

На правах рукописи



МАЖАЙЦЕВ ЕВГЕНИЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ

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

Специальность: 2.2.11 – Информационно-измерительные и управляющие системы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург 2026

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова» на кафедре «Программная инженерия и интеллектуальные системы»

**Научный
руководитель:**

СЕМЕНОВА Елена Георгиевна, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Программная инженерия и интеллектуальные системы» Балтийского государственного технического университета «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова

**Официальные
оппоненты:**

ИВАНОВ Александр Юрьевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры систем автоматического управления и бортовой вычислительной техники Санкт-Петербургского государственного морского технического университета, г. Санкт-Петербург

СМИРНОВ Владимир Александрович, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник Акционерное общество «Концерн «Гранит-Электрон», г. Санкт-Петербург

**Ведущая
организация:**

Акционерное общество «ДИПОЛЬ ТЕХНОЛОГИИ», г. Санкт-Петербург

Защита диссертации состоится «__» _____ 2026 г. на заседании диссертационного совета 99.0.135.02 в БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова по адресу 190005, г. Санкт-Петербург, ул. 1-я Красноармейская, д.1.

С диссертацией и авторефератом можно ознакомиться в библиотеке БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова и на сайте <https://voenmeh.ru/nauka/dissertacionnye-sovety/dissertacionnyj-sovet-99-0-135-02/>

Автореферат разослан «__» _____ 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Смирнова Мария Сергеевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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).

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.

Доля рынка к 2030 году, 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 более чем в 2,1 раза. При этом использовать цифровые двойники 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 в диссертации понимается объединённый общей ИИУС набор технологического оборудования и средств измерения, контроля и диагностики. Сбор, обработка и анализ данных состояния 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.

Тем самым складывается объективное противоречие: развитие промышленной автоматизации и цифровизации предъявляет требования к непрерывной диагностике, прогнозированию и управлению техническим состоянием ПТК, тогда как существующие решения по применению цифровых двойников и нейросетевых моделей в ИИУС ПТК приборостроения остаются фрагментарными и слабо связаны с критериями эффективности статистического управления процессом.

Предлагаемые в диссертации модели, методика и алгоритмы образуют научно-методический инструментарий, который связывает гибридный цифровой двойник, оценку неопределённости контролируемого параметра, выбор плана контроля и предиктивное обслуживание в единый контур управления техническим состоянием ПТК приборостроения.

Степень разработанности темы диссертационной работы определяется результатами следующих исследований:

– 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. Семеновой, 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. Psychogios и L.H. Ungar (1992), где нейронная сеть дополняет модель первых принципов; внесение физического знания непосредственно в функцию потерь формализовано M. Raissi, P. Perdikaris и G.E. Karniadakis (2019), а применение гибридных схем к прогнозированию остаточного ресурса развито M. Arias Chao, C. Kulkarni, K. Goebel и O. Fink (2022). 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, В.А. Липатникова, А.М. Летова, С.В. Богословского, Б.Т. Полякова, С.Н. Васильева, R. Bellman, L. Zadeh, R. Kalman. Задача обоснованного выбора характеристик плана контроля восходит к экономической модели проектирования контрольных карт A.J. Duncan (1956); её недостатки, связанные с завышенной частотой ложных сигналов, отмечены W.H. Woodall (1986), после чего Е.М. Saniga (1989) предложил экономико-статистическое проектирование – минимизацию затрат при ограничениях на средние длины серий, а Р. Mackin и D.C. Montgomery (1996) – многокритериальный выбор плана, не требующий оценивания стоимости ложных тревог. Учёт надёжности оборудования в проектировании карт развит Р.К. Banerjee и М.А. Rahim (1988), М. Ben-Daya и М.А. Rahim (2000), S. Panagiotidou и G. Nenes (2009). 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 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, 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 – разработать научно-методический инструментарий, повышающий эффективность функционирования ИИУС ПТК приборостроения за счёт совместного использования гибридных цифровых двойников, статистического управления и робастного ситуационного мониторинга.

Частные задачи исследования:

- разработка модели гибридного цифрового двойника компонентов ПТК, основанной на нейросетевой коррекции невязки физической модели исправного состояния оборудования;
- разработка модели формирования уровня годной продукции ПТК приборостроения за межрегулировочный период и обоснование на её основе критерия эффективности функционирования ИИУС;
- 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 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 [4, 7];
- **модель формирования уровня годной продукции** ПТК приборостроения за межрегулировочный период, связывающая уровень брака с характеристиками плана, надёжностью оборудования и механизмом статистического управления состоянием ПТК [2, 5];
- **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 [1, 3, 6].

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.

Методы исследований. При проведении диссертационного исследования использованы методы системного анализа, математического моделирования, теории нейронных сетей, статистического управления процессами, теории принятия решений в условиях неопределённости, генетических алгоритмов, а также 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 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. 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 научных результатов определяется:

- корректным применением апробированного математического аппарата теории нейронных сетей, статистического управления процессами, робастного агрегирования интервальных оценок, теории принятия решений, а также в имитационном моделировании;

- отсутствием противоречий полученных результатов с известными положениями теории цифровых двойников и теории диагностики технических систем;

- результатами имитационного и вычислительного моделирования, выполненного на данных ресурсных испытаний подшипниковых узлов, синтезированных по физически обоснованной модели усталостной деградации, а также апробацией всех трёх научных результатов на фактических данных действующей линии поверхностного монтажа печатных узлов и, дополнительно, на фактических данных износа режущего инструмента. Обоснованность третьего результата дополнительно обеспечивается доказуемой выпуклостью базовой задачи агрегирования интервальных оценок, сравнением расширенной постановки с аналитическим решением базовой модели, проверкой устойчивости к шумам, выбросам, дрейфу и отказу отдельных измерительных каналов, а также связью агрегированной оценки состояния с ситуационной классификацией S_0-S_3 и выбором управляющего действия. Область применимости полученных результатов ограничивается ПТК, для которых доступны регулярные данные мониторинга, может быть выделен критический компонент с

параметризуемой физической моделью, а статистические характеристики контролируемого параметра допускают оценивание на горизонте между регулировками.

Теоретическая значимость результатов исследования состоит в:

- развитии научно-методического аппарата построения цифровых двойников ПТК путём формализации правил совместной работы аналитических и нейросетевых компонент;
- дополнении теории статистического управления производственными процессами учётом динамики отказов оборудования и введением единого показателя эффективности функционирования ИИУС ПТК;
- развитии способов робастного агрегирования интервальных оценок и ситуационного принятия решений применительно к мониторингу, прогнозированию и предиктивному обслуживанию ПТК приборостроения.

Практическая значимость заключается в:

- повышении точности прогнозирования состояния оборудования благодаря предложенной модели гибридного цифрового двойника, что подтверждено имитационным моделированием и вычислительным экспериментом на данных ресурсных испытаний подшипниковых узлов, синтезированных по физически обоснованной модели усталостной деградации, а также внешней проверкой на фактических открытых данных линии поверхностного монтажа печатных узлов и износа режущего инструмента;
- 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 36,1% относительно карт Шухарта и на 22,9% относительно карты кумулятивных сумм CUSUM на фактических данных действующей производственной линии – 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. Реализованные 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 автора заключается в самостоятельной разработке всех научных результатов, выносимых на защиту, в частности модели гибридного цифрового двойника компонента ПТК, модели формирования среднего уровня брака продукции ПТК приборостроения, положенной в основу критерия эффективности функционирования ИИУС, и методики ситуационного мониторинга, прогнозирования и предиктивного обслуживания ПТК на основе алгоритма робастного агрегирования интервальных оценок. Автором лично выполнены аналитические выводы, разработаны алгоритмы и программные модули, проведены вычислительные эксперименты и обработка их результатов, а также осуществлены апробация и публикация результатов исследования.

Апробация. Основные результаты диссертационной работы, а также ее итоги, докладывались на:

- 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 модели, методика и алгоритмы внедрены в ПАО «Интелтех», ЗАО «Институт телекоммуникаций», АО «Концерн «Океанприбор», а также в АО «Центр технологии судостроения и судоремонта». 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», а также использованы при выполнении инициативной научно-исследовательской работы «Разработка программно-информационного обеспечения оценки рисков в сложных производственно-технологических комплексах» (Шифр – Корвет). По данным актов о внедрении применение результатов в ЗАО «Институт телекоммуникаций» обеспечило снижение среднего уровня брака продукции на 6-9% при увеличении интервала безаварийной работы на 4-6%, в АО «Концерн «Океанприбор» – повышение точности прогнозирования технического состояния на 10-15% и эффективности информационно-измерительного контроля на 10-20%, в ПАО «Интелтех» – повышение точности прогнозирования технического состояния на 8-12% и общей эффективности ИИУС мониторинга и управления ПТК на 12-15%.

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 3 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Объем и структура диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы из 118 наименований и 3 приложений. Основной текст изложен на 162 страницах и содержит 50 таблиц и 44 рисунка. Общий объем работы с учётом приложения составляет 188 страниц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении раскрыта актуальность темы исследования, поставлены цель и задачи, обозначены объект и предмет, охарактеризованы научная новизна, теоретическая и практическая значимость результатов, изложены сведения об апробации и положения, выносимые на защиту.

В первой главе представлены результаты анализа предметной области исследования с позиций совершенствования информационно-измерительной и управляющей системы производственно-технологических комплексов приборостроения.

Раскрыты назначение и направления развития информационно-измерительных систем ПТК, их состав и структура, а также инструменты поддержки принятия решений в ИИУС ПТК. Отдельно проанализированы способы обработки первичных данных применительно к прогнозированию технического состояния больших технических систем.

Показано, что предметная область сегодня определяется активным развитием промышленной автоматизации и цифровизации в Российской Федерации, однако создание методов управления ПТК идёт разрозненно: цифровые двойники и нейросетевые модели применяются эмпирически, без систематизации процедур их встраивания в ИИУС ПТК.

Проведено сопоставление основных подходов к управлению техническим состоянием ПТК – статистического управления процессами, цифровых двойников на основе предиктивного обслуживания, риск-ориентированных методов и методов агрегирования разнородных оценок.

Статистическое управление процессами располагает формализованным аппаратом обнаружения разладки и выбора контрольных границ, однако предполагает заранее заданный механизм изменения контролируемого параметра и не связано напрямую с прогнозной оценкой цифрового двойника.

Методы предиктивного обслуживания на основе цифровых двойников и машинного обучения формируют прогноз деградации, вероятности отказа и остаточного ресурса, однако без связи с критерием эффективности контроля такой прогноз не определяет напрямую момент и характер управляющего действия.

Риск-ориентированные методы удобны для инженерной интерпретации последствий отказов, а методы агрегирования разнородных оценок необходимы постольку, поскольку в реальной ИИУС состояние оборудования оценивает не один, а несколько источников одновременно. Обобщённое сопоставление рассмотренных подходов по их основной идее, преимуществам и ограничениям для ПТК приборостроения показало, что ни один из них по отдельности не решает задачу управления техническим состоянием ПТК. В связи с этим, возникает необходимость в формировании научно-методического аппарата, объединяющего их сильные стороны.

Отсюда сформулирована научная задача – разработать научно-методический инструментарий, повышающий эффективность функционирования ИИУС ПТК приборостроения за счёт совместного использования гибридных цифровых двойников, статистического управления и робастного ситуационного мониторинга.

Вторая глава посвящена разработке модели гибридного цифрового двойника компонентов ПТК и модели формирования уровня годной продукции за межрегулировочный период, используемой как критерий эффективности функционирования ИИУС. Обоснован показатель эффективности – уровень годной продукции $G = 1 - Q$, где Q – средний уровень брака за межрегулировочный период. Разработана математическая модель гибридного цифрового двойника компонентов ПТК, встраивающая в ИИУС нейросетевые блоки прогноза его состояния.

В основу предложенной модели гибридного цифрового двойника заложен принцип коррекции невязок: нейросетевой блок не подменяет детерминированную (физическую) модель оборудования, а достраивает её, предсказывая ту долю отклика, которую физическая модель не воспроизводит. Благодаря этому модель остаётся интерпретируемой и вместе с тем точнее прогнозирует состояние оборудования.

Пусть $y(t)$ – вектор контролируемых параметров технического состояния оборудования ПТК на момент t . Тогда физическая модель даёт прогноз:

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

в этой записи $u(t)$ – вектор управляющих и технологических воздействий, а θ – совокупность параметров физической модели, разделяемых на конструктивные θ_{geom} и режимные θ_{oper} ; деградационные факторы θ_{deg} проявляются через невязку между наблюдаемым и физически предсказанным состоянием. Отклонение наблюдаемого состояния от физически предсказанного выражают как:

$$e(t) = y(t) - Y_{phys}(t). \quad (2)$$

В невязке $e(t)$ собраны эффекты вне охвата физической модели: накопление повреждений, дрейф параметров, нелинейные взаимодействия, шум измерений и возможные изменения режима работы. В работе невязка рассматривается не как прямое тождество повреждённости, а как диагностический индикатор, чувствительный к деградации при условии контроля режимных факторов и качества данных. Прогнозу этой невязки по предыстории наблюдений и управляющих воздействий обучают нейросетевой блок:

$$Y_{res}(t) = f_{NN}(y(t-1), \dots, y(t-w), u(t); W), \quad (3)$$

здесь w – ширина окна данных, W – веса нейронной сети. Суммарный прогноз гибридной модели цифрового двойника получают сложением физического прогноза и нейросетевой поправки:

$$Y_{hyb}(t) = Y_{phys}(t) + Y_{res}(t). \quad (4)$$

Для согласования физической и нейросетевой частей обучение нейросетевого блока ведут по критерию согласования – двухкомпонентной функции потерь:

$$L(W) = L_{acc} + \lambda \cdot L_{phys}, \quad (5)$$

где $L_{acc} = (1/T) \cdot \sum_t (y(t) - Y_{hyb}(t))^2$ – среднеквадратическая ошибка прогноза гибридной модели; L_{phys} – штрафная функция, обеспечивающая физическую непротиворечивость прогноза за счёт ограничения диапазона прогнозируемой коррекции величиной, согласованной со среднеквадратическим отклонением контролируемого параметра σ , используемым в критерии эффективности; λ – коэффициент, балансирующий точность прогноза и физическую непротиворечивость результата.

Алгоритмическая реализация модели в составе ИИУС ПТК показана на рисунке 1. В алгоритме предусмотрены блок предварительной обработки данных мониторинга (контроль корректности приёма данных, калибровка аналоговых и нормализация цифровых датчиков), блок межсенсорной сверки согласованности данных по коэффициенту корреляции (при корреляции свыше 0,7 данные направляются на физико-статистический анализ, иначе – на коррекцию) и блок коррекции по модели $Y_{hyb} = Y_{phys} + Y_{res}$, построенной на LSTM-сети. Итог коррекции подвергается модельной верификации: если ошибка меньше 5%, данные заносятся в базу, в противном случае LSTM-коррекция повторяется; при выходе контролируемых параметров за границы $\mu \pm k \cdot \sigma$ запускается инженерный аудит, а если ошибка не снижается после заданного числа попыток, данные признаются невалидными. Архитектурой нейросетевого блока выбрана рекуррентная сеть с долгой краткосрочной памятью, поскольку она ориентирована на обработку временных последовательностей и позволяет учитывать долговременные зависимости, возникающие при постепенной деградации оборудования в условиях малого объёма размеченных данных, типичного для эксплуатационного мониторинга ПТК.

Если данные мониторинга приходят сразу по нескольким каналам, их интервальные оценки прогнозируемой невязки объединяет алгоритм из третьей главы. Агрегированный интервал выбирается так, чтобы минимизировать сумму взвешенных квадратов расстояний до оценок отдельных каналов. Такая схема сохраняет единообразие обработки на всех уровнях ИИУС ПТК.

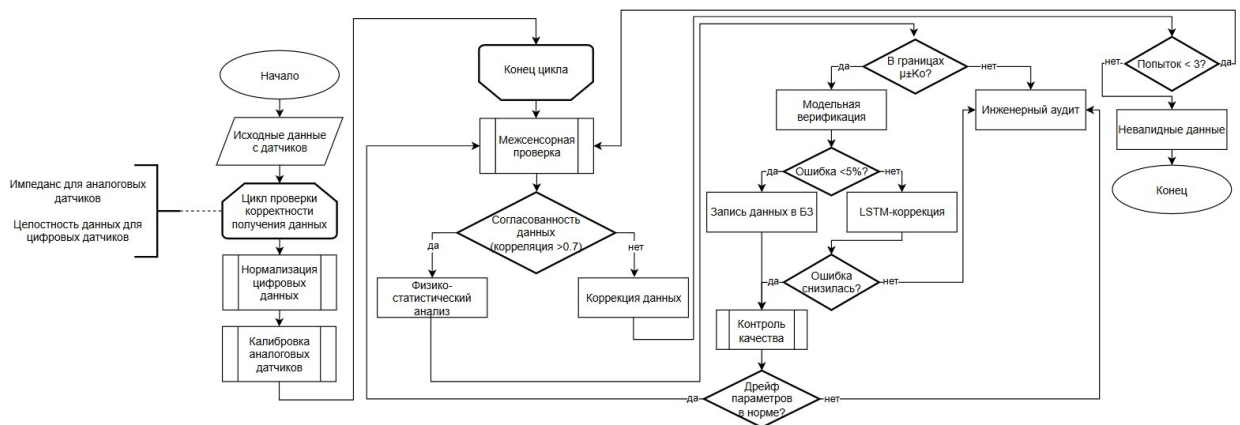


Рисунок 1 – Алгоритм функционирования гибридной модели цифрового двойника компонентов ПТК

Проверка адекватности модели включает две стадии. На первой стадии средствами имитационного моделирования данных деградации сравнивались прогнозы состояния оборудования, полученные физической, нейросетевой и предложенной гибридной моделями. На второй стадии проведён вычислительный эксперимент на данных ресурсных испытаний

подшипниковых узлов, синтезированных по физически обоснованной модели усталостной деградации, а также апробация на фактических открытых данных действующей линии поверхностного монтажа печатных узлов и на фактических данных износа режущего инструмента.

Для физической, нейросетевой и гибридной моделей по схеме перекрёстной проверки с поочерёдным исключением одного узла рассчитана среднеквадратическая ошибка прогноза повреждённости (RMSE). Сопоставление моделей по критерию RMSE выполнено для оценки вклада нейросетевой коррекции невязок. При аддитивном характере расхождения физической модели с объектом гибридная модель снижает RMSE на 59% относительно физической и на 50% относительно нейросетевой модели. На фактических данных линии поверхностного монтажа (прогноз объёма паяльной пасты) RMSE гибридной модели на 11,9% ниже физической и на 7,0% ниже нейросетевой модели; на фактических данных износа режущего инструмента гибридная модель превосходит физическую на 15,6% при сопоставимой с нейросетевой точности.

Результаты сопоставления моделей на модельных и фактических данных сведены в таблице 1.

Таблица 1 – Ошибка прогноза физической, нейросетевой и гибридной моделей

Модель	Подшипник, аддитивное расхождение	Подшипник, ограниченная выборка	Паяльная паста, % объёма	Износ резца, мкм
Физическая	0,0853	0,0916	6,465	36,3
Нейросетевая	0,0693	0,1315	6,124	26,2
Гибридная	0,0346	0,0432	5,696	30,7

При сокращении обучающей выборки ошибка нейросетевой модели возрастает почти вдвое, а гибридной – лишь на четверть; тем самым экспериментально подтверждено, что преимущество гибридной модели возрастает при сокращении объёма данных.

В работе предложена и обоснована модель формирования среднего уровня брака продукции ПТК приборостроения, значение которого используется как критерий эффективности функционирования ИИУС и положено в основу программно-информационного обеспечения предиктивного обслуживания. Роль базовой величины критерия играет средний уровень брака продукции Q , набираемый за промежуток между двумя регулировками оборудования.

Для оборудования различают два режима функционирования. Налаженному режиму присущи уровень брака q_0 при средней продолжительности T_0 ; в разлаженном режиме уровень брака поднимается до $q_1 > q_0$. Контроль опирается на выборки объёма n , снимаемые каждый период T_k ; о разладке говорит выход выборочного среднего за границы $m_0 \pm k \cdot \sigma / \sqrt{n}$. Быстроту обнаружения разладки отражает средняя длина серии выборок разлаженного процесса L_1 , а частоту ложных срабатываний при налаженном процессе – средняя длина серии L_0 .

При обозначении $A = T_0 / T_k$ (число выборок, укладываемых в период налаженной работы) усреднённый на длительном горизонте уровень брака принимает вид:

$$Q = (A \cdot q_0 + L_1 \cdot q_1) / (A + L_1). \quad (6)$$

Механизм разладки описывается двумя статистическими моделями управления. В СМУ 1 разладка проявляется как рост дисперсии выборочных средних между партиями при неизменном математическом ожидании, в СМУ 2 – как сдвиг математического ожидания при постоянной дисперсии. Выбор модели определяет расчёт средней длины серии разлаженного процесса, а через неё – значение Q . Как следует из (6), на показатель Q влияют не только уровни брака q_0 и q_1 , но также надёжность оборудования (параметр A) и качество обнаружения разладок, которое, в свою очередь, определяется параметрами плана контроля n и k . Тем самым критерий выходит за рамки классических вероятностей ошибок первого и второго рода (α , β), где последние с надёжностью оборудования и его фактическим браком напрямую не связаны. Предлагаемый критерий отличается от известных экономических и экономико-статистических моделей проектирования контрольных карт тем, что показатель

эффективности выражен непосредственно в долях брака и не содержит стоимостных коэффициентов, а надёжность оборудования входит в его структуру через безразмерный параметр A . Существенно также, что величина σ , определяющая характеристики плана контроля, оценивается не только по ретроспективной статистике, но и по прогнозу гибридной модели цифрового двойника. При фиксированных q_0 , q_1 и A , а также при зависимости Q от (n, k) только через $L_1(n, k)$, параметр A сохраняет порядок предпочтительности допустимых планов контроля, но задаёт достигаемый уровень брака и позволяет сопоставить единицы оборудования по надёжности.

Зависимость критерия Q от средней длины серии L_1 при различных значениях параметра A показана на рисунке 2 – при $q_1 > q_0$ критерий монотонно возрастает по L_1 , а при малых A влияние L_1 на итоговый уровень брака выражено сильнее, поскольку оборудование реже находится в налаженном состоянии.

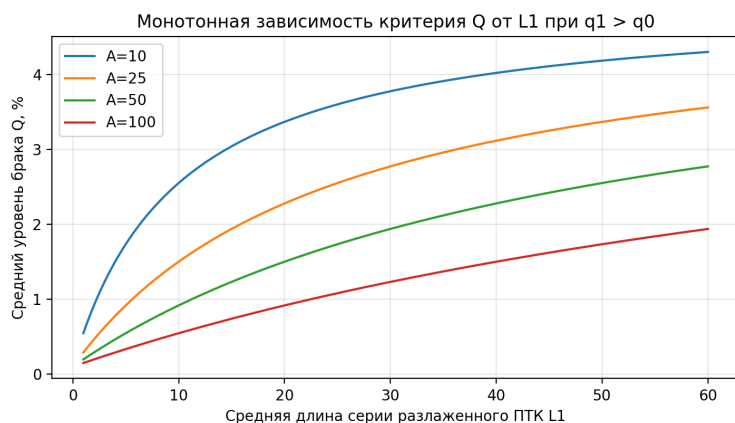


Рисунок 2 – Зависимость критерия Q от средней длины серии при различных значениях параметра A

Для нормально распределённых наблюдений вероятности ошибок обоих родов и связанные с ними средние длины серий L_0 , L_1 записываются через функцию стандартного нормального распределения, поэтому по любой паре (n, k) удаётся последовательно определить α , β , L_0 , L_1 , а затем по (6) – ожидаемый уровень брака Q .

На этом фундаменте построен четырёхэтапный двухкритериальный выбор характеристик плана контроля (n, k) . Сначала фиксируются исходные данные оборудования $(q_0, q_1, \sigma, \delta, T_0, T_k, L_{0,min})$; далее строится поверхность отклика $Q(n, k)$; затем выделяется диапазон k , где выполнено ограничение $L_0 \geq L_{0,min}$; и, наконец, формируется Парето-оптимальный план (n, k) с минимумом Q при минимально достаточном n (рисунок 3).

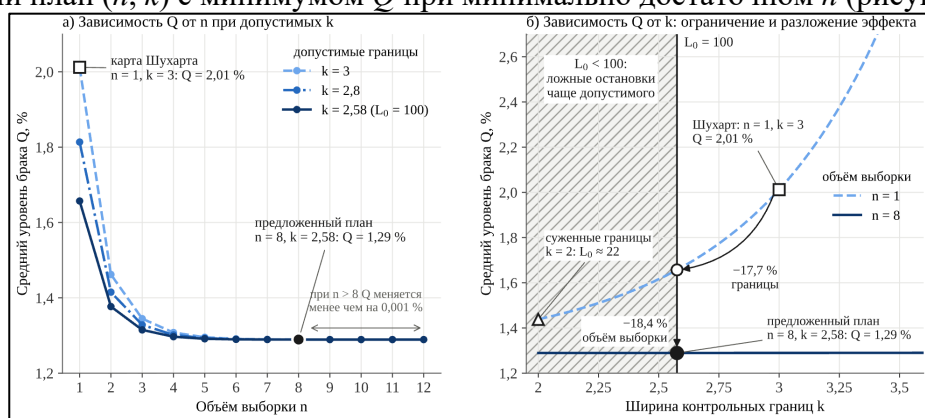


Рисунок 3 – Зависимость среднего уровня брака Q (%) от характеристик плана контроля n и k

Чтобы проверить связь характеристик плана контроля с параметрами статистических моделей управления, поставлен вычислительный эксперимент, заключающийся в формировании теоретических и фактических средних длин серий (СДС) выборок как для налаженного, так и для разлаженного ПТК. Рассмотрены обе статистические модели управления. Здесь m – число точек контрольной карты, вышедших за границы регулирования, N – объём участка карты, на котором велось наблюдение. Полученные данные представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Теоретические и фактические средние длины серий выборок

Состояние, СМУ	L теор.	L факт.	N	m	90% доверительный интервал	Гипотеза H_0
налаженное, СМУ 1, 2	348,54	352,49	10^6	2837	[2781; 2957]	принята
разлаженное, СМУ 1	4,97	4,95	10^5	20210	[19891; 20308]	принята
разлаженное, СМУ 2	4,39	4,37	10^5	22910	[22581; 23018]	принята

Равенство теоретических и фактических СДС выборок оценивалось проверкой гипотезы H_0 . Число точек карты, покинувших границы регулирования на участке фиксированной длины, подчиняется биномиальному закону, поэтому для каждого случая строился доверительный интервал, и проверялось, лежит ли в нём наблюдаемое число выходов. При уровне значимости 0,1 гипотеза H_0 не была отклонена ни в одном варианте – это говорит об адекватности установленных в главе 2 зависимостей характеристик плана контроля от параметров предложенных статистических моделей управления ПТК.

Проверка критерия выполнена аналитически по фактическим параметрам канала С23 линии поверхностного монтажа печатных узлов: $q_0 = 0,0108$, $q_1 = 0,1175$, $\sigma_0 = 6,01\%$, $\delta = 12,91\%$, $A = 50$; дополнительно результаты проверены передискретизацией реальных измерений. Сопоставлены четыре плана контроля – классический по Шухарту ($n = 1$, $k = 3$), с суженными границами ($n = 1$, $k = 2$), кумулятивная карта CUSUM ($h = 4,09$) и оптимизированный по критерию Q ($n = 8$, $k = 2,58$). Сводка результатов представлена в таблице 3.

Таблица 3 – Результаты сопоставления планов статистического контроля

План контроля	Среднее Q , %	Годная прод., %	Стд. откл. 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

Вариант с суженными границами даёт более низкий средний уровень брака, чем карты Шухарта и CUSUM, однако при $L_0 = 22$ нарушает ограничение $L_0 \geq 100$ и потому неприменим. Среди планов, удовлетворяющих ограничению, предложенный план обеспечивает минимальный средний уровень брака 1,2887% при малом разбросе Q , превосходя классический план Шухарта и карту CUSUM. Тем самым предложенный по критерию Q план даёт наилучший компромисс между уровнем годной продукции и частотой ложных остановок оборудования. На рисунке 4 представлено наглядное сравнение уровней брака для разных подходов.

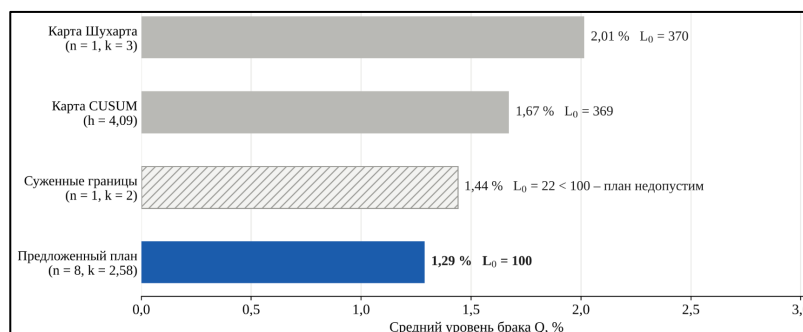


Рисунок 4 – Сравнение среднего уровня брака Q для карт Шухарта, CUSUM и предложенного метода

Предложенный подход обеспечивает наименьшее стандартное отклонение Q среди рассмотренных методов и основан на явных аналитических соотношениях (6), что позволяет адаптировать план контроля под конкретные характеристики оборудования без трудоёмкой перенастройки накопительной карты.

Критерий Q адаптируется под механизм разладки. Для канала TRB6 выбран СМУ 1 и доказана оптимальность плана при $n^* = 1$, $k^* = 2,58$, поскольку средняя длина серии до обнаружения разладки при росте разброса не зависит от объёма выборки. Для канала С23 определен СМУ 2 и оптимальный объём выборки возрастает до $n^* = 8$.

Третья глава посвящена разработке методики расчёта плана контроля и управления состоянием ПТК, переводящей модели второй главы в конкретные характеристики плана контроля и управляющие действия. Методика состоит из двух частей. Первая часть направлена на проведение расчёта плана контроля, в частности это выбор по критерию Q , стоимостная оптимизация и расчёт квазиоптимального плана при интервально заданных параметрах ПТК и ситуационного мониторинга технического состояния (робастное агрегирование интервальных оценок, ситуационная классификация состояний и выбор управляющего действия); на её основе сформулированы практические рекомендации по диагностике и управлению ПТК.

В первой части методики план контроля, выбранный по критерию Q , уточняется оптимизацией по минимуму затрат. В качестве целевого показателя взят безразмерный функционал $\varphi(\delta_{гр}, n)$ – сумма затрат на контроль, затрат на регулировку ПТК и стоимостных потерь от брака.

В отличие от проверки критерия, где параметры оборудования фиксировались, стоимостная оптимизация выполнена для диапазонов технико-экономических параметров, характерных для мелкосерийного приборостроительного производства:

- уровень брака налаженного ПТК $q_0 = 0,01-0,1$;
- степень разладки $q_1/q_0 = 2-8$;
- среднее число партий, изготавливаемых при налаженном ПТК, $B = 10-50$;
- отношение стоимости регулировки к стоимости потерь от брака $D = 0,1-10$;
- отношение стоимости контроля к стоимости потерь от брака $E = 0,0001-0,001$.

Наибольшие требования к точности задания предъявляются к оценке среднего числа партий B и уровня брака при разладке q_1 , поскольку именно эти параметры определяют длительность и тяжесть работы ПТК в разлаженном состоянии; зависимость функционала затрат от q_1 может быть немонотонной.

Оценён выигрыш $\eta = (\varphi - \varphi_{\text{опт}}) / \varphi_{\text{опт}}$ при переходе от традиционного плана ($n=5, k=3$, что соответствует $\alpha=0,0027$ при нормальном распределении) к оптимизированному. При слабой разладке (например, при $q_1 = 0,3$) он равен $\eta = 46\%$ для СМУ 1 и $\eta = 72\%$ для СМУ 2. Если же при расчёте плана совместно учесть параметр B (среднее число партий за период налаженной работы), уровни брака q_1 и q_0 , отношение D стоимости регулировки к потерям от брака и отношение E стоимости контроля к тем же потерям, то стоимостные затраты на статистическое управление ПТК удаётся сократить на 10-28%.

Зависимость стоимостного выигрыша от уровня брака при разладке приведена на рисунке 5. Наибольший эффект достигается при малых и средних степенях разладки, при сильной разладке выигрыш уменьшается, но остаётся положительным.

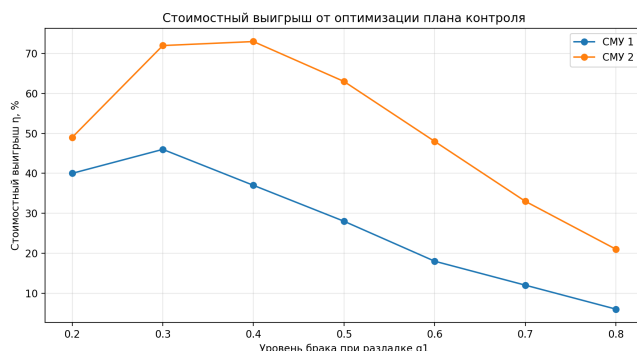


Рисунок 5 – Зависимость стоимостного выигрыша от уровня брака при разладке

Анализ чувствительности функционала затрат к отклонению характеристик $\delta_{гр}$ и n от оптимума выявил ведущую роль контрольных границ $\delta_{гр}$: небольшое отклонение $\delta_{гр}$ от оптимума может приводить к росту функционала затрат более чем на 5%, тогда как требования к точности объёма выборки n менее жёсткие, что важно для мелкосерийного приборостроительного производства.

Из анализа вытекает ряд практических рекомендаций по повышению результативности испытаний ПТК. Первая – при расчёте плана контроля точнее всего следует задавать

контрольные границы $\delta_{гр}$, а к объёму выборки n требования можно ослабить. Вторая рекомендация – для оборудования с разладкой случайного характера (высокие q_1/q_0 и малые B) целесообразен квазиоптимальный план по наихудшим значениям параметров в пределах доверительных диапазонов.

Вторая часть методики – ситуационный мониторинг и предиктивное обслуживание ПТК приборостроения по данным ИИУС – рассматривает техническое состояние как интервальную величину. Это обусловлено тем, что измерительные каналы, экспертные оценки, статистические показатели и прогнозы гибридного цифрового двойника имеют различную точность, полноту и достоверность. На вход методики поступают интервальные оценки диагностического индекса, невязки гибридной модели, среднеквадратического отклонения σ , вероятности разладки и остаточного ресурса RUL .

Интервальные оценки формируются по данным измерительных каналов ИИУС и прогнозным величинам цифрового двойника. Интервал для источника i на момент t :

$$O_i(t) = [a_i(t), b_i(t)]. \quad (7)$$

Например, прогноз цифрового двойника может быть представлен интервалом:

$$O_{DT}(t) = [Y_{hyb}(t) - \kappa\sigma(t), Y_{hyb}(t) + \kappa\sigma(t)], \quad (8)$$

а прогноз остаточного ресурса – интервалом:

$$O_{RUL}(t) = [RUL - (t), RUL + (t)]. \quad (9)$$

Каждому источнику сопоставляется вес:

$$\gamma_i(t) = w_i \cdot v_i \cdot r_i(t), \quad (10)$$

где w_i – компетентность или доверие к источнику, v_i – значимость диагностического критерия, $r_i(t)$ – текущая достоверность канала, определяемая по полноте данных, уровню шума, наличию выбросов и согласованности с цифровым двойником.

Расстояние между интервалами в базовой и расширенной постановках имеет вид:

$$D(O, O_i) = \sqrt{(x_1 - a_i)^2 + (x_2 - b_i)^2}. \quad (11)$$

На первом уровне решается базовая задача агрегирования интервальных оценок. Требуется найти агрегированный интервал:

$$O^*(t) = [x_1(t), x_2(t)], \quad (12)$$

минимизирующий сумму взвешенных квадратов расстояний до исходных интервалов:

$$F_0(x_1, x_2) = \sum_i \gamma_i \cdot [(x_1 - a_i)^2 + (x_2 - b_i)^2] \rightarrow \min, \text{ при } L \leq x_1 \leq x_2 \leq U. \quad (13)$$

Поскольку функция (13) является суммой взвешенных квадратов, а ограничения на границы агрегированного интервала линейны, базовая задача при положительных весах γ_i имеет выпуклую структуру и единственный глобальный минимум. Без ограничений решение задаётся взвешенными средними нижних и верхних границ исходных интервалов. Так, при наличии ограничений используется проекция полученной точки на допустимую область $L \leq x_1 \leq x_2 \leq U$. Тем самым базовая модель служит аналитическим эталоном для проверки корректности программной реализации.

На втором уровне введена расширенная робастная постановка. В неё включены бинарные переменные $z_i \in \{0,1\}$, определяющие, используется ли источник i при агрегировании, а также штрафы за исключение источников, конфликтность интервальных оценок, чрезмерную ширину агрегированного интервала, нарушение динамической согласованности состояния и асимметричные потери при недооценке предотказного состояния. Обобщённая целевая функция имеет вид:

$$F = F_{agg} + \lambda_1 F_{excl} + \lambda_2 F_{conf} + \lambda_3 F_{width} + \lambda_4 F_{dyn} + \lambda_5 F_{risk}. \quad (14)$$

В отличие от базовой выпуклой задачи, расширенная постановка является смешанной – она содержит непрерывные переменные x_1, x_2 , дискретные переменные z_i и попарные

слагаемые, описывающие несогласованность источников. Поэтому для её решения используется генетический алгоритм, кодирующий как границы агрегированного интервала, так и признаки включения источников данных. Такой подход позволяет устойчиво обрабатывать неполные, дрейфующие и конфликтующие измерительные данные без сведения методики к простому линейному усреднению.

Работоспособность методики проверена на наборе фактических данных линии поверхностного монтажа печатных узлов, для которых одновременно измерены четыре канала мониторинга.

Расширенная задача подтверждена на 481 плате и обеспечила нулевую долю пропусков опасных состояний против 50% у взвешенного усреднения и OWA-агрегирования, однако точность классификации снизилась до 0,7235 против 0,8836 у взвешенного среднего. Методика реализована в двухэтапном варианте. Первоначально центр агрегированного интервала вычисляется взвешенным средним, а верхняя граница отдельно расширяется до риск-ориентированной квантили оценок источников, $x_2 = \max(x_2; q_{0,8})$, без обратного влияния на центр.

Двухэтапная реализация проверена на расширенной выборке более 2000 наборов данных и сопоставлена со взвешенным усреднением и расширенной задачей, решаемой генетическим алгоритмом, по точности классификации и доле пропусков опасных состояний (таблица 4).

Таблица 4 – Сравнение методов агрегирования интервальных оценок

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

Двухэтапный метод обеспечивает нулевую долю пропущенных опасных состояний при точности классификации 98,4%, что выше, чем у обоих альтернативных методов. Это подтверждает, что отдельный расчёт центра интервала и защитной верхней границы устраняет компромисс между точностью и безопасностью, присущий совместной ГА-оптимизации.

Полученный агрегированный интервал $O^*(t)$ используется для ситуационной классификации технического состояния ПТК. Если верхняя граница интервала не превышает область нормальной работы, объект относится к ситуации S_0 и контроль продолжается по текущему плану. При признаках разладки формируется ситуация S_1 , пересчитываются параметры плана контроля (n, k) и запускается регулировка. При достижении предотказной области S_2 назначается предиктивное обслуживание с учётом прогноза RUL . При фиксации отказа или критического выхода параметров формируется ситуация S_3 , требующая аварийного останова и ремонта. Таким образом, агрегирование интервальных оценок замыкается на управляющее действие, а не ограничивается диагностическим выводом. Классификация плат по ситуациям S_0 - S_3 предложенным методом показана на рисунке 6.

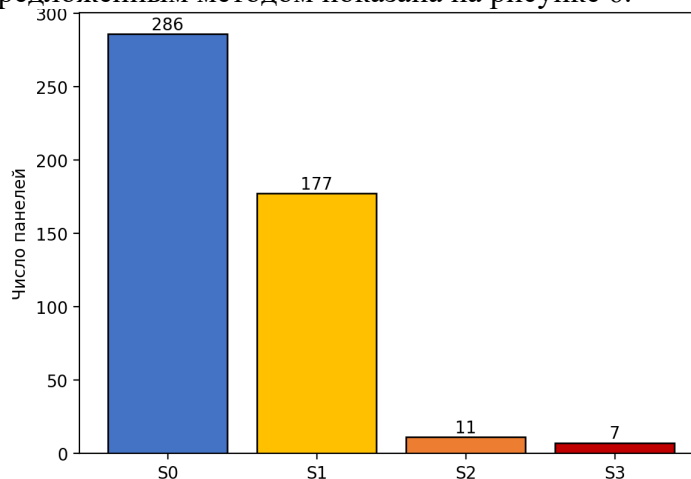


Рисунок 6 – Классификация по ситуациям S_0 - S_3 предложенным методом

Выбор управляющего действия формализован правилом ситуационного выбора $D(t) = \Psi(O^*(t), Q(t), R\Sigma(t), RUL(t), L_o(t), L_1(t))$, реализуемым как набор пороговых правил.

Методика доведена до алгоритмической реализации в виде сквозного расчётного контура (рисунок 7), который объединяет выходы гибридного цифрового двойника, идентификацию типа статистической модели управления, расчёт L_0 , L_1 и Q , выбор плана контроля, в том числе квазиоптимального при интервально заданных параметрах, робастное агрегирование интервальных оценок и ситуационную классификацию S_0 – S_3 с формированием управляющего действия.

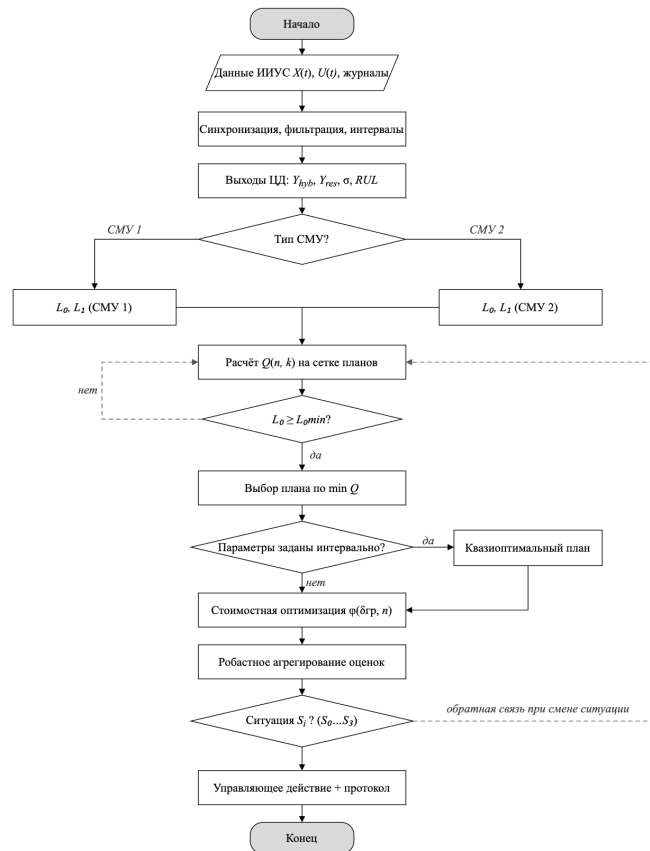


Рисунок 7 – Алгоритм расчётного контура методики управления техническим состоянием ПТК

Четвёртая глава посвящена экспериментальной проверке разработанных моделей, методики и алгоритмов. Программа эксперимента охватывает все три научных результата и включает верификацию зависимостей средних длин серий L_0 и L_1 для СМУ 1 и СМУ 2, проверку модели формирования уровня брака и сопоставление планов контроля с картами Шухарта и CUSUM, оценку стоимостной оптимизации и квазиоптимального выбора плана при интервально заданных параметрах, проверку динамической матрицы рисков, сценарное моделирование ситуаций S_0 – S_3 с сопоставлением предложенного алгоритма агрегирования с взвешенным усреднением и OWA, вычислительный эксперимент на фактических наборах данных ресурсных испытаний подшипниковых узлов, а также апробацию всех трёх результатов на данных действующей линии поверхностного монтажа печатных узлов.

Достоверность полученных оценок подтверждена многократным повторением прогонов имитационной модели, проверкой статистических гипотез о согласии теоретических и фактических характеристик плана контроля, использованием открытого эталонного набора данных и схемы перекрёстной проверки с поочерёдным исключением одного узла. Отдельно подтверждена корректность программной реализации: результат базовой выпуклой задачи агрегирования сверен с аналитическим решением, что служит эталоном для расширенной робастной постановки, решаемой генетическим алгоритмом.

В заключении представлены результаты диссертационного исследования, а также определены перспективные направления дальнейших исследований по данной тематике.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Диссертационное исследование дало следующие научные и практические результаты:

– Модель гибридного цифрового двойника компонента ПТК, основанная на нейросетевой коррекции невязки физической модели исправного состояния оборудования и предназначенная для формирования прогноза, оценки σ и диагностического индикатора деградации, позволила при аддитивном характере расхождения снизить ошибку прогноза на 59% относительно физической и на 50% относительно нейросетевой модели на моделируемых данных ресурсных испытаний подшипниковых узлов, а на фактических данных линии поверхностного монтажа – на 11,9% относительно физической модели;

– Модель формирования уровня годной продукции ПТК приборостроения за межрегулируемый период, связавшая уровень брака с характеристиками плана контроля, надёжностью оборудования и механизмом статистического управления состоянием ПТК, позволила снизить средний уровень брака на 36,1% относительно карт Шухарта и на 22,9% относительно CUSUM на фактических данных действующей производственной линии;

– Методика ситуационного мониторинга, прогнозирования и предиктивного обслуживания ПТК приборостроения, опирающаяся на алгоритм робастного агрегирования интервальных оценок состояния по данным ИИУС, прогноз гибридного цифрового двойника и ситуационную классификацию, позволяющая своевременно относить объект к одной из ситуаций технического состояния и формировать управляющее действие. Точность классификации составила 98,4% при нулевой доле пропусков опасных состояний против 97,1% и 15,7% у взвешенного среднего.

Совместно, эти результаты образуют научно-методический инструментарий, позволяющий повысить эффективность функционирования ИИУС ПТК приборостроения за счёт связки «гибридный цифровой двойник – модель уровня брака – план контроля – робастное агрегированное решение – ситуационное управляющее действие – предиктивное обслуживание».

Выносимые на защиту научные результаты представляют собой научно обоснованные технические разработки, имеющие существенное значение для развития приборостроительной отрасли. Результаты позволяют обеспечить повышение точности прогнозирования технического состояния оборудования, снижение среднего уровня брака продукции и сокращение нерегламентированных простоев за счёт перехода к предиктивному обслуживанию производственно-технологических комплексов.

Практическая апробация результатов в процессах диагностики, мониторинга и предиктивного обслуживания ПТК приборостроения подтвердила возможность сокращения нерегламентированного простоя оборудования и снижения среднего уровня брака продукции. Рост точности прогнозирования состояния оборудования при использовании модели гибридного цифрового двойника доказан двухэтапной верификацией – имитационным моделированием на данных деградации и вычислительным экспериментом на данных ресурсных испытаний подшипниковых узлов, а также внешней проверкой на фактических данных износа режущего инструмента, где гибридная модель превосходит физическую и нейросетевую модель.

Результаты диссертации использованы в ЗАО «Институт телекоммуникаций», АО «Концерн «Океанприбор», ПАО «Интелтех» и АО «Центр технологии судостроения и судоремонта». Результаты диссертации использованы в учебном процессе ФГБОУ ВО «БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова» – в дисциплинах «Цифровые двойники в технических системах» и «Основы искусственного интеллекта». Созданное автором программное обеспечение выполняет обработку аналоговых и цифровых сигналов мониторинга, построение и обновление моделей гибридных цифровых двойников компонентов ПТК, робастное агрегирование интервальных оценок состояния и поддержку группового принятия решений о техническом состоянии оборудования. Результаты также применены при проведении научно-исследовательской работы «Разработка программно-информационного обеспечения оценки рисков в сложных производственно-технологических комплексах» (ИНИР № О7-4218, Шифр – Корвет от 25.09.2025), в рамках которой нашли применение все три научных результата, выносимых на защиту.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в рецензируемых научных изданиях:

1. Мажайцев Е.А. Комплексная оценка рисков эксплуатации производственно-технологических комплексов приборостроения / Е.А. Мажайцев // Вестник Самарского государственного университета. Технические науки. Самара – 2026. – № 3. – С. 57-69. (K2)
2. Мажайцев Е.А. Мониторинг приборостроительных производств на базе моделей разладки / Е.А. Мажайцев // Научно-технический сборник «Гидроакустика/ Hydroacoustics». СПб – 2026. – № 66 (2). – С. 77-85. (K2)
3. Мажайцев Е.А. 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. (K2)
4. Мажайцев Е.А. Разработка и верификация цифрового двойника испытательных производственно-технологических комплексов / В.М. Балашов, Е.А. Мажайцев, Е.Г. Семенова // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2026. – Т. 32, № 1. – С. 25-31. (K2)
5. 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. (K2)
6. 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. (K2)
7. 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 // Научно-технический сборник «Гидроакустика/ Hydroacoustics». – 2024. – № 60 (4). – С. 87-93. (K2)

Статьи в прочих изданиях и материалы конференций:

8. 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.
9. Архиреев Г.П., Семенова Е.Г., Мажайцев Е.А. Оценка рисков несогласованности информационных потоков при интеграции системы управления требованиями в процессы жизненного цикла продукции // VI Конференция Молодежного научно-инженерного центра для школьников, студентов, аспирантов и молодых учёных. Материалы конференции. В 2-х томах. – СПб, 2026. – С. 18-20.
10. Мажайцев Е.А., Чаусовский А.И. Анализ возможностей использования больших языковых моделей в области информационно-управляющих систем // Молодежь. Техника. Космос. Труды XVII международной Молодёжной научно-технической конференции. В 4-х томах. – СПб, 2025. – С. 285-287.
11. Петриков К.Р., Иванов Н.А., Садырова А.К., Мажайцев Е.А. Использование нейронных сетей для предиктивного обслуживания оборудования ВТП // Информационные технологии в высокотехнологичных производствах (ВТП). Сборник тезисов докладов III Всероссийской научной конференции. – СПб, 2025. – С. 198-200.
12. Чаусовский А.И., Мажайцев Е.А., Скорнякова Е.А. Патентный ландшафт в области информационно-управляющих систем на основе больших языковых моделей // Информационные технологии в высокотехнологичных производствах (ВТП). Сборник тезисов докладов III Всероссийской научной конференции. – СПб, 2025. – С. 218-220.
13. 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 научной конференции. – СПб, 2025. – С. 93-95.

14. Мажайцев Е.А., Семенова Е.Г., Русина А.А. Исследование возможностей и путей совершенствования структуры информационно-измерительных и управляющих систем в условиях цифровой трансформации // Вестник Кыргызского национального университета имени Жусупа Баласагына. Материалы международной научной конференции «Развитие науки и образования в условиях глобализации и цифровой трансформации». – Бишкек, 2025. – С. 74-79.

15. Мажайцев Е.А., Минаева С.К. Обзор автоматизации процесса сбора и обработки данных с технологического оборудования // Информационные технологии в высокотехнологичных производствах (ВТП). Сборник тезисов докладов студенческой научной конференции. – СПб, 2024. – С. 158-162.

16. Мажайцев Е.А., Устиновский Г.С. Цифровые двойники в задачах прогнозирования работы технологического оборудования // Будущее предприятия – в творчестве молодых. Сборник докладов VI научно-технической конференции. – СПб, 2024. – С. 271-274.

17. Мажайцев Е.А., Устиновский Г.С., Садырова А.К. Методы сбора технологической информации в условиях современных высокотехнологичных производств // Информационные технологии в высокотехнологичных производствах (ВТП). Сборник тезисов докладов научной конференции. – СПб, 2023. – С. 80-84.

18. Котисов Г.В., Кимсанбаев К.А., Мажайцев Е.А. Программный комплекс для обеспечения взаимодействия между системами автоматизированного проектирования // Фундаментальные и прикладные научные исследования: актуальные вопросы, достижения и инновации. сборник статей XLIV Международной научно-практической конференции. – Пенза, 2021. – С. 81-86.

Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ:

19. Программный модуль обработки аналоговых сигналов для цифровых двойников производственно-технологических комплексов: [свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ] № 2025689765 / Русина А.А., Мажайцев Е.А., Семенова Е.Г.; Оpubл.15.10.2025, Бюл. № 2025687865

20. Программный модуль оптимального агрегирования интервальных экспертных оценок в процессе принятия групповых решений: [свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ] № 2026665859 / Русина А.А., Мажайцев Е.А., Семенова Е.Г.; Оpubл.26.05.2026, Бюл. № 2026664980

21. Модуль мультимодального прогнозирования остаточного ресурса высокотехнологичного оборудования: [свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ] № 2026689212 / Мажайцев Е.А., Семенова Е.Г.; Оpubл. 24.09.2026, Бюл. № 2026688452