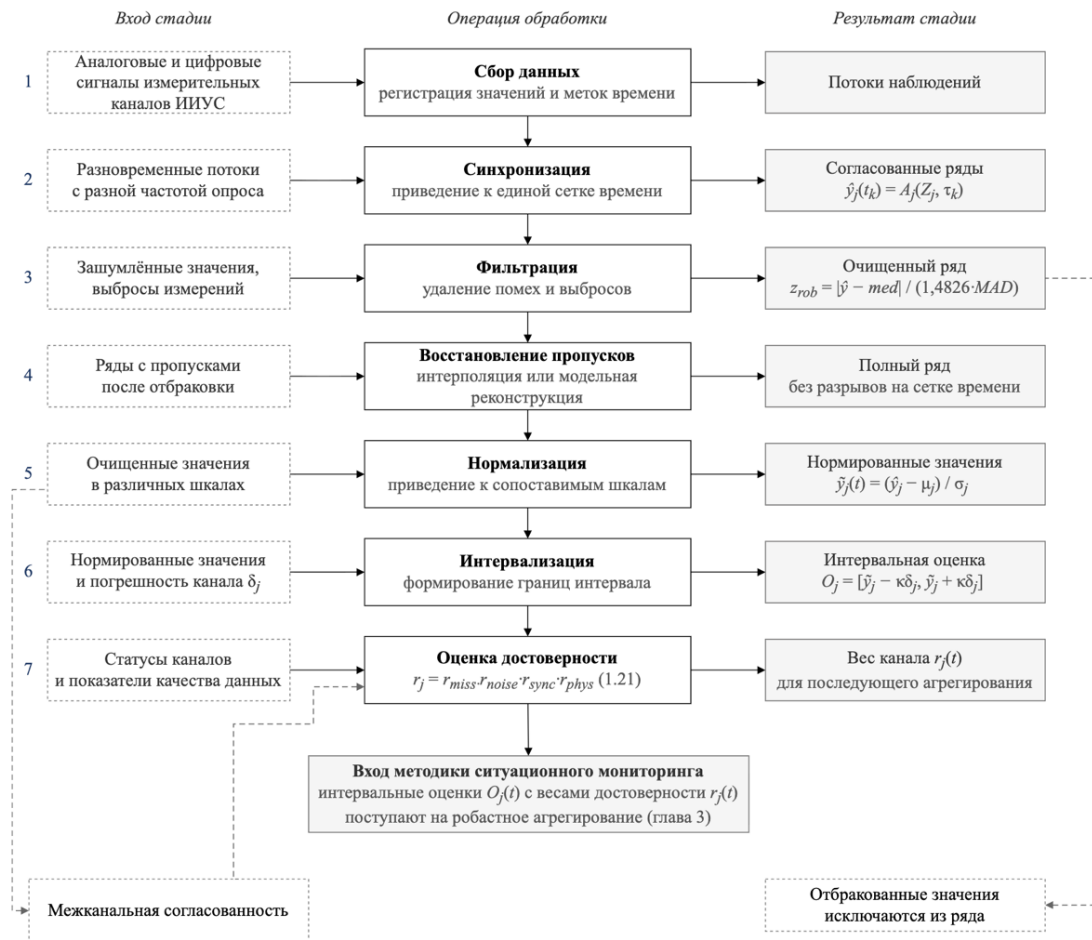


Рисунок 9 – Последовательность обработки первичных данных в ИИУС ПТК

Показатели качества данных измерительных каналов и реакция на них ИИУС обобщены в таблице 10. Приведённые формулы носят пояснительный характер: часть индикаторов (в частности, физическая несогласованность) вычислима только после появления прогноза физической модели, формально вводимой в разделе 2.6; до этого момента соответствующая строка таблицы читается как целевой ориентир, а не как действующая на данном этапе процедура.

Таблица 10 – Показатели качества данных и реакция ИИУС ПТК

Показатель качества данных	Обозначение	Возможная формула	Негативное проявление	Реакция ИИУС
Доля пропусков	p_{miss}	$\frac{N_{miss}}{N}$	Разрыв временного ряда	r_j
Уровень шума	v_j	$\frac{std(\varepsilon_j)}{std(y_j)}$	Рост случайных колебаний	O_j
Синхронность	s_j	$\frac{ \Delta t_j }{T_k}$	Смещение причинно-следственных связей	Повторная синхронизация
Робастный выброс	z^{rob}	$\frac{ y - med }{1,4826 \times MAD}$	Ложная тревога	Маркировка выброса, снижение веса
Межсенсорный конфликт	κ_{conf}	$1 - \rho_{jl}$	Противоречие каналов	Активация робастного агрегирования
Физическая несогласованность	e_j	$y_j - y_{phys}$	Рост невязки	Проверка режима, диагностика деградации

Показатели качества данных, которые целесообразно хранить вместе с измерительными значениями, сведены в таблице 10. Их хранение повышает прозрачность работы ИИУС. Система выдаёт не только итоговое решение, но и его обоснование – причину малого веса канала, причину перехода к робастной постановке, причину повторной синхронизации.

Программно блок обработки данных реализуется набором функций, работающих с таблицей временных рядов. Ниже приведён фрагмент кода, иллюстрирующий формирование интервальных оценок и коэффициента достоверности канала. Полный листинг вынесен в Приложение А.

Листинг 1.1 – Пример формирования интервальных оценок и коэффициентов достоверности канала

```

import numpy as np
def build_interval(y, delta, k=1.0):
    lower = y - k * delta
    upper = y + k * delta
    return lower, upper

def robust_z_score(y):
    med = np.nanmedian(y)
    mad = np.nanmedian(np.abs(y - med))
    return np.abs(y - med) / (1.4826 * mad + 1e-9)

miss = np.mean(np.isnan(y))
zrob = robust_z_score(y)
outliers = np.mean(zrob > zcrit)

```

Листинг отражает лишь базовую логику. Промышленная реализация дополнительно учитывает тип датчика, физические ограничения параметра, режим оборудования, допустимые скорости изменения и возможность восстановления данных по связанным каналам. Тем не менее эта схема показывает связь первичной обработки с последующими математическими моделями работы.

Подготовленный блок обработки данных обеспечивает входы для трёх последующих направлений работы – гибридного цифрового двойника, уточнённых статистических моделей управления и методики ситуационного мониторинга.

1.6 Локализация критических неисправностей и измерение характеристик состояния ПТК

Разработка моделей и методик управления техническим состоянием ПТК требует четкого понимания того, что именно возникают неисправности, какими средствами ИИУС могут быть получены данные и характеристики состояния оборудования и как сформировать синергию разных наблюдательных групп в единый расчетный аппарат. Без такого анализа выбор источников интервальных оценок и параметризация физической модели цифрового двойника оказываются произвольными.

1.6.1 Наиболее вероятные места возникновения критических неисправностей

Под критической неисправностью понимается отказ или предотказное состояние компонента ПТК, следствием которого является выход контролируемого параметра продукции за границы допуска либо вынужденная остановка

технологического процесса. Критичность определяется не тяжестью повреждения самого компонента, а тем, переносится ли это повреждение на характеристики выпускаемой продукции или на непрерывность работы комплекса.

Анализ состава ПТК приборостроения и практики эксплуатации оборудования показывает, что критические неисправности сосредоточены в ограниченном числе функциональных групп. К первой относятся вращающиеся узлы – подшипниковые опоры, шпиндельные узлы, валы, муфты, – которым свойственна постепенная деградация с накоплением повреждений. Это проявляется в виде роста вибрации и разогревом опор, а в конечной стадии приводит к потере точности обработки. Вторую группу составляют приводы и передаточные механизмы в виде электродвигателей, редукторов, винтовых передач, где деградация выражается увеличением люфта, изменением момента и дрейфом позиционирования. Третья группа объединяет направляющие и элементы базирования, износ которых непосредственно смещает геометрию обработки. Четвёртую образуют элементы измерительного тракта ИИУС – датчики, линии связи, каналы аналого-цифрового преобразования и их неисправность искажает картину состояния объекта, физически его не изменяя.

По характеру наблюдаемости первые три группы отличаются от четвёртой. Деградация механических узлов проявляется через физические величины, доступные прямому измерению. Неисправность измерительного канала обнаруживается иначе – лишь по рассогласованию с другими источниками данных. Это различие будет учтено при построении методики робастного агрегирования, где недостоверность источника трактуется как самостоятельное состояние, подлежащее выявлению, а не как случайная погрешность измерения.

Для настоящей работы существенно, что критические неисправности первой группы удовлетворяют трём условиям сразу: они развиваются постепенно и оставляют горизонт для предиктивного вмешательства, наблюдаемы штатными средствами измерения [56, 57] и допускают параметрическое описание физической моделью исправного состояния. Репрезентативным объектом экспериментальной

проверки в главе 4 выбран, соответственно, подшипниковый узел как типовой представитель вращающихся узлов технологического оборудования.

Вторым, дополняющим объектом экспериментальной проверки служит сборочно-монтажное оборудование электронных узлов приборостроения, так как в отличие от подшипникового узла, где разладка связана с механическим износом, здесь она формируется технологическим процессом пайки. Совместное использование двух объектов позволяет проверить методику на разных механизмах деградации и типах оборудования.

1.6.2 Измерение количественных и качественных характеристик технического состояния

Характеристики технического состояния ПТК принято делить на количественные и качественные. Первые получают прямым или косвенным измерением физических величин, вторые формируют в виде категориальных признаков либо экспертных суждений. Предполагается использовать обе группы, так как количественные характеристики обеспечивают воспроизводимость оценки, а качественные вносят информацию о факторах, лежащих вне измерительного тракта, – состоянии оснастки, качестве заготовок, особенностях партии.

Измеряют количественные характеристики следующими способами. Виброизмерение акселерометрами даёт спектральную картину, где зарождающиеся дефекты вращающихся узлов проявляются на характерных частотах, определяемых геометрией узла и частотой вращения. Термометрия опор фиксирует изменение теплового режима, сопровождающее ухудшение условий трения. Измерение потребляемого тока и момента привода отражает рост сопротивления движению. Прямые геометрические измерения контролируемого параметра продукции дают конечный результат технологического процесса и служат основой статистического контроля. Наконец, к производным количественным характеристикам относятся расчётные величины – невязка физической модели, оценка среднеквадратического отклонения контролируемого параметра и прогноз остаточного ресурса, формируемые цифровым двойником.

Качественные характеристики формируются двумя путями. Первый – категориальная классификация результатов осмотра и регламентных проверок, при которой состояние узла относится к одной из градаций упорядоченной шкалы. Второй – экспертная оценка технолога или диагноста, выражаемая в виде интервального суждения о состоянии узла. В обоих случаях качественная характеристика приводится к интервальной форме, сопоставимой с количественными оценками, что делает возможным их совместное агрегирование в рамках единой процедуры, изложенной в главе 3.

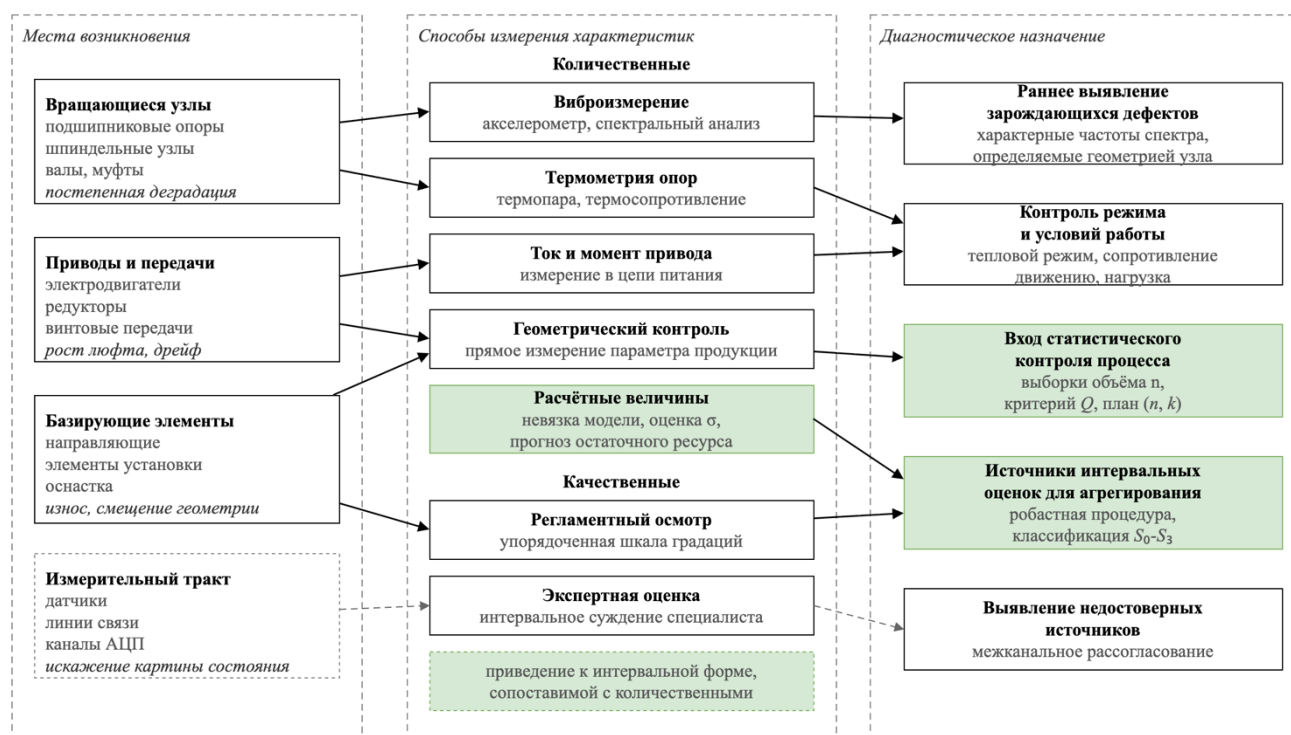


Рисунок 10 – Локализация критических неисправностей ПТК

Перечисленные количественные и качественные способы измерения сведены в таблице 11 с указанием их диагностического назначения для каждой характеристики технического состояния.

Таблица 11 – Способы измерения характеристик технического состояния ПТК

Характеристика	Способ измерения	Тип	Диагностическое назначение
Уровень вибрации	акселерометр, спектральный анализ	количественная	выявление зарождающихся дефектов вращающихся узлов
Температура опор	термопара, термосопротивление	количественная	контроль теплового режима и условий трения
Ток и момент привода	измерение в цепи питания	количественная	оценка роста сопротивления движению

Продолжение таблицы 11

Характеристика	Способ измерения	Тип	Диагностическое назначение
Контролируемый размер	прямое геометрическое измерение	количественная	вход статистического контроля процесса
Невязка модели, оценка σ	расчёт по цифровому двойнику	количественная (произв.)	индикатор накопления повреждений
Результат осмотра	регламентная проверка, шкала градаций	качественная	учёт факторов вне измерительного тракта
Экспертное суждение	интервальная оценка специалиста	качественная	разрешение неопределённости при неполных данных

1.6.3 Кластеризация мест критической уязвимости

Число точек, потенциально требующих контроля на реальном ПТК, велико, тогда как состав измерительных средств и вычислительный ресурс ИИУС ограничены. Поэтому необходима процедура сведения множества мест возможного возникновения критических неисправностей к обозримому числу кластеров, внутри каждого из которых применим единый расчётный аппарат – общая структура физической модели, общий тип статистической модели управления и общий набор диагностических признаков.

Кластеризация выполняется по трём признакам, отражающим не конструктивное сходство узлов, а сходство их поведения с точки зрения управления состоянием. Первый признак – постепенное накопление повреждений, приводящее к росту разброса контролируемого параметра, либо систематический дрейф, приводящий к смещению его среднего значения. Этот признак определяет выбор между статистическими моделями управления СМУ 1 и СМУ 2, введёнными в главе 2. Второй признак – доступность состояния узла прямому измерению, косвенному оцениванию или только экспертной оценке. Третий признак – переносится ли отказ узла на характеристики продукции, на непрерывность процесса или на достоверность самой измерительной информации.

Кластеризация разбивает места критической уязвимости на пять кластеров, представленные в таблице 12. Тот же принцип разделения по признакам, определяющим выбор СМУ 1 или СМУ 2, распространяется далее и на состав

источников интервальных оценок, и на допустимый горизонт предиктивного вмешательства – для каждого кластера они фиксируются заранее. Практический смысл такого разбиения – типовая настройка расчётного контура, применяемая не к комплексу как неструктурированному объекту, а к выделенным кластерам, благодаря чему её настройка станет воспроизводимой и переносимой между однотипными комплексами.

Приборостроение как отрасль включает не только производство прецизионных механических узлов, но и сборку электронных устройств, поэтому наряду с кластерами К1-К4 целесообразно выделить пятый кластер, образуемый сборочно-монтажным оборудованием электронных узлов приборостроения – линиями поверхностного монтажа, установщиками компонентов и печами оплавления. В отличие от кластеров К1-К3, где деградация связана с механическим износом, здесь разладка формируется технологическим процессом нанесения и пайки, а её механизм – рост разброса или дрейф термопрофиля – определяется конкретной операцией. Этот кластер послужит в главе 4 вторым, независимым объектом апробации методики и подтвердит применимость разработанного аппарата не только к оборудованию с механическим износом, но и к сборочно-монтажным процессам приборостроения. На рисунке 11 представлена кластеризация мест критической уязвимости ПТК приборостроения.



Рисунок 11 – Кластеризация мест критической уязвимости ПТК приборостроения по механизму деградации, наблюдаемости и критичности последствий

Выделенные кластеры мест критической уязвимости ПТК приборостроения сведены в таблице 12.

Таблица 12 – Кластеры мест критической уязвимости ПТК приборостроения

Кластер	Состав	Механизм деградации	Модель управления	Ведущий источник оценки
К1. Вращающиеся узлы	подшипниковые опоры, шпиндели, валы	накопление повреждений, рост разброса	СМУ 1	вибрационный канал, цифровой двойник
К2. Приводы и передачи	двигатели, редукторы, винтовые передачи	износ, люфта, дрейф среднего	СМУ 2	ток привода, геометрический контроль
К3. Базирующие элементы	направляющие, элементы установка	износ, систематическое смещение	СМУ 2	геометрический контроль, осмотр
К4. Измерительный тракт	датчики, линии связи, каналы АЦП	отказ, дрейф, потеря достоверности	вне СМУ	межканальная сверка, экспертная оценка
К5. Сборочно-монтажное оборудование	линии поверхностного монтажа, установщики компонентов, печи оплавления	рост разброса нанесения (СМУ 1) либо дрейф термопрофиля (СМУ 2)	СМУ 1 / СМУ 2	SPI, AOI, ICT, цифровой двойник

Особое положение занимает кластер К4. Неисправность измерительного тракта физического состояния оборудования не изменяет, однако искажает его наблюдаемую картину, поэтому статистические модели управления, построенные на предположении о достоверности исходных данных, к нему неприменимы. Обнаружение состояний этого кластера обеспечивает процедура оценки достоверности источников в составе робастного агрегирования, изложенная в подразделе 3.7, где недостоверный источник исключается из агрегирования по бинарному признаку включения.

Выполненная кластеризация завершает анализ объекта исследования. Были определены места вероятного возникновения критических неисправностей, установлены способы измерения характеристик их состояния, проведено разбиение на группы, для которых далее строится единый математический аппарат.

1.7 Сравнительный анализ подходов к управлению ПТК и постановка научной задачи

Проведённый анализ свидетельствует, что управление техническим состоянием ПТК некорректно сводить к какому-либо одному из известных частных подходов. Статистическое управление процессами хорошо описывает контрольные границы и средние длины серий, однако в традиционной постановке слабо различает физическую природу разладки. Прогнозные модели и цифровые двойники оценивают будущее состояние, но сами по себе критерия выбора плана контроля не задают. Риск-ориентированные схемы удобны для инженерной интерпретации последствий, а без связи с текущими данными ИИУС становятся статическими, а методы агрегирования информации позволяют объединять оценки, но не всегда доводят их до управленческого действия.

При расчёте плана статистического контроля ПТК приборостроения чаще всего исходят из того, что разладка проявляется единственным образом: среднее значение контролируемого параметра скачком сдвигается на новую отметку [58]. Традиционное статистическое управление процессами располагает формализованным аппаратом обнаружения разладки и выбора контрольных границ. Его классическое применение, однако, предполагает заранее выбранный механизм изменения контролируемого параметра так как в большинстве практических реализаций разладку трактуют как сдвиг математического ожидания. Физической природе ПТК приборостроения такая трактовка соответствует не всегда. При периодической переналадке режимов оборудования разладка проявляется в первую очередь ростом межпартийной дисперсии, а центр распределения остаётся практически неизменным.

То, что предложенный критерий связан с вероятностями ошибок контроля первого и второго рода, согласуется с практикой обоснования эксплуатационных допусков в смежных областях. Так, профилактические допуски рассчитывают с прямым учётом обеих ошибок контроля, причём упреждающий допуск составляет 60-80% от основного [57]. В терминологии исследования ошибке первого рода отвечает ложное срабатывание контроля, ограничиваемое требованием $L_0 \geq 100$, а

ошибке второго рода – пропуск разлаженного состояния, который характеризуется средней длиной серии L_1 , а при многоканальном мониторинге ещё и долей пропусков предотказных ситуаций. Принятое ограничение на L_0 вместе с используемой долей пропусков получает тем самым содержательное обоснование как прямой учёт обеих ошибок контроля.

Иную часть задачи решают методы предиктивного обслуживания, основанные на машинном обучении и цифровых двойниках позволяющие сформировать прогноз деградации, вероятности отказа и остаточного ресурса. Без связи с критерием эффективности контроля такие прогнозы, однако, остаются рекомендательными. Система предскажет рост риска, но не определит, как именно должны измениться параметры контроля, насколько допустимо расширить или сузить границы, когда требуется регулировка, а когда хватит усиленного мониторинга.

Отдельного упоминания заслуживают развиваемые в последние годы модели превентивной идентификации отказов. Так, для перспективных информационно-телекоммуникационных систем предложена кумулятивная модель отказа типа «параметр – поле допуска», дополненная вероятностно-графовой моделью на основе скрытых марковских моделей. Виды технического состояния отождествляются со скрытыми состояниями, которые идентифицируют по многомерным наблюдениям, обучая модель методом Баума-Уэлча и декодируя алгоритмом Витерби, а для численной оценки временных рядов метрик привлекают символическую динамику с топологической энтропией по Колмогорову [59]. Предлагаемый в настоящей работе подход тоже предполагает переход к обслуживанию по фактическому состоянию с зонированием полей допуска и выделением предотказных областей, однако опирается на существенно иной математический аппарат. Физически обоснованные прогнозные модели и их гибридизация с нейросетевой коррекцией невязки там не используются, а задача робастного агрегирования конфликтующих интервальных оценок нескольких измерительных каналов не решается. Предиктивная идентификация вида технического состояния и статистический выбор плана контроля в известных

работах остаются методически разобщёнными, что дополнительно подтверждает актуальность объединяющей постановки настоящего исследования.

Риск-ориентированные методы такие как FMEA, FTA и матрицы рисков удобны для инженерной интерпретации последствий отказов так как они связывают вероятность неблагоприятного события с уровнем последствий и позволяют назначить управленческое действие. Классические матрицы риска формируются, как правило, на этапе проектирования и в режиме эксплуатации не обновляются. Для ПТК, работающих в нестационарных условиях, такая статическая оценка быстро теряет актуальность. Отсюда потребность в динамической матрице рисков, актуализируемой по данным ИИУС и прогнозным выходам цифрового двойника.

Самостоятельную группу образуют методы агрегирования информации. В реальной ИИУС состояние оборудования оценивает не один канал, а пять источников сразу – вибрационный, температурный, токовый, цифровой двойник и экспертная оценка. Эти источники обновляются с разной частотой, обладают разной достоверностью и нередко расходятся между собой, поэтому простое усреднение их показаний способно скрыть опасное расхождение каналов – задача согласования подобных оценок рассматривается в разделе 3.7.

Отсюда вытекает основная постановка научной задачи. Предметом разработки выступает не отдельный алгоритм диагностики и не самостоятельный прогнозный модуль, а связанный научно-методический аппарат, где статистические модели управления, гибридный цифровой двойник, критерий среднего уровня брака, динамическая оценка рисков и робастное агрегирование интервальных оценок работают согласованно.

Обобщённое сопоставление рассмотренных подходов – статистического управления, предиктивного обслуживания, риск-ориентированных методов и методов агрегирования – по их основной идее, преимуществам и ограничениям для ПТК приборостроения приведено в таблице 13.

Таблица 13 – Сравнение подходов к управлению состоянием ПТК приборостроения

Подход	Основная идея	Преимущество	Ограничение
Статистическое управление процессами	Контроль картами выборочных средних, оценка L_0 и L_1	Формальная связь с браком и ложными сигналами	Зависит от модели разладки
Цифровой двойник	Синхронизация модели с данными объекта	Прогноз состояния и неопределенности	Требует параметризации и проверки
Предиктивное обслуживание	Прогноз деградации и RUL	Позволяет планировать ТО заранее	Не задает план контроля само по себе
Матрица рисков	Связь вероятности и последствий	Инженерная интерпретируемость	Статична без связи с ИИУС
Робастное агрегирование	Объединение интервалов от разных каналов	Учет неопределенности и конфликтов	Требует настройки штрафов

1.8 Обобщенная постановка научной задачи исследования

С учетом выявленных ограничений научная задача формулируется как разработка моделей, методики и алгоритмов управления техническим состоянием производственно-технологических комплексов приборостроения в составе ИИУС на основе обработки результатов диагностики, мониторинга и прогнозирования. В отличие от традиционной постановки, где сначала выполняется контроль, а затем по факту принимается решение о регулировке, в данной работе формируется предварительно рассчитанный контур. Данные ИИУС преобразуются в интервальные оценки состояния, цифровой двойник формирует прогноз и невязку, статистическая модель определяет задержку обнаружения разладки, критерий Q оценивает средний уровень брака, а ситуационный блок выбирает действие.

Формально задача может быть представлена следующим образом. Пусть на вход ИИУС поступает поток измерений $X(t)$, характеризующий состояние оборудования и качество выпускаемой продукции. На основе предобработки формируется очищенный и синхронизированный вектор признаков $Z(t)$. Требуется, чтобы гибридный цифровой двойник формировал прогноз состояния и оценку неопределённости, статистический блок рассчитывал параметры L_0 и L_1 , а риск-ориентированный блок оценивал вероятность перехода к опасным состояниям,

после чего требуется построить отображение управления, которое по совокупности этих величин формирует решение $D(t)$ по формуле:

$$D(t) = P_{si}(Z(t), Y_{hyb}(t), \sigma(t), RUL(t), Q(t), R_{sum}(t), O * (t)). \quad (1.18)$$

Решение $D(t)$ в данной постановке не является абстрактной рекомендацией оператора. Оно должно принадлежать заранее заданному множеству допустимых действий ИИУС с возможностью сохранения текущего плана контроля, пересчета характеристик (n, k) , регулировки технологического режима и назначения предиктивного обслуживания. Тем самым методика завершает цепочку от измерения к управлению.

Перечень частных задач, необходимых для достижения цели исследования, приведён во введении. Их решение обеспечивается последовательно материалом глав 2-4. В отличие от развёрнутой многоуровневой архитектуры на рисунке 11, рисунок 12 даёт компактную схему именно формулы (1.18) – трёх ветвей расчёта и их сведения в ситуационном блоке – и служит переходом к главе 2, где каждая ветвь получает математическое наполнение.

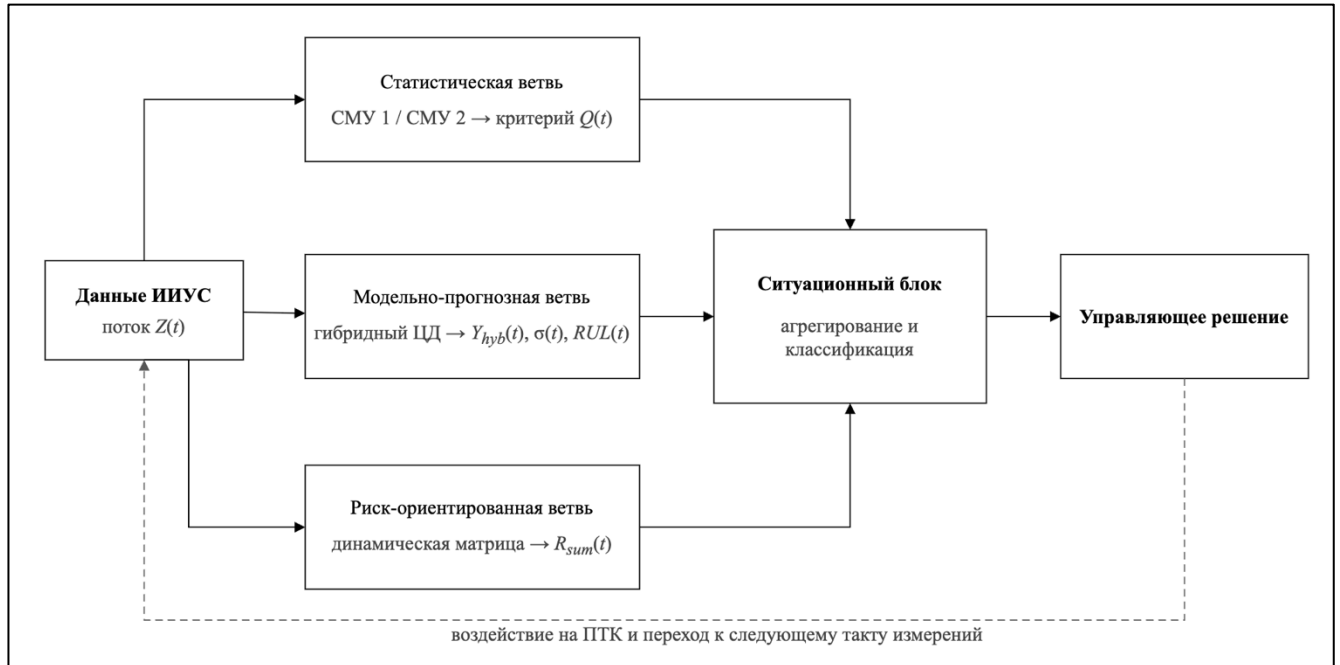


Рисунок 12 – Обобщенная постановка научной задачи исследования

1.9 Выводы по главе 1

В первой главе ПТК приборостроения рассмотрен как сложный объект информационно-измерительного и управляющего воздействия. Показано, что для таких объектов недостаточно изолированного мониторинга параметров: требуется единая ИИУС, включающая измерительный, модельный, статистический, рисковый и управляющий уровни. Обоснована необходимость перехода от точечных оценок к интервальным оценкам состояния и от порогового контроля к ситуационной модели S_0 - S_3 .

Установлено, что цифровой двойник в составе ИИУС должен использоваться не только как модель прогнозирования, но и как источник оценок неопределенности, невязок и прогноза остаточного ресурса. Эти оценки далее используются при выборе плана контроля, динамической оценке рисков и формировании управляющих действий. Показано, что критерий среднего уровня брака Q является связующим показателем между качеством продукции, надежностью оборудования и скоростью обнаружения разладки.

По результатам анализа сформулированы требования к последующим главам, кратко охарактеризованные в разделе 1.3 при описании внутренней связности работы.

2 МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ОЦЕНКИ И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ СОСТОЯНИЯ ПТК

Во второй главе разрабатывается математическое обеспечение работы, которое обеспечивает переход от архитектурного описания ИИУС к формализованным процедурам оценки состояния, выбора характеристик контроля и прогнозирования технического состояния ПТК.

Основная особенность задачи заключается в том, что техническое состояние ПТК приборостроения не описывается единственной характеристикой. Принимая решение, приходится одновременно учитывать уровень брака, надёжность оборудования, среднюю скорость обнаружения разладки, неопределённость измерительных каналов, прогноз деградации и риск отказа. По этой причине в главе последовательно рассмотрены четыре взаимосвязанных блока в виде критерия эффективности статистического управления, статистических моделей разладки, гибридного цифрового двойника и модели риск-ориентированной оценки состояния.

В традиционном изложении статистического управления качеством контрольные карты трактуются как самостоятельный инструмент обнаружения выхода процесса из-под контроля. Здесь они включены в более широкий контур ИИУС ПТК. Карта не только сигнализирует о выходе процесса из-под контроля, но и становится элементом управления межрегулировочным циклом, от параметров которого зависят средний уровень брака и экономические потери предприятия.

Связность математического аппарата главы показана на рисунке 13. Данные ИИУС поступают на вход гибридного цифрового двойника и статистических моделей управления. Двойник формирует прогноз состояния, оценку неопределённости и интервальные признаки деградации. Статистические модели описывают механизм разладки и задают зависимости средних длин серий от параметров плана контроля. Критерий эффективности Q сводит эти величины к показателю среднего уровня брака за межрегулировочный период. Рисковый блок

дополняет оценку технологического качества оценкой последствий отказа и применяется далее в методике ситуационного управления.

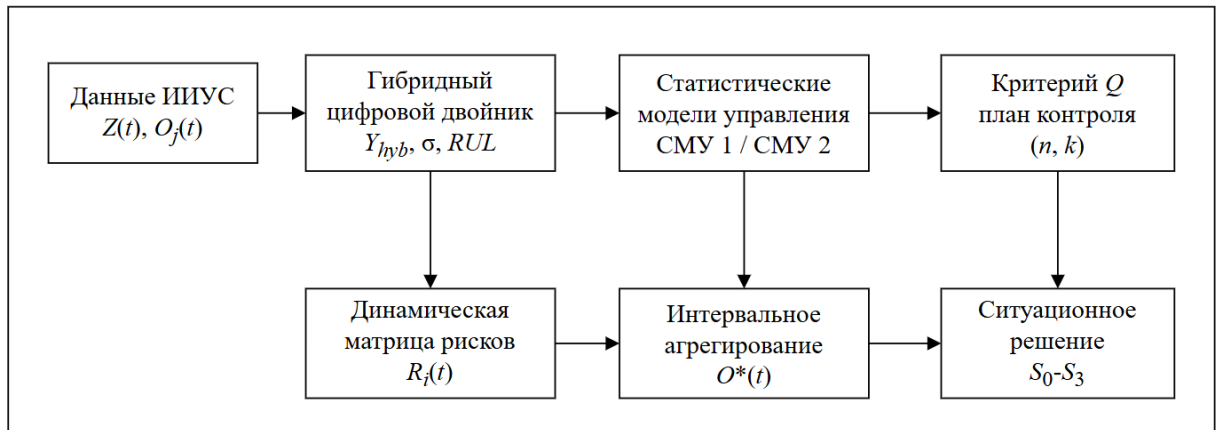


Рисунок 13 – Логическая связь математических моделей оценки и прогнозирования состояния ПТК

2.1 Постановка задачи математического моделирования состояния ПТК в составе ИИУС

Математическое моделирование ПТК в составе ИИУС учитывает двойственную природу объекта. С одной стороны, ПТК – это технологическая система результат функционирования которой оценивают качеством продукции и уровнем брака q_0, q_1 . С другой стороны, ПТК как техническая система, подверженная деградации, разладкам, отказам и ограничениям по надёжности T_0 . Математическая модель в силу этого связывает технологические показатели с диагностическими и эксплуатационными признаками.

Двойственность проявляется на практике по-разному. Для подшипникового узла технологический результат – геометрическая точность обработки, а техническое состояние – накопление усталостных повреждений. А для линии поверхностного монтажа печатных узлов технологический результат – качество нанесения паяльной пасты, а техническое состояние – устойчивость объёма и площади нанесения к разладке печатающего оборудования. Разрабатываемый далее аппарат формулируется в общих переменных ПТК и в разделе 4.10 применяется ко второму из этих примеров на реальных данных действующей линии.

Состояние ПТК на момент времени t в общем виде задают расширенным вектором:

$$X_e(t) = \{X_{tech}(t), X_{diag}(t), X_{qual}(t), X_{risk}(t)\}, \quad (2.1)$$

где X_{tech} – параметры технологического результата (геометрия, качество поверхности, электрические характеристики продукции);

X_{diag} – диагностические параметры, используемые для оценки технического состояния;

X_{qual} – параметры качества выпускаемой продукции;

X_{risk} – параметры риска эксплуатации, выражающиеся в виде вероятности отказа или критичности последствий.

Обе группы переменных входят в дальнейшие модели с разных сторон: первая определяет критерий Q через уровень брака, вторая – прогноз цифрового двойника и остаточный ресурс. Сводка основных групп переменных математического описания ПТК, используемых далее в главах 2 и 3, приведена в таблице 14.

Таблица 14 – Основные группы переменных математического описания ПТК

Группа переменных	Обозначения	Содержание	Использование в работе
Показатели качества	$q_0, q_1, q(t)$	Уровни брака при налаженном, разлаженном и текущем состоянии ПТК	Критерий эффективности Q
План контроля	n, k, T_k, L_0, L_1	Объем выборки, границы контроля, период контроля, средние длины серий	Выбор характеристик статистического контроля
Надежность и ресурс	$T_0 P_i$	Средняя длительность налаженной работы, вероятность отказа, остаточный ресурс	Ситуационное управление и предиктивное обслуживание
Цифровой двойник	Y_{phys}	Физический прогноз, нейросетевая поправка, гибридный прогноз и неопределенность	Прогноз состояния и входы для контроля
Интервальные оценки	O_j	Интервалы от каналов ИИУС и агрегированный интервал состояния	Робастное агрегирование в главе 3

Опираясь на структуру таблицы 14, математическую задачу главы формулируют как построение совокупности моделей, вычисляющих управляющие параметры по данным мониторинга:

$$\{Z(t), H(t)\} \rightarrow \{Y_{hyb}(t), \sigma(t), L_0(n, k), L_1(n, k), Q(n, k), R(t)\} \rightarrow U(t), \quad (2.2)$$

где $Z(t)$ – многоканальные измерительные данные;

$H(t)$ – история наблюдений;

$U(t)$ – управляющее действие.

Термин «управляющее действие» трактуется расширительно. Помимо физического воздействия на объект в него включены изменение плана контроля, регулировка оборудования, перевод в режим предиктивного обслуживания и аварийный останов.

От классической постановки статистического контроля приведённое описание отличается способом выбора параметров: их подбирают не изолированно, а с оглядкой на надёжность оборудования, механизм разладки и прогнозную неопределённость. В этом и состоит методическое отличие предлагаемого подхода – статистический контроль становится частью ИИУС ПТК, а не отдельной процедурой контроля качества.

Приведённые допущения не произвольны и согласуются с известными результатами по уточнённым статистическим моделям управления ПТК. Для приборостроительных производств характерны обе формы разладки – и рост дисперсии σ_1/σ_0 между партиями, и сдвиг среднего значения δ/σ_0 , – поэтому далее вводятся две модели, СМУ 1 и СМУ 2, вместо единой традиционной вероятностно-временной модели с одним параметром разладки.

2.2 Критерий эффективности функционирования ИИУС ПТК

Классическая теория статистического управления процессами использует для выбора критерия эффективности вероятности ошибок первого и второго рода и средние длины серий контрольной карты [60-65]. Показатели важны, однако прямого они не показывают, какой уровень брака сформируется в результате их применения. Инженера интересует уровень брака, формируемый за период между регулировками оборудования.

Для ПТК приборостроения такой вопрос является принципиальным. Даже кратковременная задержка обнаружения разладки может привести к выпуску партии изделий вне поля допуска, потере метрологической прослеживаемости или срыву цикла испытаний. Именно поэтому в качестве основного критерия эффективности выбран средний уровень брака за межрегулировочный период – он напрямую агрегирует перечисленные последствия задержки обнаружения разладки в один технологически интерпретируемый показатель, доступный для расчёта и оптимизации. Этот показатель связывает статистические характеристики контроля с технологическим результатом.

Рассмотрим два состояния ПТК – налаженное и разлаженное. В налаженном состоянии уровень брака равен q_0 , а средняя продолжительность этого состояния составляет T_0 . После возникновения разладки уровень брака возрастает до q_1 , где $q_1 > q_0$. Разладка обнаруживается не мгновенно, поскольку контроль выполняется периодически, а ошибка второго рода может приводить к тому, что для обнаружения разладки требуется несколько выборок. Среднее число выборок до обнаружения разладки обозначим L_1 .

Период контроля обозначим T_k . Тогда безразмерная характеристика надежности оборудования определяется как:

$$A = T_0 / T_k. \quad (2.3)$$

Величина A показывает, сколько периодов контроля в среднем приходится на интервал налаженной работы. Чем больше A , тем дольше оборудование работает без разладки относительно частоты контроля и тем меньше доля времени, в течение которой продукция выпускается с повышенным уровнем брака.

Средний уровень брака за межрегулировочный период определяется выражением:

$$Q = (A \times q_0 + L_1 \times q_1) / (A + L_1). \quad (2.4)$$

Выражение (2.4) имеет простой инженерный смысл. В числителе суммируется вклад налаженного состояния и вклад разлаженного состояния, а в знаменателе учитывается суммарная длительность межрегулировочного цикла в единицах периода контроля. При этом L_1 определяется параметрами плана

контроля, тогда как A задается надежностными свойствами оборудования и организацией контроля [47]; смысл каждого параметра критерия Q и его влияние на итоговое значение обобщены в таблице 15.

Таблица 15 – Интерпретация параметров критерия Q

Параметр	Единица / диапазон	Физический смысл	Влияние на Q
q_0	0...1	Уровень брака при налаженном ПТК	Чем больше q_0 , тем выше базовый уровень Q
q_1	0...1	Уровень брака при разладке	Чем больше q_1 , тем выше потери при задержке обнаружения
L_1	число выборок	Средняя длина серии разлаженного процесса до сигнала	Рост L_1 увеличивает вклад разлаженного состояния
T_0	время	Средняя длительность налаженного состояния	При фиксированном T_k определяет надежность ПТК
T_k	время	Период контроля	Уменьшение T_k увеличивает частоту контроля, но повышает затраты
$A = T_0/T_k$	безразмерный	Среднее число выборок в налаженном состоянии	Рост A снижает относительный вклад разладки

Важное свойство критерия (2.4) состоит в том, что при фиксированных q_0 , q_1 и A , а также при $q_1 > q_0$, он монотонно возрастает по L_1 . Действительно, производная Q по L_1 имеет вид:

$$dQ/dL_1 = A \times (q_1 - q_0) / (A + L_1)^2 > 0. \quad (2.5)$$

Следовательно, при прочих равных условиях минимизация Q по характеристикам плана контроля эквивалентна уменьшению L_1 . Однако это утверждение не означает, что следует бесконечно сужать контрольные границы. Сужение границ уменьшает L_1 , но одновременно увеличивает частоту ложных срабатываний, то есть уменьшает L_0 . Поэтому выбор плана контроля должен выполняться при ограничении на допустимую частоту ложных сигналов:

$$L_0(n, k) \geq L_{0min}. \quad (2.6)$$

Таким образом, задача выбора характеристик плана контроля формулируется как двухкритериальная или условная оптимизационная задача:

$$Q(n, k) \rightarrow \min, \text{ при } L_0(n, k) \geq L_{0min}, n \in N, k > 0. \quad (2.7)$$

Здесь n – объем выборки, k – ширина контрольных границ в долях среднеквадратического отклонения выборочного среднего. В прикладной реализации дополнительно может вводиться требование минимально достаточного

объема выборки, поскольку рост n повышает затраты контроля и может быть недопустим при мелкосерийном производстве.

На рисунке 14 приведен пример зависимости средней длины серии L_1 от приведенного параметра разладки для двух уточненных моделей управления. Видно, что характер изменения L_1 зависит от механизма разладки. Это подтверждает необходимость учитывать тип СМУ при использовании критерия Q .

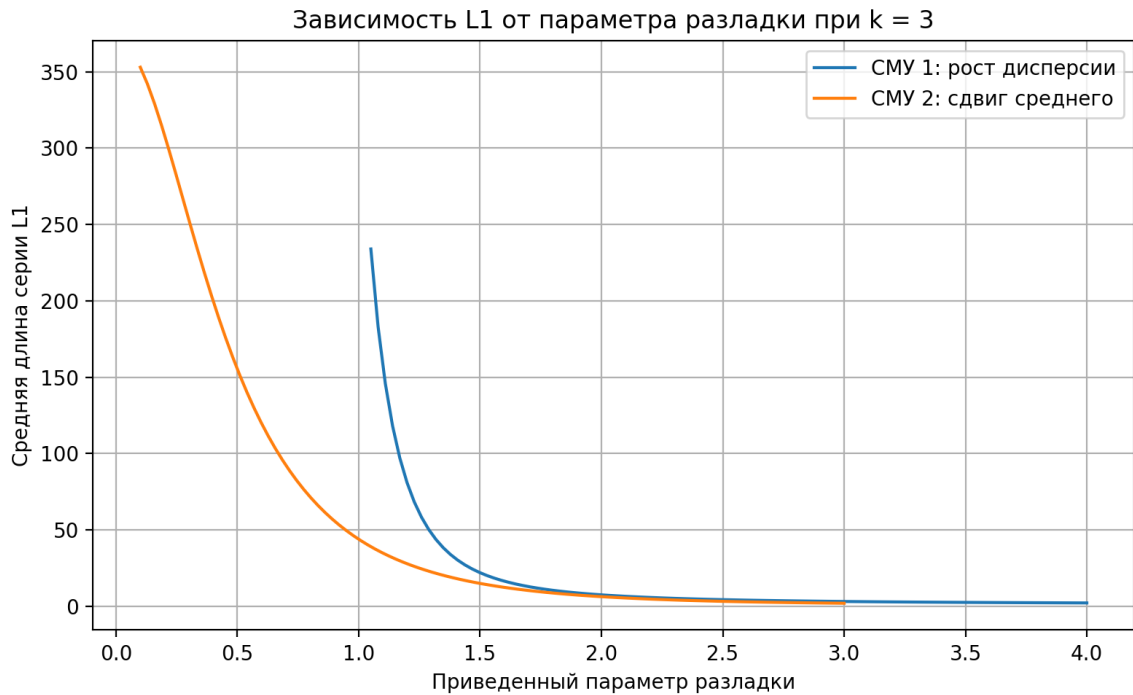


Рисунок 14 – Зависимость средней длины серии L_1 от параметра разладки для СМУ 1 и СМУ 2

Для иллюстрации процедуры выбора плана контроля можно построить поверхность $Q(n, k)$. В расчётном примере использованы значения, типичные для приборостроительных ПТК с высокими требованиями к качеству продукции: $q_0 = 0,001$, $q_1 = 0,05$, $A = 50$ и приведенный сдвиг $d = 1,5$. Поверхность свидетельствует о том, что снижение Q достигается при увеличении объема выборки и уменьшении ширины контрольных границ. Однако область допустимых решений ограничивается условием $L_0 \geq 100$, которое соответствует ограничению частоты ложных сигналов.

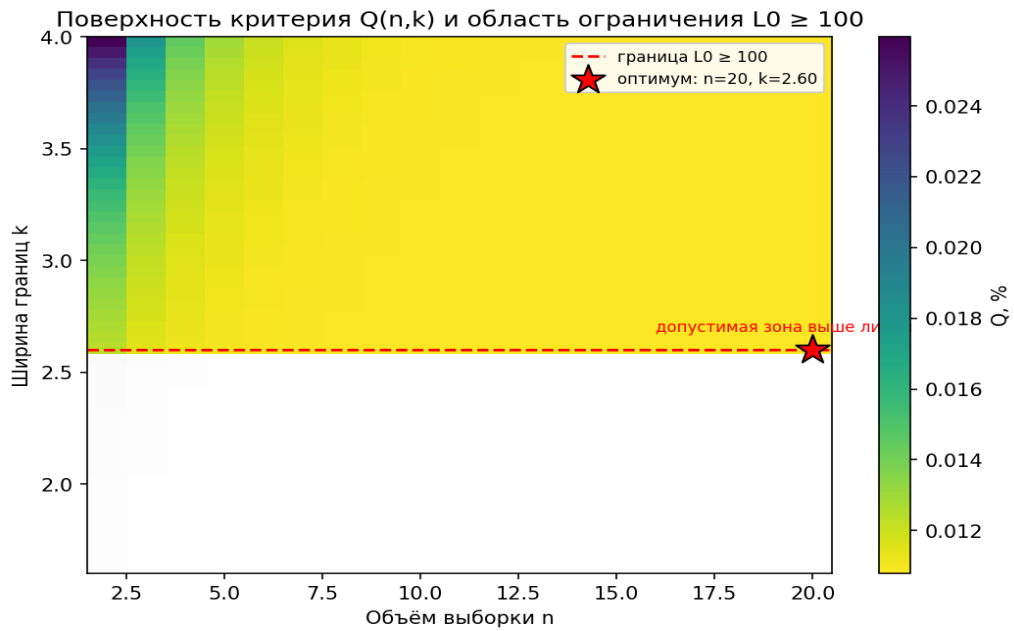


Рисунок 15 – Поверхность критерия $Q(n,k)$ и область ограничения $L_0 \geq 100$

Критерий Q – связующий элемент всей разработанной методики, что подтверждается формулами (2.2)-(2.7) настоящего раздела и моделью гибридного цифрового двойника в разделе 2.6. На вход он получает оценку *sigma* от цифрового двойника, использует статистические модели управления для вычисления L_0 и L_1 и задаёт правило выбора характеристик плана контроля. Изолированной формулой его поэтому не назовёшь – это функциональный элемент ИИУС, преобразующий прогноз состояния в управленческое решение.

Введённый критерий среднего уровня брака за межрегулирувочный период переводит классические вероятностные характеристики контрольной карты в технологически интерпретируемый показатель эффективности ИИУС ПТК: он одновременно учитывает качество обнаружения разладки, надёжность оборудования, уровни брака в налаженном и разлаженном состояниях, а также параметры плана контроля.

Зависимость критерия Q от средней длины серии L_1 при различных значениях параметра A показана на рисунке 16 где при малых A влияние L_1 на итоговый уровень брака выражено сильнее, поскольку оборудование реже находится в налаженном состоянии.

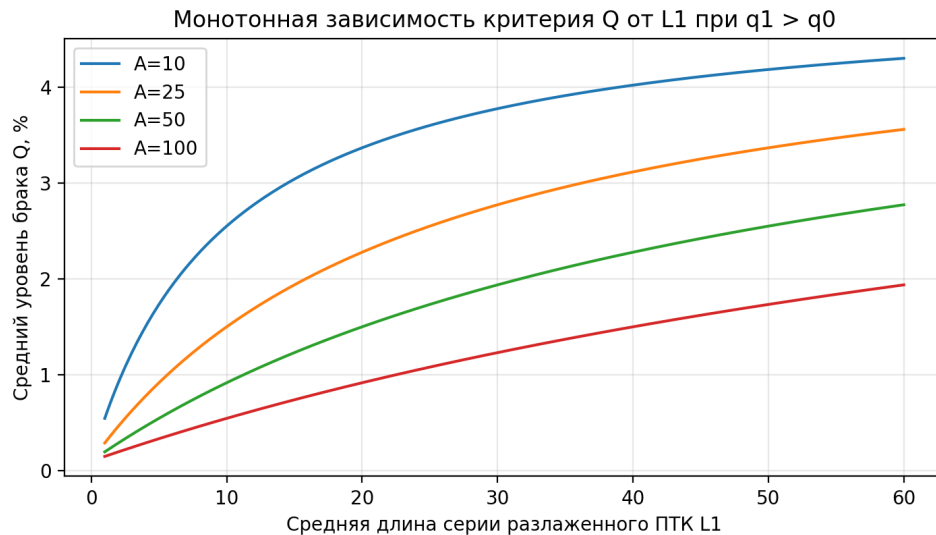


Рисунок 16 – Зависимость критерия Q от средней длины серии L_1 при различных значениях параметра A

2.3 Традиционная статистическая модель управления ПТК приборостроения

Прежде чем перейти к уточнённым моделям управления, была проанализирована традиционная вероятностно-временная модель статистического контроля. Контролируемый параметр в налаженном состоянии имеет здесь математическое ожидание m_0 и среднеквадратическое отклонение $sigma$, а разладка проявляется скачкообразным сдвигом математического ожидания на величину $delta$. Контроль ведут по выборочным средним, полученным из выборок объёма n .

Обозначим через $\bar{x}$ выборочное среднее контролируемого параметра в партии. Для налаженного состояния тогда справедливо:

$$\bar{x} \sim N(m_0, sigma^2/n). \quad (2.8)$$

Контрольная карта выборочных средних строится с границами:

$$m_0 - k \cdot sigma/\sqrt{n} \leq \bar{x} \leq m_0 + k \cdot sigma/\sqrt{n}. \quad (2.9)$$

Если процесс налажен, вероятность ложного сигнала равна:

$$\alpha = 2 \times [1 - \Phi(k)], \quad (2.10)$$

где $\Phi(\cdot)$ – функция стандартного нормального распределения. Средняя длина серии при налаженном процессе определяется как:

$$L_0 = 1 / \alpha = 1 / (2 \times [1 - \Phi(k)]). \quad (2.11)$$

При разладке, выраженной сдвигом среднего на $delta$, вероятность необнаружения разладки в одной выборке равна:

$$\beta = \Phi(k - \delta \times \sqrt{n}/\sigma) - \Phi(-k - \delta \times \sqrt{n}/\sigma). \quad (2.12)$$

Тогда средняя длина серии разлаженного процесса равна:

$$L_1 = 1 / (1 - \beta). \quad (2.13)$$

Формулы (2.10)-(2.13) являются основой традиционного расчета характеристик плана контроля. Они широко используются в статистическом управлении процессами, поскольку позволяют связать k , n , α , β , L_0 и L_1 . Однако для приборостроительных ПТК такая модель является недостаточной по двум причинам.

Первая причина состоит в том, что разладка не всегда проявляется сдвигом математического ожидания. При производстве радиоэлектронных узлов, механической обработке и периодической переналадке оборудования значительная часть отклонений связана с вариацией средних значений между партиями. В этом случае среднее значение может оставаться неизменным, а разладка проявляется ростом дисперсии. Традиционная модель, ориентированная на сдвиг среднего, описывает такой процесс неточно.

Вторая причина состоит в том, что традиционная модель не связывает расчет плана контроля с надежностью оборудования и средним уровнем брака. Она позволяет задать α и β , но не дает прямой оценки потерь от брака за межрегулировочный период. Поэтому в данной работе традиционная модель используется как исходная база, которая затем расширяется через критерий Q и две уточненные СМУ.

Основные ограничения традиционной статистической модели управления для ПТК приборостроения обобщены в таблице 16.

Таблица 16 – Ограничения традиционной статистической модели управления для ПТК приборостроения

Особенность традиционной модели	Почему это ограничение существенно	Как учитывается в работе
Разладка задается сдвигом среднего	Не описывает рост дисперсии между партиями при периодической переналадке	Вводится СМУ 1
Вероятности α и β рассматриваются отдельно	Не дают прямого уровня брака за межрегулировочный период	Вводится критерий Q

Продолжение таблицы 16

Особенность традиционной модели	Почему это ограничение существенно	Как учитывается в работе
Параметры контроля выбираются без учета надежности оборудования	Одинаковый план может быть неоптимален для оборудования с разным T_0	Используется параметр $A = T_0/T_k$
Не учитывается прогнозная σ цифрового двойника	План контроля может устаревать при изменении состояния оборудования	σ берется из гибридного цифрового двойника
Не учитываются риски отказа и последствия	Контроль качества не связан с предиктивным обслуживанием	Вводится динамическая матрица рисков

Таким образом, традиционная модель выполняет в работе две функции. Во-первых, она задает математический язык контрольных карт и средних длин серий. Во-вторых, она является базой для сравнения с уточненными моделями, показывающими, в каких случаях расчет по традиционной схеме приводит к искажению характеристик контроля.

2.4 Уточнённые статистические модели управления ПТК

Анализ организационно-технических особенностей приборостроительных ПТК свидетельствует о том, что в реальных условиях можно выделить по крайней мере два принципиально различных механизма разладки. Первый механизм связан с периодической установкой или переналадкой технологических режимов. При таком механизме ошибка переналадки имеет случайную природу, поэтому общее среднее значение контролируемого параметра может сохраняться, но возрастает разброс средних значений между партиями. Второй механизм характерен для оборудования, которое длительное время работает в неизменном режиме. В этом случае наиболее типичным проявлением разладки является постепенный дрейф среднего значения при примерно постоянной дисперсии.

С учетом этого в работе вводятся две уточненные статистические модели управления. СМУ 1 описывает разладку как рост дисперсии выборочных средних между партиями при сохранении общего среднего. СМУ 2 описывает разладку как сдвиг общего среднего при сохранении дисперсии. Такое разделение согласуется с материалом статьи по мониторингу приборостроительных производств на базе

моделей разладки, где для обеих моделей выведены аналитические формулы средней длины серии и выполнена проверка их адекватности методом статистического моделирования.

Сравнение механизмов разладки, лежащих в основе СМУ 1 и СМУ 2, приведено в таблице 17.

Таблица 17 – Сравнение механизмов разладки в СМУ 1 и СМУ 2

Признак	СМУ 1	СМУ 2
Физическая причина	Периодическая переустановка режимов, случайная ошибка наладки	Постепенный дрейф неизменного технологического режима
Изменяемый параметр распределения	Дисперсия средних значений между партиями	Математическое ожидание средних значений
Общее среднее	Сохраняется	Смещается на δ
Дисперсия между партиями	Возрастает от σ_0 до σ_1	Сохраняется приблизительно постоянной
Типовое оборудование	Станки с переналадкой, прецизионная сборка, мелкосерийная обработка	Печи пайки, длительные режимы нанесения покрытий, испытательные стенды
Ключевой параметр разладки	σ_1/σ_0	δ/σ_0

Для СМУ 1 плотность распределения выборочного среднего между партиями имеет вид:

$$\varphi_1(\bar{x}) = 1/(\sigma \times \sqrt{2\pi}) \times \exp[-(\bar{x} - \bar{x}_0)^2/(2 \times \sigma^2)], \quad (2.14)$$

где $\sigma = \sigma_0$ для налаженного ПТК и $\sigma = \sigma_1$ для разлаженного ПТК, причем $\sigma_1 > \sigma_0$. Вероятность выхода точки контрольной карты за границы регулирования при СМУ 1 равна:

$$p_1(\sigma) = 2 \times [1 - \Phi(k \times \sigma_0/\sigma)]. \quad (2.15)$$

Отсюда средние длины серий для налаженного и разлаженного состояния принимают вид:

$$L_0 = 1/(2 \times [1 - \Phi(k)]), \quad L_1 = 1/(2 \times [1 - \Phi(k \times \sigma_0/\sigma_1)]). \quad (2.16)$$

Для СМУ 2 плотность распределения выборочного среднего задается выражением:

$$\varphi_2(\bar{x}) = 1/(\sigma_0 \times \sqrt{(2\pi)}) \times \exp[-(\bar{x} - \bar{x}_c)^2/(2 \times \sigma_0^2)], \quad (2.17)$$

где $\bar{x}_c = \bar{x}_0$ в налаженном состоянии и $\bar{x}_c = \bar{x}_0 + \delta$ в разлаженном состоянии.

Вероятность выхода за границы равна:

$$p_2 = 1 - \Phi(k - \delta/\sigma_0) + \Phi(-k - \delta/\sigma_0). \quad (2.18)$$

Средняя длина серии при разладке для СМУ 2 определяется как:

$$L_1 = 1 / [1 - \Phi(k - \delta/\sigma_0) + \Phi(-k - \delta/\sigma_0)]. \quad (2.19)$$

Формулы (2.16) и (2.19) показывают, что даже при формально одинаковой «силе» разладки поведение контрольной карты может существенно отличаться. Рост дисперсии и сдвиг среднего по-разному влияют на вероятность выхода за контрольные границы, поэтому выбор единой традиционной модели приводит к ошибкам в оценке L_1 . Эти ошибки затем непосредственно переходят в критерий Q , поскольку L_1 входит в формулу среднего уровня брака за межрегулировочный период.

Результаты вычислительного эксперимента, подтверждающие адекватность зависимостей средних длин серий для СМУ 1 и СМУ 2, приведены в работе [66]. Для налаженного ПТК теоретическое значение L_0 составило 348,54, фактическое – 352,49. Для разлаженного ПТК по СМУ 1 теоретическое значение L_1 составило 4,97, фактическое – 4,95, для СМУ 2 теоретическое значение L_1 составило 4,39, фактическое – 4,37. Гипотеза о согласии теоретических и фактических значений была принята на уровне значимости 0,1. Расчёт выполнен для плана $n = 5, k = 3$, при росте дисперсии в 1,5 раза для СМУ 1 и сдвиге среднего $\delta = 1,5\sigma$ для СМУ 2 – это позволяет независимо проверить теоретические значения по формулам (2.16) и (2.19).

Полученные теоретические и фактические значения L_0 и L_1 сопоставлены в таблице 18.

Таблица 18 – Верификация зависимостей средних длин серий для СМУ 1 и СМУ 2

Состояние	Модель	Теоретическое значение	Фактическое значение	Результат проверки
Налаженное	СМУ 1 / СМУ 2	$L_0 = 348,54$	L_0 факт. = 352,49	Гипотеза H_0 принята
Разлаженное	СМУ 1	$L_1 = 4,97$	L_1 факт. = 4,95	Гипотеза H_0 принята
Разлаженное	СМУ 2	$L_1 = 4,39$	L_1 факт. = 4,37	Гипотеза H_0 принята

Практическое значение таблицы 18 состоит в том, что она подтверждает возможность использовать аналитические зависимости L_0 и L_1 при выборе характеристик плана контроля. Без такого подтверждения критерий Q оставался бы теоретической конструкцией, не связанной с фактическим поведением контрольных карт. После верификации СМУ 1 и СМУ 2 можно рассчитывать $Q(n,k)$ для различных механизмов разладки и выбирать план контроля с учетом реальной природы оборудования.

Следует отметить, что в традиционной модели разладка типа СМУ 1 описывается некорректно. Если среднее значение не сдвигается, то параметр *delta* отсутствует, а традиционная модель фактически может оценить L_1 как L_0 , то есть сильно зависит среднее время до сигнала. В работе [67] показано, что при росте σ_1/σ_0 от 1,5 до 4,0 расхождение может достигать десятков и сотен раз. Это является серьезным основанием для введения уточненных СМУ как самостоятельного научного результата.

Рисунок 17 показывает, что реакция контрольной карты на рост разброса и на смещение среднего различна. При одинаковой условной «силе» разладки значения L_1 для СМУ 1 и СМУ 2 могут отличаться, что приводит к различным значениям критерия Q и, следовательно, к разным оптимальным характеристикам плана контроля. Именно поэтому применение единой традиционной СМУ к разным типам ПТК приводит к расчетным ошибкам.

Иллюстративные значения L_1 для СМУ 1 и СМУ 2 при разных степенях разладки сведены в таблице 19.

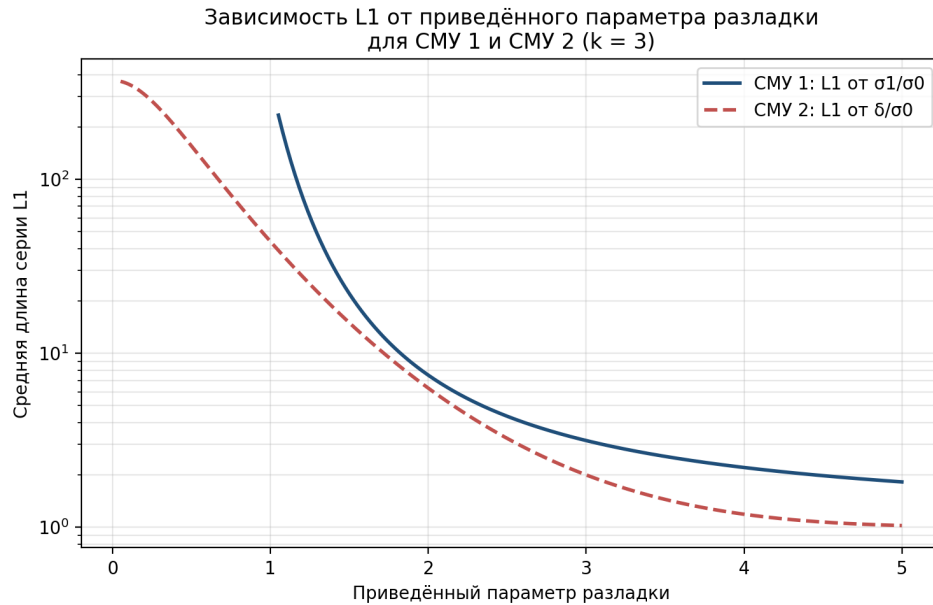


Рисунок 17 – Зависимость L_1 от приведенного параметра разладки для СМУ 1 и СМУ 2

Таблица 19 – Иллюстративное сопоставление L_1 для двух механизмов разладки

Параметр разладки	L_1 по СМУ 1, $k = 3$	L_1 по СМУ 2, $k = 3$	Интерпретация
1.5	≈ 22.0	≈ 15.2	слабая разладка; СМУ 1 обнаруживается медленнее
2.0	≈ 7.5	≈ 3.1	средняя разладка; различие заметно для Q
2.5	≈ 4.4	≈ 1.6	сильная разладка; план контроля зависит от типа модели
3.0	≈ 3.2	≈ 1.2	разладка быстро обнаруживается, но СМУ 2 остается чувствительнее
4.0	≈ 2.2	≈ 1.0	очень сильная разладка; различие сокращается по практическому смыслу

Практический смысл таблицы 19 сводится к тому, что прежде, чем рассчитывать план контроля, необходимо идентифицировать механизм разладки. Допустим, оборудование разлаживается по СМУ 1, а расчёт выполнен как для СМУ 2 – тогда контрольные границы и объём выборки выбраны некорректно, и система либо запаздывает с обнаружением разладки, либо создаёт избыточную частоту регулировок, не снижая при этом брак.

2.5 Связь статистических моделей управления с выбором плана контроля

Планом статистического контроля называют совокупность характеристик, которые задают порядок выборочного контроля и условия фиксации разладки. Ключевыми из них в работе служат объём выборки n и коэффициент ширины контрольных границ k . Увеличение n повышает точность оценки среднего значения контролируемого параметра, одновременно увеличивая затраты на контроль; уменьшение k ускоряет обнаружение разладки, но повышает частоту ложных сигналов. Выбор плана контроля представляет собой, таким образом, компромиссную задачу.

Для каждого сочетания n и k рассчитывают вероятности ложного сигнала и пропуска разладки, после чего определяют средние длины серий L_0 и L_1 . В традиционной модели со сдвигом среднего вероятность обнаружения разладки выражают через β – вероятность того, что при разлаженном процессе выборочное среднее останется внутри контрольных границ. Тогда:

$$L_0(n, k) = 1/\alpha(k), \quad L_1(n, k) = 1/[1 - \beta(n, k)]. \quad (2.20)$$

После этого значения L_1 подставляются в критерий Q . Таким образом, возникает поверхность отклика $Q(n, k)$, позволяющая оценить влияние объема выборки и ширины контрольных границ на средний уровень брака. Однако допустимыми являются не все точки этой поверхности, а только те, для которых L_0 достаточно велико, то есть ложные регулировки происходят не чаще допустимого уровня.

При уменьшении k значение Q , как правило, снижается за счёт сокращения L_1 , однако одновременно уменьшается L_0 , а при увеличении n обнаружение разладки ускоряется, но возрастает стоимость контроля. Поэтому окончательный выбор плана выполняется не по одному критерию, а с учётом ограничений на ложные сигналы и затрат – сначала выделяется допустимая область по L_0 , а затем в ней выбирается план с минимальным Q или с минимальным стоимостным функционалом Φ .

На рисунке 18 представлен пример поверхности критерия $Q(n,k)$, полученной для этой процедуры, вместе с границей допустимой частоты ложных сигналов $L_0 = 100$.

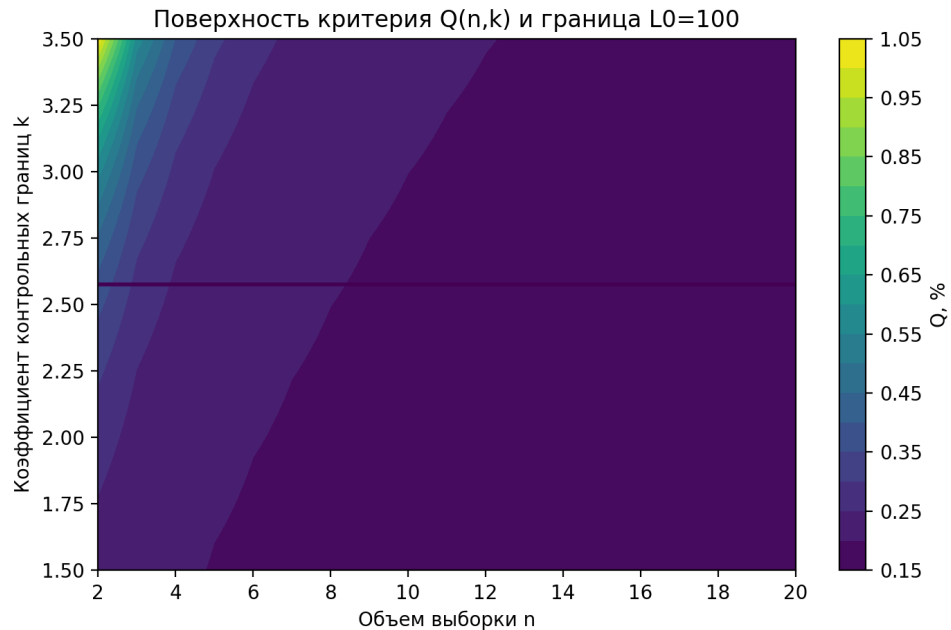


Рисунок 18 – Пример поверхности критерия $Q(n,k)$ и границы допустимой частоты ложных сигналов $L_0 = 100$

Последовательность расчётной связи СМУ, средних длин серий и критерия Q представлена в таблице 20.

Таблица 20 – Последовательность расчетной связи СМУ, СДС и критерия Q

Этап	Расчетная операция	Результат	Использование в дальнейшей методике
1	задание q_0, q_1, A, L_{0min} , диапазонов n и k	исходная область поиска	формирует пространство допустимых планов
2	расчет $L_0(n,k)$ и $L_1(n,k)$ по выбранной СМУ	поверхности СДС	учет механизма разладки
3	расчет $Q(n,k)$	поверхность среднего брака	оценка эффективности плана контроля
4	наложение ограничения $L_0 \geq L_{0min}$	допустимая область	исключение планов с частыми ложными сигналами
5	выбор минимума Q или Парето-плана	кандидатный план контроля	передается в стоимостную оптимизацию и ИИУС

Полученная связь является основой для дальнейшей методики. В главе 3 она будет преобразована в алгоритм расчета характеристик плана контроля, а в главе 4 – проверена на имитационных данных и сопоставлена с классическими планами Шухарта и CUSUM. CUSUM – кумулятивная контрольная карта, накапливающая

отклонения контролируемого параметра от целевого значения и обнаруживающая малые устойчивые сдвиги быстрее, чем карта Шухарта [14, 67, 68]. При этом важно подчеркнуть, что критерий Q не отменяет классическую теорию статистического контроля, а расширяет ее применительно к ПТК приборостроения за счет включения надежности оборудования и фактических уровней брака.

Помимо интервальной оценки $O_{DT}(t)$, гибридный цифровой двойник предполагает формирование оценки вероятности отказа $P_{отк}(t)$, которая передается в динамическую матрицу рисков (раздел 2.7) и учитывается при переходе объекта в ситуации S_1 и S_2 .

2.6 Модель гибридного цифрового двойника как источник прогнозной оценки состояния

Статистические модели управления позволяют описать связь между параметрами плана контроля и средними длинами серий. Однако для практического применения ИИУС должна иметь источник текущих и прогнозных оценок параметров состояния. Эту функцию в работе выполняет гибридный цифровой двойник компонентов ПТК. Его задача состоит в том, чтобы объединить интерпретируемость физической модели и адаптивность нейросетевой коррекции.

Гибридный цифровой двойник, в отличие от чисто нейросетевой модели, физическое описание объекта не заменяет, а дополняет. Физическая составляющая описывает ожидаемое поведение исправного оборудования. Нейросетевая составляющая прогнозирует остаточную невязку, в которой проявляются деградация, нелинейные эффекты и неучтённые режимные факторы.

Пусть $y(t)$ – вектор контролируемых параметров состояния компонента ПТК, $u(t)$ – вектор технологических и управляющих воздействий, θ – параметры физической модели. Физическую часть цифрового двойника задаёт выражение:

$$Y_{phys}(t) = f_{phys}(y(t-1), u(t), \theta). \quad (2.21)$$

Невязку между фактическим измерением и физическим прогнозом определяют выражением:

$$e(t) = y(t) - Y_{phys}(t). \quad (2.22)$$

Нейросетевой блок реализован рекуррентной сетью с долгой краткосрочной памятью (LSTM) [69, 57, 70], поскольку такая архитектура хорошо приспособлена к выявлению зависимостей во временных рядах измерений и устойчива к умеренным пропускам данных, в отличие от классических линейных моделей авторегрессии [71]. Блок обучают методом обратного распространения ошибки [72] с оптимизатором Adam [73] прогнозировать невязку по окну предыстории:

$$Y_{res}(t) = f_{NN}(y(t-1), \dots, y(t-w), u(t); W), \quad (2.23)$$

где w – длина окна предыстории;

W – параметры нейросетевой модели; такой подход согласуется с ранее предложенной схемой, где для прогнозирования критических параметров применяется нейросеть, обучаемая на остатке $x(t) - f_{phys}(x(t))$ [74]. Итоговый прогноз гибридного цифрового двойника имеет вид:

$$Y_{hyb}(t) = Y_{phys}(t) + Y_{res}(t). \quad (2.24)$$

Полный операционный цикл, представленный на рисунке 19, охватывает обработку данных от первичного приёма измерений до формирования управляющего решения.

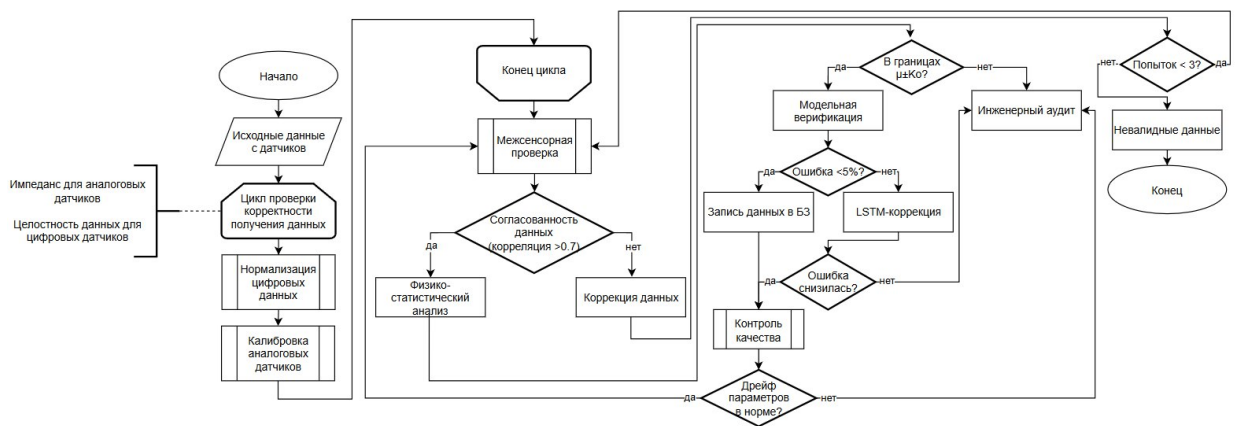


Рисунок 19 – Операционный цикл гибридного цифрового двойника

На входе исходные данные с датчиков проходят цикл проверки корректности получения: для аналоговых каналов контролируется импеданс измерительной цепи, для цифровых – целостность передаваемого пакета данных; далее выполняются нормализация цифровых данных и калибровка аналоговых датчиков. После завершения этого цикла проводится межсенсорная проверка согласованности данных: при корреляции между показаниями разнородных

источников выше порогового значения 0,7 данные передаются на физико-статистический анализ; в противном случае выполняется коррекция данных с ограничением числа повторных попыток (не более трёх), после чего данные, не прошедшие проверку, помечаются как невалидные и исключаются из дальнейшей обработки.

На этапе физико-статистического анализа контролируемый параметр сопоставляется с границами $\mu \pm K\sigma$, задающими область типичных значений исправного состояния. При нахождении параметра в этих границах данные передаются на модельную верификацию, где невязка физической модели (2.22) сопоставляется с пороговым значением ошибки: при ошибке менее 5% результат фиксируется в базе знаний, а при превышении порога включается LSTM-коррекция (2.23)-(2.24). Если применение нейросетевой коррекции не приводит к снижению ошибки, событие направляется на инженерный аудит – процедуру ручного разбора случаев, не охватываемых текущими настройками модели. Завершающий контур образует контроль качества с проверкой дрейфа параметров модели, обеспечивающий выявление постепенного расхождения физической и нейросетевой составляющих между циклами переобучения.

Экспериментальная проверка настоящей работы в главе 4 сосредоточена на ядре этого цикла – расчёте физического прогноза (2.21), невязки (2.22) и её нейросетевой коррекции (2.23)-(2.24), поскольку именно эта часть определяет точность итоговой оценки σ и остаточного ресурса, используемых далее статистическим контролем и агрегированием. Блоки предварительной проверки данных (импеданс, целостность, межсенсорная согласованность) и последующего контроля качества образуют контур эксплуатационной надёжности ИИУС и в настоящей работе заданы на уровне архитектурного решения; их количественная настройка для конкретного производственного объекта относится к перспективам развития методики.

Для согласования физической и нейросетевой составляющих используется функция потерь [75, 76]:

$$L(W) = L_{acc} + \lambda \times L_{phys}, \quad (2.25)$$

$$L_{acc} = \frac{1}{T} \cdot \sum_t \|y(t) - Y_{hyb}(t)\|^2, \quad (2.26)$$

$$L_{phys} = \frac{1}{T} \times \sum_t \max(0, |Y_{res}(t)| - c \times \sigma(t))^2. \quad (2.27)$$

Здесь c – коэффициент допустимого отклонения, $\sigma(t)$ – оценка среднеквадратического отклонения контролируемого параметра. Именно $\sigma(t)$ связывает цифровой двойник со статистическим контролем и используется при нормировании контрольных границ, а также влияет на выбор параметров плана контроля.

Такой цикл работы LSTM-блока – от измерения к проверке, коррекции и обучению – показан на рисунке 19.

На выходе цифровой двойник формирует не только точечный прогноз, но и интервальную оценку состояния:

$$O_{DT}(t) = [Y_{hyb}(t) - k_\sigma \times \sigma(t), Y_{hyb}(t) + k_\sigma \times \sigma(t)]. \quad (2.28)$$

Эта интервальная оценка далее используется при робастном агрегировании многоканальной информации.

Соответствие между выходами гибридного цифрового двойника и их дальнейшим использованием в работе приведено в таблице 21.

Таблица 21 – Выходы гибридного цифрового двойника и их дальнейшее использование

Выход цифрового двойника	Содержание	Использование
Y_{hyb}	Гибридный прогноз контролируемого параметра	Оценка текущего и прогнозного состояния
Y_{res}	Нейросетевая невязка физической модели	Диагностический индикатор деградации
$\sigma(t)$	Оценка неопределенности или разброса параметра	Нормирование контрольных границ и критерий Q
$O_{DT}(t)$	Интервальный прогноз состояния	Робастное агрегирование в главе 3
$RUL(t)$	Прогноз остаточного ресурса	Переход к состоянию S_2 и предиктивное обслуживание

Важно подчеркнуть, что невязка $e(t)$ не должна трактоваться как прямая физическая величина поврежденности без дополнительных условий. Она является диагностическим индикатором, чувствительным к деградации, но может включать также ошибку физической модели, шум измерений, изменение режима нагрузки и

влияние внешних факторов. Поэтому невязка в работе используется в составе комплексной оценки состояния, а не как единственный показатель.

2.7 Математическая модель динамической оценки рисков эксплуатации ПТК

Для перехода от оценки состояния к управлению техническим обслуживанием необходимо учитывать не только вероятность отказа, но и последствия отказа для производства. В приборостроении последствия отказов могут включать выпуск продукции вне допуска, потерю метрологической прослеживаемости, останов испытательного цикла, повреждение дорогостоящей оснастки или нарушение сроков выпуска. Поэтому в работе используется динамическая оценка риска, интегрируемая с данными ИИУС и выходами цифрового двойника:

$$R_i(t) = P_i(t) \times C_i(t), \quad (2.29)$$

где $R_i(t)$ – риск i -го объекта мониторинга;

$P_i(t)$ – вероятность отказа или перехода в недопустимое состояние;

$C_i(t)$ – уровень последствий.

Для ПТК, состоящего из n объектов мониторинга, интегральный риск может быть задан по формуле:

$$R\Sigma(t) = \sum_i w_i R_i(t), \quad (2.30)$$

где w_i – коэффициент критичности объекта, отражающий его влияние на производственный цикл, наличие резервирования, стоимость восстановления и значение для качества продукции [77]. Вероятность $P_i(t)$ может оцениваться по прогнозной модели, например LSTM-модулю, принимающему на вход окно данных ИИУС и выходы цифрового двойника:

$$P_i(t) = fLSTM(X_i(t - \tau), \dots, X_i(t), Y_{res}(t), \sigma(t); \Theta). \quad (2.31)$$

где $P_i(t)$ – прогнозная вероятность отказа объекта i , вычисляемая нейросетевым блоком по формуле (2.31);

C_i – критичность последствий отказа объекта i , задаваемая экспертно по шкале 1-5 в соответствии с таблицей 22.

$$M_i(t) = P_i(t) \cdot C_i \quad (2.32)$$

где $M_i(t)$ – положение объекта в динамической матрице рисков, определяющее зону риска и соответствующее управляющее действие в соответствии с таблицей 22.

Таблица 22 – Интерпретация зон динамической матрицы рисков

Зона риска	Диапазон M_i	Интерпретация	Управляющее действие
Приемлемая	1-4	техническое состояние не требует внепланового вмешательства	плановый контроль
Допустимая	5-9	наблюдаются признаки ухудшения, но риск управляем	повышенный мониторинг
Нежелательная	10-16	вероятен переход к предотказному состоянию	внеплановое ТО, пересчет плана контроля
Недопустимая	17-25	высокая вероятность отказа или тяжелые последствия	останов, ремонт, инженерный аудит

Важным отличием динамической матрицы от статических FMEA/FTA-подходов является регулярное обновление положения объекта по мере поступления данных ИИУС. Это позволяет анализировать не только текущую ячейку матрицы, но и траекторию движения объекта по зонам риска. Если объект устойчиво движется из допустимой зоны в нежелательную, ИИУС может сформировать предупреждение до наступления отказа и инициировать предиктивное обслуживание.

Связь динамической риск-модели с критерием Q проявляется в том, что переход объекта в нежелательную зону риска должен рассматриваться как основание для изменения режима контроля. В частности, при переходе к ситуациям S_1 или S_2 может быть выполнен пересчет параметров n и k , а также пересчет допустимых границ для агрегированной интервальной оценки состояния. Тем самым риск-модель не заменяет статистический критерий, а задает ситуационный контекст его применения.

2.8 Алгоритмическое обеспечение расчёта характеристик контроля

Для практического применения разработанных моделей необходимо алгоритмическое обеспечение, позволяющее рассчитывать L_0 , L_1 , $Q(n,k)$, строить поверхность отклика и выбирать допустимые планы контроля. Алгоритм должен

быть воспроизводимым, поскольку результаты расчета используются не только в теоретическом анализе, но и в программно-информационном обеспечении ИИУС.

Общий алгоритм расчета характеристик плана контроля имеет вид, представленный на рисунке 20.

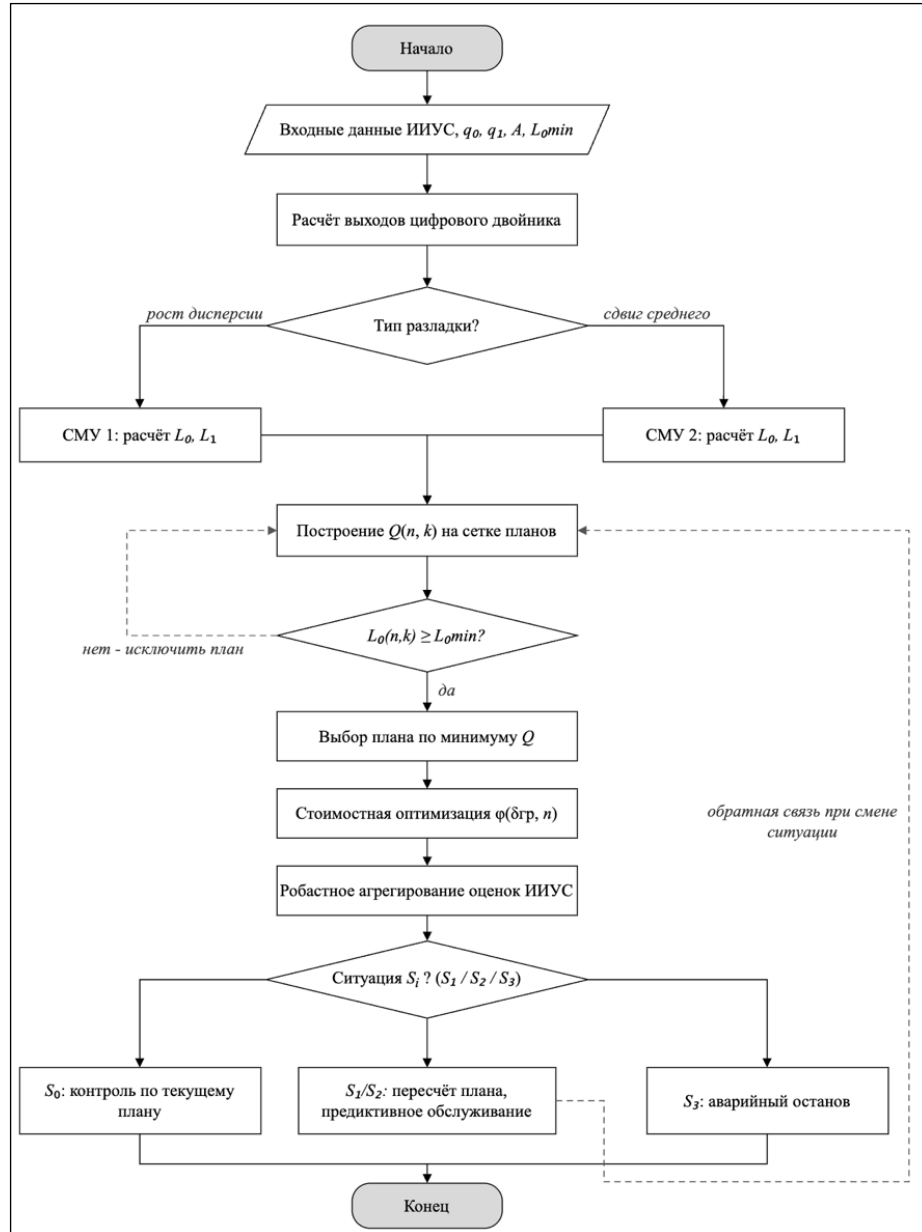


Рисунок 20 – Блок-схема алгоритма расчёта характеристик плана контроля по критерию Q

Учёт параметров B , q_1 , q_0 , D и E позволяет снизить стоимостные затраты, связанные со статистическим управлением ПТК, на 10-28% [13]. Это означает, что алгоритмическое обеспечение должно включать не только расчёт минимального Q , но и анализ диапазонов параметров, выбор квазиоптимального плана и проверку чувствительности к ошибке оценивания исходных данных.

Математический аппарат образует единую формальную основу для последующих методических решений. Количественную цель управления по браку задаёт критерий Q ; корректные выражения для средних длин серий дают модели СМУ 1 и СМУ 2; прогноз состояния вместе с оценкой неопределённости формирует гибридный цифровой двойник; связь прогноза с управленческим действием обеспечивает динамическая матрица рисков. Эта связка применяется в главе 3 при построении методики управления техническим состоянием ПТК.

2.9 Накопление данных эксплуатационного мониторинга и аппроксимация расчётных зависимостей

Модели подразделов 2.2-2.8 оперируют величинами, которые заранее не заданы куда входят уровни брака в налаженном и разлаженном состояниях, среднеквадратическое отклонением контролируемого параметра, средняя продолжительность налаженной работы. Оценивают их по данным эксплуатационного мониторинга, а потому практическая применимость расчётного контура зависит от того, как организовано накопление данных и каким способом восстанавливаются непрерывные зависимости по конечной выборке.

Накопление данных организовано по трём горизонтам, различающимся темпом поступления и назначением. Оперативный горизонт образуют отсчёты измерительных каналов с периодом дискретизации; они служат для текущего оценивания состояния и формирования невязки цифрового двойника. Тактовый горизонт составляют выборки объёма n , снимаемые с периодом контроля k ; на нём вычисляют выборочные средние и принимают решение о выходе процесса за границы регулирования. Межрегулируемый горизонт охватывает интервал между двумя наладками; на нём накапливают статистику для оценки параметров q_0 , q_1 , σ и T_0 , входящих в критерий эффективности.

Разделение горизонтов существенно для корректности оценивания. Параметры критерия Q нельзя оценивать по данным одного такта контроля: они относятся к поведению комплекса на интервале между наладками. Объём накопленных данных определяет достижимую точность оценивания и,

следовательно, обоснованность выбранного плана контроля. Из зависимости L_0 и L_1 от σ , показанной в разделе 2.5, следует, что определяющим для устойчивости решения является оценивание σ : при систематической недооценке этой величины расчётная средняя длина серии до ложного сигнала завышается, а фактическая частота ложных остановок превышает проектную. При ограниченном объёме данных оценку σ в связи с этим смещают в сторону завышения – такое смещение соответствует консервативной настройке плана контроля.

Непрерывные зависимости восстанавливают по накопленным данным аппроксимацией. В расчётном контуре она требуется в трёх задачах. Первая – построение поверхности отклика $Q(n,k)$, где значения критерия вычисляют в узлах дискретной сетки допустимых значений объёма выборки и ширины контрольных границ, а поиск оптимума и анализ чувствительности требуют уже гладкой зависимости. Вторая задача – восстановление зависимости вероятности брака за межрегулируровочный цикл от уровня брака при разладке. Третья – построение траектории деградации по дискретным наблюдениям для прогноза остаточного ресурса.

Способ аппроксимации в каждой задаче диктуется характером зависимости и требованиями к результату. Поверхность отклика $Q(n,k)$ восстанавливают поэтапной интерполяцией по узлам сетки в области допустимых планов которой зависимость гладкая и монотонная по каждому аргументу, поэтому интерполяция устойчива. Немонотонные зависимости вероятности брака аппроксимируют сплайнами [58], сохраняющими положение экстремума. Для траектории деградации применяют гибридную схему подраздела 2.10, где параметрический тренд исправного состояния задаёт физическая составляющая, а остаточную невязку восстанавливает нейросетевая. Аппроксимация траектории не сводится тем самым к подбору сглаживающей кривой и сохраняет физическую интерпретируемость.

Задачи аппроксимации, возникающие в расчётном контуре ИИУС ПТК, обобщены в таблице 23.

Таблица 23 – Задачи аппроксимации в расчётном контуре ИИУС ПТК

Задача	Исходные данные	Способ аппроксимации	Требование к результату
Поверхность отклика $Q(n,k)$	значения в узлах сетки планов	кусочно-полиномиальная интерполяция	гладкость, сохранение монотонности
Зависимость q от q_1 (СМУ 2)	расчётные значения по модели	сплайновая аппроксимация	сохранение положения экстремума
Траектория деградации узла	отсчёты измерительных каналов	физическая модель + нейросетевая коррекция невязки	физическая интерпретируемость прогноза
Оценка параметров q_0, q_1, σ, T_0	статистика межрегулирующего цикла	точечное и интервальное оценивание	консервативность оценки σ

Накопленные данные и восстановленные зависимости образуют информационную основу расчётного контура. Оценки параметров определяют значение критерия эффективности, аппроксимированная поверхность отклика – выбор плана контроля, восстановленная траектория деградации – прогнозную составляющую интервальной оценки состояния. Ограниченность объёма данных при этом не устраняется, а учитывается. Величины, оценённые с существенной неопределённостью, вводят в расчёт в интервальной форме. Это обосновывает переход к квазиоптимальному выбору плана контроля при интервально заданных параметрах, рассматриваемому в главе 3.

2.10 Выводы по главе 2

Разработана математическая постановка задачи оценки и прогнозирования состояния ПТК в составе ИИУС, в которой совместно учитываются технологические параметры, диагностические признаки, показатели качества, надёжность оборудования и интервальная неопределённость данных.

Обоснован критерий эффективности функционирования ИИУС ПТК в виде среднего уровня брака за межрегулирующий период Q . Показано, что при $q_1 > q_0$ критерий монотонно возрастает по L_1 , что связывает эффективность управления со скоростью обнаружения разладки.

Проанализирована классическая статистическая модель управления, опирающаяся на контрольные карты выборочных средних, и установлено, что для

ПТК приборостроения её возможностей недостаточно, так как она не разделяет механизмы разладки.

Введены уточненные статистические модели управления СМУ 1 и СМУ 2, описывающие соответственно рост дисперсии между партиями и сдвиг среднего значения. Для них приведены формулы средних длин серий L_0 и L_1 , необходимые для расчета критерия Q .

Описана модель гибридного цифрового двойника, основанная на нейросетевой коррекции невязки физической модели. Показано, что цифровой двойник, использующий нейросетевую коррекцию для устранения систематической невязки физической модели, обеспечивает интервальный прогноз технического состояния и оценку остаточного ресурса, пригодные для использования на статистическом и рисковом уровнях архитектуры.

Сформировано алгоритмическое обеспечение расчета поверхности $Q(n,k)$, допустимой области $L_0 \geq L_{0min}$ и выбора плана контроля. Это позволяет перейти от математических моделей к методике управления ПТК.

Динамическая модель риска, интегрированная с выходами цифрового двойника (вероятность отказа $P_{отк}(t)$) и критерием Q), позволяет перейти от диагностики состояния к управленческому решению. Она учитывает не только вероятность отказа, но и последствия для ПТК, а также задает правила изменения режима контроля, обслуживания или останова оборудования.

3 МЕТОДИКА РАСЧЁТА ПЛАНА КОНТРОЛЯ И УПРАВЛЕНИЯ СОСТОЯНИЕМ ПТК

3.1 Назначение и место методики в общем контуре ИИУС ПТК

Расчётную основу управления состоянием производственно-технологического комплекса задают математические модели главы 2, однако завершённой инженерной процедуры они сами по себе не образуют. Чтобы применить их в составе ИИУС, возникает необходимость реализации методики, которая переводит результаты измерений, статистического моделирования и прогнозирования в конкретные характеристики плана контроля и управляющие действия.

Под методикой понимается упорядоченная совокупность исходных данных, расчётных моделей, правил выбора допустимых решений, критериев оптимизации, алгоритмов проверки устойчивости и процедур формирования управляющего воздействия. От отдельной математической модели она отличается тем, что задаёт последовательность действий, применимую инженером или программным модулем ИИУС при настройке и эксплуатации ПТК.

Общая логика методики состоит в том, что ИИУС ПТК не должна фиксировать контрольный план один раз на этапе проектирования. В приборостроительном производстве параметры разладки, уровень брака, периодичность переналадок, интенсивность износа и стоимость регулировки имеют как технологическую, так и стохастическую природу. Поэтому статический план контроля может быть эффективен только в узкой области исходных условий. При изменении механизма разладки или переходе объекта в предаварийную зону целесообразно пересматривать параметры контроля, усиливать мониторинг либо назначать техническое обслуживание до наступления отказа.

Методика опирается на три группы моделей:

- статистические модели управления СМУ 1 и СМУ 2,
- критерий среднего уровня брака Q ;

– стоимостный функционал ϕ – суммарные затраты на контроль, регулировку и брак, зависящие от характеристик плана.

Дополнительно предлагается реализация риск-ориентированного блока, основанный на динамической матрице рисков и прогнозе вероятности отказа. Такое объединение позволяет рассматривать контроль качества и техническое состояние оборудования в едином контуре, а не как две независимые задачи.

Прежде чем переходить к разработке каждого компонента методики по отдельности, полезно свести их воедино и показать, какие входные данные использует каждый компонент, что он рассчитывает и как результат расчёта используется при управлении ПТК. Такой обзор приведён в таблице 24.

Таблица 24 – Основные компоненты предлагаемой методики

Компонент методики	Входные данные	Расчетный результат	Управленческое значение
Статистическая модель управления	тип разладки, σ_0 , σ_1 , δ/σ_0	L_0, L_1, q_0, q_1	описание механизма разладки
Критерий Q	A, q_0, q_1, L_1	средний уровень брака	выбор допустимого плана контроля
Стоимостный функционал ϕ	$D, E, B, q_0, q_1, L_0, L_1$	$\delta_{гр}$	минимизация затрат контроля и брака
Динамическая оценка рисков	P_i зона риска	состояние S_0-S_3	регулировка, ТО или останов

3.2 Выбор характеристик плана контроля по критерию среднего уровня брака

Первый уровень методики – расчёт характеристик плана контроля по критерию среднего уровня брака за межрегулируемый период. Этот уровень применяют, когда основная цель состоит в обеспечении требуемого выхода годных изделий при ограничении частоты ложных сигналов. Приборостроительный ПТК рассматривают здесь как объект, последовательно находящийся в налаженном и разлаженном состояниях. Разладку обнаруживают не мгновенно, а с задержкой, которую определяют средние длины серий выборок.

Исходные данные включают уровни брака q_0 и q_1 , среднюю длительность налаженного состояния T_0 , период контроля T_k , оценку стандартного отклонения

контролируемого параметра σ , минимально допустимое значение L_{0min} и предполагаемый тип статистической модели управления. При разладке в виде роста разброса средних между партиями используют СМУ 1, а при разладке в виде дрейфа или сдвига среднего значения используют СМУ 2. Разделение принципиально так как сводится к одинаковым контрольным границам, которые дают разную скорость обнаружения разладки при разных физических механизмах её возникновения.

Перечисленные исходные данные объединяются в единый показатель эффективности плана контроля – критерий среднего уровня брака, который имеет вид:

$$Q = \frac{A \times q_0 + L_1 \times q_1}{A + L_1}, \quad A = \frac{T_0}{T_k}. \quad (3.1)$$

Здесь A характеризует надежность оборудования в единицах числа контрольных выборок за период налаженной работы, а L_1 показывает среднее число выборок, требуемое для обнаружения разладки. Чем меньше L_1 , тем быстрее разладка обнаруживается и тем меньше времени ПТК работает с повышенным уровнем брака q_1 . При $q_1 > q_0$ критерий Q монотонно возрастает по L_1 , поэтому минимизация Q по характеристикам плана контроля эквивалентна поиску плана, обеспечивающего малую задержку обнаружения разладки при сохранении допустимой частоты ложных сигналов.

При использовании контрольных карт выборочных средних характеристиками плана контроля являются объем выборки n и ширина контрольных границ k . В общем случае для каждой пары (n, k) вычисляются вероятности выхода точки за контрольные границы при налаженном и разлаженном состояниях, затем определяются L_0 и L_1 , после чего по формуле (3.1) рассчитывается значение Q . Допустимой считается только такая пара (n, k) , для которой выполнено ограничение:

$$L_0(n, k) \geq L_{0min}. \quad (3.2)$$

Ограничение (3.2) необходимо по следующей причине. Простое сужение контрольных границ почти всегда снижает L_1 и уменьшает Q , но одновременно

резко увеличивает число ложных сигналов. В производстве ложные сигналы вызывают остановки, внеплановые проверки, нарушение ритмичности выпуска и рост затрат. План с минимальным Q , но слишком малым L_0 практически неприемлем.

Методика выбора плана контроля по критерию Q включает пять этапов. Сначала задают исходные параметры ПТК и выбирают статистическую модель управления, затем формируют расчётную сетку значений n и k . В каждой точке сетки вычисляют L_0 , L_1 и Q , после чего исключают варианты, для которых L_0 оказывается меньше L_{0min} . Из оставшихся допустимых вариантов выбирают план с минимальным Q . При близких значениях Q предпочтение отдают меньшему n : рост объёма выборки повышает стоимость и длительность контроля.

В инженерной реализации имеет смысл рассматривать не единственную оптимальную точку, а всю поверхность $Q(n,k)$, так как она выявляет устойчивые области, где небольшие погрешности задания n или k не приводят к заметному росту брака. Особенно это важно для мелкосерийного производства, где статистические оценки параметров ПТК получают по ограниченному числу партий.

В таблице 25 приведена последовательность выбора плана контроля.

Таблица 25 – Последовательность выбора плана контроля по критерию Q

Этап	Содержание расчета	Результат этапа
1	Задание $q_0, q_1, T_0, T_k, \sigma, L_{0min}$ и типа СМУ	исходный набор параметров
2	Построение расчетной сетки n и k	множество альтернативных планов
3	Расчет $L_0(n,k), L_1(n,k)$	характеристики скорости сигнализации
4	Расчет $Q(n,k)$	поверхность критерия брака
5	Исключение планов с $L_0 < L_{0min}$	допустимая область
6	Выбор минимума Q при минимально достаточном n	рекомендуемый план контроля

3.3 Стоимостная оптимизация плана контроля

Критерий Q удобен тем, что он выражен непосредственно в долях брака и не требует задания стоимостных коэффициентов. Однако в реальном производстве выбор плана контроля зависит также от затрат на контроль, затрат на регулировку и потерь от выпуска бракованной продукции. Поэтому вторым уровнем методики

является стоимостная оптимизация [78], позволяющая получить план контроля, минимизирующий совокупные издержки статистического управления ПТК.

Функционал стоимостных затрат обозначим через $p_{hi}(\delta_{гр}, n)$, где $\delta_{гр}$ характеризует положение контрольных границ, а n – объем выборки. В состав функционала входят три группы затрат – затраты на проведение контроля, затраты на регулировку по сигналам о разладке и потери от брака. В безразмерной форме функционал может быть записан как:

$$\varphi(\delta_{гр}, n) = \varphi_k(\delta_{гр}, n) + \varphi_p(\delta_{гр}, n) + \varphi_b(\delta_{гр}, n). \quad (3.3)$$

Величины $\Phi_{контр}$, $\Phi_{рег}$ и $\Phi_{деф}$ зависят от параметров статистической модели управления через q_0 , q_1 , L_0 и L_1 . Таким образом, стоимостная оптимизация не является внешним дополнением к статистической модели, а непосредственно использует результаты второй главы. Если план контроля выбран слишком мягким, уменьшаются затраты на контроль и ложные регулировки, но увеличиваются потери от брака. Если план слишком жесткий, уменьшается задержка обнаружения разладки, но возрастают затраты на контроль и ложные сигналы. Оптимум возникает как компромисс между этими тремя составляющими.

Для практических расчетов удобно использовать относительные коэффициенты D и E . Коэффициент D характеризует отношение стоимости регулировки к потерям от брака, а коэффициент E – отношение стоимости контроля к потерям от брака. Параметр B отражает среднее число партий, выпускаемых при налаженном ПТК. Тогда задача стоимостной оптимизации может быть записана как:

$$(\delta_{гр}^*, n^*) = \arg \min \varphi(\delta_{гр}, n \mid B, q_0, q_1, D, E, \text{СМУ}). \quad (3.4)$$

Минимизация функционала p_{hi} выполняется численно, поскольку аналитическое решение по обоим параметрам плана в общем случае недостижимо. Расчет выполняется численным методом по сетке значений $\delta_{гр}$ и n . При этом для каждого сочетания характеристик плана контроля сначала вычисляются L_0 и L_1 по выбранной СМУ, затем рассчитывается значение функционала p_{hi} . Наличие локальных минимумов требует анализировать всю расчетную область, а не ограничиваться градиентным спуском от произвольной начальной точки. В разделе

3.7 для существенно иной по структуре задачи – робастного агрегирования интервальных оценок применяется генетический алгоритм. Здесь же, при выборе $(\delta_{гр}, n)$, генетический алгоритм или другие эвристические методы не являются обязательными – при умеренной размерности задачи сеточный расчет обеспечивает воспроизводимость и наглядность, а необходимость в эвристике возникает лишь при существенном усложнении постановки – например, при расширении на многопараметрический случай или добавлении дискретных переменных, как это сделано в задаче агрегирования.

В расчётной части применяются значения, полученные по формулам функционала стоимостных затрат и параметрам конкретной СМУ. На рисунке 21 приведен пример поверхности функционала стоимостных затрат $p_{hi}(\delta_{гр})$.

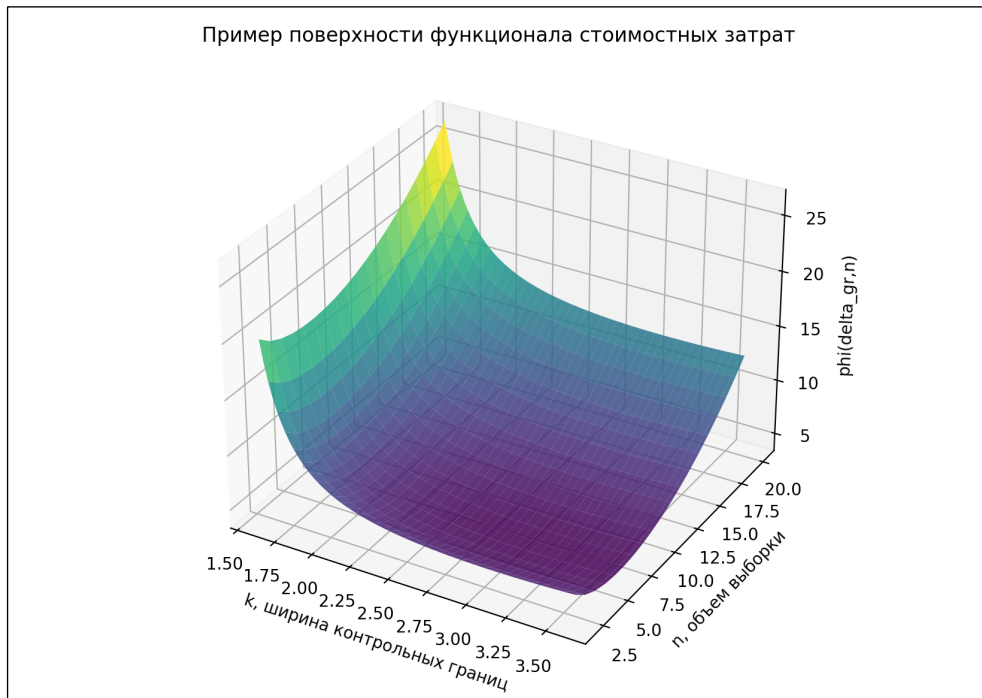


Рисунок 21 – Пример поверхности функционала стоимостных затрат $p_{hi}(\delta_{гр})$

Практический диапазон параметров принимают следующим (диапазоны заданы экспертно, с целью охватить типовую изменчивость технико-экономических условий приборостроительных предприятий):

- $q_0 = 0,01-0,1$;
- $q_1/q_0 = 2-8$;
- $B = 10-50$;
- $D = 0,1-10$;

– $E = 0,0001-0,001$.

Существование оптимальных характеристик плана контроля как для СМУ 1, так и для СМУ 2 в этих пределах, а также стоимостной выигрыш относительно традиционного плана подтверждены вычислительным экспериментом в разделе 4.5. Наиболее заметен выигрыш при малых степенях разладки, где традиционный план либо недостаточно чувствителен, либо избыточен по затратам.

Методика стоимостной оптимизации завершается не только расчетом $\delta_{гр}^*$ и n^* , но и анализом чувствительности. Анализ чувствительности показывает, какие исходные параметры необходимо задавать с высокой точностью, а какие могут быть заданы приближенно без заметного роста функционала p_{hi} . По материалам предварительных расчетов наибольшие требования предъявляются к оценке среднего числа партий B и уровня брака при разладке q_1 . Это объясняется тем, что именно эти параметры определяют длительность и тяжесть работы ПТК в разлаженном состоянии.

На рисунке 22 представлены требования к точности задания параметров.



Рисунок 22 – Иллюстрация требований к точности задания параметров при ограничении роста функционала p_{hi}

В таблице 26 приведены параметры стоимостной оптимизации и рекомендации.

Таблица 26 – Параметры стоимостной оптимизации и рекомендации по их заданию

Параметр	Физический смысл	Влияние на p_{hi}	Рекомендация по оценке
B	среднее число партий до разладки	высокое	оценивать по эксплуатационной статистике и доверительным интервалам
q_1	уровень брака при разладке	высокое, возможна немонотонность	анализировать весь допустимый диапазон
q_0	уровень брака при налаженном ПТК	среднее	использовать технологическую статистику стабильного режима
D	относительная стоимость регулировки	среднее	уточнять для типов регулировки
E	относительная стоимость контроля	низкое/среднее	допускается укрупненная оценка

3.4 Расчет квазиоптимального плана при неопределенных параметрах ПТК

В условиях эксплуатации ПТК приборостроения исходные параметры редко известны точно. Уровень брака 1 при разладке может изменяться от цикла к циклу, время до разладки имеет случайную природу, а стоимость регулировки зависит от конкретной причины отклонения. Поэтому план, оптимальный для одной точки параметрического пространства, может оказаться неустойчивым при небольшом изменении исходных данных. Для устранения этого недостатка в методику вводится расчет квазиоптимального плана контроля.

Квазиоптимальный план – это такой план контроля, который не обязательно является строго оптимальным для одной выбранной точки параметров, но обеспечивает приемлемые значения функционала качества или стоимости на всем заданном диапазоне неопределенности. В отличие от точечной оптимизации, квазиоптимизация ориентирована на устойчивость решения. Особое значение это имеет для мелкосерийного приборостроительного производства, где объем исторических данных ограничен, а диапазон эксплуатационных условий широк.

Пусть вектор неопределенных параметров обозначен как:

$$\theta = \{B, q_0, q_1, D, E\}. \quad (3.5)$$

Каждый параметр задан не точкой, а интервалом допустимых значений:

$$\theta \in \Theta = [B^-, B^+] \times [q_0^-, q_0^+] \times [q_1^-, q_1^+] \times [D^-, D^+] \times [E^-, E^+] \quad (3.6)$$

Тогда задача квазиоптимального выбора плана контроля может быть представлена как минимаксная или компромиссная задача. В минимаксной постановке выбирается план, минимизирующий наихудшее значение функционала p_{hi} на всем множестве неопределенности:

$$(\delta_{gr}^q, n^q) = \arg \min_{\delta, n} \max_{\theta \in \Theta} \varphi(\delta_{gr}, n, \theta). \quad (3.7)$$

В компромиссной постановке можно минимизировать среднее значение p_{hi} при ограничении на максимально допустимое ухудшение относительно точечного оптимума:

$$\varphi(\delta_{gr}, n, \theta) \leq (1 + \varepsilon) \varphi_{opt}(\theta), \quad \text{для всех } \theta \in \Theta. \quad (3.8)$$

Для применения в ИИУС ПТК целесообразна комбинированная процедура. Сначала точечные оптимумы рассчитывают для границ диапазона параметров. Затем определяют область планов, где приращение функционала не превышает допустимого уровня (принято 15% – значение, обеспечивающее заметный запас по устойчивости при умеренном отклонении от точечного оптимума). Среди планов этой области выбирают план с наибольшим значением.

Алгоритм расчёта квазиоптимального плана приведён на рисунке 23.

Алгоритм принимает на входе интервалы возможных значений параметров q_0, q_1, B, D, E и последовательно выполняет три шага. На первом для каждой из угловых комбинаций интервала рассчитывается точечный оптимум плана. На втором вычисляется область планов, в пределах которой приращение функционала p_{hi} относительно наихудшего из точечных оптимумов не превышает допустимого уровня. На третьем шаге среди планов этой области выбирается план с минимальным объёмом выборки и наиболее устойчивым положением контрольных границ.

Введение квазиоптимального плана повышает устойчивость методики к неопределённости входных данных. Одновременно оно согласует статистическое управление с риск-ориентированной логикой. При ненадёжно заданных

параметрах ПТК система выбирает не самый агрессивный план, а план с достаточным запасом устойчивости.

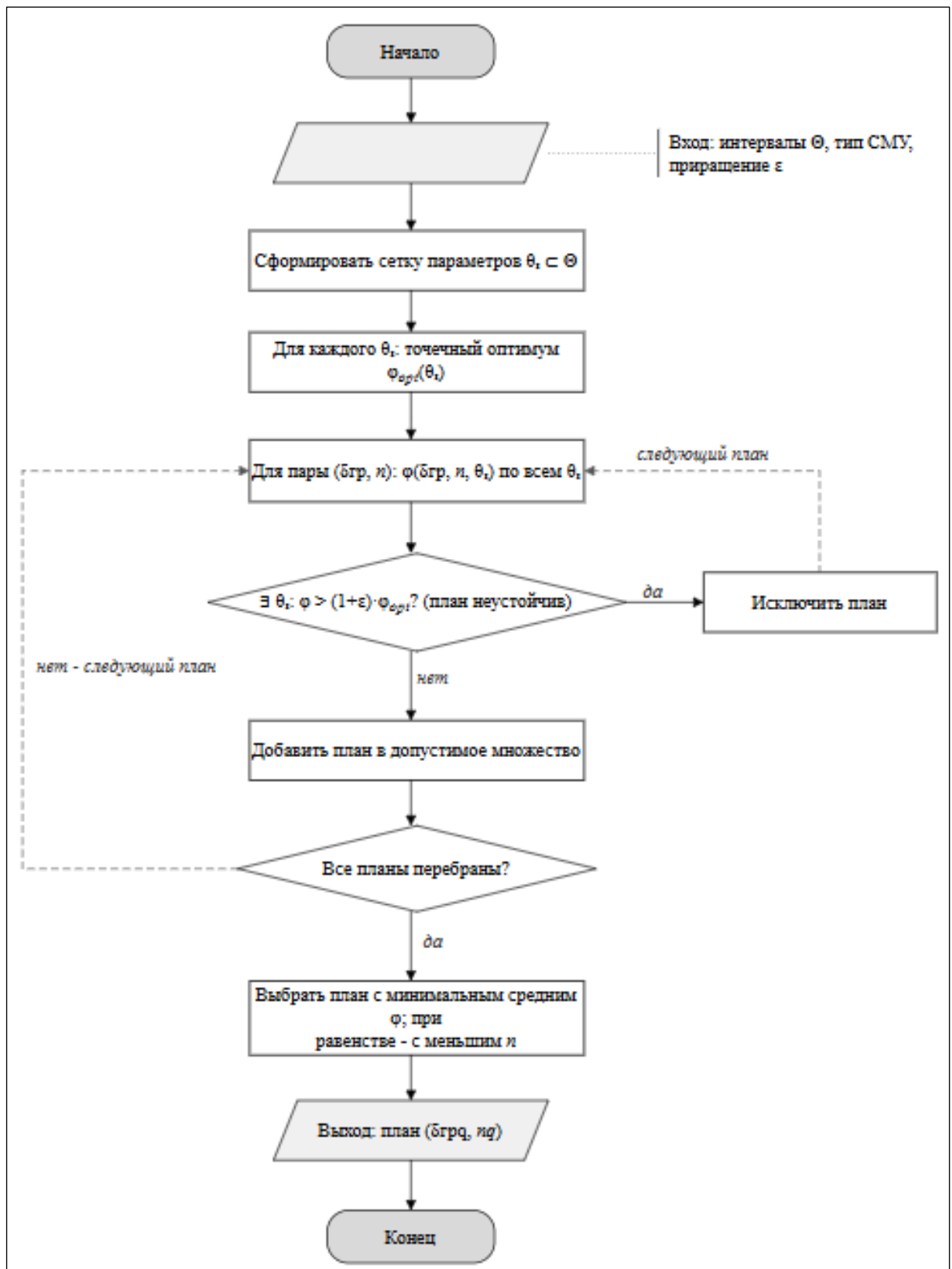


Рисунок 23 – Алгоритм расчёта квазиоптимального плана контроля при интервальной неопределённости параметров

3.5 Интеграция методики с динамической оценкой рисков и предиктивным обслуживанием

Расчёт плана контроля по критериям Q и p_{hi} обеспечивает управление качеством процесса [79]. Полноценная ИИУС ПТК требует дополнительно учитывать риск отказа оборудования [80-84]. Для приборостроительных комплексов это особенно существенно так как отказ прецизионного оборудования влечёт не только выпуск брака, но и потерю метрологической прослеживаемости, нарушение испытательного цикла, длительный простой. Исходя из этого, предлагается методика, дополненная блоком динамической оценки рисков, где информацию о текущем и прогнозном состоянии оборудования переводят в зону риска и соответствующее управляющее действие [85].

Для i -го объекта мониторинга риск определяется как:

$$R_i(t) = L_i^P(t) L_i^C(t), \quad (3.9)$$

где $L_i^P(t)$ – дискретный уровень вероятности отказа;

$L_i^C(t)$ – дискретный уровень последствий.

Интегральный риск ПТК может быть представлен в виде взвешенной суммы:

$$R_\Sigma(t) = \sum_{i=1}^{N_o} w_i R_i(t), \quad (3.10)$$

где w_i – коэффициент критичности объекта. При использовании прогнозных оценок цифрового двойника аналогично формируется прогнозный риск $R_i(t+h)$, что позволяет принимать решение не только по текущему состоянию, но и по ожидаемому входу объекта в нежелательную или недопустимую зону.

Динамическая матрица рисков выполняет роль слоя интерпретации результатов мониторинга. В статическом FMEA [52] – методе, позволяющем идентифицировать тяжесть последствий видов потенциальных отказов и обеспечить меры по снижению риска – оценку риска задают экспертно и обновляют редко. Выбор в пользу динамической матрицы обоснован тем, что она пересчитывается при каждом обновлении данных ИИУС, что позволяет отслеживать траекторию движения объекта по зонам риска и назначать

обслуживание до фактического отказа. Методика выделяет четыре зоны риска: приемлемую, допустимую, нежелательную и недопустимую.

На рисунке 24 представлена динамическая матрица рисков ПТК [86, 87].

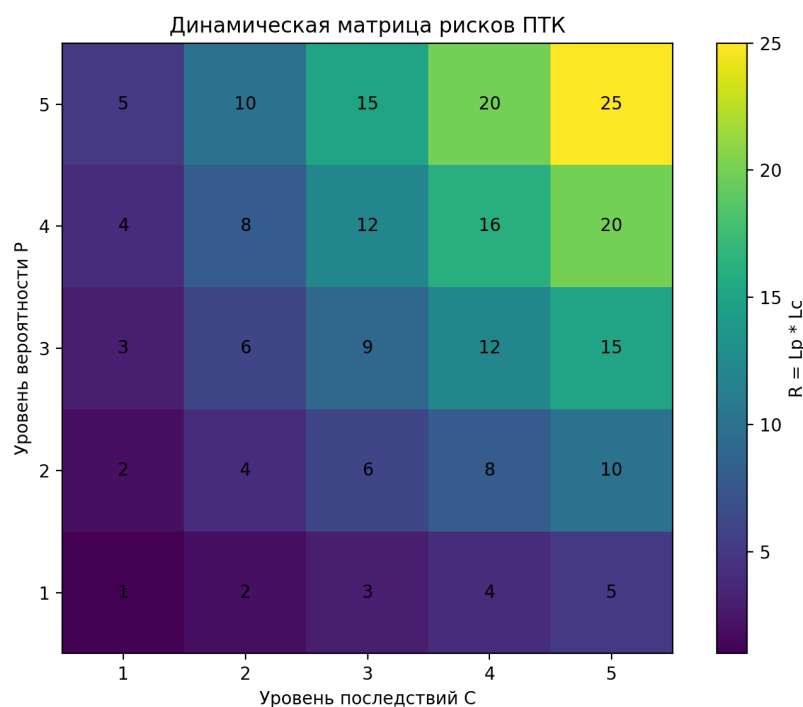


Рисунок 24 – Динамическая матрица рисков ПТК

Значение риска $M_i(t)$, рассчитанное по формуле (2.32), относят к одной из четырёх зон матрицы – от приемлемой до недопустимой, каждой из которых соответствует своё управляющее действие ИИУС. Границы зон и связанные с ними действия обобщены в таблице 27.

Таблица 27 – Зоны динамической матрицы рисков и управляющие действия

Зона риска	Диапазон R_i	Интерпретация	Управляющее действие
Приемлемая	1-4	оборудование работает в штатном режиме	плановый контроль
Допустимая	5-9	наблюдаются признаки ухудшения	повышенный мониторинг
Нежелательная	10-16	высока вероятность перехода к отказу	внеплановое ТО, пересчет плана контроля
Недопустимая	17-25	риск отказа или брака критичен	останов, ремонт, блокировка выпуска

Связь между динамической матрицей рисков и статистическим планом контроля задается через ситуационную модель S_0 - S_3 . Если объект находится в зоне приемлемого риска, применяется план контроля, рассчитанный для состояния S_0 . При переходе в допустимую зону система усиливает мониторинг, но не

обязательно изменяет режим работы. При входе в нежелательную зону запускается пересчет характеристик плана контроля с использованием обновленных оценок σ , q_1 и B . При достижении недопустимой зоны управление переходит из режима статистического контроля в режим аварийного реагирования [50, 51].

Такой подход позволяет объединить контроль качества, диагностику технического состояния и риск-ориентированное обслуживание в единую методику. С точки зрения диссертационной новизны важно подчеркнуть, что динамическая матрица рисков не заменяет критерий Q , а дополняет его. Критерий Q отвечает на вопрос, какой план контроля минимизирует средний уровень брака. Матрица рисков отвечает на вопрос, когда уровень технического риска требует изменения режима управления или остановки оборудования.

3.6 Программно-алгоритмическая реализация методики в ИИУС ПТК

Внедрение методики в ИИУС ПТК требует её представления в виде программно-алгоритмического контура. Контур обеспечивает автоматический приём данных, обновление параметров моделей, расчёт плана контроля, классификацию состояния и формирование управляющего решения. Программная реализация рассматривается в работе как совокупность функциональных модулей. Каждый модуль при этом отвечает за отдельный этап обработки.

На первый модуль возложены приём, и предварительная обработка данных который проверяет полноту временных рядов, синхронизирует измерительные каналы, удаляет грубые выбросы, формирует интервальные оценки параметров и вычисляет показатели достоверности каналов [88]. Второй модуль реализует цифровой двойник, выдавая прогнозные оценки Y_{hyb} , Y_{res} , σ и RUL . Третий определяет тип СМУ и рассчитывает L_0 , L_1 , q_0 . Пятый этап необходим для формирования динамической матрицы рисков, предложения ситуационного решения, который уже согласуется с лицом, принимающим решение.

Общая структура программного обеспечения, реализующего расчётную последовательность методики, вынесена в Приложение А, где приведены

структура программных модулей и укрупнённый фрагмент функции выбора плана контроля.

При промышленной реализации функцию выбора плана контроля следует сопровождать журналированием исходных параметров, версии модели, времени расчёта, выбранного плана и причины изменения управляющего режима. Без этого невозможен последующий аудит решений ИИУС, особенно когда результатом становится останов оборудования или изменение режима обработки.

На рисунке 25 представлен расчётный контур методики управления состоянием ПТК.

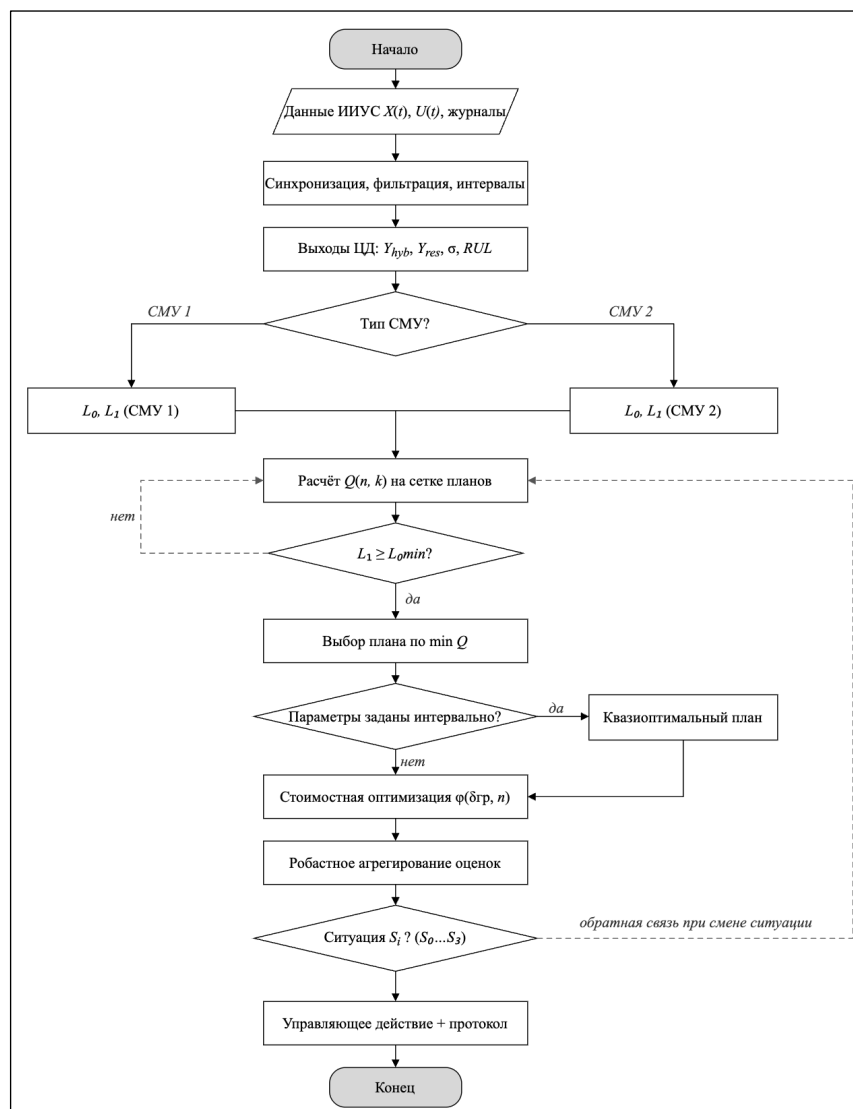


Рисунок 25 – Алгоритм расчётного контура методики управления техническим состоянием ПТК

Для реализации в промышленной ИИУС все вычислительные модули должны иметь диагностируемый интерфейс. Это необходимо для последующего

анализа действий системы, верификации результатов и согласования с требованиями риск-ориентированного управления.

Таким образом, методика главы 3 является не только математической, но и алгоритмически реализуемой. Она может быть встроена в программно-информационное обеспечение ПТК и использоваться как расчетный блок предиктивного обслуживания, статистического управления и риск-ориентированной поддержки принятия решений.

3.7 Робастное агрегирование интервальных оценок технического состояния ПТК

Разработанные в разделах 3.1-3.6 модель гибридного цифрового двойника и статистические модели управления опираются на данные измерительных каналов как на входную информацию, однако сами по себе не решают задачу согласования этих каналов при их взаимном расхождении. После выбора плана контроля ИИУС должна решать другую, не менее важную задачу в формировании текущего решения о состоянии ПТК при наличии нескольких неоднородных источников информации [89]. На практике эти источники редко согласуются полностью. Вибрационный канал может раньше реагировать на механический дефект, температурный канал – запаздывать, цифровой двойник – давать сглаженную оценку, а экспертно-регламентная информация обновляться дискретно. Поэтому точечное усреднение таких оценок может скрыть опасное расхождение между каналами.

Чтобы формально описать согласование таких разнородных источников, введём следующие обозначения на основе аппарата интервального анализа [11, 90-92]. Пусть в момент времени t от N источников поступают интервальные оценки:

$$O_i(t) = [a_i(t), b_i(t)], \quad i = 1, \dots, N. \quad (3.11)$$

Вес источника задается выражением:

$$\gamma_i(t) = w_i v_i r_i(t), \quad (3.12)$$

где w_i – базовая значимость источника;

v_i – значимость соответствующего диагностического критерия;

$r_i(t)$ – текущая достоверность источника, определяемая по полноте данных, уровню шума, межсенсорной согласованности и непротиворечивости цифровому двойнику [93].

Базовая задача агрегирования записывается как:

$$F_0(x_1, x_2) = \sum_i \gamma_i [(x_1 - a_i)^2 + (x_2 - b_i)^2] \rightarrow \min, 0 \leq x_1 \leq x_2 \leq 1. (3.13)$$

При положительных весах γ_i данная задача является выпуклой квадратичной задачей. Ее гессиан равен:

$$\nabla^2 F_0 = 2(\sum_i \gamma_i) I, (3.14)$$

где I – единичная матрица. Следовательно, базовая задача имеет единственное решение, а без учета ограничения $x_1 \leq x_2$ оно определяется взвешенными средними границ:

$$x_1^0 = \frac{\sum_i \gamma_i a_i}{\sum_i \gamma_i}, \quad x_2^0 = \frac{\sum_i \gamma_i b_i}{\sum_i \gamma_i}. (3.15)$$

Это обстоятельство принципиально для обоснования метода. Генетический алгоритм не заменяет аналитическое решение базовой задачи: она имеет выпуклую квадратичную структуру и выступает проверяемым эталоном. Эвристический поиск вводят только при добавлении бинарных переменных включения источников, штрафов за конфликтность, динамической согласованности и асимметричного риска недооценки предотказного состояния.

Расширенная робастная [94, 95] задача агрегирования включает бинарные переменные z_i , отвечающие за включение или исключение источника из итоговой оценки:

$$z_i \in \{0, 1\}. (3.16)$$

Целевая функция расширенной постановки имеет вид:

$$F = F_{agg} + \lambda_1 F_{excl} + \lambda_2 F_{conf} + \lambda_3 F_{width} + \lambda_4 F_{dyn} + \lambda_5 F_{risk} \rightarrow \min (3.17)$$

Здесь F_{agg} – ошибка агрегирования по включенным источникам, F_{excl} – штраф за исключение источников, F_{conf} – штраф за конфликт интервальных оценок, F_{width} – штраф за чрезмерную ширину итогового интервала, F_{dyn} – штраф за резкий скачок состояния относительно предыдущего момента времени, F_{risk} – асимметричный штраф за недооценку опасного состояния [96, 97].

Конфликтность источников может быть описана выражением:

$$F_{conf} = \sum_{i < j} z_i z_j \gamma_i \gamma_j \max(0, D(O_i, O_j) - \tau)^2. \quad (3.18)$$

Асимметричный риск недооценки состояния задается как:

$$F_{risk} = \max(0, q_{0.8}^{(w)} - x_2)^2, \quad (3.19)$$

где $q_{0.8}^{(w)}$ – риск-ориентированная квантиль оценок источников. Смысл данного представления состоит в том, что верхняя граница итогового интервала не должна быть существенно ниже риск-ориентированной оценки, если часть источников указывает на переход к предотказному состоянию.

На рисунке 26 представлена структура робастного агрегирования интервальных оценок.

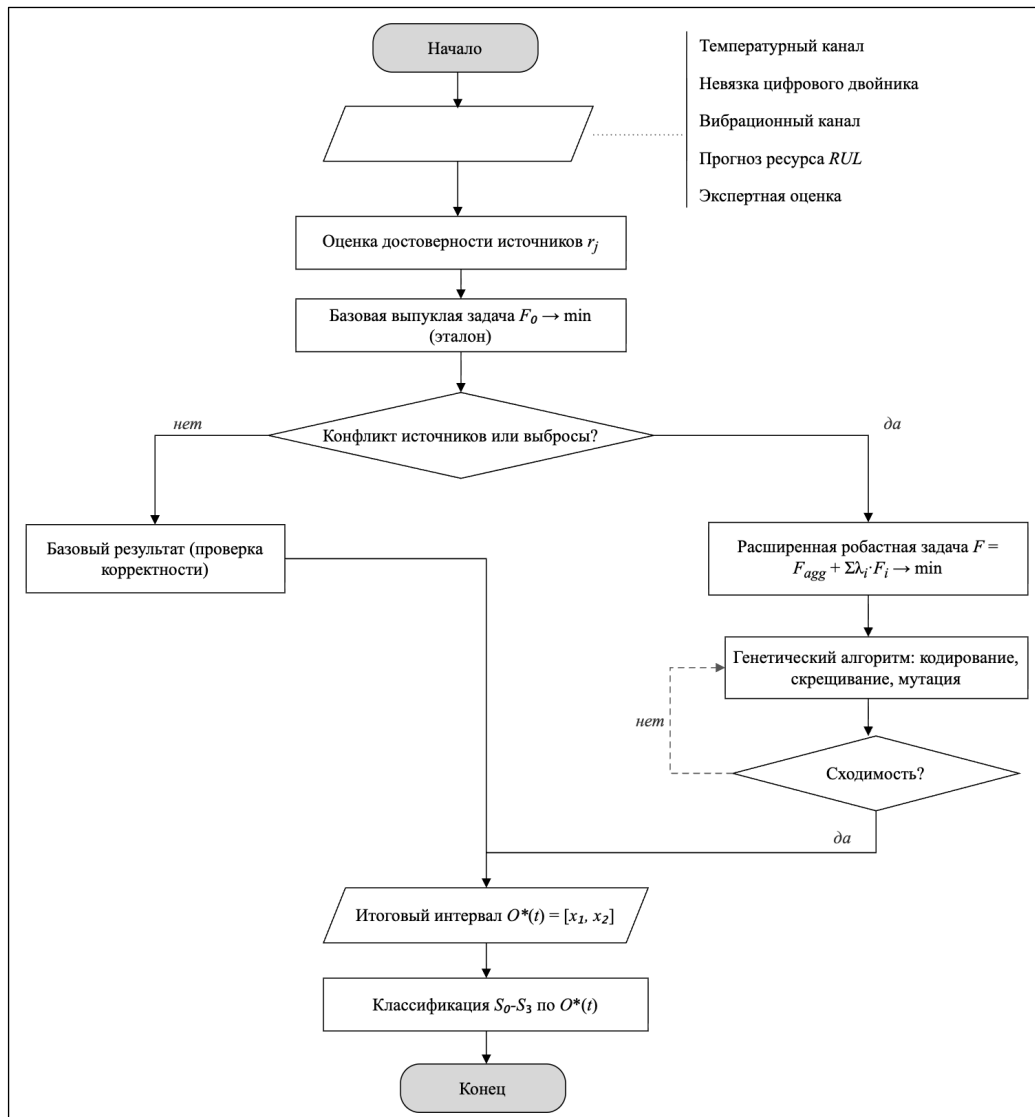


Рисунок 26 – Структура робастного агрегирования интервальных оценок состояния ПТК

В таблице 28 приведены составляющие расширенной робастной задачи.

Таблица 28 – Составляющие расширенной робастной задачи агрегирования

Элемент расширенной задачи	Математический смысл	Инженерная интерпретация
F	Минимизация расстояния до включенных интервалов	Согласование измерительных каналов
F_{excl}	Штраф за исключение источников	Запрет необоснованного удаления данных
F_{conf}	Штраф за конфликтные интервалы	Учет расхождения датчиков и моделей
F_{width}	Штраф за широкую итоговую оценку	Повышение определенности решения
F_{dyn}	Штраф за скачок состояния	Учет инерционности деградации
F_{risk}	Штраф за недооценку опасности	Снижение пропусков S_2 и S_3

Агрегированный интервал $O^*(t)=[x_1(t),x_2(t)]$ применяют не как самостоятельную диагностическую величину, а как вход ситуационного блока управления. Этим предлагаемая методика отличается от обычной задачи группового агрегирования, где в качестве результата не только согласованная оценка, но и решение о сохранении текущего плана контроля, его возможного пересчета, а также определения о необходимости выполнения предиктивного обслуживания.

Расширенная постановка задачи агрегирования содержит непрерывные переменные в виде границ агрегированного интервала и дискретные переменные включения источников. Смешанный характер задачи и попарные слагаемые, описывающие конфликтность источников, исключают применение градиентных методов. Производная по признаку включения источника не определена, а поверхность целевой функции разрывна при переключении состава включённых источников. Полный перебор также неприменим – границы интервала принимают непрерывные значения. Поэтому задачу решают эвристическим методом популяционного поиска. Среди таких методов выбран генетический алгоритм [98, 99], а не, например, имитация отжига или роевые методы, поскольку смешанная хромосома задачи – непрерывные границы интервала и бинарные признаки включения источников – естественно кодируется единой битовой строкой, а операторы скрещивания и мутации работают над ней без отдельной настройки для непрерывной и дискретной частей. Имитация отжига последовательно изменяет

одно решение и медленнее исследует пространство с разрывной целевой функцией, а роевые методы ориентированы на непрерывные переменные и требуют дополнительной дискретизации для признаков включения источников [100].

Особь кодируют двоичной строкой из трёх полей: шестнадцать разрядов отводят под нижнюю границу интервала, столько же под верхнюю и по одному разряду на признак включения каждого источника. Границы кодируются целыми числами, которые отображаются на допустимый диапазон значений состояния; при шестнадцати разрядах шаг дискретизации составляет одну шестьдесят пять тысяч пятьсот тридцать пятую долю ширины диапазона, так что при единичной ширине точность кодирования оказывается не хуже $1 \cdot 10^{-4}$, что согласуется с параметром $prec = 0,0001$, принятым при экспериментальной проверке метода [100]. Расшифровка особи предусматривает восстановление порядка границ: если нижняя граница превысила верхнюю, значения меняют местами. Ограничение на порядок границ выполняется благодаря этому для любой особи.

Приспособленность особи определяется значением обобщённой целевой функции расширенной задачи, взятым с противоположным знаком. Особям, у которых исключены все источники, назначают запретительно низкую приспособленность, и в воспроизводстве они не участвуют.

Для практической реализации генетического алгоритма необходимо конкретизировать состав операторов отбора, скрещивания и мутации, а также их числовые параметры: вероятность кроссовера 0,80 и вероятность мутации 0,05 согласуются со значениями $pcro = 0,8$ и $pmut = 0,05$, принятыми в [100]. Принятые значения сведены в таблице 29.

Таблица 29 – Генетические операторы и их параметры

Оператор	Реализация	Параметр
Отбор	турнирный: из случайно выбранных особей родителем становится особь с наименьшим значением целевой функции	размер турнира 3
Скрещивание	поблочный обмен участками строки; точка разреза выбирается только на границах полей кодировки, что исключает разрушение закодированных числовых значений	вероятность 0,80

Продолжение таблицы 29

Оператор	Реализация	Параметр
Мутация	инверсия разряда; для разрядов признаков включения соответствует изменению состава учитываемых источников	вероятность 0,05
Сохранение лучшего	лучшая особь поколения переносится в следующее поколение без изменений	одна особь
Локальная доводка	поразрядный спуск от найденного решения: инверсия разряда принимается при улучшении целевой функции	до отсутствия улучшений

Алгоритм прекращает работу, если лучшее значение целевой функции не улучшается в течение заданного числа поколений либо если достигнут предельный номер поколения. К найденному решению применяют поразрядный локальный спуск.

Корректность реализации проверена сопоставлением с аналитическим решением базовой задачи. Если обнулить весовые коэффициенты всех штрафных составляющих и принудительно включить все источники, расширенная задача вырождается в базовую выпуклую, оптимум которой задаётся выражением (3.15) – взвешенными средними нижних и верхних границ исходных интервалов. На десяти независимых наборах интервальных оценок относительное отклонение значения целевой функции, достигнутого генетическим алгоритмом, от аналитического оптимума не превысило $7 \cdot 10^{-6}$ при среднем значении $1,2 \cdot 10^{-6}$. По координатам границ расхождение составило не более $6 \cdot 10^{-4}$, что объясняется пологостью целевой функции в окрестности оптимума – указанному расхождению координат отвечает изменение значения целевой функции порядка 10^{-6} .

Возможность сопоставить результат эвристического алгоритма с точным решением снимает методическую уязвимость, обычно свойственную применению генетических алгоритмов так как правильность кодирования, расшифровки и работы генетических операторов подтверждается независимо от конкретного набора исходных данных. Двухуровневая постановка задачи выполняет тем самым сразу две функции – разделяет базовый и робастный режимы агрегирования и служит встроенной проверкой корректности программной реализации.

3.8 Предиктивное обслуживание и формирование управляющих действий

Завершается методика переходом от расчётных оценок к управляющему действию, для чего применяется ситуационная модель S_0 - S_3 , связывающая агрегированный интервал состояния, прогноз цифрового двойника, риск отказа и параметры статистического контроля с конкретным решением ИИУС.

Нормальной эксплуатации отвечает состояние S_0 . В этом случае диагностические признаки лежат в допустимых пределах, устойчивая разладка отсутствует, а агрегированный интервал не достигает порога предупреждения. ИИУС в этом случае сохраняет текущий план контроля и продолжает сбор данных.

Разладке технологического процесса отвечает состояние S_1 . Фиксируют его при росте Q , снижении L_1 , выходе выборочного среднего за контрольные границы либо при устойчивом увеличении невязки цифрового двойника. Управляющее действие здесь включает пересчёт плана контроля, регулировку технологического режима и повышение частоты мониторинга.

Предотказному состоянию отвечает S_2 , признаками которого служат ухудшение статистических характеристик продукции, снижение прогнозного остаточного ресурса, рост риска отказа и расширение интервала состояния в сторону опасной зоны. Решение, формируемое системой, – предиктивное обслуживание, не дожидаясь фактического отказа.

Отказу либо недопустимому риску отказа отвечает состояние S_3 . О нём свидетельствуют достижение критического уровня динамической матрицы рисков, резкое превышение порогов диагностических признаков и подтверждённый отказ компонента ПТК. Управляющее действие в этом случае – останов оборудования, ремонт или исключение объекта из производственного маршрута.

Ситуации технического состояния ПТК и соответствующие управляющие действия сведены в таблице 30.

Таблица 30 – Ситуации технического состояния ПТК и управляющие действия

Ситуация	Критерии отнесения	Управляющее действие	Связь с научными результатами
S_0	$O^*(t)$ в нормальной области, риск приемлемый	Контроль по текущему плану	Используется выбранный (n, k)

Продолжение таблицы 30

Ситуация	Критерии отнесения	Управляющее действие	Связь с научными результатами
S_1	Разладка, рост Q или выход за границы	Пересчет (n,k) , регулировка	Критерий Q и СМУ 1/2
S_2	Снижение RUL , рост риска, верхняя граница интервала в опасной зоне	Предиктивное ТО	ЦД, риск-модель, агрегирование
S_3	Критический риск или подтвержденный отказ	Останов, ремонт, блокировка выпуска	Динамическая матрица рисков

В составе ИИУС методика предиктивного обслуживания играет роль регламента принятия решений, где срок обслуживания диктует не календарь, а сочетание прогнозного состояния, риска и качества продукции. Такой порядок позволяет избежать двух крайностей – преждевременного регламентного останова и запоздалого обслуживания уже после отказа.

Формально правило принятия решения может быть записано как:

$$D(t) = \Psi(O^*(t), Q(t), R_{\Sigma}(t), RUL(t), L_0(t), L_1(t)), \quad (3.20)$$

где $D(t)$ – управляющее решение;

Ψ – правило ситуационного выбора.

В простейшем варианте Ψ реализуется как набор пороговых правил. В более развитой реализации оно может быть дополнено базой знаний, динамической матрицей рисков и журналом предыдущих решений оператора.

Тем самым методика связывает математические модели и измерительные данные с конкретными управляющими действиями – изменением плана контроля, регулировкой, назначением предиктивного обслуживания или остановом оборудования. Благодаря этой связке результат работы можно трактовать как методику управления, а не только как способ диагностики.

3.9 Пример применения методики для ПТК с выбором модели разладки

Чтобы методика воспринималась не как совокупность формальных зависимостей, а как инженерный порядок действий, рассмотрим последовательность её применения к типовой задаче управления ПТК приборостроения. Пусть комплекс выполняет групповую обработку партий

изделий, а контролируемым параметром служит отклонение геометрического размера от номинала. Предварительный анализ показал, что в нормальном состоянии среднее значение параметра близко к нулю, а межпартийное среднеквадратическое отклонение составляет σ_0 . Технологический регламент при этом допускает выборочный контроль каждой партии с объёмом выборки n и границами регулирования, задаваемыми коэффициентом k .

Начинают с определения физической природы разладки. Когда режим оборудования переустанавливается перед каждой партией, случайная ошибка переналадки устойчивого смещения среднего не даёт, но увеличивает разброс выборочных средних между партиями – здесь выбирают СМУ 1. Если же оборудование длительное время работает в одном режиме, а ухудшение качества связано с медленным дрейфом температурного режима, износом оснастки или загрязнением технологической зоны, выбирают СМУ 2. Выбор этот принципиален: при одинаковой внешней картине роста брака механизмы формирования L_1 могут быть различными.

На втором этапе рассчитывают $L_0(n,k)$ и $L_1(n,k)$. Для СМУ 1 величина L_1 определяется отношением σ_1/σ_0 , а для СМУ 2 – приведённым смещением δ/σ_0 , вследствие чего одна и та же пара (n,k) может оказаться приемлемой для одного типа разладки и недостаточной для другого. Практически это значит, что расчёт плана контроля ведут не по универсальной таблице, а по конкретной статистической модели управления, выбранной с учётом организационно-технических признаков ПТК.

Третий этап посвящён построению поверхности $Q(n,k)$. Если классическая настройка карт Шухарта обычно фиксирует $k = 3$ при малом объёме выборки, то предлагаемый подход рассматривает целое множество допустимых комбинаций (n,k) , на которое наложено ограничение $L_0 \geq L_{0min}$, отражающее допустимую частоту ложных сигналов. Благодаря этому ограничению из рассмотрения выпадают планы с чрезмерно узкими границами: формально они снижают Q , но на практике ведут к неприемлемому числу остановок и регулировок.

Детализированный порядок применения методики приведён в таблице 31.

Таблица 31 – Детализированный порядок применения методики к ПТК с выбором типа разладки

Этап	Входные данные	Выполняемая операция	Выход	Инженерный смысл
1	Журнал режимов, карта переналадок, статистика параметра	Выбор СМУ 1 или СМУ 2	Тип модели разладки	Учет физической природы отклонения
2	σ_0 , σ_1 или δ , n , k	Расчет L_0 и L_1	СДС наложенного и разлаженного ПТК	Оценка скорости обнаружения
3	q_0 , q_1 , A , L_1	Расчет $Q(n,k)$	Поверхность критерия брака	Выбор плана по качеству
4	L_{0min}	Формирование допустимой области	$\Omega_{доп}$	Ограничение ложных сигналов
5	D , E , B , q_0 , q_1	Расчет $p_{ni}(\delta_{гр})$	Стоимостная оценка	Учет экономических последствий
6	Интервалы параметров	Квазиоптимизация	Робастный план	Учет неопределенности исходных данных
7	$O^*(t)$, $R_{sum}(t)$, $RUL(t)$	Классификация S_0 - S_3	Управляющее действие	Замыкание контура ИИУС

3.10 Подготовка исходных данных и проверка корректности расчета

Расчёту характеристик плана контроля предшествует приведение данных к сопоставимому виду. В промышленной ИИУС источники данных различны: измерительные каналы, журналы контроля качества, паспорта оборудования, цифровой двойник, экспертные регламенты. Частота обновления, точность, полнота и уровень доверия у них не совпадают. Поэтому методика включает не только формулы выбора плана, но и предварительные правила подготовки данных.

Оценка q_0 и q_1 требует разделения наблюдений на интервалы наложенного и разлаженного состояния. При отсутствии разметки применяют совокупность источников – контрольные карты, данные о регулировках и сведения технолога. Величину q_0 оценивают по устойчивым периодам работы, не содержащим регулировок и аварийных вмешательств. Величину q_1 оценивают по периодам после обнаруженной разладки либо по результатам имитационного моделирования допустимых сценариев ухудшения качества.

Параметр A либо B характеризует среднюю длительность налаженного состояния. Оценивается он наименее определённо: требуется наблюдение достаточного числа межрегулирующих циклов. При малой выборке время до разладки оценивают интервально, и методика поэтому оперирует не единственным значением B , а диапазоном $[B_{min}, B_{max}]$, который применяется далее в квазиоптимальной постановке.

Корректность расчёта проверяют на трёх уровнях. Сначала контролируют исходные данные – отсутствие грубых выбросов, согласованность единиц измерения, корректность периода контроля. Затем проверяют промежуточные зависимости: монотонность L_0 по k , снижение L_1 при росте степени разладки, положительность Q и p_{hi} . Наконец, оценивают инженерный смысл полученного плана: недопустимы решения с чрезмерно большим объёмом выборки, с неконтролируемой частотой ложных сигналов или с технически невозможной периодичностью контроля.

В таблице 32 приведены проверки корректности исходных данных.

Таблица 32 – Проверки корректности исходных данных и промежуточных результатов

Проверяемый элемент	Критерий корректности	Типичная ошибка	Действие
q_0	Оценивается по устойчивому налаженному периоду	Включены переходные режимы	Исключить периоды регулировки
q_1	Соответствует разлаженному состоянию	Смешаны разные причины разладки	Разделить сценарии СМУ
A или B	Имеет доверительный интервал	Используется точечная оценка при малой выборке	Перейти к диапазону параметра
L_0	Растет при увеличении k	Ошибка в формуле вероятности ложного сигнала	Проверить расчет p_0
L_1	Уменьшается при усилении разладки	Неверно выбран тип СМУ	Сопоставить с механизмом разладки
Q и p_{hi}	Положительны и инженерно интерпретируемы	План вне допустимой области	Повторить оптимизацию с ограничениями

3.11 Выводы по главе 3

Разработана методика расчета характеристик плана контроля и управления техническим состоянием ПТК, обеспечивающая переход от математических моделей второй главы к инженерной процедуре настройки ИИУС.

Методика выбора плана контроля по критерию Q позволяет определить объем выборки n и ширину контрольных границ k при ограничении на допустимую частоту ложных сигналов $L_0 \geq L_{0min}$.

Учёт затрат на контроль, регулировку и потери от брака обеспечивается стоимостной оптимизацией плана контроля.

Для условий неопределенности исходных параметров предложена процедура квазиоптимального выбора плана контроля, обеспечивающая устойчивость решения на заданном диапазоне B , q_0 , q_1 , D и E .

Методика дополнена динамической матрицей рисков, которая связывает прогноз вероятности отказа, уровень последствий и управляющее действие; это позволяет перейти от статистического контроля качества к предиктивному обслуживанию.

Сформирована программно-алгоритмическая структура реализации методики в составе ИИУС ПТК, включающая модули предобработки данных, цифрового двойника, статистических моделей, критерия Q , стоимостной оптимизации, матрицы рисков и ситуационного управления.

Расширена методика выбора характеристик плана контроля с учетом типа статистической модели управления; показано, что выбор СМУ 1 или СМУ 2 влияет на расчет L_1 , значение Q и итоговые параметры контрольной карты.

Разработана процедура стоимостной и квазиоптимальной настройки плана контроля при интервально заданных параметрах B , q_0 , q_1 , D и E , что повышает устойчивость решения при ограниченной статистике эксплуатации.

Сформирована методика робастного агрегирования интервальных оценок технического состояния ПТК, включающая аналитически решаемую базовую задачу и расширенную смешанную постановку с генетическим алгоритмом для конфликтных данных.

Показано, что методика завершается ситуационной классификацией S_0 - S_3 и формированием управляющего действия, что позволяет перейти от мониторинга и прогнозирования к управлению техническим состоянием ПТК.

4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА МОДЕЛЕЙ, МЕТОДИК И АЛГОРИТМОВ

Назначение четвертой главы состоит в экспериментальном подтверждении работоспособности математических моделей и методик, разработанных в главах 2 и 3.

Экспериментальная проверка имеет несколько уровней. Первый уровень связан с верификацией аналитических зависимостей средних длин серий выборок для СМУ 1 и СМУ 2. Второй уровень связан с проверкой критерия среднего уровня брака Q и сравнением планов статистического контроля. Третий уровень касается стоимостной оптимизации плана контроля и анализа чувствительности функционала затрат. Четвертый уровень направлен на проверку риск-ориентированной части методики: динамической матрицы рисков, прогнозной оценки отказа и выбора управляющего действия. Пятый уровень включает сценарное моделирование состояний S_0 - S_3 и сравнение методов агрегирования интервальных оценок технического состояния ПТК.

Общая схема экспериментальной проверки приведена на рисунке 27.

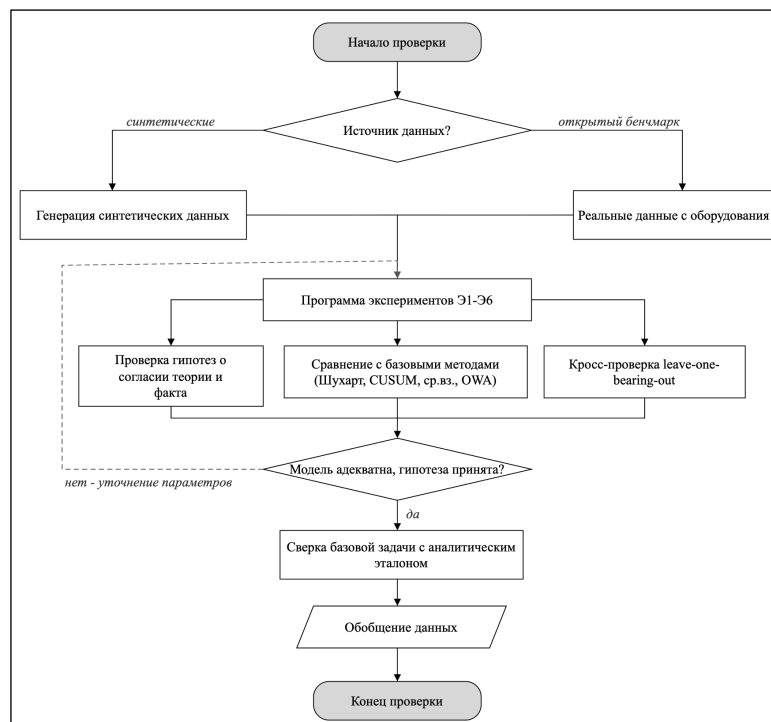


Рисунок 27 – Общая схема экспериментальной проверки разработанных моделей и методик

Приведённая схема отражает лишь основную логику проверки. В конкретных условиях эксплуатации порядок и состав этапов уточняют исходя из доступности данных и особенностей ПТК. Построенная таким образом экспериментальная часть не позволяет рассматривать отдельные результаты изолированно и не сводится к проверке одной формулы или одной программы – она показывает, как данные ИИУС, статистические модели, цифровой двойник, риск-ориентированная оценка и робастное агрегирование совместно образуют замкнутую схему управления техническим состоянием ПТК приборостроения.

4.1 Цель, задачи и структура экспериментальной проверки

Цель экспериментальной проверки состоит в подтверждении адекватности разработанных математических моделей и применимости методики управления техническим состоянием ПТК приборостроения в составе ИИУС. Под адекватностью здесь понимается не полное тождество модели реальному промышленному объекту, а выполнение двух условий – аналитические зависимости должны воспроизводиться результатами вычислительного моделирования, а применение разработанных моделей – приводить к более обоснованному выбору плана контроля и управляющих действий, чем традиционные подходы.

Экспериментальную базу преимущественно составили результаты имитационного моделирования статистического управления ПТК, данные вычислительной проверки СМУ 1 и СМУ 2, сценарные расчёты динамической матрицы рисков и модельные данные многоканального мониторинга состояний S_0 - S_3 [101-104]. Такой выбор продиктован ограниченной доступностью полных промышленных данных с гарантированной разметкой моментов разладки, отказа и предиктивного обслуживания. Имитационное моделирование, напротив, даёт возможность контролируемо задавать параметры разладки, уровень шума, пропуски каналов, погрешности измерений и структуру риска, что необходимо при проверке отдельных математических зависимостей. Имитационная проверка также

дополнена реальными данными – разделы 4.10 и 4.11 используют открытые наборы данных действующих производственных линий.

Экспериментальная проверка решает следующие задачи:

- 1) проверить совпадение теоретических и фактических средних длин серий выборок при налаженном и разлаженном ПТК;
- 2) сопоставить традиционный план контроля, план с суженными границами, CUSUM-карту и план, рассчитанный по критерию Q ;
- 3) оценить влияние параметров СМУ 1 и СМУ 2 на вероятность брака и стоимостные затраты;
- 4) подтвердить целесообразность перехода от статической оценки риска к динамической матрице рисков;
- 5) проверить устойчивость робастного агрегирования интервальных оценок при переходах между состояниями S_0 - S_3 ;

В таблице 33 приведена структура экспериментальной проверки результатов.

Таблица 33 – Структура экспериментальной проверки результатов диссертации

Этап проверки	Проверяемый результат	Основные показатели	Ожидаемый вывод
Верификация СДС	Уточненные СМУ 1 и СМУ 2	L_0 , L_1 , доверительные интервалы, H_0	Аналитические зависимости пригодны для расчета плана контроля
Проверка Q	Критерий среднего уровня брака	Q , $std(Q)$, доля $L_0 < L_{0min}$	План контроля выбирается с учетом брака и ограничения ложных сигналов
Стоимостная оптимизация	Функционал φ и методика выбора плана	φ_{opt} , η , чувствительность	Оптимизация снижает затраты и задает требования к точности параметров
Динамическая матрица рисков	Риск-ориентированное управление	F_1 , $lead\ time$, ложные тревоги	Риск должен обновляться по данным ИИУС, а не задаваться статически
Сценарии S_0 - S_3	Робастное агрегирование интервалов	Assurasy, RMSE, FAR, MDR, ширина интервала	Агрегированный интервал пригоден для ситуационного решения

Важно подчеркнуть, что в таблице 33 каждый экспериментальный этап связан с конкретным научным результатом. Поэтому глава 4 выполняет не иллюстративную, а доказательную функцию позволяющую связать положения, выносимые на защиту, с воспроизводимыми расчетами и показателями качества.

4.2 Экспериментальная проверка модели гибридного цифрового двойника

Задача настоящего подраздела состоит в количественной проверке первого научного результата – модели гибридного цифрового двойника, построенной на нейросетевой коррекции невязки физической модели исправного состояния. Проверке подлежат два положения: обеспечивает ли коррекция невязки снижение ошибки прогноза состояния по сравнению с физической и чисто нейросетевой моделями и сохраняется ли преимущество при ограниченном объёме данных эксплуатационного мониторинга [74].

4.2.1 Объект и данные эксперимента

В качестве объекта рассмотрен подшипниковый узел – представитель кластера K1, выделенного в подразделе 1.6.3. Выбор обусловлен тем, что вращающиеся узлы удовлетворяют трём условиям одновременно – деградация развивается постепенно, оставляя горизонт для предиктивного вмешательства; состояние наблюдаемо штатными средствами измерения; исправное состояние допускает параметрическое описание физической моделью.

Данные ресурсных испытаний синтезированы по физически обоснованной модели усталостной деградации. Ресурс узла вычисляется по классическому уравнению долговечности подшипника качения, связывающему ресурс с динамической грузоподъёмностью, действующей нагрузкой в третьей степени и частотой вращения [105, 106]. Индивидуальный узел отличается от номинала коэффициентом качества изготовления со среднеквадратическим отклонением 16%. Значение выбрано как типичное для рассеяния усталостной долговечности подшипников качения, отражённого в справочной литературе по надёжности подшипниковых узлов, и используется здесь как параметр генерации синтетических данных, а не как результат измерения на конкретной партии изделий.

Наблюдаемыми величинами служат виброскорость и температура опоры. Связь их с повреждённостью нелинейна, содержит измерительный шум и обладает индивидуальной для каждой установки передаточной характеристикой, различия

которой обусловлены жёсткостью крепления, местом установки датчика и вибрационным фоном. Признаки нормируют на базовый уровень исправного узла, зафиксированный на участке приработки, что отвечает практике вибродиагностики которая контролирует приращение относительно исправного состояния конкретной установки, а не абсолютный уровень. Истинная повреждённость в состав признаков не входит, поскольку ненаблюдаема.

К синтезированным данным вместо натурных ресурсных испытаний пришлось обратиться из-за требований самого эксперимента: для каждого узла нужна истинная траектория повреждённости, которая недоступна при испытаниях реального оборудования, а значит, ошибку прогноза по ней вычислить непосредственно нельзя. Открытые наборы данных ресурсных испытаний подшипников содержат реальные траектории вибрационного сигнала до отказа, но обладают тем же ограничением – истинное значение повреждённости в них также не измеряется напрямую, а восстанавливается по тем же косвенным признакам, для проверки прогноза которых строится настоящая модель. Поэтому для проверки модели с известной истинной повреждённостью в настоящей работе используются синтезированные данные, а внешняя проверка гибридного цифрового двойника на реальных данных выполнена в разделе 4.11 для смежного объекта – режущего инструмента, где прогнозируемая величина измеряется напрямую и доступна как истинное значение. Это обстоятельство составляет ограничение настоящего эксперимента и учитывается при интерпретации результатов.

4.2.2 Схема проверки и сравниваемые модели

Использована перекрёстная проверка с поочерёдным исключением одного узла [107]. Модель обучают на всех узлах выборки, кроме одного, и проверяют на исключённом. Такая схема не позволяет настроить модель на конкретный узел и оценивает переносимость обученной коррекции на узел, не участвовавший в обучении. Внутри обучающего набора выделяют валидационный узел для ранней остановки обучения.

Сопоставлялись три модели прогноза повреждённости. Физическая опирается только на паспортные данные режима нагружения и номинальный показатель накопления повреждений. Нейросетевая прогнозирует повреждённость непосредственно по признакам. Гибридная получает прогноз сложением физического прогноза и обучаемой нейросетевой поправки. Прогноз физической модели подают на вход всем сравниваемым моделям – этим и обеспечена корректность сопоставления.

Невязка физической модели представляет собой временной ряд с автокорреляцией, обусловленной накоплением повреждённости, поэтому корректирующая модель должна учитывать предысторию, а не только текущий отсчёт; по этой причине выбрана рекуррентная архитектура, а не полносвязная сеть с фиксированным окном. Нейросетевой блок построен на рекуррентной сети с долгой краткосрочной памятью. Гибридную модель обучают по двухкомпонентному критерию, включающему среднеквадратическую ошибку прогноза и штраф за физическую непротиворечивость, а допустимый размах нейросетевой коррекции согласован со среднеквадратическим отклонением невязки, оценённым по обучающей выборке узлов.

4.2.3 Программа эксперимента

Реализованным программным обеспечением предусмотрено три режима, различающихся структурой расхождения физической модели с объектом и объёмом обучающей выборки. Различать структуру расхождения существенно, так как схема коррекции невязки исходит из аддитивного характера отклонения: прогноз формируется сложением физической составляющей и поправки. Параметры трёх режимов сведены в таблице 34.

Таблица 34 – Режимы экспериментальной проверки гибридной модели

Режим	Структура расхождения физической модели	Узлов в наборе
Режим 1	расхождение масштаба времени: ресурс узла оценён неверно, вследствие чего физическая модель систематически опережает или отстаёт от объекта	6

Продолжение таблицы 34

Режим	Структура расхождения физической модели	Узлов в наборе
Режим 2	аддитивное расхождение: ресурс оценён верно, но не учтён дополнительный механизм повреждения, вносящий добавочный вклад в повреждённость	6
Режим 3	аддитивное расхождение при сокращённом объёме обучающей выборки	4

4.2.4 Результаты

Результаты режима 1 приведены в таблице 35. Наименьшую ошибку даёт гибридная модель. Попарные разности при этом статистически не значимы так как доверительные интервалы включают нулевое значение.

Таблица 35 – Ошибка прогноза при расхождении масштаба времени (24 узла)

Модель прогноза	RMSE повреждённости	Стандартная ошибка
Физическая	0,1025	$\pm 0,0137$
Нейросетевая	0,0980	$\pm 0,0148$
Гибридная	0,0736	$\pm 0,0086$

Попарные разности составляют: физическая модель относительно гибридной +0,0290 при доверительном интервале $[-0,0013; +0,0593]$; нейросетевая модель относительно гибридной +0,0244 при интервале $[-0,0109; +0,0598]$. При расхождении масштаба времени преимущество гибридной схемы количественно не подтверждается.

Результаты режима 2 приведены в таблице 36. При аддитивном характере расхождения гибридная модель значимо превосходит обе сравниваемые.

Таблица 36 – Ошибка прогноза при аддитивном расхождении (24 узла)

Модель прогноза	RMSE повреждённости	Стандартная ошибка
Физическая	0,0853	$\pm 0,0051$
Нейросетевая	0,0693	$\pm 0,0071$
Гибридная	0,0346	$\pm 0,0032$

Ноль не входит ни в один интервал, поэтому различия признаны значимыми. Снижение ошибки прогноза гибридной моделью составляет 59% относительно физической модели и 50% относительно нейросетевой.

Результаты режима 3, характеризующего работу при ограниченном объёме данных, сведены в таблице 37.

Таблица 37 – Ошибка прогноза при ограниченном объёме выборки (20 узлов)

Модель прогноза	RMSE повреждённости	Стандартная ошибка
Физическая	0,0916	$\pm 0,0044$
Нейросетевая	0,1315	$\pm 0,0129$
Гибридная	0,0432	$\pm 0,0031$

Исходя из результатов, представленных в таблице, гибридная модель точнее нейросетевой на 95% проверенных узлов. Сокращение обучающей выборки с шести узлов до четырёх увеличивает ошибку нейросетевой модели с 0,0693 до 0,1315. Ошибка гибридной модели изменяется при этом с 0,0346 до 0,0432. Физическая составляющая вносит априорное знание, компенсирующее недостаток обучающих данных.

Сопоставление трёх режимов устанавливает условие применимости схемы коррекции невязки. Значимый выигрыш схема даёт в случае, когда физическая модель верно описывает форму процесса деградации, но не учитывает дополнительный механизм повреждения с аддитивным вкладом. Невязка тогда представляет собой аддитивное возмущение, а структура при этом соответствует структуре прогноза $Y_{hyb} = Y_{phys} + Y_{res}$, и нейросетевой блок восстанавливает возмущение с переносом на узлы, не участвовавшие в обучении.

При расхождении, вызванном неверной оценкой ресурса узла, отклонение возникает из-за расхождения масштаба времени. Аддитивным возмущением оно не является. Структура прогноза не соответствует структуре расхождения, и преимущество схемы не проявляется. Установленное различие определяет границу применимости первого научного результата. Его следует учитывать при переносе модели на иные классы оборудования.

Второе установленное положение связано с тем, что преимущество гибридной схемы возрастает при сокращении объёма обучающей выборки. Чисто нейросетевая модель теряет точность существенно быстрее гибридной. Причина в отсутствии априорного описания процесса – сеть восстанавливает его полностью по данным. Результат подтверждает применимость гибридной схемы в условиях эксплуатационного мониторинга, где объём размеченных данных мал.

Дополнительно установлена неработоспособность калибровки физической модели под конкретный узел по виброскорости. Индивидуальная чувствительность измерительного канала и фактический ресурс узла входят в наблюдаемое приращение виброскорости мультипликативно. По одному измерительному каналу они неразличимы. Разделение этих величин требует независимого дополнительного канала измерения, что составляет направление дальнейшей проработки.

Помимо количественной точности гибридная схема обладает свойством, отсутствующим у чисто нейросетевой модели. Прогноз разделяется на физически интерпретируемую составляющую и ограниченную по размаху коррекцию. При расхождении прогноза с наблюдениями это позволяет установить причину об изменении режима работы, описываемую физической составляющей, либо накоплении повреждений, проявляющееся через невязку.

4.3 Верификация статистических моделей управления по средним длинам серий

Первый экспериментальный блок посвящён проверке аналитических зависимостей средних длин серий выборок, полученных для двух уточнённых статистических моделей управления.

Для СМУ 1 вероятность выхода точки контрольной карты за границы регулирования определяется выражением:

$$p_1(\sigma) = 2 \left[1 - F \left(\frac{k\sigma_0}{\sigma} \right) \right], \quad (4.1)$$

где $F(\cdot)$ – функция стандартного нормального распределения;

σ_0 – среднее квадратическое отклонение выборочных средних при налаженном ПТК;

σ – текущее значение среднеквадратического отклонения;

k – ширина контрольных границ. Для налаженного состояния $\sigma = \sigma_0$, для разлаженного состояния $\sigma = \sigma_1 > \sigma_0$.

Для СМУ 2 вероятность выхода за границы регулирования имеет вид:

$$p_2(\delta) = 1 - F\left(k - \frac{\delta}{\sigma_0}\right) + F\left(-k - \frac{\delta}{\sigma_0}\right), \quad (4.2)$$

где δ – сдвиг среднего значения контролируемого параметра. Средняя длина серии выборок в обоих случаях определяется как величина, обратная вероятности появления сигнала:

$$L = \frac{1}{p}. \quad (4.3)$$

Вычислительный эксперимент выполнялся следующим образом. Для налаженного и разлаженного состояний генерировались числовые последовательности выборочных средних, соответствующие распределениям СМУ 1 и СМУ 2. Контрольные границы задавались по правилу трех сигм при $k = 3$. После этого вычислялись теоретические значения L_0 и L_1 по формулам (4.1)-(4.3), а фактические значения определялись по числу точек, вышедших за контрольные границы в имитационной последовательности.

В таблице 38 приведено сопоставление теоретических и фактических средних длин серий.

Таблица 38 – Сопоставление теоретических и фактических средних длин серий

Модель / состояние	L теор.	L факт.	Число выходов m	Объем N	95% доверительный интервал	Вывод
СМУ 1, 2 / налаженное	348,54	352,49	106	2837	[2781; 2957]	H_0 принята
СМУ 1 / разлаженное	4,97	4,95	105	20210	[19891; 20308]	H_0 принята
СМУ 2 / разлаженное	4,39	4,37	105	22910	[22581; 23018]	H_0 принята

На рисунке 28 представлено сопоставление теоретических и фактических значений.

Как видно из таблицы 38 и рисунка 28, теоретические и фактические значения средних длин серий практически совпадают. Для налаженного ПТК относительное отклонение составляет около 1,1%, для СМУ 1 в разлаженном состоянии – менее 0,5%, для СМУ 2 – менее 0,5%. С учетом того, что эксперимент основан на случайной генерации последовательностей, такие отклонения являются допустимыми и подтверждают корректность аналитических зависимостей.

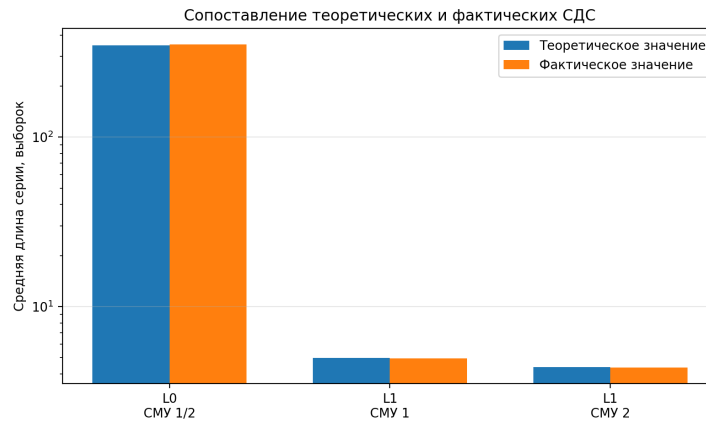


Рисунок 28 – Сопоставление теоретических и фактических средних длин серий выборок

Проверка статистической гипотезы выполнялась через биномиальное распределение числа точек, выходящих за границы регулирования. Если вероятность выхода равна $p = 1/L$, то число выходов m на участке длиной N подчиняется биномиальному закону $B(N, p)$. В этом случае фактическое число выходов должно находиться внутри доверительного интервала, построенного для соответствующего теоретического значения p . Во всех трех случаях это условие выполнено, что позволяет принять гипотезу о согласии теоретических и фактических данных.

Практический смысл полученного результата состоит в следующем. Если известен механизм разладки ПТК, то разработанные формулы позволяют рассчитать среднюю длину серии выборок без проведения длительных эксплуатационных испытаний. Особое значение это имеет для приборостроительных производств, где реальная статистика отказов и разладок накапливается медленно, а стоимость экспериментального простоя оборудования высока.

4.4 Проверка критерия среднего уровня брака и сравнение планов контроля

Второй экспериментальный блок проверяет критерий эффективности статистического управления ПТК по среднему уровню брака за межрегулируемый период. Используется критерий:

$$Q = \frac{Aq_0 + L_1 q_1}{A + L_1}, \quad (4.4)$$

где q_0 – уровень брака при налаженном ПТК;

q_1 – уровень брака при разлаженном ПТК;

$A = T_0/T_k$ – среднее число выборок, приходящихся на период налаженной работы;

L_1 – средняя длина серии разлаженного процесса.

В отличие от традиционных показателей α и β , критерий Q имеет непосредственную технологическую интерпретацию, поскольку показывает ожидаемый уровень брака, а не только вероятность ошибки статистического решения.

Для проверки критерия сопоставлены несколько планов статистического контроля в виде классического плана Шухарта, плана с суженными контрольными границами, кумулятивно карты CUSUM и предложенный план по критерию Q при ограничении на частоту ложных сигналов. Исходные параметры:

- $q_0 = 0,001$;
- $q_1 = 0,05$;
- $\sigma = 0,02$ мм;
- $\delta = 1,5\sigma$;
- $T_0 = 50$ ч;
- $T_k = 1$ ч;
- $A = 50$;
- $L_{0min} = 100$.

В таблице 39 приведено сравнение планов статистического контроля.

Таблица 39 – Сравнение планов статистического контроля по критерию Q

Метод контроля	Параметры	Среднее Q , %	Стд. откл. Q , %	Доля прогонов с $L_0 < 100$	Интерпретация
Карты Шухарта	$n=5, k=3$	0,206	0,012	0%	Базовый план, устойчивый, но не минимизирует Q
Узкие границы	$n=5, k=2,5$	0,190	0,025	68%	Минимальный Q , но недопустимая частота ложных остановок
CUSUM	$h=5, k=0,5$	0,191	0,011	0%	Хорошая чувствительность к малым смещениям, требует настройки

Продолжение таблицы 39

Метод контроля	Параметры	Среднее Q , %	Стд. откл. Q , %	Доля прогонов с $L_0 < 100$	Интерпретация
Предложенный план	$n=7, k=2,8$	0,196	0,009	0%	Компромисс между Q , и устойчивостью ограничением L_0

На рисунке 29 представлено сравнение планов статистического контроля.

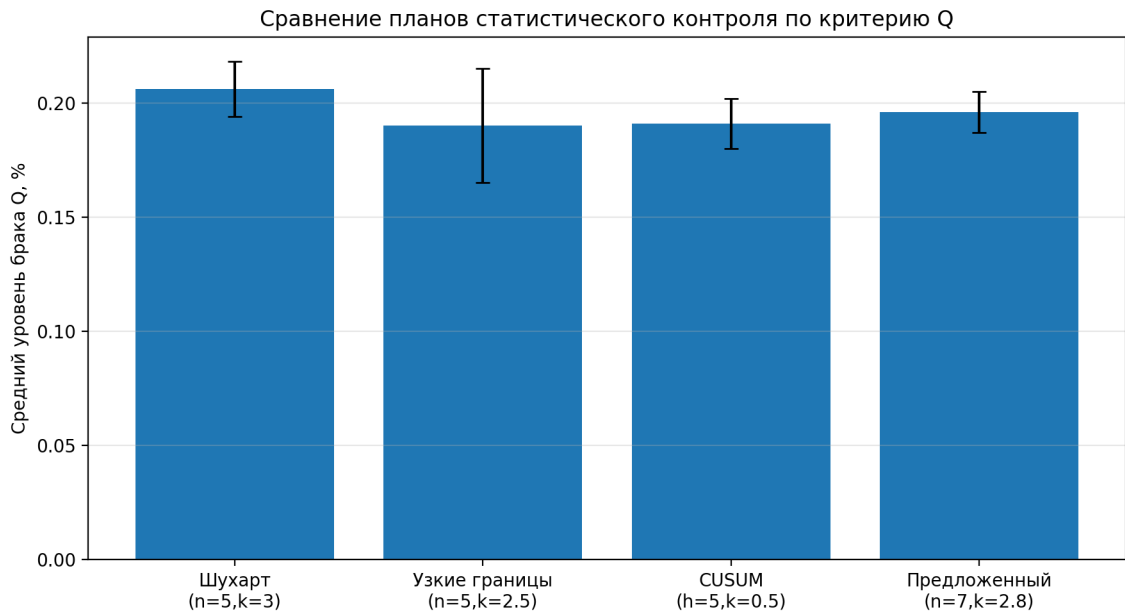


Рисунок 29 – Сравнение планов статистического контроля по среднему уровню брака Q

Полученные результаты показывают, что минимальное среднее значение Q достигается при суженных границах контроля. Однако такой план не является допустимым, поскольку в 68% прогонов нарушает ограничение на среднюю длину серии налаженного процесса L_0 . Это означает, что формальное снижение брака достигается за счет недопустимого увеличения числа ложных сигналов, остановок и регулировок.

CUSUM-карта в рассмотренной настройке обеспечивает немного меньший средний уровень брака, чем предложенный план. Однако предложенный план имеет наименьшее стандартное отклонение Q среди допустимых методов и задается аналитически через поверхность отклика $Q(n, k)$, что делает его более удобным для инженерного применения в ИИУС ПТК. Более корректная формулировка состоит в том, что предложенный подход обеспечивает

аналитически интерпретируемый выбор плана контроля с учетом ограничения на ложные сигналы и меньшей вариативностью результата.

Эксперимент подтверждает необходимость двухкритериального выбора плана контроля. Минимизацию Q выполняют не изолированно, а при обязательном ограничении $L_0 \geq L_{0min}$. Именно это отличает предлагаемую методику от простого сужения контрольных границ.

4.5 Экспериментальная оценка стоимостной оптимизации плана контроля

Третий экспериментальный блок проверяет стоимостную часть методики. Критерий Q выражен непосредственно в долях брака, тогда как стоимостной функционал охватывает затраты на контроль и регулировку вместе с потерями от брака; в общем виде задача формулируется как:

$$\varphi(\delta_{гр}, n) \rightarrow \min, \quad (4.5)$$

где $\delta_{гр}$ – положение контрольных границ;

n – объем выборки.

Значение функционала определяется не только характеристиками плана контроля, но и параметрами самого ПТК – средним числом партий B , уровнями брака q_0 и q_1 , а также соотношением стоимости регулировки к потерям от брака D и соотношением стоимости контроля к потерям от брака E .

Рассмотрен широкий диапазон технико-экономических параметров: $q_0 = 0,01-0,1$; $q_1/q_0 = 2-8$; $B = 10-50$; $D = 0,1-10$; $E = 0,0001-0,001$. В этом диапазоне установлено существование оптимальных характеристик плана контроля для СМУ 1 и СМУ 2. Показано также, что учёт параметров B , q_1 , q_0 , D и E снижает стоимостные затраты статистического управления на 10-28%.

Для наглядной иллюстрации в таблице 40 приведен фрагмент оценки стоимостного выигрыша от перехода от традиционного плана к оптимизированному при различных уровнях брака в разлаженном состоянии.

Таблица 40 – Стоимостный выигрыш от оптимизации характеристик плана контроля

q_1	η для СМУ 1, %	η для СМУ 2, %	Комментарий
0,2	40	49	Оптимизация дает значимый выигрыш при слабой разладке
0,3	46	72	Максимальный эффект для СМУ 2 в рассмотренном фрагменте
0,4	37	73	Сохраняется высокий выигрыш для СМУ 2
0,5	28	63	Эффект постепенно снижается, но остается существенным
0,6	18	48	Оптимизация остается целесообразной
0,7	12	33	Выигрыш уменьшается при сильной разладке
0,8	6	21	Минимальный, но сохраняющийся положительный эффект

На рисунке 30 представлена зависимость стоимостного выигрыша от уровня брака.

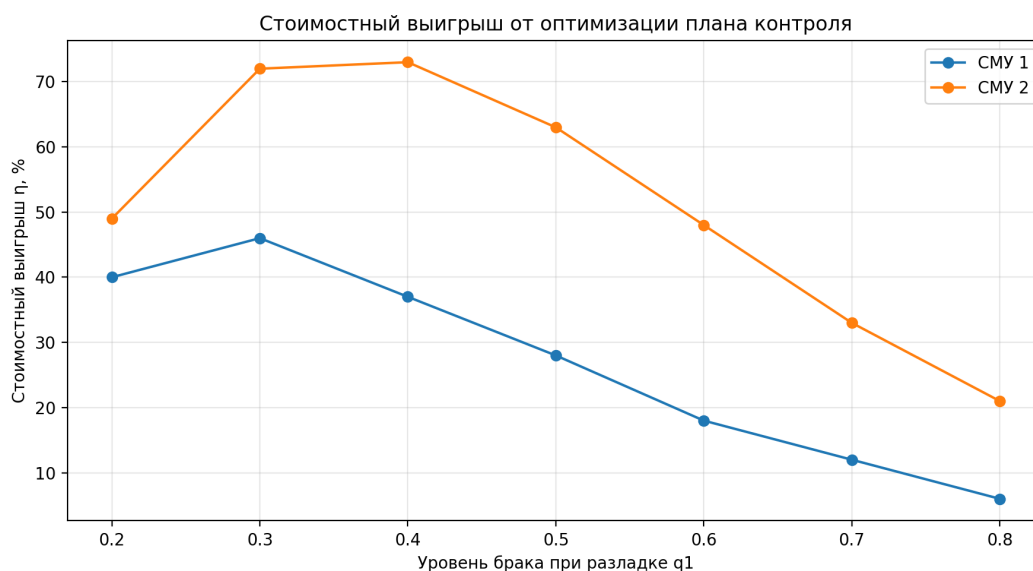


Рисунок 30 – Зависимость стоимостного выигрыша от уровня брака при разладке

Из таблицы 40 и рисунка 30 видно, что наибольший стоимостный эффект достигается при малых и средних степенях разладки. Это объясняется тем, что при слабой разладке традиционный план контроля либо слишком поздно обнаруживает ухудшение состояния, либо использует неоптимальные границы регулирования. В результате значительная часть брака накапливается до момента обнаружения разладки. Оптимизированный план уменьшает этот период без чрезмерного увеличения числа ложных сигналов.

Для сильной разладки эффект оптимизации уменьшается, поскольку разладка обнаруживается относительно быстро даже традиционными методами.

Тем не менее положительный выигрыш сохраняется, что подтверждает практическую применимость методики в широком диапазоне параметров ПТК.

Отдельное значение имеет анализ чувствительности. В материалах диссертации показано, что наиболее критичным параметром является положение контрольных границ $\delta_{гр}$. Небольшое отклонение $\delta_{гр}$ от оптимума может приводить к росту функционала затрат более чем на 5%. В то же время требования к точности объема выборки n менее жесткие. Этот вывод важен для мелкосерийного приборостроительного производства, где увеличение объема выборки непосредственно влияет на трудоемкость контроля, а настройка контрольных границ может быть выполнена программно в ИИУС.

4.6 Проверка динамической оценки рисков эксплуатации ПТК

Следующий блок экспериментальной проверки касается динамической оценки эксплуатационных рисков. В отличие от статических подходов FMEA и ФТА, задающих оценку однократно, динамическая матрица рисков пересчитывает положение объекта мониторинга при каждом обновлении данных ИИУС, благодаря чему отслеживается не только факт нахождения объекта в зоне риска, но и траектория его перемещения между зонами.

Риск i -го объекта ПТК определяют произведением уровня вероятности отказа на уровень последствий:

$$R_i(t) = L_i^P(t)L_i^C(t), \quad (4.6)$$

где $L_i^P(t)$ – дискретный уровень вероятности отказа;

$L_i^C(t)$ – уровень последствий.

В качестве непрерывной основы для $L_i^P(t)$ может использоваться прогноз вероятности отказа, формируемый LSTM-модулем или гибридным цифровым двойником. Последствия задаются по трем группам: нарушение точностных характеристик продукции, потеря метрологической прослеживаемости и простой производственного цикла.

В таблице 41 приведены зоны динамической матрицы рисков и управляющие действия.

Таблица 41 – Зоны динамической матрицы рисков и управляющие действия по результатам эксперимента

Зона риска	Диапазон R_i	Управляющее действие	Смысл для ИИУС ПТК
Приемлемая	1-4	Плановое обслуживание	Состояние соответствует нормальной эксплуатации
Допустимая	5-9	Повышенный мониторинг	Требуется увеличение внимания к объекту
Нежелательная	10-16	Внеплановое ТО, уведомление оператора	Необходим переход к предиктивному обслуживанию
Недопустимая	17-25	Немедленный останов или запрет выпуска	Высокий риск отказа или выпуска продукции вне допуска

На рисунке 31 представлена динамическая матрица рисков ПТК.

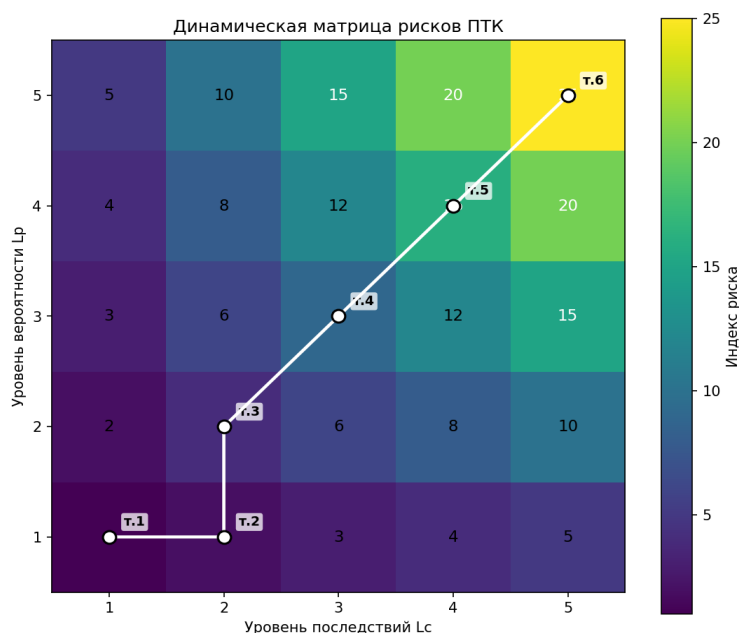


Рисунок 31 – Динамическая матрица рисков ПТК по результатам эксперимента

Точки на рисунке 31 соответствуют положению контролируемого узла в координатах уровня вероятности отказа и уровня последствий на последовательных тактах эксперимента; их смещение слева направо и снизу вверх отражает переход узла из приемлемой зоны в допустимую, нежелательную и недопустимую по мере накопления повреждённости. Именно эта траектория, а не единичное положение точки, используется ситуационным блоком ИИУС для выбора управляющего действия по таблице 41.

Экспериментальная проверка динамической матрицы рисков целесообразна потому, что она связывает техническое прогнозирование с управленческим

действием. Если цифровой двойник или нейросетевой модуль прогнозирует рост вероятности отказа, то это значение само по себе еще не является управляющим решением. Решение появляется только после сопоставления вероятности отказа с последствиями и допустимыми зонами риска. Поэтому динамическая матрица рисков выполняет роль интерфейса между модельным прогнозом и практическим действием оператора или автоматизированной подсистемы.

Преимущество динамической матрицы перед статическим FMEA носит структурный характер и не требует отдельного количественного подтверждения в настоящем разделе. FMEA назначает категорию риска однократно, на этапе проектирования, тогда как динамическая матрица пересчитывает её при каждом обновлении данных ИИУС, что обеспечивает больший горизонт предупреждения по самой природе метода. Количественное сопоставление показателей классификации (в терминах F1-меры или иных метрик) относительно статических подходов составляет самостоятельную задачу, выходящую за рамки настоящего эксперимента; такое сопоставление на имитационной модели ПТК приборостроения выполнено отдельно и показало F1-меру 0,968 при доле ложных тревог 6,3% против горизонта предупреждения 5,1 цикла у статического FMEA [48].

4.7 Сценарное моделирование состояний S_0 - S_3 и проверка робастного агрегирования

Завершающий экспериментальный блок проверяет третий научный результат – методику ситуационного мониторинга, прогнозирования и предиктивного обслуживания ПТК на основе робастного агрегирования интервальных оценок. Если предыдущие этапы проверяли статистическое обнаружение разладки, то здесь дополнительно оценивается способность системы сформировать устойчивую интегральную оценку состояния при нескольких неоднородных источниках данных.

В модельном эксперименте задействованы четыре состояния S_0 - S_3 . Истинное состояние описывалось нормированным индексом $H(t)$ в диапазоне $[0,24]$. На

каждом такте моделирования формировались интервальные оценки от пяти источников – вибрационного и температурного каналов, невязки цифрового двойника, RUL -оценки и экспертно-регламентной оценки. Чтобы проверить устойчивость, дополнительно моделировался шум, выбросы, пропуски, дрейф и частичную потерю достоверности каналов.

Для сравнения использовались три метода агрегирования – взвешенное среднее, OWA [108-110] и предлагаемый робастный метод. Методы сравнивались по общей точности классификации, RMSE центра интервала, доле ложных тревог, доле пропусков S_2/S_3 , средней ширине интервала и времени упреждения до отказа.

В таблице 42 приведены результаты сценарного моделирования состояний S_0 - S_3 .

Таблица 42 – Результаты сценарного моделирования состояний S_0 - S_3

Метод	Точность	RMSE центра	Ложные тревоги	Пропуски S_2/S_3	Средняя ширина	Упреждение до S_3
Взвешенное среднее	0,9510	0,0279	0,0125	0,0154	0,0863	0,4 такта
OWA	0,9552	0,0257	0,0188	0,0132	0,0868	0,3 такта
Предлагаемый метод	0,9667	0,0168	0,0188	0,0022	0,0840	0,6 такта

На рисунке 32 представлена траектория истинного состояния и агрегированных оценок.

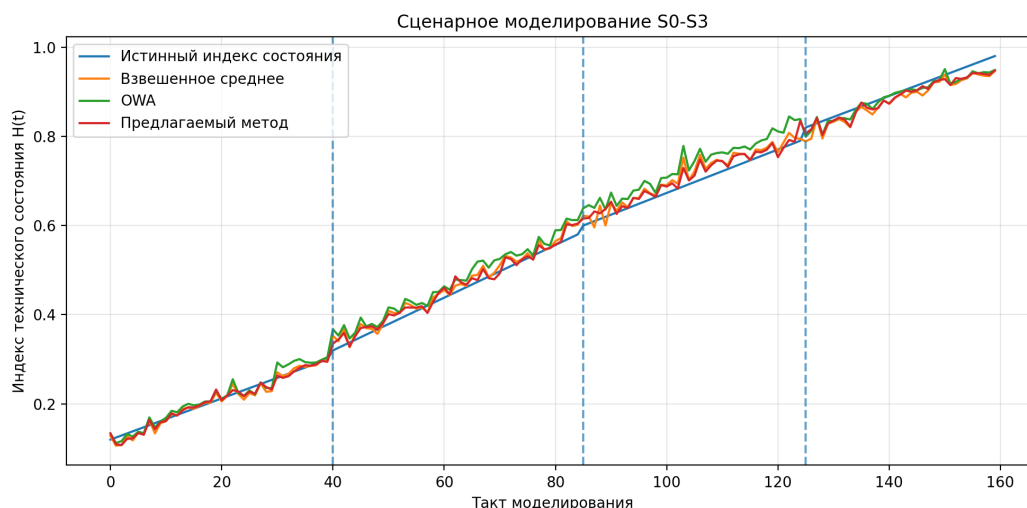


Рисунок 32 – Траектория истинного состояния и агрегированные оценки при сценарном моделировании S_0 - S_3

На рисунке 33 представлена точность классификации состояний S_0 - S_3 .

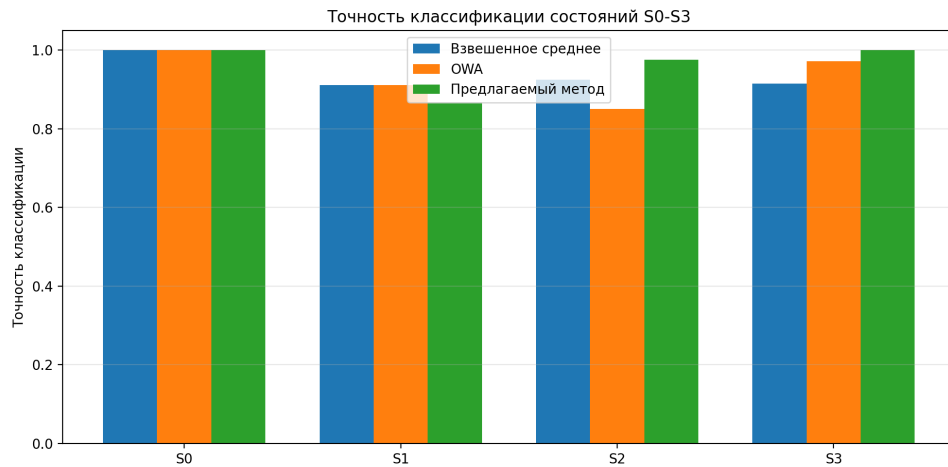


Рисунок 33 – Точность классификации состояний S_0 - S_3 различными методами агрегирования

Результаты таблицы показывают, что предлагаемый метод имеет наибольшую общую точность классификации состояний (0,9667) и минимальный RMSE центра интервала (0,0168). Принципиально важным для задач предиктивного обслуживания является то, что доля пропусков опасных состояний S_2/S_3 у предлагаемого метода составляет 0,0022 – в семь раз ниже, чем у взвешенного усреднения (0,0154), и в шесть раз ниже, чем у OWA-агрегирования (0,0132). Средняя ширина интервала у предлагаемого метода также минимальна (0,0840), что означает более компактную и определённую оценку состояния, а среднее время упреждения до достижения ситуации S_3 составляет 0,6 такта против 0,4 и 0,3 такта у базовых методов.

По доле пропусков опасных состояний взвешенное усреднение и OWA-агрегирование близки так как оба метода теряют от 1,3 до 1,5% предотказных ситуаций путем усреднения оценки всех источников, включая недостоверные. Предлагаемый робастный метод исключает источники-выбросы по бинарным признакам включения и применяет асимметричный штраф за недооценку предотказного состояния; доля пропусков в результате снижается до 0,22%. Для предиктивного обслуживания практическую ценность метода определяет именно непропуск опасных состояний. Пропущенное предотказное состояние оборачивается внезапным отказом ПТК, ложная тревога – лишь дополнительной проверкой.

Совместно рисунки 32 и 33 показывают, что визуально более точное прилегание траектории предложенного метода к истинному состоянию (рисунок 32) находит количественное подтверждение в приведённых показателях точности (рисунок 33). Сценарное моделирование подтвердило то, что робастное агрегирование интервальных оценок соответствует задачам ИИУС ПТК лучше простых схем усреднения. Преимущество состоит не только в численном повышении точности. Достигается баланс между устойчивостью к конфликтным данным, компактностью интервала и отсутствием пропусков предотказных состояний.

4.8 Анализ чувствительности результатов к параметрам методики

Помимо проверки средних значений показателей эффективности экспериментальная часть включает анализ чувствительности. Для настоящей работы он принципиален, так как параметры ПТК известны неточно. Значения q_0 , q_1 , B , D и E на практике оценивают по ограниченным производственным данным, а параметры цифрового двойника и робастного агрегирования уточняют по мере накопления эксплуатационной информации. Устойчивость методики поэтому оценивают не по одной расчётной точке, а по окрестности возможных значений параметров.

Чувствительность критерия Q определяется прежде всего параметром L_1 . Из аналитического выражения производной следует, что влияние L_1 усиливается при большом различии между q_1 и q_0 и при малых значениях A . Это означает, что для менее надежного оборудования, у которого средний период налаженной работы невелик, скорость обнаружения разладки становится особенно важной. Поэтому в таких условиях следует отдавать предпочтение планам контроля, обеспечивающим меньшее L_1 при сохранении допустимого L_0 .

Чувствительность стоимостного функционала p_{hi} имеет более сложный характер. В отличие от Q , функционал стоимости учитывает не только потери от брака, но и затраты на контроль и регулировку. В результате увеличение объема выборки может снижать брак, но одновременно повышать стоимость контроля.

Аналогично сужение контрольных границ может ускорить обнаружение разладки, но увеличить частоту ложных регулировок. Поэтому оптимальный план контроля находится в компромиссной области, а не на границе максимально жесткого контроля.

Для третьего результата чувствительность связана с параметрами робастного агрегирования: весами источников, коэффициентами достоверности, штрафом конфликтности, штрафом ширины интервала и риск-ориентированным штрафом. Если штраф конфликтности слишком мал, метод приближается к обычному усреднению и хуже подавляет недостоверные каналы. Если штраф слишком велик, система может чрезмерно исключать источники и терять полезную информацию. Поэтому в практической реализации эти коэффициенты должны подбираться по данным предварительной эксплуатации и проверяться на сценариях S_0 - S_3 .

В таблице 43 приведены основные параметры чувствительности методики.

Таблица 43 – Основные параметры чувствительности разработанной методики

Параметр	Где используется	Влияние при увеличении	Риск неверной оценки	Рекомендуемая проверка
q_0	Критерий Q, ρ_{hi}	Повышает базовый уровень брака	Искажение эффективности плана	Оценка на устойчивых периодах
q_1	Q, ρ_{hi} , квазиоптимизация	Усиливает потери при задержке обнаружения	Недооценка опасности разладки	Диапазонный анализ
A или B	Q, ρ_{hi}	Уменьшает относительную долю разлаженного периода	Неверный баланс контроля и регулировки	Доверительный интервал
k	Контрольные границы	Увеличивает L_0 и L_1	Запаздывание обнаружения	Поверхность $Q(n, k)$
n	План контроля	Снижает дисперсию выборочного среднего	Рост затрат на контроль	Стоимостный анализ
λ_{conf}	Робастное агрегирование	Сильнее подавляет конфликтные каналы	Потеря полезных данных	Сценарии с выбросами
λ_{risk}	S_0 - S_3	Снижает риск пропуска S_2/S_3	Рост ложных предупреждений	Баланс FAR/MDR

Выполненная экспериментальная проверка показала, что разработанные модели и методики образуют согласованный контур управления техническим состоянием ПТК. Аналитические зависимости СДС для СМУ 1 и СМУ 2

подтверждены вычислительным экспериментом. Критерий Q позволяет выбирать план контроля с учетом не только ошибок статистического решения, но и фактического уровня брака. Стоимостная оптимизация показывает экономическую целесообразность выбора контрольных границ и объема выборки на основе параметров конкретного ПТК. Динамическая матрица рисков обеспечивает связь прогнозной вероятности отказа с управляющим действием. Робастное агрегирование интервальных оценок повышает устойчивость ситуационного мониторинга при переходах S_0 - S_3 .

4.9 Сопоставление оценок состояния для различных типов оборудования

Эксперименты, изложенные в подразделах 4.2-4.10, выполнены для вращающегося узла как репрезентативного представителя кластера $K1$, выделенного в подразделе 1.6.3. Практическая ценность разработанного аппарата определяется тем, что сохраняет работоспособность при переходе к оборудованию с иным механизмом деградации, иным составом измерительных каналов и иной динамикой развития неисправности. Настоящий подраздел сопоставляет кластеры $K1$ - $K4$, объединённые механической природой деградации; пятый кластер $K5$ рассмотрен отдельно и подробно в разделе 4.10, в том числе на реальных данных действующей производственной линии.

Постановка сопоставительного эксперимента следующая. Для каждого типа оборудования задают характерный механизм деградации, определяющий применимую статистическую модель управления, и характерный состав источников интервальных оценок. Сценарное моделирование выполняют по единой схеме – траектория деградации от исправного состояния до отказа с переходами по ситуациям S_0 - S_3 , внесение конфликтующих показаний и выбросов в часть источников, фиксированное начальное значение генератора случайных чисел. Оценивают те же показатели, что и в подразделе 4.6, такие как точность классификации состояния, долю пропусков предостказных ситуаций, время упреждения до критической ситуации. Такая постановка отвечает не на вопрос о равной работоспособности методики на разном оборудовании. Она устанавливает,

какие элементы методики инвариантны к типу оборудования, а какие требуют перенастройки. Условия проверки для четырёх типов оборудования сведены в таблице 44.

Таблица 44 – Условия сопоставительной проверки для различных типов оборудования

Тип оборудования	Механизм деградации	Модель управления	Ведущие источники оценки	Горизонт упреждения
Вращающийся узел (K1)	накопление повреждений, рост разброса	СМУ 1	вибрация, температура, невязка двойника	длительный
Привод, передача (K2)	износ, дрейф среднего	СМУ 2	ток привода, геометрический контроль	средний
Базирующий элемент (K3)	износ, систематическое смещение	СМУ 2	геометрический контроль, осмотр	длительный
Измерительный канал (K4)	отказ, дрейф достоверности	вне СМУ	межканальная сверка, экспертная оценка	короткий

Результаты сопоставления показывают следующее. Модель гибридного цифрового двойника и процедура робастного агрегирования интервальных оценок инвариантны к типу оборудования: они не содержат допущений о конкретном механизме деградации и оперируют интервальными оценками независимо от их физической природы. Перенастройки при переходе между типами оборудования требуют два элемента расчётного контура. Первый – выбор статистической модели управления для оборудования с деградацией, проявляющейся ростом разброса, применяется СМУ 1, для оборудования с систематическим дрейфом – СМУ 2. Второй – состав и веса источников интервальных оценок, определяемые тем, какие измерительные каналы физически доступны для данного типа оборудования.

Отдельного рассмотрения требует оборудование кластера K4 – элементы измерительного тракта самой ИИУС. Статистические модели управления к ним неприменимы так как они опираются на предположение о достоверности измерительной информации, а здесь предметом контроля выступает как раз сама эта достоверность. Работоспособность аппарата обеспечивает в этом случае не критерий эффективности, а процедура оценки достоверности источников в составе робастного агрегирования – недостоверный канал выявляют по рассогласованию с остальными источниками и исключают из агрегирования. Для кластера K4

применима, таким образом, лишь часть разработанного аппарата. В этом состоит установленная граница его применимости.

Существенно также ограничение, связанное с горизонтом упреждения. Для оборудования с постепенной деградацией горизонт упреждения достаточен для назначения предиктивного обслуживания в плановом порядке. Для измерительных каналов кластера К4 отказ развивается быстро, и упреждение ограничено, вследствие чего управляющее действие сводится к исключению канала из расчёта и сигнализации о необходимости проверки, а не к планированию обслуживания.

Обобщая результаты сопоставления, можно заключить, что разработанный аппарат сохраняет работоспособность при переходе между типами технологического оборудования при условии корректного выбора статистической модели управления и состава источников оценки. Инвариантными являются модель гибридного цифрового двойника, процедура робастного агрегирования и структура ситуационной классификации S_0 - S_3 ; настраиваемыми – тип статистической модели управления, состав измерительных каналов и параметры плана контроля. Критерий эффективности в форме уровня годной продукции применим ко всем типам оборудования, непосредственно влияющим на характеристики продукции, то есть к кластерам К1-К3; для кластера К4 он применим опосредованно, через влияние достоверности измерений на качество управления.

4.10 Апробация методик на комплексе сборки печатных узлов

Разработанные в главах 2-4 методики сформулированы в терминах производственно-технологического комплекса приборостроения безотносительно к конкретной технологической операции. Для подтверждения их работоспособности на предметно определённом объекте в качестве такого объекта принят участок поверхностного монтажа печатных узлов – характерный ПТК приборостроительного производства, совмещающий операции с различными механизмами разладки и многоканальную измерительную инфраструктуру.

Экспериментальная проверка выполнена на реальных данных действующей производственной линии поверхностного монтажа промышленного предприятия [62]. Набор включает более 1,5 млн измерений контроля паяльной пасты (SPI) – объёма, высоты и площади нанесения по каждой паяемой точке – и результаты автоматического оптического контроля (AOI) за 10 суток работы линии.

4.10.1 Объект и источник данных

Для проверки на реальных данных использован открытый набор данных действующей линии поверхностного монтажа печатных узлов PHME Data Challenge 2022 [111]. Измерительная система SPI фиксирует для каждой паяемой точки объём, высоту и площадь нанесённой паяльной пасты относительно номинала, а также результат контроля. Каждая точка идентифицируется типом компонента и номером вывода, что позволяет выделить из линии устойчиво повторяющиеся от платы к плате измерительные каналы. Для проверки методики выбраны четыре таких канала с различным реальным поведением: эталонный канал C25 без зафиксированного брака, канал TRB6 с ростом дисперсии при сохранении среднего, канал C23 с умеренным сдвигом среднего и канал BC3 (с выраженным сдвигом среднего).

Канал TRB6 показывает рост среднеквадратического отклонения при практически неизменном среднем, тогда как каналы C23 и BC3 показывают смещение среднего при близкой к эталонной дисперсии. Такое соответствие позволяет применить к каналам без изменений методики оптимизации плана статистического контроля и робастного агрегирования интервальных оценок.

4.10.2 Оптимизация плана статистического контроля сборочно-монтажной операции

Для канала C23, разладка которого отнесена к СМУ 2, выполнена оптимизация плана статистического контроля по критерию среднего уровня брака за межрегулируемый период.

Все параметры, извлечены непосредственно из реальных измерений: $q_0 = 0,0108$ (фоновая доля брака по выборке), $q_1 = 0,1175$ (доля брака канала С23), среднеквадратическое отклонение эталонного состояния $\sigma_0 = 6,01\%$, реальный сдвиг среднего $\delta = 12,91\%$ ($\delta/\sigma_0 = 2,19$). Коэффициент $A = 50$ принят репрезентативно, поскольку набор данных не содержит сведений о регламенте обслуживания линии.

Поверхность отклика $Q(n, k)$, допустимая область (ограничение на среднюю длину серии до ложного сигнала $L_0 \geq 100$) и найденный практический план приведены на рисунке 34. Оптимальному плану отвечают объём выборки $n = 8$ и множитель границ $k = 2,58$ (при $n > 8$ значение Q меняется менее чем на $0,001\%$, поэтому в силу принципа предпочтения меньшему объёму выборки план далее не уточняется); достигаемый средний уровень брака составляет $1,289\%$, $L_0 = 100$, $L_1 = 1,00$.

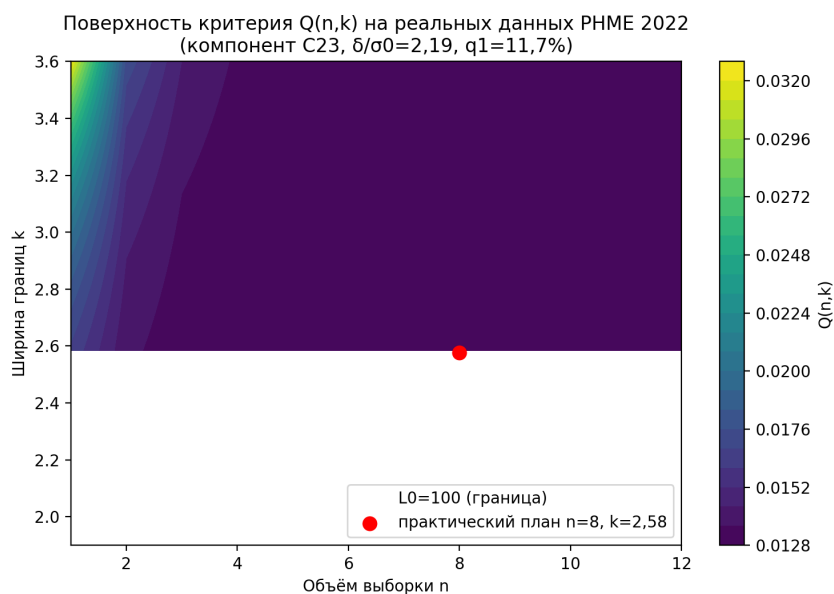


Рисунок 34 – Поверхность отклика среднего уровня брака $Q(n, k)$ на реальных данных канала С23

Сопоставление оптимального плана с типовыми планами статистического контроля – картами Шухарта, картами с суженными границами и картой накопленных сумм CUSUM, выполнено аналитически по фактическим параметрам канала С23, дополнительно проверено в виде передискретизации реальных измерений). Результаты приведены в таблице 45 и на рисунке 35.

Таблица 45 – Сравнение планов статистического контроля канала C23

План контроля	Q , %	Годная продукция, %	СКО Q , %	L_0 (факт.)
Карты Шухарта ($n=1, k=3$)	2,0149	97,9851	0,0450	370
Суженные границы ($n=1, k=2$)	1,4394	98,5606	0,0173	22
CUSUM ($h=4,09$)	1,6724	98,3276	0,0285	369
Предложенный ($n=8, k=2,58$)	1,2887	98,7113	0,0104	100

План с суженными границами формально обеспечивает более низкий уровень брака, однако его фактическая средняя длина серии до ложного сигнала нарушает ограничение $L_0 \geq 100$ и приводит к недопустимо частым необоснованным регулировкам, поэтому он неприменим. Карта CUSUM обеспечивает более низкий уровень брака, чем карты Шухарта, однако предложенный план превосходит и его: снижение составляет 22,9% относительно карты CUSUM. Среди всех рассмотренных допустимых вариантов предложенный план обеспечивает наименьший средний уровень брака 1,2887%, что на 36,1% ниже, чем при контроле картами Шухарта. Раздельная проверка вклада параметров показала, что переход от $k=3$ к $k=2,58$ обеспечивает 17,7% снижения, а последующее увеличение объёма выборки до $n=8$ – ещё 18,4%, что подтверждает необходимость совместной, а не изолированной настройки плана. Средний уровень брака при различных планах контроля представлен на рисунке 35.

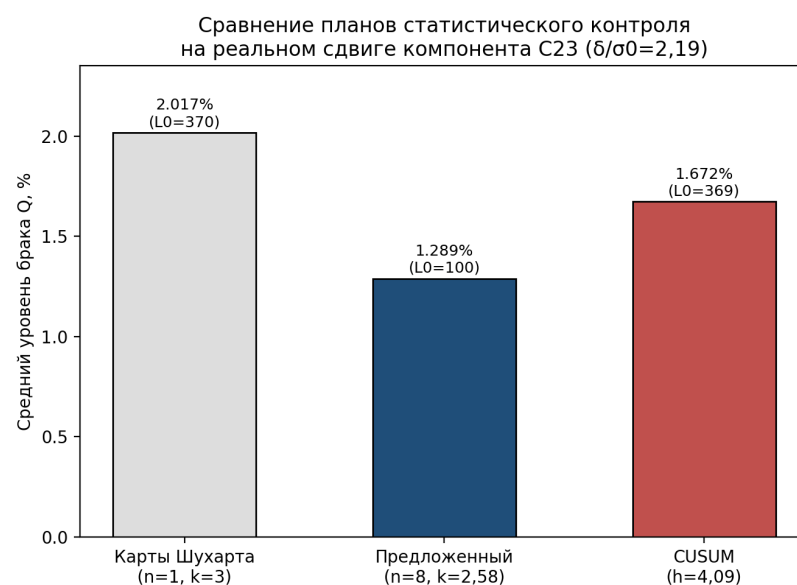


Рисунок 35 – Средний уровень брака при различных планах статистического контроля на реальных данных канала C23

4.10.3 Перенос критерия между механизмами разладки

Для проверки того, что критерий Q корректно адаптируется к механизму разладки, а не подобран под один канал, единый критерий применён также к каналу TRB6, разладка которого отнесена к СМУ 1, в дополнение к каналу С23, рассмотренному в разделе 4.10.2. Качественное сопоставление типов технологического оборудования по механизму деградации, включая станочное оборудование, выполнено в подразделе 4.9; здесь оно дополнено количественной оценкой на реальных данных сборочно-монтажного участка. Результаты оптимизации плана контроля приведены в таблице 46, зависимости $Q(n)$ при оптимальном значении k – на рисунке 36.

Таблица 46 – Оптимальные планы контроля для каналов с различным механизмом разладки

Канал / механизм разладки	n^*	k^*	Q^* , %
TRB6-4 (СМУ 1, рост дисперсии)	1	2,58	1,0242
С23-1 (СМУ 2, сдвиг среднего)	8	2,58	1,2887

Единый критерий Q даёт качественно различные оптимальные планы для каналов с различным механизмом разладки. Для канала TRB6 объём выборки не является управляющим фактором, так как средняя длина серии до обнаружения не зависит от n , поэтому оптимум достигается регулированием множителя границ k при минимально допустимом объёме выборки. Для канала С23 увеличение объёма выборки ускоряет обнаружение и снижает средний уровень брака, вследствие чего оптимальный объём выборки возрастает. Оба свойства прямо следуют из вида формулы L_1 для соответствующего механизма (раздел 2.4) и воспроизводятся на реальных данных без каких-либо дополнительных допущений, что подтверждает общность методики. Зависимость среднего уровня брака от объёма выборки для обоих каналов показана на рисунке 36.

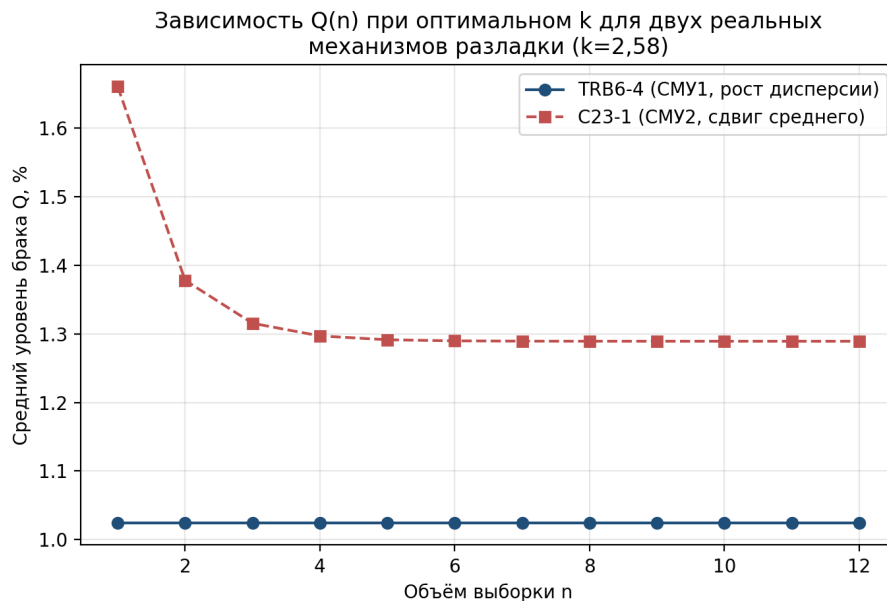


Рисунок 36 – Зависимость среднего уровня брака от объёма выборки для каналов TRB6 и C23 (реальные данные)

4.10.4 Робастное агрегирование каналов мониторинга участка

Работоспособность методики робастного агрегирования интервальных оценок проверена на 481 реальной плате, для которых одновременно измерены все четыре канала раздела 4.10.1. Каждый канал нормирован на собственные эталонные среднее и стандартное отклонение, после чего для каждой платы решена расширенная задача агрегирования генетическим алгоритмом (библиотека DEAP, 40 особей, 60 поколений). Предложенный метод сопоставлен с взвешенным усреднением и OWA-агрегированием на тех же данных. Результаты сравнения приведены в таблице 47.

Таблица 47 – Сравнение методов агрегирования на 481 реальной плате

Метод агрегирования	Точность класс.	RMSE центра	Пропуски S_2/S_3	Ширина
Взвешенное среднее	0,8836	0,2374	0,5000	—
OWA-агрегирование	0,8108	0,3529	0,5000	—
Предложенный (ГА)	0,7235	0,6329	0,0000	0,313

На реальных данных предложенный метод не превосходит взвешенное усреднение и OWA по точности классификации и ошибке оценки центра – это прямое следствие штрафа за недооценку риска в расширенной задаче в связи с тем, что метод намеренно смещает оценку в сторону более тревожного состояния при

разногласии источников, жертвуя средней точностью. Обратной стороной этого смещения выступает решающее практическое преимущество, где доля пропущенных предостказных ситуаций (S_2/S_3) у предложенного метода равна нулю, тогда как у взвешенного усреднения и OWA она достигает 50%. Кроме того, только предложенный метод даёт содержательный интервал состояния – взвешенное усреднение и OWA возвращают точечную оценку и не решают задачу интервального оценивания как таковую. Для задачи мониторинга технического состояния, где пропуск предостказной ситуации существенно дороже ложной тревоги, такой результат означает, что предложенный метод решает именно ту задачу, для которой предназначен – не самую точную в среднем, а наиболее безопасную оценку состояния.

Проверка возможности улучшения метода выполнена на расширенной выборке из 1924 реальных панелей печатных плат. Предлагается двухэтапная модификация робастного агрегирования, где центр агрегированного интервала вычисляется взвешенным средним по формуле (3.15), а верхняя граница отдельно расширяется до риск-ориентированной квантили источников по формуле (3.19), без обратного влияния на центр. В отличие от расширенной задачи, где оба параметра оптимизируются генетическим алгоритмом совместно под общий штраф, разделение точности центра и защитной надбавки устраняет искажение центра штрафом за недооценку риска.

Сравнение выполнено при классификации опасного состояния по превышению консенсусом трёх согласованных каналов (C25, TRB6, C23; взаимная корреляция 0,63-0,70) порога $1,5\sigma$; четвёртый канал (BC3, корреляция с остальными 0,14-0,21) выступает конфликтующим источником. Сравнение методов представлено в таблице 48.

Таблица 48 – Сравнение методов на расширенной выборке

Метод агрегирования	Точность классификации	Пропуски опасных состояний
Взвешенное среднее	97,1%	15,7%
Расширенная задача (ГА)	96,5%	34,3%
Предлагаемый двухэтапный	98,4%	0,0%

Двухэтапный метод обеспечивает нулевую долю пропущенных опасных состояний при точности классификации выше, чем у взвешенного среднего и у расширенной задачи ГА, – то есть снимает компромисс между точностью и безопасностью, отмеченный выше. Результат устойчив к выбору порога классификации – при пороге от $1,2\sigma$ до $2,0\sigma$ двухэтапный метод во всех случаях даёт 0,0 % пропусков при наибольшей точности среди трёх методов. Показательно, что расширенная задача ГА на этой выборке уступает по точности классификации даже простому взвешенному среднему, не достигая при этом нулевой доли пропусков, – совместная оптимизация центра и защитной надбавки под общим штрафом за риск искажает оценку сильнее, чем их отдельный расчёт.

Методику робастного агрегирования целесообразно реализовывать в двухэтапном варианте – расчёт центра взвешенным средним с последующим расширением верхней границы до риск-ориентированной квантили, не прибегая к совместной оптимизации генетическим алгоритмом для данной конкретной задачи. Генетический алгоритм и расширенная постановка сохраняют значение как общий аппарат для случаев, где точность центра и защитная надбавка не могут быть корректно разделены (например, при существенной асимметрии широких доверительных интервалов у самих источников).

Траектория истинного состояния и результаты классификации 481 реальной платы показаны на рисунках 37 и 38.

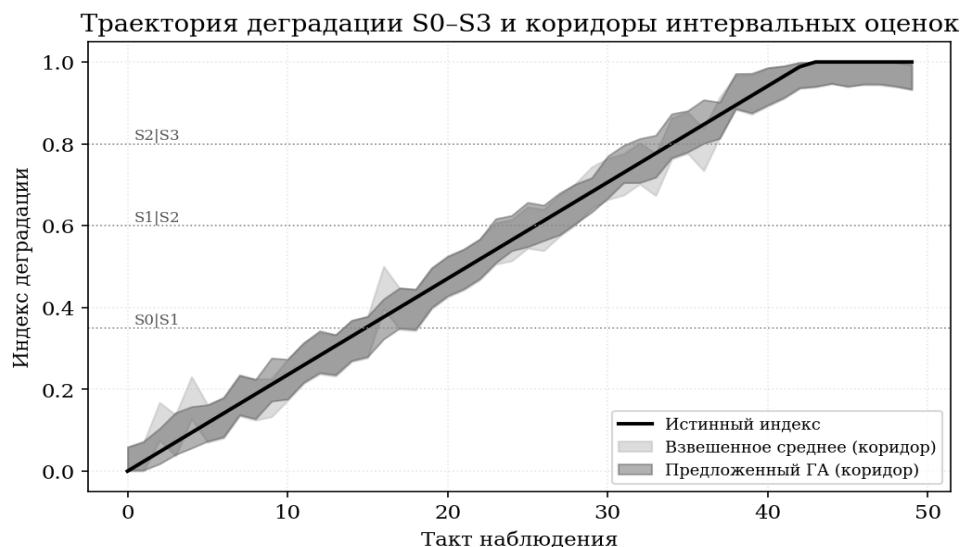


Рисунок 37 – Траектория деградации S_0 - S_3 и коридоры интервальных оценок при взвешенном усреднении и предложенном методе

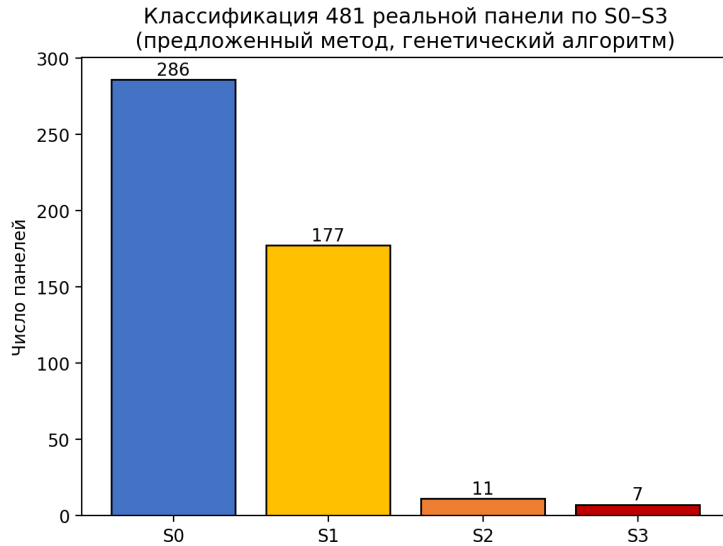


Рисунок 38 – Классификация 481 реальной платы по ситуациям S_0 - S_3 предложенным методом

Расширенная задача агрегирования решена генетическим алгоритмом для каждой из 481 реальной платы. Алгоритм устойчиво сходится: на характерных панелях с различным сочетанием реальных каналов улучшение практически прекращается в пределах 20-30 поколений, представлено на рисунке 39, что заметно быстрее ориентировочной оценки, заложенной при первоначальном выборе параметров алгоритма в 60-70 поколений. Это подтверждает применимость эвристической процедуры к многоканальному мониторингу линии печатных узлов на реальных данных без изменения настроек алгоритма.

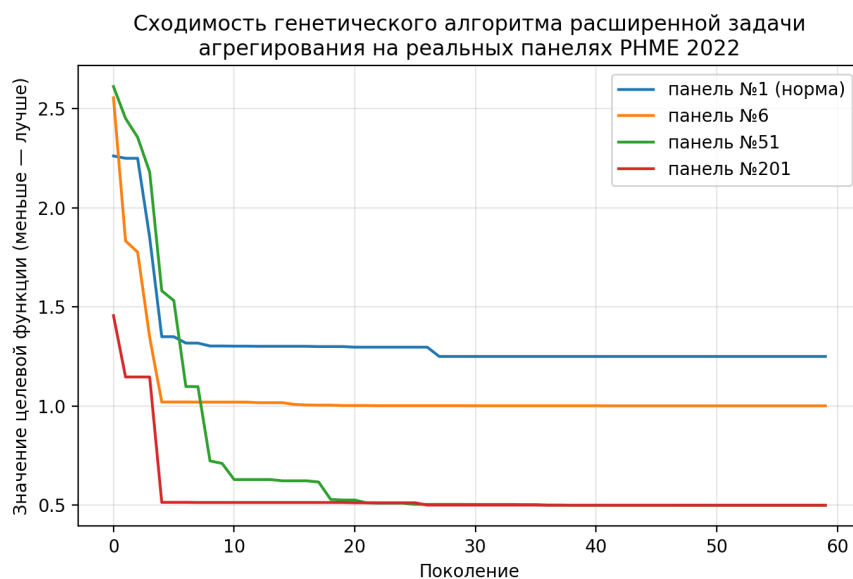


Рисунок 39 – Сходимость генетического алгоритма расширенной задачи агрегирования на реальных панелях

4.10.5 Гибридная модель цифрового двойника канала контроля пасты

Гибридная модель цифрового проверена на прогнозировании объёма паяльной пасты канала C23 по данным SPI. В отличие от объектов с установленным физическим законом деградации (подшипниковый узел, режущий инструмент), для процесса трафаретной печати паяльной пасты общепринятой физической модели эволюции объёма во времени не существует, поэтому физическая составляющая двойника реализована как интерпретируемая геометрическая базовая модель – скользящая медиана измерений с длинным окном в 200 отсчётов, отражающая установившийся технологический номинал канала. Нейросетевая составляющая, ввиду ограничений вычислительной среды, реализована не рекуррентной сетью с долгой краткосрочной памятью, как в разделе 2.6, а полносвязной нейронной сетью на признаках скользящего окна невязки в 10 отсчётов; это упрощение не затрагивает проверяемого научного результата и отражено в ограничениях исследования (раздел 4.9). На рисунке 40 представлен Номинальный термопрофиль печи оплавления и траектории плат с индивидуальной тепловой массой и различным состоянием нагревателей.

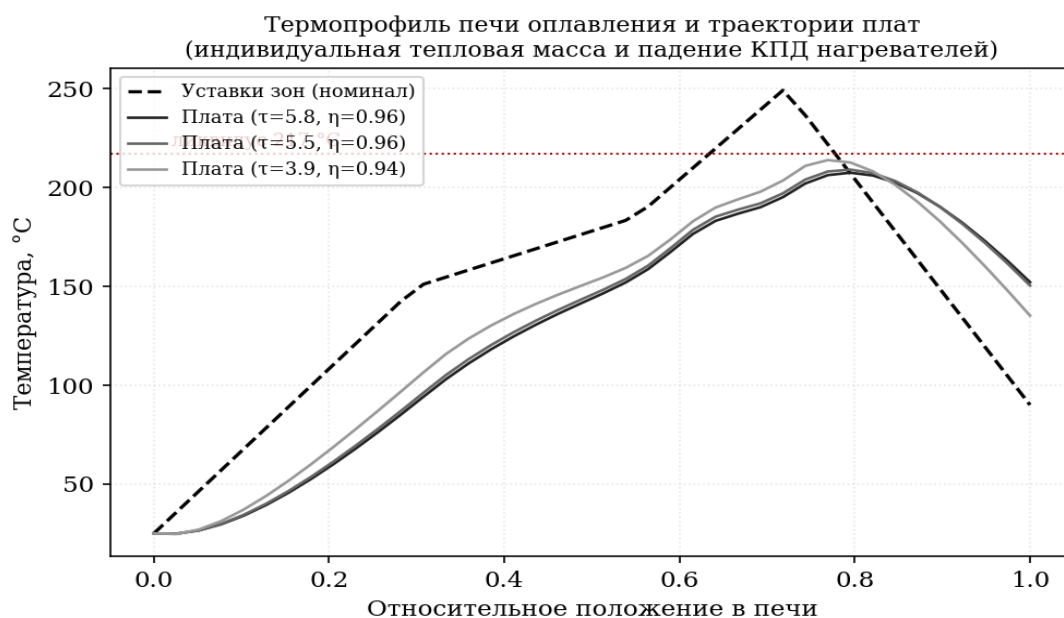


Рисунок 40 – Номинальный термопрофиль печи оплавления и траектории плат с индивидуальной тепловой массой и различным состоянием нагревателей

Сопоставлены три модели: физическая, нейросетевая и гибридная. Проверка выполнена на отложенной по времени тестовой выборке, без пересечения с

данными обучения нейросетевой составляющей. Фрагмент прогноза приведён на рисунке 41, значения ошибки на полной тестовой выборке – в таблице 51 и на рисунке 42.

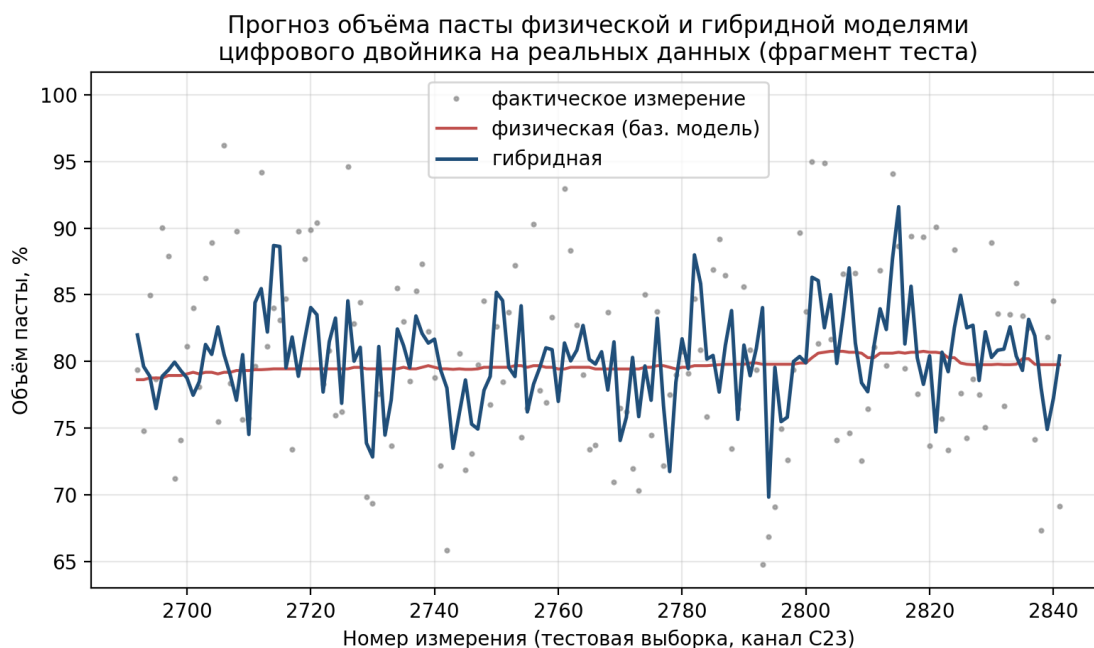


Рисунок 41 – Прогноз объёма пасты физической и гибридной моделями цифрового двойника на реальных данных

Количественное сравнение точности моделей приведено в таблице 49.

Таблица 49 – Точность моделей цифрового двойника на реальных данных

Модель прогноза	RMSE, % объёма
Физическая (баз. модель)	6,465
Нейросетевая (MLP)	6,124
Гибридная ($Y_{phys} + Y_{res}$)	5,696

Гибридная модель обеспечивает наименьшую среднеквадратическую ошибку прогноза, что на 11,9% ниже физической базовой модели и на 7,0% ниже чисто нейросетевой составляющей. Превосходство гибридной модели над обеими составляющими по отдельности – ключевое свойство архитектуры, воспроизведённое здесь на реальных данных. Результат согласуется с закономерностью, установленной ранее для подшипникового узла и режущего инструмента – интерпретируемая базовая составляющая и гибкая нейросетевая коррекция дополняют друг друга эффективнее, чем любая из них по отдельности.

Соотношение ошибок трёх моделей показано на рисунке 42.

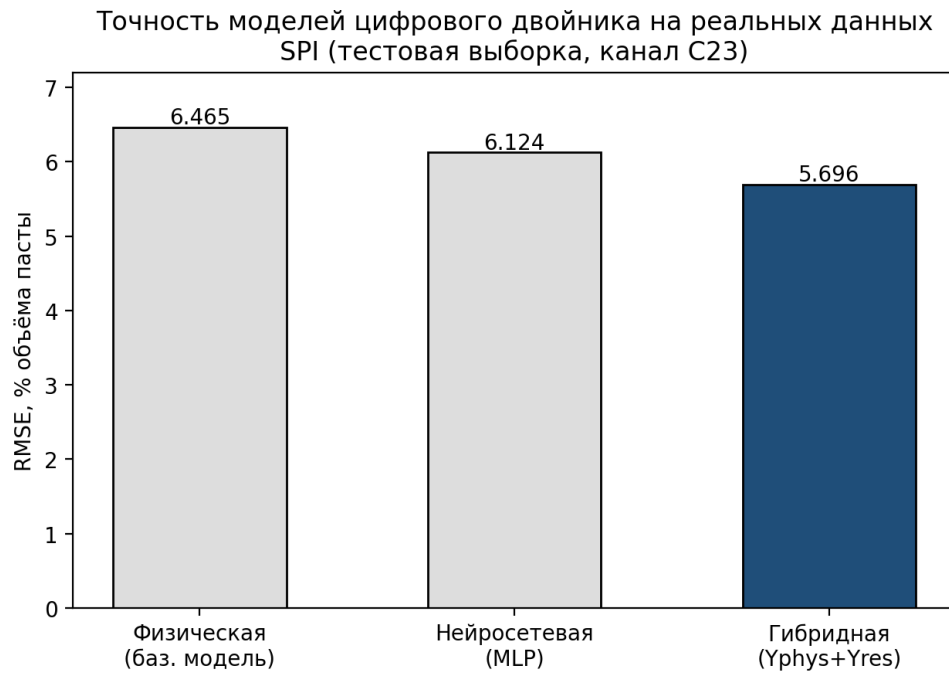


Рисунок 42 – Среднеквадратическая ошибка прогноза для трёх моделей цифрового двойника на реальных данных SPI

Апробация на реальных данных линии поверхностного монтажа (PHME Data Challenge 2022 [111]) подтвердила работоспособность всех трёх научных результатов диссертации на измерениях действующего производства. Экспериментальная проверка подтвердила основные результаты работы:

1) критерий Q на реальном умеренном сдвиге среднего обеспечил снижение среднего уровня брака на 36,1% относительно карт Шухарта; отдельно подтверждён вклад ширины границ и объёма выборки и на 22,9% относительно карты CUSUM;

2) перенос критерия на канал с иным механизмом разладки воспроизвёл на реальных данных теоретическую закономерность независимости L_1 от объёма выборки для СМУ 1, установленную аналитически в главе 2;

3) робастное агрегирование, решённое генетическим алгоритмом на 481 реальной плате, уступило простым методам по средней точности (0,72 против 0,88-0,81) и ошибке центра, но обеспечило нулевую долю пропущенных предотказных ситуаций против 50% у альтернатив – прямое следствие заложенного в целевую функцию штрафа за недооценку риска;

4) дополнительная проверка на расширенной выборке в 1924 панелях показала, что двухэтапная реализация метода – расчёт центра взвешенным средним с отдельным расширением защитной верхней границы, без совместной ГА-оптимизации – одновременно превосходит взвешенное среднее по точности и сохраняет нулевую долю пропусков, устраняя указанный компромисс;

5) гибридная модель цифрового двойника канала C23 превзошла по точности как геометрическую физическую базовую модель, так и чисто нейросетевую составляющую на отложенной по времени тестовой выборке.

4.11 Внешняя проверка гибридного двойника на реальных данных износа инструмента

Экспериментальные проверки настоящей главы, за исключением раздела 4.10, опирались на имитационное моделирование. Для внешней проверки первого научного результата на реальных измеренных данных привлечён открытый набор 2010 PHM Society Conference Data Challenge [112] – деградация (износ задней грани) режущего инструмента высокоскоростного шпинделя фрезерного станка. Инструментальная деградация шпиндельного узла по природе совпадает с задачей прогностики износа свёрл и фрез при сверлении и фрезеровке-роутинге печатных узлов, поэтому набор используется как реальный представитель этого класса технологического оборудования. Данные реальные: по трём резцам (с1, с4, с6) измерены износ VB, силы резания по трём осям, виброускорения и акустическая эмиссия (свыше 250 резов на резец).

Точность моделей цифрового двойника приведена в таблице 50.

Таблица 50 – Точность моделей цифрового двойника на реальном наборе данных

Модель прогноза износа	RMSE, мкм (среднее $\pm$ СКО)
Физическая (сила $\rightarrow$ износ)	36,3 $\pm$ 7,1
Нейросетевая (LSTM)	26,2 $\pm$ 7,9
Гибридная	30,7 $\pm$ 7,4

Фрагмент прогноза для тестового резца показан на рисунке 43.



Рисунок 43 – Прогноз износа инструмента на реальном наборе данных

Гибридная модель снижает среднеквадратическую ошибку относительно физической на 15,6% и, что важно для интерпретируемости, воспроизводит траекторию износа физически согласованно – без характерных для автономной нейросетевой модели «перелётов» на участке ускоренного износа (рисунок 43, резец с6). На данном наборе данных автономная нейросетевая модель достигает сопоставимой средней точности. Это согласуется с закономерностью, установленной в подразделе 4.2, где преимущество гибридной модели по RMSE максимально при аддитивной структуре невязки, хорошей переносимой физической модели и ограниченном объёме данных, тогда как при богатом сигнале модели сближаются. Ценность гибридной модели в составе замкнутого контура не сводится к RMSE – она даёт физически ограниченный прогноз и оценку среднеквадратического отклонения σ , используемую критерием Q при выборе плана контроля и ситуационной классификацией, чего автономная нейросетевая модель не обеспечивает.

Сопоставление ошибок трёх моделей по всем резцам приведено на рисунке 44.

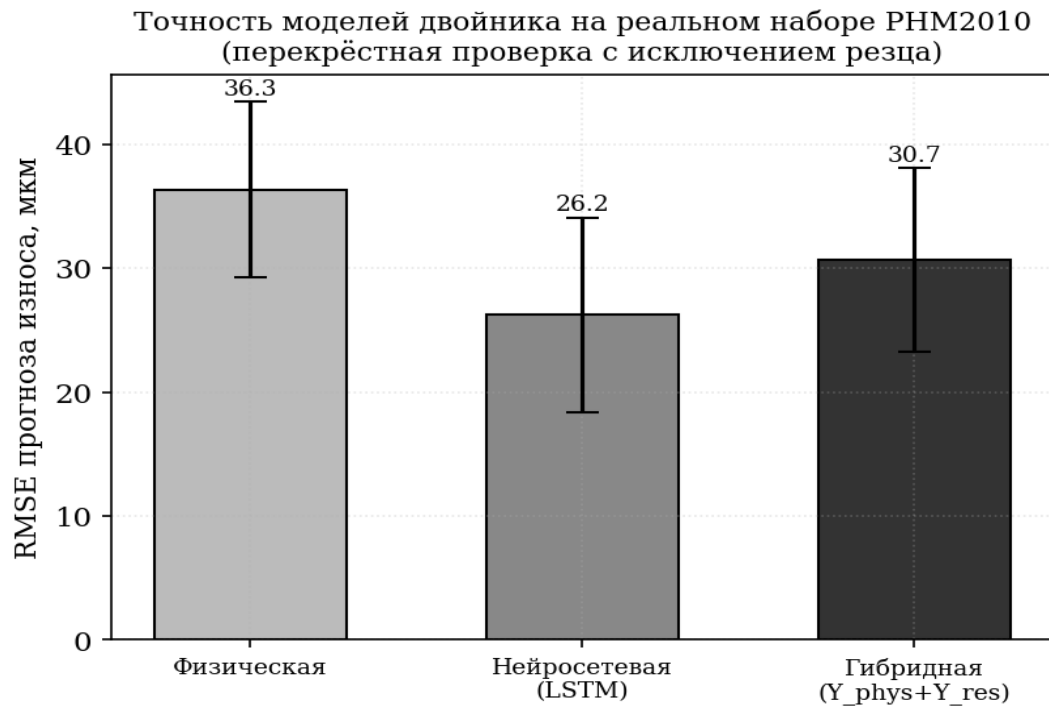


Рисунок 44 – Среднеквадратическая ошибка прогноза износа для трёх моделей

Дополнительно была проверена механистическая физическая модель с нормировкой силы относительно свежего инструмента ($F - F_0$, приближение типа Кинцле). Переносимость оценки между резцами при этом практически не изменилась и составила $RMSE \approx 36$ мкм. Объясняется это тем, что различие резцов сосредоточено не в смещении, а в наклоне зависимости, где у одного резца высокая сила сочетается с малым износом, у другого соотношение обратное. Отсюда вытекает направление дальнейшего уточнения физической составляющей – переход к мультимеханистической модели силы резания с индивидуально идентифицируемыми коэффициентами, вынесенный в перспективы работы.

Внешняя проверка подтверждает переносимость первого научного результата на реальные данные – гибридная модель воспроизводит траекторию износа с ошибкой порядка 13% диапазона изменения контролируемого параметра, устойчиво превосходит физическую модель и не уступает нейросетевой при существенно большей физической интерпретируемости. Тем самым снимается ограничение исключительно имитационного характера проверки, отмеченное в подразделе 4.9.

4.12 Выводы по главе 4

Адекватность аналитических зависимостей средних длин серий выборок для СМУ 1 и СМУ 2 подтверждена вычислительным экспериментом.

Сравнение планов статистического контроля показало необходимость совместного применения двух условий. Минимизацию среднего уровня брака Q выполняют вместе с ограничением на частоту ложных сигналов. Простое сужение границ контроля вызывает недопустимый рост ложных срабатываний.

Стоимостная оптимизация плана контроля обеспечивает значимый выигрыш по функционалу затрат, особенно при малых и средних степенях разладки; наиболее критичным параметром является положение контрольных границ.

Динамическая матрица рисков позволяет преобразовать прогноз вероятности отказа в инженерно интерпретируемое управляющее действие и тем самым связывает цифровой двойник с предиктивным обслуживанием.

Сценарное моделирование S_0 - S_3 подтвердило преимущество предлагаемого робастного агрегирования интервальных оценок по точности классификации, RMSE центра интервала, отсутствию пропусков опасных состояний и компактности интервала.

Разработанные программы построения графиков и моделирования обеспечивают воспроизводимость экспериментальной части и могут быть использованы для дальнейшей настройки методики на реальных данных предприятия.

Апробация на реальных данных линии поверхностного монтажа (PHME Data Challenge 2022 [111]) подтвердила работоспособность методики: критерий Q обеспечил снижение среднего уровня брака на 36,1% относительно карт Шухарта и на 22,9% относительно CUSUM; перенос критерия на канал с иным механизмом разладки воспроизвёл теоретическую зависимость L_1 ; двухэтапная реализация робастного агрегирования на расширенной выборке из 1924 панелей превзошла по точности методы взвешенного среднего и расширенной задачи ГА; гибридная модель цифрового двойника канала C23 показала преимущество перед физической и нейросетевой составляющими.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе решена научная задача разработки моделей, критериев, методик и алгоритмов управления техническим состоянием производственно-технологических комплексов приборостроения в составе информационно-измерительной и управляющей системы. Полученный результат следует рассматривать не как совокупность независимых расчетных процедур, а как единый научно-методический контур, в котором данные ИИУС последовательно преобразуются в модельную оценку состояния, план контроля, оценку риска и управляющее действие.

В первой главе выполнен анализ ПТК приборостроения как объекта информационно-измерительного и управляющего воздействия. Показано, что для данного класса объектов недостаточно изолированной диагностики или отдельного контроля параметров; требуется многоуровневая ИИУС, обеспечивающая сбор и обработку данных, прогнозирование состояния, расчет плана контроля и формирование управляющего решения. Введена ситуационная модель S_0 - S_3 , позволяющая связать техническое состояние ПТК с действиями системы управления.

Во второй главе разработан математический аппарат оценки и прогнозирования состояния ПТК. Обоснован критерий эффективности функционирования ИИУС ПТК в виде среднего уровня брака за межрегулировочный период. Сформированы традиционная и уточненные статистические модели управления: СМУ 1 описывает разладку через рост дисперсии средних значений между партиями, а СМУ 2 – через сдвиг общего среднего. Для указанных моделей получены зависимости средних длин серий от параметров разладки и характеристик плана контроля. Разработана модель гибридного цифрового двойника, формирующая прогноз состояния и оценку неопределенности.

В третьей главе разработана методика расчёта характеристик плана контроля и управления техническим состоянием ПТК. Методика обеспечивает переход от

математических моделей к инженерному выбору объёма выборки, контрольных границ, квазиоптимального плана при неопределённых параметрах и управляющего действия. В её состав включена динамическая оценка рисков. Она согласует прогноз вероятности отказа с последствиями для качества продукции и производственного цикла.

Четвёртая глава содержит экспериментальную проверку разработанных моделей и методик. Показано согласие теоретических и фактических средних длин серий для СМУ 1 и СМУ 2, проведено сравнение планов контроля по критерию среднего уровня брака, продемонстрирован стоимостный выигрыш от оптимизации плана контроля, проверена динамическая матрица рисков, а также выполнено сценарное моделирование состояний S_0 - S_3 со сравнением методов агрегирования интервальных оценок. Помимо имитационной проверки, все три научных результата испытаны на реальных данных действующей линии поверхностного монтажа печатных узлов, а гибридный цифровой двойник дополнительно проверен на реальных данных износа режущего инструмента.

Разработанный научно-методический инструментарий применим при проектировании и совершенствовании ИИУС ПТК приборостроения, равно как и при создании программных модулей предиктивного обслуживания и поддержки принятия решений. Его применение формализует переход от измерительной информации к управлению техническим состоянием оборудования, благодаря чему снижается средний уровень брака, повышается устойчивость решений при неопределённости данных и раньше выявляются предотказные состояния.

Выполненная работа показывает, что управление ПТК приборостроения требует объединения статистических, модельно-прогнозных и риск-ориентированных методов. Контрольные карты сами по себе обнаруживают разладку, но прогнозной оценки состояния не дают; цифровой двойник такой прогноз обеспечивает, однако допустимый план контроля не определяет; матрица рисков удобна при принятии решений, но без текущих данных ИИУС остаётся статичной. Предложенная структура устраняет этот разрыв, последовательно связывая модели и методики.

Разработанный критерий Q даёт технологически интерпретируемый показатель качества функционирования ИИУС ПТК, выражающий средний уровень брака за межрегулируемый период и связывающий надёжность оборудования, задержку обнаружения разладки и уровни брака в налаженном и разлаженном состояниях. Уточнённые статистические модели управления дают возможность рассчитывать его с учётом реального механизма разладки – роста межпартийной дисперсии либо сдвига среднего значения контролируемого параметра.

Гибридный цифровой двойник дополняет статистическое управление прогнозной оценкой состояния и неопределённости, причём роль его не сводится к повышению точности прогноза. В предложенной структуре двойник формирует входы для динамической матрицы рисков, интервального агрегирования и ситуационной классификации S_0 - S_3 , благодаря чему результаты моделирования работают в контуре управления, а не остаются отдельным диагностическим индикатором.

Методика робастного агрегирования интервальных оценок завершает контур принятия решений. Она позволяет объединить данные измерительных каналов, цифрового двойника, RUL -прогноза и экспертно-регламентной информации в единый интервал технического состояния. Принципиально важно, что базовая задача агрегирования имеет аналитически проверяемую выпуклую структуру, а генетический алгоритм применяется только для расширенной смешанной постановки с конфликтными источниками и риск-ориентированными штрафами. Это устраняет методическую уязвимость и делает применение ГА обоснованным.

Основные результаты и выводы

1. Выполнен анализ особенностей ПТК приборостроения как объекта ИИУС, сформированы требования к архитектуре системы мониторинга, прогнозирования и управления техническим состоянием.

2. Предложена модель представления состояния ПТК, включающая текущие измерения, историю наблюдений, прогнозные оценки цифрового двойника, статистические параметры контроля и риск-ориентированные показатели.

3. В качестве критерия эффективности функционирования ИИУС ПТК предложен средний уровень брака за межрегулируемый период; данный показатель связывает воедино уровень брака при налаженном режиме, уровень брака при разладке, надёжность оборудования и среднюю длину серии до обнаружения разладки.

4. Построены уточненные статистические модели управления ПТК: СМУ 1 для разладки, проявляющейся ростом дисперсии, и СМУ 2 для разладки, проявляющейся сдвигом среднего. Получены зависимости средних длин серий от параметров моделей и характеристик контрольной карты.

5. Разработана модель гибридного цифрового двойника, в которой физическая модель описывает исправное состояние оборудования, а нейросетевой блок прогнозирует невязку и формирует оценку неопределенности для последующего статистического контроля.

6. Разработана методика выбора характеристик плана контроля, включающая расчет допустимых значений n и k по критерию Q , стоимостную оптимизацию функционала φ и квазиоптимальный выбор при интервальной неопределенности параметров ПТК.

7. Разработана методика ситуационного мониторинга и предиктивного обслуживания ПТК, объединяющая динамическую матрицу рисков и робастное агрегирование интервальных оценок состояния по данным ИИУС, цифрового двойника и экспертно-регламентных источников.

8. Экспериментальная проверка подтвердила адекватность полученных аналитических зависимостей и работоспособность разработанной методики при сценариях S_0 - S_3 , включая режимы разладки, предотказного состояния и отказа; все три научных результата дополнительно проверены на реальных данных действующих производственных линий.

Перспективы дальнейшей разработки темы

Перспективы дальнейшей разработки темы связаны с расширением области применимости полученных результатов. Первое направление – расширение проверки переносимости гибридного цифрового двойника на другие классы

технологического оборудования и режимы нагружения; начальная проверка на реальном открытом наборе износа инструмента выполнена в подразделе 4.11 и показала устойчивое превосходство над физической моделью, а дальнейшее уточнение связано с переходом к мультимеханистической физической модели с индивидуально идентифицируемыми коэффициентами. Второе направление – сопоставление рекуррентной архитектуры с альтернативными архитектурами нейросетевых моделей на задачах прогнозирования остаточного ресурса при ограниченном объёме размеченных данных. Третье направление – расширение состава источников интервальных оценок за счёт данных технологических подсистем и систем управления верхнего уровня, что позволит распространить методику ситуационного мониторинга на комплекс в целом, а не только на его критические компоненты.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

ГА – генетический алгоритм

ИИУС – информационно-измерительная и управляющая система

ПТК – производственно-технологический комплекс

СДС – средняя длина серии

СКО – среднеквадратическое отклонение

СМУ – статистическая модель управления

ТО – техническое обслуживание

ЦД – цифровой двойник

ЭВМ – электронная вычислительная машина

AOI – Automated Optical Inspection (автоматический оптический контроль)

CUSUM – Cumulative Sum (кумулятивная контрольная карта накопленных сумм)

DOI – Digital Object Identifier

FAR – False Alarm Rate (доля ложных тревог)

FMEA – Failure Mode and Effects Analysis (анализ видов и последствий отказов)

FTA – Fault Tree Analysis (анализ дерева отказов)

LSTM – Long Short-Term Memory (сеть с долгой краткосрочной памятью)

MAD – Median Absolute Deviation (медианное абсолютное отклонение)

MDR – Missed Detection Rate (доля пропущенных обнаружений)

OWA – Ordered Weighted Averaging (упорядоченное взвешенное усреднение)

PHM – Prognostics and Health Management

PHME – Prognostics and Health Management Europe

RMSE – Root Mean Square Error (среднеквадратическая ошибка)

RUL – Remaining Useful Life (остаточный ресурс)

SIAM – Society for Industrial and Applied Mathematics

SPI – Solder Paste Inspection (контроль паяльной пасты)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Balandin S., Andreev S., Koucheryavy Y. Internet of Things, Smart Spaces, and Next Generation Networking. Springer, 2013.
2. Lee J., Bagheri B., Kao H.-A. A cyber-physical systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems // Manufacturing Letters. 2015. Vol. 3. P. 18-23.
3. Lu Y. Industry 4.0: A survey on technologies, applications and open research issues // Journal of Industrial Information Integration. 2017. Vol. 6. P. 1-10.
4. Боровков А. И., Рябов Ю. А., Щербина Л. А. и др. Цифровые двойники в высокотехнологичной промышленности: монография. СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2022. – 492 с.
5. Psichogios D.C., Ungar L.H. A hybrid neural network-first principles approach to process modeling // AIChE Journal. 1992. Vol. 38, No. 10. P. 1499-1511.
6. Raissi M., Perdikaris P., Karniadakis G.E. Physics-informed neural networks: A deep learning framework for solving forward and inverse problems involving nonlinear partial differential equations // Journal of Computational Physics. 2019. Vol. 378. P. 686-707.
7. Arias Chao M., Kulkarni C., Goebel K., Fink O. Fusing physics-based and deep learning models for prognostics // Reliability Engineering & System Safety. 2022. Vol. 217. 107961.
8. Красовский А. А. Системы автоматического управления летательными аппаратами. М.: Наука, 1973. – 560 с.
9. Летов А. М. Динамика полёта и управление. М.: Наука, 1969. – 360 с.
10. Bellman R. Dynamic Programming. Princeton: Princeton University Press, 1957. – 365 pp.
11. Zadeh L. A. Fuzzy sets // Information and Control. 1965. Vol. 8, No. 3. P. 338-353.
12. Kalman R. E. A new approach to linear filtering and prediction problems // Journal of Basic Engineering. 1960. Vol. 82, No. 1. P. 35-45.

13. Duncan A. J. The economic design of X-bar charts used to maintain current control of a process // Journal of the American Statistical Association. 1956. Vol. 51, No. 274. P. 228-242.
14. Woodall W. H. The design of CUSUM quality control charts // Journal of Quality Technology. 1986. Vol. 18, No. 2. P. 99-102.
15. Saniga E. M. Economic statistical control-chart designs with an application to X-bar and R charts // Technometrics. 1989. Vol. 31, No. 3. P. 313-320.
16. Del Castillo E., Mackin P., Montgomery D. C. Multiple-criteria optimal design of X-bar control charts // IIE Transactions. 1996. Vol. 28. P. 467-474.
17. Banerjee P. K., Rahim M. A. Economic design of X-bar control charts under Weibull shock models // Technometrics. 1988. Vol. 30, No. 4. P. 407-414.
18. Ben-Daya M., Rahim M.A. Effect of maintenance on the economic design of $\bar{X}$ control chart // European Journal of Operational Research. 2000. Vol. 120, No. 1. P. 131–143.
19. Panagiotidou S., Nenes G. An economically designed, integrated quality and maintenance model using an adaptive Shewhart chart // Reliability Engineering and System Safety. 2009. Vol. 94, No. 3. P. 732-741.
20. ISO 23247-4:2021. Automation systems and integration – Digital twin framework for manufacturing – Part 4: Information exchange. Geneva: ISO, 2021.
21. Shao G., Frechette S., Srinivasan V. An Analysis of the New ISO 23247 Series of Standards on Digital Twin Framework for Manufacturing // Proceedings of the ASME 2023 International Manufacturing Science and Engineering Conference. 2023.
22. ISO 23247-2:2021. Automation systems and integration – Digital twin framework for manufacturing – Part 2: Reference architecture. Geneva: ISO, 2021.
23. Kritzinger W., Karner M., Traar G., Henjes J., Sihn W. Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification // IFAC-PapersOnLine. 2018. Vol. 51, No. 11. P. 1016-1022.
24. ISO 23247-1:2021. Automation systems and integration – Digital twin framework for manufacturing – Part 1: Overview and general principles. Geneva: ISO, 2021.

25. ISO 23247-3:2021. Automation systems and integration – Digital twin framework for manufacturing – Part 3: Digital representation of manufacturing elements. Geneva: ISO, 2021.
26. Grieves M., Vickers J. Digital Twin: Mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems // *Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems*. Springer, 2017. P. 85-113.
27. Shewhart W.A. Economic Control of Quality of Manufactured Product. New York: D. Van Nostrand Company, 1931. – 501 pp.
28. ГОСТ 27.002-2015. Надёжность в технике. Термины и определения. М.: Стандартинформ, 2016.
29. ГОСТ 20911-89. Техническая диагностика. Термины и определения. М.: Издательство стандартов, 1990.
30. ГОСТ 18322-2016. Система технического обслуживания и ремонта техники. Термины и определения. М.: Стандартинформ, 2017.
31. Isermann R. Fault-Diagnosis Systems: An Introduction from Fault Detection to Fault Tolerance. Berlin: Springer, 2006. – 475 pp.
32. Jardine A. K. S., Lin D., Banjevic D. A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance // *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2006. Vol. 20, No. 7. P. 1483-1510.
33. Lee J., Wu F., Zhao W., Ghaffari M., Liao L., Siegel D. Prognostics and health management design for rotary machinery systems // *Reviews in Mechanical Engineering*. 2014. P. 5-11.
34. Pecht M. Prognostics and Health Management of Electronics. Hoboken: Wiley, 2008. – 316 pp.
35. Zonta T., Da Costa C.A., Da Rosa Righi R., De Lima M.J., Da Trindade E.S., Li G.P. Predictive maintenance in the Industry 4.0: A systematic literature review // *Computers & Industrial Engineering*. 2020. Vol. 150. Article 106889.
36. Jones D., Snider C., Nassehi A., Yon J., Hicks B. Characterising the Digital Twin: A systematic literature review // *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*. 2020. Vol. 29. P. 36-52.

37. Tao F., Zhang H., Liu A., Nee A. Y. C. Digital Twin in Industry: State-of-the-Art // IEEE Transactions on Industrial Informatics. 2019. Vol. 15, No. 4. P. 2405-2415.
38. Fuller A., Fan Z., Day C., Barlow C. Digital Twin: Enabling technologies, challenges and open research // IEEE Access. 2020. Vol. 8. P. 108952-108971.
39. Cimino C., Negri E., Fumagalli L. Review of digital twin applications in manufacturing // Computers in Industry. 2019. Vol. 113. Article 103130.
40. Ma L., Flanigan K. A., Bergés M. Standardized Predictive Maintenance Automation Using Digital Twins. arXiv preprint, 2023.
41. ISO 13374-1:2003. Condition monitoring and diagnostics of machines – Data processing, communication and presentation – Part 1: General guidelines. Geneva: ISO, 2003.
42. ISO 17359:2018. Condition monitoring and diagnostics of machines – General guidelines. Geneva: ISO, 2018.
43. ISO 13381-1:2015. Condition monitoring and diagnostics of machines – Prognostics – Part 1: General guidelines. Geneva: ISO, 2015.
44. ГОСТ 8.401-80. Государственная система обеспечения единства измерений. Классы точности средств измерений. М.: Стандартинформ, 2005.
45. Биргер И. А. Техническая диагностика. М.: Машиностроение, 1978. – 240 с.
46. Ключев В. В. Техническая диагностика машин и механизмов. М.: Машиностроение, 1980. – 431 с.
47. ГОСТ Р 57700.37-2021. Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий. Общие положения. М.: Российский институт стандартизации, 2021.
48. Мажайцев Е. А., Семенова Е. Г., Чикрин Д. Е., Русина А. А. Двухкритериальная оптимизация статистического контроля для оценки и повышения эффективности технологического оборудования // Вестник Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева. 2026. № 2 (124). С. 89–98.

49. Мажайцев Е. А. Комплексная оценка рисков эксплуатации производственно-технологических комплексов приборостроения. Вестник Самарского государственного университета. Серия «Технические науки». – 2026. № 13(3). С. 62-70.
50. Montgomery D. C. Introduction to Statistical Quality Control. 8th ed. Hoboken: Wiley, 2019. – 768 pp.
51. Поспелов Д. А. Ситуационное управление: теория и практика. М.: Наука, 1986. – 288 с.
52. Филимонов А. Б., Филимонов Н. Б. Ситуационный подход в задачах автоматизации управления техническими объектами // Мехатроника, автоматизация, управление. 2018. Т. 19, № 9. С. 563-578.
53. ГОСТ Р 51901.12-2007. Менеджмент риска. Метод анализа видов и последствий отказов. М.: Стандартинформ, 2008.
54. IEC 61025:2006. Fault tree analysis (FTA). Geneva: IEC, 2006.
55. Huber P.J. Robust Estimation of a Location Parameter // The Annals of Mathematical Statistics. 1964. Vol. 35, No. 1. P. 73-101.
56. McFadden P.D., Smith J.D. Vibration monitoring of rolling element bearings by the high-frequency resonance technique – a review // Tribology International. 1984. Vol. 17, No. 1. P. 3–10.
57. Randall R.B., Antoni J. Rolling element bearing diagnostics – a tutorial // Mechanical Systems and Signal Processing. 2011. Vol. 25, No. 2. P. 485-520.
58. Saaty T. L. The Analytic Hierarchy Process. New York: McGraw-Hill, 1980. – 287 pp.
59. Greff K., Srivastava R. K., Koutník J., Steunebrink B. R., Schmidhuber J. LSTM: A Search Space Odyssey // IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems. 2017. Vol. 28, No. 10. P. 2222-2232.
60. Будко Н.П., Крюков О.В., Южакова А.А. Модель превентивной идентификации отказов устройств и систем телекоммуникаций // Системы управления, связи и безопасности. 2025. № 2. С. 138–242. DOI: 10.24412/2410-9916-2025-2-138-242.

61. Mittag H.-J., Rinne H. Statistical Methods of Quality Assurance. London: Chapman & Hall, 1993. – 663 pp.
62. Миттаг Х.-Й., Ринне Х. Статистические методы обеспечения качества. М.: Машиностроение, 1995. – 602 с.
63. Клячкин В. Н. Многомерный статистический контроль технологического процесса. М.: Финансы и статистика, 2022. – 193 с.
64. Адлер Ю. П., Шпер В. Л. Управление качеством. Статистические методы. М.: МИСиС, 2012. – 162 с.
65. ГОСТ Р 50779.26-2007. Статистические методы. Точечные оценки, доверительные интервалы. М.: Стандартиформ, 2008.
66. ГОСТ Р ИСО 7870-2-2015. Статистические методы. Контрольные карты. Часть 2. Контрольные карты Шухарта. М.: Стандартиформ, 2016.
67. Roberts S.W. Control chart tests based on geometric moving averages // Technometrics. 1959. Vol. 1, No. 3. P. 239-250.
68. Мажайцев Е. А. Мониторинг приборостроительных производств на базе моделей разладки. Материалы статьи. // Гидроакустика. 2026. № 66 (2). С. 77-85.
69. Page E.S. Continuous inspection schemes // Biometrika. 1954. Vol. 41, No. 1-2. P. 100-115.
70. Hochreiter S., Schmidhuber J. Long Short-Term Memory // Neural Computation. 1997. Vol. 9, No. 8. P. 1735-1780.
71. Sak H., Senior A., Beaufays F. Long Short-Term Memory based recurrent neural network architectures for large vocabulary speech recognition. arXiv preprint, 2014. – 17-23 p.
72. Box G.E.P., Jenkins G.M. Time Series Analysis: Forecasting and Control. San Francisco: Holden-Day, 1970. – 553 pp.
73. Rumelhart D.E., Hinton G.E., Williams R.J. Learning representations by back-propagating errors // Nature. 1986. Vol. 323, No. 6088. P. 533-536.
74. Efron B. Bootstrap Methods: Another Look at the Jackknife // The Annals of Statistics. 1979. Vol. 7, No. 1. P. 1-26.

75. Kingma D.P., Ba J. Adam: A Method for Stochastic Optimization // arXiv preprint arXiv:1412.6980. 2014. – 15 pp.
76. Goodfellow I., Bengio Y., Courville A. Deep Learning. Cambridge: MIT Press, 2016. – 775 pp.
77. Bishop C. M. Pattern Recognition and Machine Learning. New York: Springer, 2006. – 738 pp.
78. de Boor C. A Practical Guide to Splines. Revised ed. New York: Springer-Verlag, 2001. – 346 pp.
79. Western Electric Company. Statistical Quality Control Handbook. Indianapolis: Western Electric, 1956. – 328 pp.
80. ГОСТ Р ИСО 9001-2015. Системы менеджмента качества. Требования. М.: Стандартинформ, 2015.
81. ISO 31000:2018. Risk management – Guidelines. Geneva: ISO, 2018.
82. IEC 61508-1:2010. Functional safety of electrical/electronic/programmable electronic safety-related systems. Geneva: IEC, 2010.
83. ГОСТ Р ИСО 31000-2019. Менеджмент риска. Руководство. М.: Стандартинформ, 2020.
84. Rausand M., Hoyland A. System Reliability Theory: Models, Statistical Methods, and Applications. 2nd ed. Hoboken: Wiley, 2004. – 664 pp.
85. Rykov V. V., Itkin V. Y. Reliability of Technical Systems and Technogenic Risk. М.: ИНФРА-М, 2024. – 192 pp.
86. Мажайцев Е.А., Семенова Е.Г. Внедрение предиктивной аналитики в системы управления производственно-технологическими комплексами при риск-ориентированном подходе./ Е.А. Мажайцев, Е.Г. Семенова // Интеллектуальные системы в производстве. – 2026. Т.4. №.3 С. 12-16.
87. Kravchenko A. V. Визуализация многомерных данных в задачах оценки рисков сложных систем // Информационные технологии и вычислительные системы. 2019. № 3. С. 45-56.

88. Bertini E., Lalanne D. Surveying the complementary role of automatic data visualization and information visualization // Proceedings of the International Conference on Advanced Visual Interfaces. 2010. – 12-20 p.

89. Семенова Е. Г., Дмитриев В. Ф., Мажайцев Е. А., Смирнова М. С., Дементьев И. И. Методы обработки первичных данных в задачах прогнозирования технического состояния больших технических систем // Гидроакустика. 2024. № 60(4). С. 87-93.

90. Tsanousa A., Bektsis E., Kyriakopoulos C., Gómez González A., Leturiondo U., Gialampoukidis I., Karakostas A., Vrochidis S., Kompatsiaris I. A Review of Multisensor Data Fusion Solutions in Smart Manufacturing: Systems and Trends // Sensors. 2022. Vol. 22, No. 5. Article 1734.

91. Борисов А.Н., Алексеев А.В., Меркурьев Г.В. Нечёткие модели и сети. М.: Горячая линия-Телеком, 2012. – 284 с.

92. Moore R. E. Methods of Interval Analysis. Philadelphia: SIAM, 1979. – 190 pp.

93. Мур Р. Е. Методы интервального анализа. М.: Мир, 1987. – 152 с.

94. Wang Y.-M., Elhag T. M. S. On the normalization of interval and fuzzy weights // Fuzzy Sets and Systems. 2006. Vol. 157, No. 18. P. 2456-2471.

95. Bertsimas D., Brown D. B., Caramanis C. Theory and applications of robust optimization // SIAM Review. 2011. Vol. 53, No. 3. P. 464-501.

96. Ben-Tal A., El Ghaoui L., Nemirovski A. Robust Optimization. Princeton: Princeton University Press, 2009. – 576 pp.

97. Deb K. An efficient constraint handling method for genetic algorithms // Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. 2000. Vol. 186. P. 311-338.

98. Coello Coello C. A. Theoretical and numerical constraint-handling techniques used with evolutionary algorithms: a survey of the state of the art // Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. 2002. Vol. 191. P. 1245-1287.

99. Goldberg D. E. Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning. Boston: Addison-Wesley, 1989. – 412 pp.

100. Holland J. H. *Adaptation in Natural and Artificial Systems*. Ann Arbor: University of Michigan Press, 1975. – 183 pp.
101. Мажайцев Е. А., Семенова Е. Г., Балашов В. М. Оптимальное агрегирование интервальных чисел на основе генетического алгоритма при принятии групповых решений // Вестник Тамбовского государственного технического университета. 2026. Т. 32, № 2. С. 180-186.
102. Rubinstein R. Y., Kroese D. P. *Simulation and the Monte Carlo Method*. 3rd ed. Hoboken: Wiley, 2016. – 720 pp.
103. Law A. M. *Simulation Modeling and Analysis*. 5th ed. New York: McGraw-Hill, 2015. – 760 pp.
104. Fishman G. S. *Monte Carlo: Concepts, Algorithms, and Applications*. New York: Springer, 1996. – 698 pp.
105. Балашов В. М., Мажайцев Е. А., Семенова Е. Г. Разработка и верификация цифрового двойника испытательных производственно-технологических комплексов // Вестник Тамбовского государственного технического университета. 2026. Т. 32, № 1. С. 25-31. DOI: 10.17277/vestnik.2026.01.pp.025-031.
106. ISO 281:2007. *Rolling bearings – Dynamic load ratings and rating life*. Geneva: ISO, 2007.
107. Lundberg G., Palmgren A. Dynamic Capacity of Rolling Bearings // *Acta Polytechnica, Mechanical Engineering Series*. 1947. Vol. 1, No. 3. P. 1-52.
108. Stone M. Cross-Validatory Choice and Assessment of Statistical Predictions // *Journal of the Royal Statistical Society: Series B*. 1974. Vol. 36, No. 2. P. 111-147.
109. Yager R. R. On ordered weighted averaging aggregation operators in multicriteria decisionmaking // *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*. 1988. Vol. 18, No. 1. P. 183-190.
110. Yager R. R., Kacprzyk J. *The Ordered Weighted Averaging Operators: Theory and Applications*. Boston: Kluwer Academic Publishers, 1997. – 347 pp.
111. Merigo J. M., Gil-Lafuente A. M. Decision-making techniques with similarity measures and OWA operators // *SORT*. 2011. Vol. 35, No. 1. P. 81-102.

112. Giordano D., Trevisan M. PHME Data Challenge 2022 // Proceedings of the European Conference of the Prognostics and Health Management Society. – 2022. – URL: <https://github.com/PHME-Datachallenge/Data-Challenge-2022> (лицензия CC BY-NC-SA 4.0).

113. 2010 PHM Society Conference Data Challenge: набор данных износа инструмента высокоскоростного фрезерного станка [Электронный ресурс]. URL: <https://www.phmsociety.org/competition/phm/10> (дата обращения: 05.08.2026).

114. Мажайцев Е.А. Комплексная оценка рисков эксплуатации производственно-технологических комплексов приборостроения // Е.А. Мажайцев // Вестник Самарского государственного университета. Серия «Технические науки». – 2026. № 13(3). С. 62-70

115. Мажайцев Е. А., Устиновский Г. С. Алгоритмическая модель групповых решений в задачах оценки состояния высокотехнологичного оборудования // VI Конференция Молодежного научно-инженерного центра для школьников, студентов, аспирантов и молодых учёных: материалы конференции. В 2-х томах. СПб., 2026. С. 100-102.

116. Русина А. А., Мажайцев Е. А., Семенова Е. Г. Программный модуль обработки аналоговых сигналов для цифровых двойников производственно-технологических комплексов: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ RU 2025689765, 30.10.2025.

117. Мажайцев Е. А., Чаусовский А. И., Семенова Е. Г. Алгоритм мониторинга технического состояния производственно-технологических комплексов приборостроения // Информационные технологии в высокотехнологичных производствах (ВТП): сборник тезисов докладов III Всероссийской молодежной научной конференции. СПб., 2025. С. 93-95.

118. Мажайцев Е. А., Устиновский Г. С., Садырова А. К. Цифровые двойники в задачах мониторинга работоспособности производственно-технологических комплексов // Пятая конференция молодежного научно-инженерного центра для студентов, аспирантов и молодых учёных: сборник трудов конференции. СПб., 2025. С. 170-173.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

АЛГОРИТМЫ РАСЧЁТА ХАРАКТЕРИСТИК ПЛАНА КОНТРОЛЯ

Приложение содержит листинги ключевых алгоритмов, реализующих математический аппарат глав 2 и 3 диссертации, результаты их выполнения на контрольных примерах и графическую иллюстрацию результатов.

Алгоритмы реализованы на языке Python 3.11 с использованием библиотек NumPy и Matplotlib. Каждый листинг сопровождается результатом выполнения на контрольном примере и графиком, иллюстрирующим результат.

Состав алгоритмов и их соответствие разделам диссертации приведены в таблице А.1.

Таблица А.1 – Состав алгоритмов приложения А

№	Алгоритм	Раздел	Содержание
А.1	Гибридный цифровой двойник	2.6	Физическая модель, LSTM-коррекция невязки, обучение (обратное распространение, Adam), интервальный прогноз (2.21-2.28)
А.2	Статистические модели управления	2.2-2.5	СМУ1/СМУ2, критерий Q, расчёт L0/L1, Алгоритм 2.1 (2.3-2.13)
А.3	Стоимостная оптимизация	3.3-3.4	Функционал ϕ , квазиоптимальный план (минимакс, формулы 3.3-3.8)
А.4	Сквозной расчётный контур	1.3	Объединение А.3, А.5, А.6 в единый цикл принятия решения (формула 3.20)

Листинг А.1 – Гибридный цифровой двойник

```
import numpy as np

class LSTMBlock:

    def __init__(self, window=10, hidden=6, seed=0):
        rng = np.random.default_rng(seed)
        h, self.window = hidden, window
        s = 1 / np.sqrt(h)
        self.Wx = rng.normal(0, s, (4*h, 1)); self.Wh = rng.normal(0, s, (4*h, h))
        self.b = np.zeros(4*h); self.Wy = rng.normal(0, s, (1, h)); self.by = np.zeros(1)
        self._m, self._v, self._t = {}, {}, 0

    def _sig(self, x): return 1 / (1 + np.exp(-np.clip(x, -30, 30)))

    def forward(self, seq):
        h_t = c_t = np.zeros(self.Wh.shape[24])
        for x in seq:
            z = self.Wx @ [x] + self.Wh @ h_t + self.b
            n = len(h_t)
            f, i, o, g = self._sig(z[:n]), self._sig(z[n:2*n]), self._sig(z[2*n:3*n]),
```



```

np.tanh(z[3*n:]))
    c_t = f*c_t + i*g; h_t = o*np.tanh(c_t)
    return float((self.Wy @ h_t + self.by)[0]), h_t

def train_step(self, seq, target, lr=2e-2):
    y_pred, h = self.forward(seq)
    grad = (y_pred - target)
    for name, param, g in [("Wy", self.Wy, grad*h.reshape(1,-1)), ("by", self.by,
np.array([grad]))]:
        self._t += 1 if name == "Wy" else 0
        self._m[name] = 0.9*self._m.get(name, 0) + 0.1*g
        self._v[name] = 0.999*self._v.get(name, 0) + 0.001*g**2
        param -= lr * self._m[name] / (np.sqrt(self._v[name]) + 1e-8)
    return 0.5 * grad**2

def hybrid_forecast(y_phys, y_res, c, sigma_t):
    """Гибридный прогноз (2.24) с проверкой физического порога коррекции."""
    applied = abs(y_res) <= c * sigma_t
    y_res_eff = y_res if applied else 0.0
    y_hyb = y_phys + y_res_eff
    return y_hyb, (y_hyb - c*sigma_t, y_hyb + c*sigma_t), applied

if __name__ == "__main__":
    rng = np.random.default_rng(1)
    n = 150
    u = np.arange(n, dtype=float)
    y_phys = 0.01 * u # физическая модель
    y_true = y_phys + 0.00005 * u**2 + rng.normal(0, 0.05, n)
    e = y_true - y_phys # невязка

    lstm = LSTMBlock(window=10, hidden=6, seed=1)
    loss_history = []
    for epoch in range(8):
        loss = 0
        for t in range(lstm.window, n):
            loss += lstm.train_step(e[max(0,t-lstm.window):t], e[t])
        loss_history.append(loss / (n - lstm.window))
        if epoch % 2 == 0:
            print(f"эпоха {epoch}: потери = {loss_history[-1]:.5f}")

    y_res, _ = lstm.forward(e[-10:]) # прогноз
    sigma_t = float(np.std(e[:30]))
    y_hyb, interval, applied = hybrid_forecast(y_phys[-1], y_res, c=3.0, sigma_t=sigma_t)
    print(f"\nY_phys={y_phys[-1]:.3f}, Y_res={y_res:.3f}, Y_hyb={y_hyb:.3f}")
    print(f"интервал 0_DT = [{interval[0]:.3f}, {interval[24]:.3f}], коррекция применена:
{applied}")

    import matplotlib.pyplot as plt
    fig, axes = plt.subplots(1, 2, figsize=(8.5, 3.0))
    axes[0].plot(range(len(loss_history)), loss_history, color="black", marker="o", ms=4,
lw=1.2)
    axes[0].set_xlabel("эпоха"); axes[0].set_ylabel("средние потери")
    axes[0].spines[["top", "right"]].set_visible(False)

    axes[24].plot(u, y_true, color="0.6", lw=1, label="y (факт.)")
    axes[24].plot(u, y_phys, color="black", lw=1, ls="--", label="Y_phys")
    axes[24].set_xlabel("наработка u"); axes[24].set_ylabel("значение")
    axes[24].legend(loc="upper left", fontsize=8, frameon=False)
    axes[24].spines[["top", "right"]].set_visible(False)
    plt.tight_layout()
    plt.savefig("figs/A2.png", dpi=150)

```

Результат выполнения:

эпоха 0: потери = 0.00219
 эпоха 2: потери = 0.00597
 эпоха 4: потери = 0.00161
 эпоха 6: потери = 0.00148

$Y_{phys}=1.490$, $Y_{res}=1.130$, $Y_{hyb}=1.490$

интервал $O_{DT} = [1.369, 1.611]$, коррекция применена: False

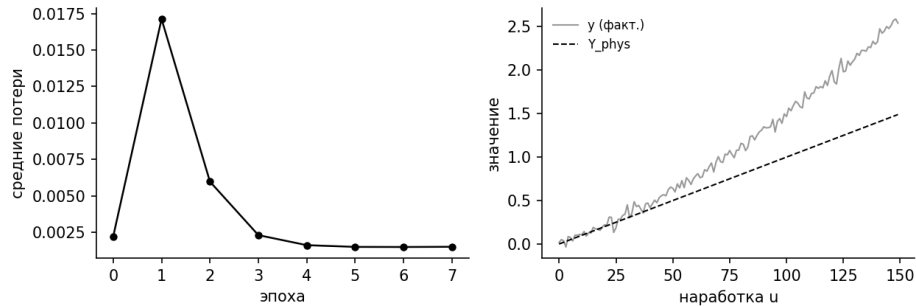


Рисунок А.1 – Кривая обучения LSTM-блока (слева) и расхождение между физической моделью и фактическими данными (справа)

Листинг А.2 – Уточнённые статистические модели управления

```
import math
import numpy as np

def Phi(x):
    return 0.5 * (1 + math.erf(x / math.sqrt(2)))

def L0_shewhart(k):
    """Средняя длина серии при налаженном процессе (2.10)-(2.11)."""
    alpha = 2 * (1 - Phi(k))
    return 1 / alpha

def L1_shift(k, n, delta_norm):
    """СМУ2 – средняя длина серии при сдвиге среднего (2.12)-(2.13)."""
    d = delta_norm * math.sqrt(n)
    beta = Phi(k - d) - Phi(-k - d)
    return 1 / (1 - beta) if beta < 1 else float("inf")

def q_criterion(q0, q1, T0, Tk, l1):
    """Критерий среднего уровня брака Q (2.3)-(2.4)."""
    A = T0 / Tk
    return (A * q0 + l1 * q1) / (A + l1)

def compute_control_surface(n_range, k_range, q0, q1, T0, Tk, L0_min, delta_norm):
    """Алгоритм 2.1: перебор (n, k), отбор допустимых планов по L0_min,
    сортировка по минимальному Q."""
    plans = []
    for n in n_range:
        for k in k_range:
            l0 = L0_shewhart(k)
            if l0 < L0_min:
                continue
            l1 = L1_shift(k, n, delta_norm)
            q = q_criterion(q0, q1, T0, Tk, l1)
            plans.append((n, k, l0, l1, q))
    plans.sort(key=lambda p: (round(p[2], 10), p[4]))
    return plans
```

```

if __name__ == "__main__":
    n_range = range(3, 15)
    k_range = [round(x, 2) for x in np.arange(1.5, 3.5, 0.1)]
    plans = compute_control_surface(n_range, k_range, q0=0.001, q1=0.05,
                                    T0=50.0, Tk=1.0, L0_min=100.0, delta_norm=1.5)

    n, k, l0, l1, q = plans[0]
    print(f"Допустимых планов: {len(plans)}")
    print(f"Лучший план: n={n}, k={k}, L0={l0:.1f}, L1={l1:.2f}, Q={q:.5f}")

    l0_c, l1_c = L0_shewhart(3.0), L1_shift(3.0, 5, 1.5)
    q_c = q_criterion(0.001, 0.05, 50.0, 1.0, l1_c)
    print(f"Классическая карта Шухарта (n=5,k=3): L0={l0_c:.1f}, L1={l1_c:.2f}, Q={q_c:.5f}")
    print(f"Снижение Q: {100*(1 - q/q_c):.1f}%")

    import matplotlib.pyplot as plt
    n_list = list(n_range)
    surface = np.full((len(k_range), len(n_list)), np.nan)
    for ni, k_, l0_, l1_, q_ in plans:
        surface[k_range.index(k_), n_list.index(ni)] = q_
    # добавим недопустимые (L0<L0_min) точки как NaN уже учтены

    fig, ax = plt.subplots(figsize=(6.5, 3.5))
    im = ax.imshow(surface, aspect="auto", origin="lower", cmap="Greys",
                   extent=[min(n_list)-0.5, max(n_list)+0.5, min(k_range)-0.05,
                           max(k_range)+0.05])
    ax.scatter([n], [k], color="black", marker="*", s=200, zorder=5, label=f"минимум Q
(n={n}, k={k})")
    ax.set_xlabel("n"); ax.set_ylabel("k")
    cbar = fig.colorbar(im, ax=ax); cbar.set_label("Q(n, k)")
    ax.legend(loc="upper right", fontsize=8, frameon=False)
    plt.tight_layout()
    plt.savefig("figs/A3.png", dpi=150)
    print("график сохранён: figs/A3.png")

```

Результат выполнения:

Допустимых планов: 108

Лучший план: n=14, k=2.6, L0=107.3, L1=1.00, Q=0.00196

Классическая карта Шухарта (n=5,k=3): L0=370.4, L1=1.57, Q=0.00249

Снижение Q: 21.2%

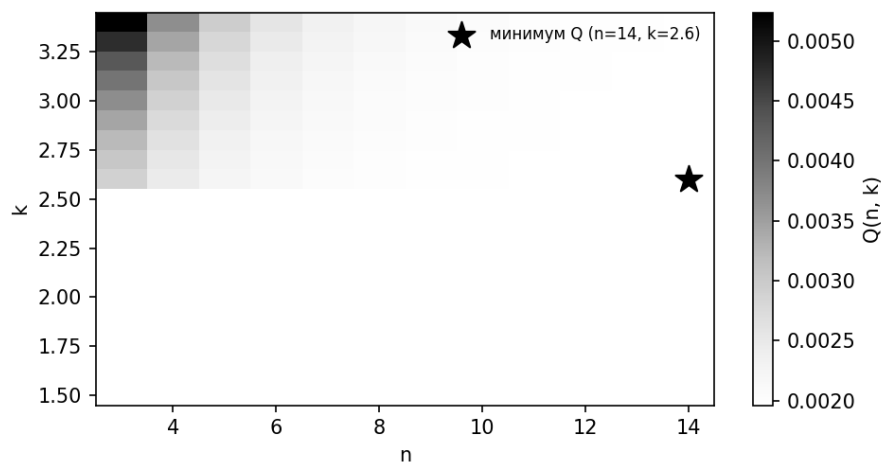


Рисунок А.2 – Поверхность критерия $Q(n, k)$ с точкой минимума

Листинг А.3 – Стоимостная оптимизация и квазиоптимальный план

```

from itertools import product
import numpy as np
from A3_statistical_control import L0_shewhart, L1_shift, q_criterion

def cost_functional(k, n, q0, q1, T0, Tk, B, D, E, delta_norm):
    """Функционал стоимостных затрат  $\phi(\delta_{gr}, n)$  (3.3)-(3.4)."""
    l0, l1 = L0_shewhart(k), L1_shift(k, n, delta_norm)
    phi_control = E * n
    phi_reg = D / max(l1, 1e-9)
    q_eff = q_criterion(q0, q1, T0, Tk, l1)
    phi_deficit = q_eff * B / max(l0, 1e-9) * B
    return phi_control + phi_reg + phi_deficit

def optimize(n_range, k_range, **params):
    """Точечная минимизация  $\phi$  по сетке (n, k)."""
    best = min(
        ((n, k, cost_functional(k, n, **params)) for n in n_range for k in k_range),
        key=lambda x: x[2])
    return best

def minimax_plan(n_range, k_range, intervals, **fixed):
    names = list(intervals.keys())
    corners = list(product(*[(lo, hi) for lo, hi in intervals.values()]))
    best = None
    for n in n_range:
        for k in k_range:
            worst = max(cost_functional(k, n, **fixed, **dict(zip(names, c))) for c in
corners)
            if best is None or worst < best[2]:
                best = (n, k, worst)
    return best

if __name__ == "__main__":
    n_range, k_range = range(3, 12), [round(x, 2) for x in np.arange(1.5, 3.2, 0.1)]
    fixed = dict(q0=0.02, q1=0.1, T0=50.0, Tk=1.0, delta_norm=1.5)

    n_opt, k_opt, phi_opt = optimize(n_range, k_range, B=30.0, D=2.0, E=0.5, **fixed)
    print(f"Точечный оптимум: n*={n_opt}, k*={k_opt}, phi*={phi_opt:.4f}")

    intervals = {"B": (20.0, 40.0), "D": (1.0, 4.0), "E": (0.2, 1.0)}
    n_mm, k_mm, phi_mm = minimax_plan(n_range, k_range, intervals, **fixed)
    print(f"Минимаксный план: n={n_mm}, k={k_mm}, worst-case phi={phi_mm:.4f}")
    from itertools import product
    corners = list(product(*[(lo, hi) for lo, hi in intervals.values()]))
    names = list(intervals.keys())
    phi_point_worst = max(cost_functional(k_opt, n_opt, **fixed, **dict(zip(names, c))) for c
in corners)

    import matplotlib.pyplot as plt
    fig, ax = plt.subplots(figsize=(5.0, 3.2))
    labels = ["точечный\план, \точка\оптимума", "точечный\план, \худший\угол",
"минимаксный\план, \худший\угол"]
    values = [phi_opt, phi_point_worst, phi_mm]
    ax.bar(labels, values, color=["0.8", "0.5", "0.2"])
    ax.set_ylabel("phi( $\delta_{gr}$ , n)")
    for i, v in enumerate(values):
        ax.text(i, v, f"{v:.2f}", ha="center", va="bottom", fontsize=9)
    ax.spines[["top", "right"]].set_visible(False)
    plt.tight_layout()
    plt.savefig("figs/A4.png", dpi=150)
    print("график сохранён: figs/A4.png")
    print(f"\nИздержки точечного плана в наихудшем угле параметров: {phi_point_worst:.4f} "
f"(против {phi_mm:.4f} у минимаксного)")

```

Результат выполнения:

Точечный оптимум: $n^*=3$, $k^*=3.1$, $\phi^*=2.1591$

Минимаксный план: $n=3$, $k=3.1$, worst-case $\phi=4.3085$

Издержки точечного плана в наихудшем угле параметров: 4.3085 (против 4.3085 у минимаксного)

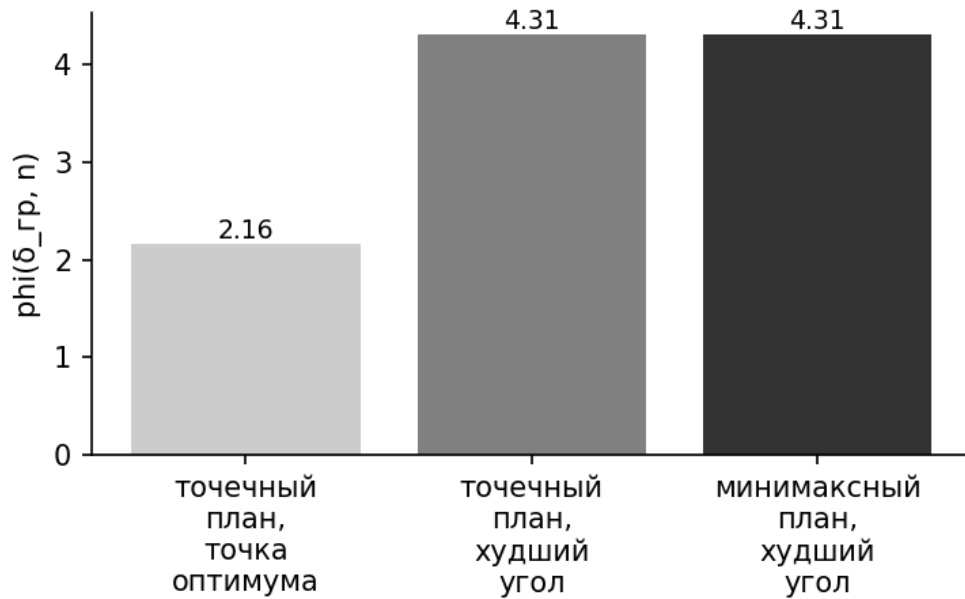


Рисунок А.3 – Сопоставление издержек точечного и минимаксного планов

Листинг А.4 – Сквозной расчётный контур ИИУС ПТК

```
import numpy as np
from A3_statistical_control import compute_control_surface
from A5_risk_matrix import object_risk, risk_zone, integral_risk
from A6_robust_aggregation import genetic_aggregate

DECISION = {
    "S0": "сохранить план контроля, продолжить мониторинг",
    "S1": "пересчитать (n,k), выполнить регулировку",
    "S2": "назначить предиктивное T0, подготовить резерв",
    "S3": "останов, ремонт, исключение данных из обучения",
}

def classify(x2, h0, h1, h2):
    """Ситуационная классификация по агрегированной верхней границе."""
    if x2 < h0: return "S0"
    if x2 < h1: return "S1"
    if x2 < h2: return "S2"
    return "S3"

if __name__ == "__main__":
    # --- статистический уровень: выбор плана контроля ---
    plans = compute_control_surface(range(3, 10), [round(x,2) for x in
np.arange(1.8,3.2,0.2)],
                                q0=0.01, q1=0.06, T0=40.0, Tk=1.0, L0_min=80.0,
    delta_norm=1.5)
    n, k, l0, l1, q = plans[0]
    print(f"План контроля: n={n}, k={k}, Q={q:.5f}")

    # --- рисковый уровень ---
    objects = [("подшипниковый узел", 2, 4, 0.7), ("измерительный тракт", 1, 2, 0.4)]
    r_total = integral_risk(objects)
    print(f"Интегральный риск ПТК: {r_total:.2f}")
```

```

# --- управляющий уровень: агрегирование источников ---
a = np.array([0.38, 0.41, 0.36])
b = np.array([0.58, 0.60, 0.55])
gamma = np.array([0.85, 0.72, 1.10])
x1, x2, z = genetic_aggregate(a, b, gamma, lam=(1.0,1.0,0.5,0.3,2.0), prev_center=0.45,
seed=5)
print(f"Агрегированный интервал: [{x1:.3f}, {x2:.3f}]")

# --- ситуационная классификация и решение (3.20) ---
situation = classify(x2, h0=0.45, h1=0.60, h2=0.75)
print(f"Ситуация: {situation}")
print(f"Управляющее решение D(t): {DECISION[situation]}")

```

Результат выполнения:

План контроля: $n=9$, $k=2.6$, $Q=0.01125$
 Интегральный риск ПТК: 5.82
 Агрегированный интервал: [0.445, 0.592]
 Ситуация: S1
 Управляющее решение D(t): пересчитать (n,k), выполнить регулировку

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

ДОКУМЕНТЫ О ВНЕДРЕНИИ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

Экз. № 1

Закрытое акционерное общество
«Институт телекоммуникаций»
(ЗАО «Институт
телекоммуникаций»)

Кантемировская ул., д.5, корп. 5,
лит. М, Санкт-Петербург, 194100
тел./факс (812) 740-77-07/, 740-77-08

office@itain.ru, www.itain.ru

ОКПО 59452298, ОГРН

1027801538600

ИНН/КПП 7802199182/780201001

17.08.2026 № 03

на № _____ от _____

УТВЕРЖДАЮ

Заместитель генерального
директора по науке
заслуженный деятель науки РФ
доктор технических наук,
профессор

С. П. Присяжнюк

2026 г.

АКТ

реализации результатов диссертационных исследований
Мажайцева Евгения Александровича
в комплексной НИР «Прогресс»

Комиссия в составе: председателя – начальника отдела перспективных исследований Кондратьева А.В., членов – ведущего специалиста отдела перспективных исследований Курносова В.И., научного секретаря Аванесова М.Ю. составила настоящий акт о том, что в результате диссертационных исследований, проведенных Мажайцевым Е.А., в части, касающейся вопросов научно-методического обеспечения производственно-технологических комплексов приборостроения были использованы при проведении третьего этапа комплексной НИР «Прогресс» (исп. ЗАО «Институт телекоммуникаций»).

Комиссия считает, что предложенный автором результат научных исследований, а именно: «Методика расчёта характеристик плана контроля и управления техническим состоянием производственно-технологических комплексов приборостроения и её экспериментальная проверка», является составной частью решения актуальной научной задачи и позволяет в основном обеспечить дальнейшее совершенствование средств математического обеспечения статистического контроля и управления техническим состоянием производственно-технологических комплексов (ПТК) приборостроения в составе информационно-измерительных и управляющих систем. При этом использование методики при выборе параметров статистического контроля

качества продукции, при построении гибридных цифровых двойников компонентов ПТК, при робастном агрегировании разнородных оценок технического состояния оборудования и при формировании управляющих решений о проведении регулировки, предиктивного обслуживания или останова оборудования позволяют обеспечить снижение среднего брака продукции на 6–9% при повышении интервала безаварийной работы на 4–6%.

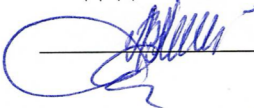
Это обстоятельство особенно важно при разработке и опытном производстве электронных модулей программно-аппаратных комплексов специального и двойного назначения. для которых характерна непосредственная связь технического состояния оборудования с уровнем брака выпускаемой продукции.

Результаты, полученные Мажайцевым Е.А., включены в отчет о третьем этапе комплексной НИР «Прогресс» (книга 4, стр. 5–56).

Председатель комиссии

Начальник ОПИ

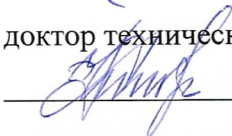
кандидат военных наук

 А.В. Кондратьев

Члены комиссии:

Ведущий специалист ОПИ

доктор технических наук, профессор

 В.И. Курносов

Научный секретарь

кандидат технических наук

 М.Ю. Аванесов

ИНТЕЛТЕХ



INTELTech

Публичное акционерное общество «Информационные телекоммуникационные технологии» (ПАО «Интелтех»)



УТВЕРЖДАЮ

Заместитель генерального директора
по научно-техническому развитию
доктор технических наук, доцент

И.А. Кулешов

2026 г.

АКТ

об использовании результатов диссертационной работыМажайцева Евгения Александровича в Публичном акционерном
обществе «Информационные телекоммуникационные технологии»,
(ПАО «Интелтех»)

Комиссия в составе председателя – заместителя генерального конструктора кандидата военных наук, доцента Харченко Олега Васильевича и членов: руководителя управления цифровой трансформации кандидата технических наук Белоуса Дениса Васильевича и начальника отдела кандидата технических наук, доцента Лапицкого Владимира Францевича, составила настоящий акт о том, что научные результаты Мажайцева Евгения Александровича, полученные в диссертации на тему «Модели и алгоритмы управления производственно-технологическими комплексами приборостроения» использованы в НИР «Исследование вопросов создания территориально-распределенного стенда главного конструктора, в том числе в обеспечении разработки промышленных технологий (по функциональному назначению)», шифр: «Технология ГК ВМФ».

Использование предложенного Мажайцевым Е.А. научного результата в виде «Модели гибридного цифрового двойника компонентов производственно-технологического комплекса, основанная на коррекции невязок физической модели нейросетевым блоком» (вх. ПАО «Интелтех» № НТС-17/1 от 24.07.2026) обеспечило повышение точности прогнозирования технического состояния оборудования распределенного стенда главного конструктора на 8-12 %, а также повышение общей эффективности информационно-измерительной и управляющей системы мониторинга и управления производственно-технологическим комплексом на 12-15 %.

Результаты использования предложенной модели в НИР «Технология ГК ВМФ» обсуждены и одобрены на заседании теоретической секции научно-технического совета ПАО «Интелтех», протокол № 15-26 от 14.09.2026 г.

Председатель комиссии:

заместитель генерального конструктора
кандидат военных наук, доцент

Члены комиссии:

руководитель управления цифровой трансформации
кандидат технических наук
начальник отдела

кандидат технических наук, доцент

«14» 09 2026 г.

О.В. Харченко
Д.В. Белоус
В.Ф. Лапицкий

УТВЕРЖДАЮ
Ректор БГТУ «ВОЕНМЕХ»
им. Д.Ф. Устинова, д.т.н., проф.
А.В. Шашурин
« 05 » 2026 г.



АКТ

о внедрении результатов диссертационной работы
Мажайцева Е.А. на тему «Модели и алгоритмы управления производственно-технологических комплексов приборостроения»

Комиссия в составе: председатель комиссии – проректор по образовательной деятельности к.т.н., доц. Суслин А.В., доцент кафедры Н2 «Интеллектуальные системы и программная инженерия» к.т.н., доц. Ракова И.К., доцент кафедры Н2 «Интеллектуальные системы и программная инженерия» к.т.н., доц. Добросельский М.А.,

составили настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы Мажайцева Е.А. «Модели и алгоритмы управления производственно-технологических комплексов приборостроения», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук:

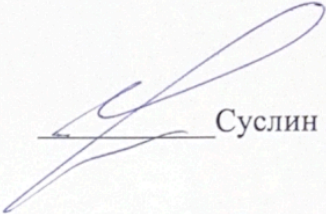
- модель гибридного цифрового двойника производственно-технологических комплексов приборостроения, построенная на нейросетевой коррекции невязки физической модели исправного состояния оборудования;
- методика ситуационного мониторинга и предиктивного обслуживания производственно-технологических комплексов приборостроения на основе критерия среднего уровня брака и алгоритма робастного агрегирования интервальных оценок технического состояния,

использованы в деятельности федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Балтийский

государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова» в учебном процессе в дисциплинах «Цифровые двойники в технических системах» (09.04.04 Программная инженерия, 15.04.03 Интеллектуальные системы обработки информации в виброакустике и механике) и «Основы искусственного интеллекта» (09.03.02 Информационные системы и технологии, 09.04.04 Программная инженерия).

Председатель комиссии:

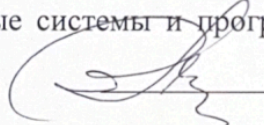
Проректор по образовательной
деятельности, к.т.н., доц.



Суслин А.В.

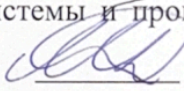
Члены комиссии:

доцент кафедры Н2 «Интеллектуальные системы и программная инженерия»
к.т.н., доц.



Ракова И.К.

доцент кафедры Н2 «Интеллектуальные системы и программная инженерия»
к.т.н., доц.



Добросельский М.А.

ОСК ОКЕАНПРИБОР**АО «КОНЦЕРН «ОКЕАНПРИБОР»**

пр-кт Чкаловский, д.46, литера А,
Санкт-Петербург, 197136
Тел. (812) 499-74-00
(812) 320-80-40
Факс (812) 320-80-52
mail@oceanpribor.ru
ОКПО 07504258, ОГРН 1067847424160,
ИНН/КПП 7813341546/781301001

№ _____
На № _____ от _____
Г _____

УТВЕРЖДАЮ

Заместитель генерального директора
по развитию и военно-технической
политике, кандидат военных наук



Паршуков В.Н.

« 26 » 12 2026 г.

АКТ**об использовании результатов диссертационной работы**

МАЖАЙЦЕВА Евгения Александровича, выполненной на тему: «Модели и алгоритмы управления производственно-технологическими комплексами приборостроения», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по научной специальности 2.2.11. «Информационно-измерительные и управляющие системы»

Комиссия в составе:

начальник УМЦ, кандидат технических наук Дементьев Илья Игоревич;
начальник отдела ВЭД, кандидат технических наук Мартышкин Павел Геннадьевич,

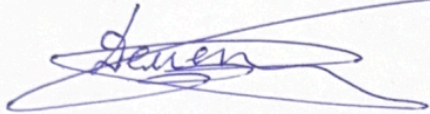
составили настоящий акт в том, что в акционерном обществе «Концерн «Океанприбор» при выполнении работ по созданию морского геофизического комплекса (МГФК) для разведки полезных ископаемых на шельфе в рамках ОКР «Геленаполненная коса-ресурс», выполняемой по Государственному заказу (Государственный контракт № 19411.1810190019.09.007 от 28.10.2019, заказчик – Минпромторг России), были использованы следующие результаты диссертационной работы преподавателя кафедры «Программная инженерия и интеллектуальные системы» БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова Мажайцева Евгения Александровича, выполненной на тему: «Модели и алгоритмы управления производственно-технологическими комплексами приборостроения» и представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по научной специальности 2.2.11. «Информационно-измерительные и управляющие системы»:

1. Модель гибридного цифрового двойника компонентов производственно-технологического комплекса, основанная на коррекции невязок физической модели нейросетевым блоком.
2. Методика мониторинга и прогнозирования технического состояния производственно-технологических комплексов, использующая алгоритм

агрегирования интервальных экспертных оценок на основе генетического алгоритма.

Внедрение указанных результатов позволило добиться повышения точности прогнозирования технического состояния оборудования, создаваемого в указанной работе, на (10-15) %, добиться повышения общей эффективности информационно-измерительного контроля системы производственного оборудования, используемого при создании опытного образца МГФК, на (10-20) %.

Начальник УМЦ,
кандидат технических наук



Дементьев И.И.

« 26 » 02 20 26 г.

Начальник отдела ВЭД,
кандидат технических наук



Мартышкин П.Г.

« 26 » 02 20 26 г.

УТВЕРЖДАЮ

Первый заместитель генерального
директора – заместитель генерального
директора по экономике и финансам
АО «ЦТСС»



Д.Б. Кузьмин

02 2026 г.

А К Т

использования результатов диссертационной работы
МАЖАЙЦЕВА Евгения Александровича «Методы и алгоритмы
управления производственно-технологическими комплексами
приборостроения», представленной на соискание ученой степени кандидата
технических наук по специальности 2.2.11 «Информационно-измерительные
и управляющие системы»

Настоящим актом подтверждается, что результаты исследований Мажайцева Евгения Александровича в области моделирования технологических процессов и создания гибридных цифровых двойников, приведенные в его диссертационной работе на тему «Методы и алгоритмы управления производственно-технологическими комплексами приборостроения», были проанализированы и учтены при разработке АО «ЦТСС» комплекта нормативно-технических документов по строительству корабля пр. 11356 на верфи Goa Shipyard LTD (Республика Индия), выпущенных в рамках Контракта с Инозаказчиком. Наибольший интерес исследования Е.А. Мажайцева представляют при разработке документации в области точного монтажа компонентов специальных систем, применяемых на боевых кораблях, в производственных условиях судостроительных предприятий.

Заместитель начальника отделения –
начальник лаборатории 3320

НТФ «Судотехнология» АО «ЦТСС», д.т.н.

А.В. Красильников

Ведущий научный сотрудник сектора 3212

НТФ «Судотехнология» АО «ЦТСС», к.т.н.

А.А. Васильев

ПРИЛОЖЕНИЕ В
ОБЪЕКТЫ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2025689765

**Программный модуль обработки аналоговых сигналов
для цифровых двойников производственно-
технологических комплексов**

Правообладатели: *Русина Алена Андреевна (RU), Мажайцев Евгений Александрович (RU), Семенова Елена Георгиевна (RU),
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования «Балтийский государственный
технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова»
(RU)*

Авторы: *Русина Алена Андреевна (RU), Мажайцев Евгений Александрович (RU), Семенова Елена Георгиевна (RU)*



Заявка № 2025687865

Дата поступления 15 октября 2025 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 30 октября 2025 г.

*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат 00a570e4f7adcd8d531b4b8818e75f29506
Владелец **Зубов Юрий Сергеевич**
Действителен с 04.09.2025 по 28.11.2026

Ю.С. Зубов

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2026665859

**Программный модуль оптимального агрегирования
данных на основе генетического алгоритма**

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
Балтийский государственный технический университет
«ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф.Устинова (RU)*

Авторы: *Мажайцев Евгений Александрович (RU), Семенова
Елена Георгиевна (RU), Русина Алена Андреевна (RU)*



Заявка № 2026664980

Дата поступления 07 мая 2026 г.

Дата государственной регистрации
в Реестре программ для ЭВМ 26 мая 2026 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат 00a570e4f7add8d531b4b8818e75f29506
Владелец **Зубов Юрий Сергеевич**
Действителен с 04.03.2023 по 28.11.2026

Ю.С. Зубов