

На правах рукописи



Смирнов Владимир Александрович

**Технология приемочного контроля сложной приборной аппаратуры с
ограниченным ресурсом**

Специальность 05.11.14 – Технология приборостроения

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург
2015

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения»

Научный руководитель: **Ларин Валерий Павлович**, доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Лось Андрей Павлович**, доктор технических наук, профессор Федерального Государственного унитарного предприятия «Первый Центральный научно-исследовательский институт Министерства обороны России»

Ханычев Виталий Викторович, кандидат технических наук, первый заместитель генерального директора по научной работе Центрального научно-исследовательского института «КУРС»

Ведущая организация: Открытое акционерное общество «Концерн «Гранит-Электрон»

Защита состоится 03 декабря 2015 г. в 14.00 ч. на заседании диссертационного совета Д 212.233.01 федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения» по адресу: 190000, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, дом 67.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения» <http://guar.ru>

Автореферат разослан «01» октября 2015 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.233.01,
доктор технических наук,
профессор

 Шелест Дмитрий Константинович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В конструкциях современной бортовой аппаратуры летательных аппаратов (ЛА) постоянно воплощаются новейшие достижения науки и техники. Соответственно возрастает и сложность приемочного контроля, как завершающего этапа производства такого рода изделий. Повышение объективности и достоверности решений по возможности поставки изделия для использования по назначению является одним из основных факторов, влияющих на качество его функционирования, что в конечном итоге определяет вероятность выполнения полетного задания. Происходящие в последние годы неудачные запуски ракет различного назначения и разных классов являются свидетельством серьезных проблем с приемочным контролем аппаратуры ракетной техники. Одной из причин увеличения количества параметрических отказов, влияющих на качество функционирования ЛА и полноту выполняемых им назначенных функций, является недостаточный технический ресурс критичных элементов ЛА.

Бортовая автоматизированная система управления (БАСУ) относится к группе аппаратуры изделий одноразового использования, входящей в класс бортовой аппаратуры ЛА и обрабатывается на безотказность в ограниченном временном отрезке, который и составляет ограниченный ресурс или ограниченную наработку до отказа. Необходимость сохранения запаса ресурса при проведении производственных и эксплуатационных контрольно-испытательных мероприятий и более глубокой оценки технического состояния изделия требует разработки новой технологии приемочного контроля, позволяющей исключить принятие ошибочных решений по результатам контроля с максимальным устранением человеческого фактора из этого процесса.

Проблемы контроля и диагностирования электронных приборов решали такие российские и зарубежные ученые, как Пархоменко П.П., Согомоян Е.С., Гнедов Г.М., Синдеев И.М., Мозгалевский А.В., Гаскаров Д.В., Голинкевич Т.А., Барзилович Е.Ю. и многие другие. В настоящее время одним из основных направлений комплексной автоматизации систем контроля и диагностирования сложных технических объектов является совершенствование процессов обработки полученной информации с привлечением новых методов интеллектуального анализа данных и использование достижений информационных технологий в процессе принятия решений.

Разработка и исследование предлагаемой в данной диссертационной работе технологии приемочного контроля лежит в русле дальнейшего развития и совершенствования теории и практики технологии приборостроения применительно к задачам контроля и диагностирования сложной приборной аппаратуры с ограниченным ресурсом на примере БАСУ, что подчеркивает актуальность, проводимых в работе исследований.

Цель и задачи исследований. Целью диссертационной работы является разработка теоретических принципов построения технологической системы приемочного контроля (ТСПК) сложных технических объектов для обеспечения достоверной оценки состояния объекта контроля с минимальным исчерпанием ресурса. В данной работе **объектом исследования** является процесс приемочного контроля и диагностирования сложных изделий ответственного назначения на стадии производства, а **предметом исследования** – методическое, информационное и организационное обеспечение проектирования и функционирования ТСПК.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить комплекс взаимосвязанных задач научного и научно-прикладного характера:

1. Провести анализ современного состояния и направлений развития технологий приемочного контроля сложных изделий, определить проблемы и сформулировать требования к технологическому проектированию приемочного контроля, учитывающие особенности современного производства и специфику изделий.

2. Предложить методологическую основу проектирования технологического процесса и технического обеспечения приемочного контроля на базе системных принципов, технологий интеллектуальной поддержки принятия решений, информационного сопровождения и поддержки процесса проектирования и эксплуатации ТСПК.
3. В рамках предложенного подхода разработать принципы построения ТСПК.
4. Разработать структуру информационной поддержки проектирования и функционирования ТСПК на основе CALS-технологий.
5. Разработать методику принятия решений по результатам контроля, учитывающую возможное наличие неопределенностей в результатах проверок.
6. Разработать методические аспекты оценки эффективности предложенной технологии приемочного контроля.

Методы исследования. Для решения поставленных в работе задач использовались следующие теории и методы: общая теория систем и методы системного анализа, теории и методы технического контроля и диагностики, теория надежности, теории вероятностей и математической статистики, теории и методы искусственного интеллекта: нечетких множеств, байесовских сетей доверия (БСД), рассуждений на основе прецедентов; методы математического моделирования и обработки информации, теория и методы принятия решений.

Научная новизна результатов диссертационного исследования, полученных при решении перечисленных выше задач, заключается в следующем:

1. Предложен новый технологический процесс и новая организация проведения приёмочного контроля БАСУ, отличающиеся интеллектуализацией процесса принятия решений по результатам контроля и информационной поддержкой с использованием принципов CALS-технологий, обеспечивающих достоверное оценивание состояния объекта контроля с минимальным исчерпанием технического ресурса изделия.
2. Разработана оригинальная интеллектуальная система поддержки принятия решений (ИСППР), отличающаяся целевым интеллектуально-методическим обеспечением приемочного контроля и осуществляющая эффективную поддержку решений сложных трудноформализуемых задач контроля и диагностирования.
3. Разработана новая методика многокритериальной идентификации технического состояния объекта контроля, основанная на качественной оценке значений критических параметров по критериям близости к границам полей допусков и аномальности поведения в пределах границ полей допусков, позволяющая увеличить запас работоспособности и обеспечить устойчивую работу БАСУ.
4. Впервые разработана комбинированная методика оптимизации процедуры диагностирования на основе байесовской и прецедентной моделей представления знаний, позволяющая проводить автоматизированный анализ несоответствий в результатах контроля и устранение их причин за минимальное время затраченной наработки объекта контроля.

Практическая значимость теоретических результатов работы и решений прикладных задач состоит в следующем:

1. Предложенные методики позволяют решать весь комплекс практических задач технологического проектирования приемочного контроля сложных технических систем одноразового использования с ограниченным ресурсом.
2. Разработанные в диссертации методики, модели и алгоритмы могут быть использованы на других предприятиях военно-промышленного комплекса при создании систем поддержки принятия решений для целого ряда прикладных и исследовательских задач:
 - повышения производительности контроля и диагностирования за счет автоматизации принимаемых решений;
 - анализа влияния внешних факторов на параметры изделия во время производственных испытаний, анализа причин отказов;

- разработки информационной поддержки и сопровождения приемочного контроля в единой информационной среде предприятия;
- прогнозирования и оценки эффективности ИСПП, что позволяет снизить затраты на научно-исследовательские работы и опытно-конструкторские разработки.

3. Полученные теоретические результаты послужили основой для разработки изобретения «Способ технического контроля и диагностирования бортовых систем беспилотного летательного аппарата с поддержкой принятия решений и комплекс контрольно-проверочной аппаратуры с интеллектуальной системой поддержки принятия решений для его осуществления» (Патент №2557771 от 29.06.15 г.).

4. Разработанный методический комплекс поддержки принятия решений на основе интеллектуальных технологий позволяет автоматизировать процедуры процесса контроля сложных технических систем, существенно уменьшая влияние человеческого фактора.

Практическая ценность полученных результатов подтверждается наличием положительного опыта их внедрения и использования, а именно:

1. Разработанные в диссертационной работе теоретические решения и практические рекомендации использованы в ОАО «Концерн «Гранит-Электрон» и ЗАО «НПЦ «Аквамарин» при разработке и реализации проектов совершенствования технологических процессов контроля сложных объектов, о чем имеется соответствующий акт.

2. Разработанные в диссертации организационно-технические решения приняты в ЗАО «НПЦ «Аквамарин» для разработки корректировок в стандарты организации, о чем имеется соответствующий акт.

3. Научные аспекты исследований нашли отражение в практических учебно-методических материалах и используются в учебном процессе на кафедре конструирования и технологии электронных и лазерных средств Санкт-Петербургского университета аэрокосмического приборостроения при проведении занятий по дисциплинам «Технология контроля электронных средств», «Технология производственного контроля приборов», «Интеллектуальные системы технологического проектирования», о чем имеется соответствующий акт.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Разработка ТСПК сложных ответственных изделий, отличающаяся от известных наличием интеллектуального структурного элемента и целостным представлением на структурном, функциональном, алгоритмическом, информационном и методическом уровнях.

2. Технологический процесс приемочного контроля БАСУ, основанный на применении технологий интеллектуальной поддержки принятия решений и информационного сопровождения и поддержки ЖЦ продукции, позволяющий минимизировать исчерпание ресурса изделия в процессе контроля.

3. Методика оценки критических параметров по критерию близости к границам полей допусков, основанная на формализации экспертных знаний с использованием математического аппарата теории нечетких множеств и продукционных правил логического вывода, позволяющая оперативно обнаруживать и качественно оценивать недостаточный запас работоспособности критических параметров.

4. Методика оптимизации процедуры диагностирования при неполном обнаружении неисправностей на основе БСД, обеспеченная байесовской сетевой моделью диагностирования и позволяющая проводить в автоматизированном режиме анализ и поиск неисправностей в условиях неопределенностей.

5. Методика оптимизации процедуры диагностирования при неполном обнаружении неисправностей на основе прецедентного подхода, обеспеченная моделями прецедента и библиотеки прецедентов и позволяющая проводить в автоматизированном режиме анализ и поиск неисправностей в условиях неопределенностей.

6. Методика оценки эффективности ТСПК, отличающаяся от известных тем, что дает возможность выявлять выходной эффект на различных уровнях системного рассмотрения, учитывая различный вклад ее элементов.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертации докладывались и обсуждались на научных семинарах кафедры, на XIII, XVII международных научно-практических конференциях «Фундаментальные и прикладные исследования, разработка и применение высоких технологий в промышленности и экономике» (Санкт-Петербург, 2012, 2014 гг.); на научной сессии ГУАП (Санкт-Петербург, 2013, 2014, 2015 гг.); на LXVIII, LXX научно-технической конференции СПбНТОРЭС, посвященной Дню радио (Санкт-Петербург, 2013, 2015 г.); на II научно-технической конференции ОАО «Корпорация «Тактическое ракетное вооружение» «Принципы построения систем имитации и контроля управляемых средств поражения» (Москва, 2013 г.); на XIV Международном форуме «Формирование современного информационного общества. Проблемы, перспективы, инновационные подходы» (Санкт-Петербург, 2013 г.); на Всероссийской научно-технической конференции «Теоретические и прикладные проблемы развития и совершенствования автоматизированных систем управления военного назначения» (Санкт-Петербург, 2013 г.); на XIV Всероссийской научно-технической конференции «Приоритетные направления развития науки и технологий» (Тула, 2014 г.); на IX международной научно-практической конференции «Электронные средства и системы управления» (Томск, 2013 г.); на Всероссийской научно-технической конференции по теоретическим и прикладным проблемам развития и совершенствования автоматизированных систем управления специального назначения «НАУКА И АСУ – 2014» (Москва, 2014 г.); на XX юбилейной научно-технической конференции «Радиоэлектронное вооружение НК, ПЛ и береговых объектов флота. Системы управления крылатых ракет» (Санкт-Петербург, 2014 г.); на V Международной научно-практической конференции «Современные концепции научных исследований» (Москва, 2014 г.); на IV Международной научно-практической конференции «Теоретические и прикладные аспекты современной науки» (Белгород, 2014); at I International scientific and practical conference “Science and Education” (Sheffield, 2014 г.).

Соответствие специальности. Работа соответствует паспорту специальности 05.11.14 "Технология приборостроения" по пунктам 1, 2, 3, 7, 8 раздела "Области исследований" паспорта данной специальности.

Публикации. Основные результаты диссертации опубликованы в 30 печатных работах, в том числе 1 патент на изобретение, 8 статей в изданиях, рекомендованных ВАК России, 21 публикация в журналах, сборниках трудов и материалах российских и международных форумов и конференций.

Личный вклад автора. Основные результаты, выносимые на защиту, получены автором лично. Во всех работах, которые выполнены в соавторстве, соискатель непосредственно участвовал в постановке задач, разработке методов их решения, получении и анализе результатов исследований.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех разделов, заключения, списка используемой литературы, восьми приложений, включает 138 страниц основного текста, 38 рисунков и 9 таблиц. Список используемой литературы содержит 134 наименования.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении сформулирована актуальность темы диссертации, указаны ее цели и задачи, методы исследования, научная новизна работы и практическая значимость. Сформулированы основные положения, выносимые на защиту, содержатся сведения об апробации работы и её структуре.

В первом разделе на основе системного подхода проведен анализ современного состояния системы приемочного контроля БАСУ. В результате проведенного анализа определены основные особенности конструкции БАСУ как объекта контроля, технологического процесса производства, средств и методов контроля и диагностирования, информационного обеспечения и взаимодействия в рамках ЖЦ изделия и процесса принятия решений. Приведена диаграмма причинно-следственного анализа (Исикавы) источников дефектов БАСУ на стадии производства и проведена систематизация основных недостатков существующей технологии приемочного контроля и ее обеспечения с учетом влияния внешних по отношению к предприятию-изготовителю факторов.

Отмечено, что в процессе технического контроля нередко приходится сталкиваться с ситуациями недостаточности, неполноты или неопределенности информации о состоянии БАСУ и невозможности гарантированного выбора оптимального решения. Это обстоятельство приводит к повторным проверкам, прерыванию программы контроля, возвратам к началу программы и тем самым к излишнему расходованию ресурса объекта, увеличению времени контроля и анализа проблемных ситуаций. Предложена классификация неопределенностей по источнику их происхождения. Сформулированы следующие основные проблемы: сокращение выработки ресурса аппаратуры при проведении контроля и диагностирования, максимальное исключение человеческого фактора из процесса принятия решений при проведении всех видов контрольных операций и повышения качества оценивания результатов контроля. Отмечена необходимость рассмотрения процесса приемочного контроля как сложной динамической системы, имеющей в своем составе средства диагностирования.

Анализ тенденций развития систем контроля и диагностирования сложных объектов показал, что повышение эффективности функционирования ТСПК связано с совершенствованием процессов обработки полученной информации с привлечением методов интеллектуального анализа данных и использованием достижений информационных технологий в процессе принятия решений. Обоснована целесообразность применения ИСППР в структуре ТСПК, как системы, реализующей комплекс задач контроля на основе единого организационного, информационного, технического, математического и программного обеспечения для достижения поставленных целей.

В конце первого раздела проведена систематизация основных направлений совершенствования существующей технологии приемочного контроля, ориентированных на сохранение заложенного при проектировании технического ресурса изделия. Сформулированы требования к приемочному контролю, технологическому проектированию и сопровождению приемочного контроля БАСУ, учитывающие особенности современного производства и специфику изделия. Предложена методологическая основа проектирования технологического процесса приемочного контроля на базе системных принципов, технологий интеллектуальной поддержки принятия решений и информационного сопровождения и поддержки ЖЦ продукции.

Во втором разделе предложена технология приемочного контроля БАСУ, основанная на решении функциональных задач с использованием ИСППР и автоматизированного рабочего места (АРМ) ТСПК, позволяющая обеспечить достоверную оценку технического состояния объекта контроля и сократить выработку ресурса БАСУ за счет минимизации времени нахождения изделия во включенном состоянии. Разработана схема технологического процесса приемочного контроля БАСУ в форме алгоритма. Отличие предложенной технологии приемочного контроля от существующей в настоящее время на предприятии состоит в расширении круга решаемых задач и представлено для наглядности в виде упрощенной схемы сравнения технологических процессов на рисунке 1. Введение операции контроля функционирования контрольно-проверочной аппаратуры (КПА) в режиме самоконтроля позволяет сократить исчерпание ресурса изделия в случае

неисправного состояния аппаратуры контроля. Предлагаемые операции контроля критических параметров по критерию близости их значений к границам полей допусков и аномальности поведения их значений в пределах границ полей допусков позволяют выявлять случаи практического отсутствия запаса работоспособности у изделия, нестабильность работы комплектующих элементов, наличие плохих контактов и т.п. Проведение операций диагностирования КПА и БАСУ с использованием ИСППР, предусматривающее информационное взаимодействие с информационной системой предприятия посредством АРМ ТСПК, позволяет существенно повысить качество подготовки и эффективность реализации управленческих решений по их восстановлению.

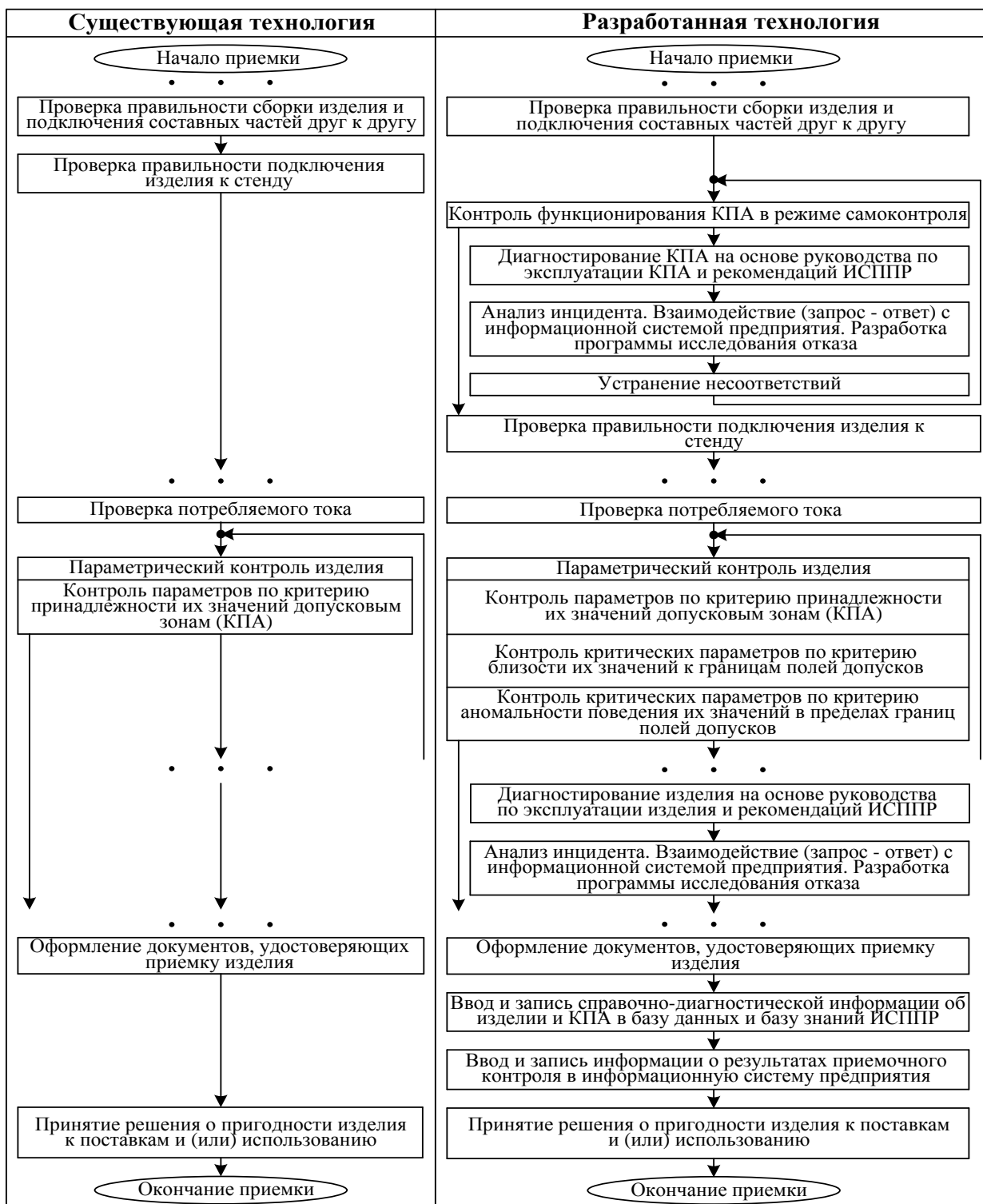


Рисунок 1 - Схема сравнения существующего и предложенного технологического процесса приемочного контроля БАСУ

В рамках системного подхода к исследованию и проектированию технологии приемочного контроля разработана структурно-функциональная схема ТСПК, представленная на рисунке 2.

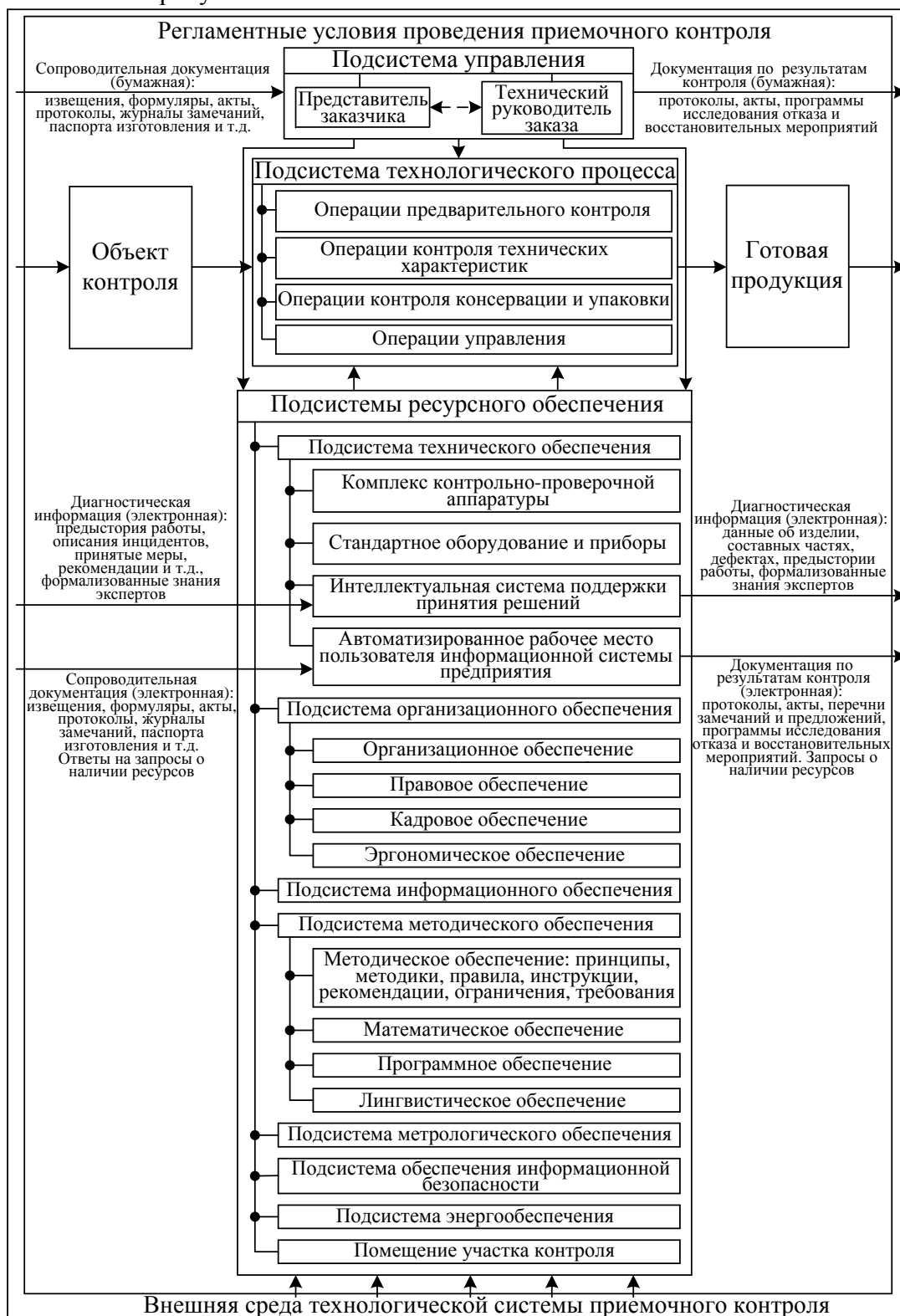


Рисунок 2 - Структурно-функциональная схема ТСПК БАСУ

Исследованы составные элементы ТСПК, характер их взаимодействия и определено место ТСПК в технологической системе отрасли. Разработана организационно-технологическая схема ТСПК на основе матричной структуры управления, которая дополняет существующую линейно-функциональную структуру предприятия. Матричная

форма организации управления позволяет объединить ведущих специалистов для совместной работы, дает большую возможность координации связей между исполнителями, обеспечивает четкое распределение обязанностей и ответственности между исполнителями и различными функциональными подразделениями предприятия.

Разработана структура технических средств, составляющих техническую структуру ТСПК и необходимых для автоматизации проведения всего комплекса операций приемочного контроля. Определены элементы PDM-системы (системы хранения, анализа, передачи данных об изделии и процессах) и единого информационного пространства предприятия, необходимые для информационного сопровождения подготовки и функционирования ТСПК. Разработана структура информационной поддержки проектирования и функционирования ТСПК и функциональная модель процесса разработки технологической документации приемочного контроля на основе методологии IDEF0. Дальнейшее развитие предложенной технологии приемочного контроля БАСУ было связано с разработкой ИСППР и методического обеспечения поддержки принятия решений, позволяющего достоверно оценивать состояние объекта контроля за минимальное время затраченной наработки.

В третьем разделе сформированы требования к ИСППР, принципы построения, определен состав и разработана ее концептуальная модель, представленная на рисунке 3. Приводится описание назначения функциональных элементов.

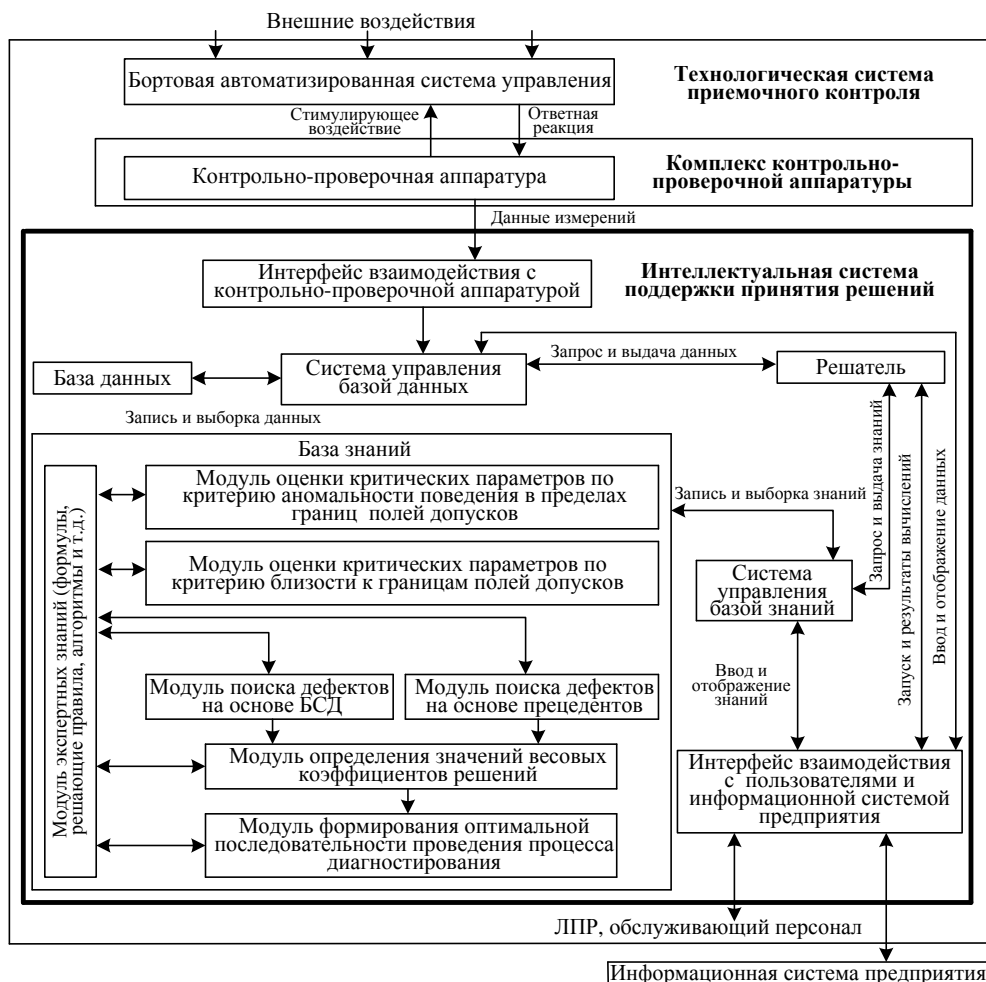


Рисунок 3 – Концептуальная модель ИСППР

Для реализации указанных интеллектуальных компонентов разработано методическое обеспечение, включающее методики, алгоритмы, рекомендации и т.д. Предложен классификатор (рисунок 4) и принципы классификации качественных оценок

контролируемых параметров, являющиеся основой для разработанных методик оценки критических параметров по предложенным критериям.

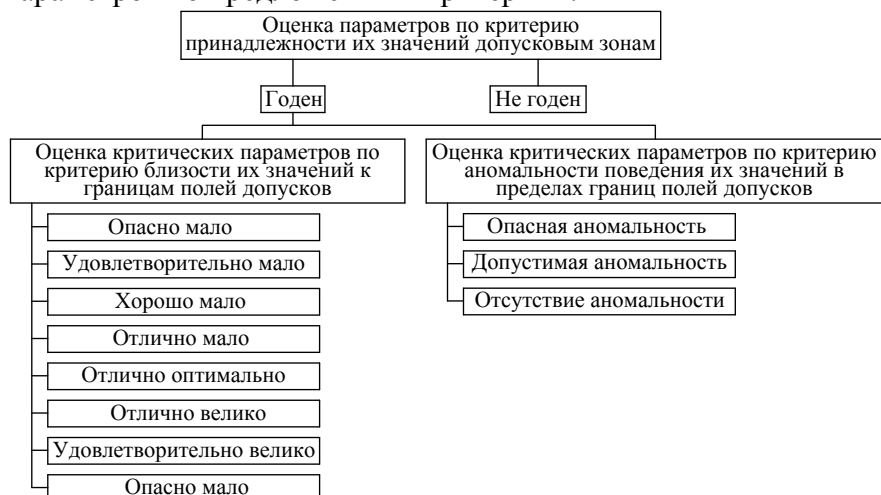


Рисунок 4 – Классификатор для оценки контролируемых параметров БАСУ

Предложено описание значений параметра в виде лингвистической переменной. В этом случае, функции принадлежности нечетких переменных $\mu_{нм}$ («не годен меньше»), $\mu_г$ («годен»), $\mu_{нб}$ («не годен больше») задают степень или уверенность, с которой возможные значения параметра принадлежат нечетким множествам, описываемым функциями:

$$\mu_{нм}(x; x_{мин}, x_{д.мин}) = \begin{cases} 1, & x \leq x_{мин} \\ \frac{x_{д.мин} - x}{x_{д.мин} - x_{мин}}, & x_{мин} \leq x \leq x_{д.мин} \\ 0, & x \geq x_{д.мин} \end{cases} \quad (1)$$

$$\mu_г(x; x_{мин}, x_{опт}, x_{макс}) = \begin{cases} 0, & x \leq x_{мин} \\ \frac{x - x_{мин}}{x_{опт} - x_{мин}}, & x_{мин} \leq x \leq x_{опт} \\ \frac{x_{макс} - x}{x_{макс} - x_{опт}}, & x_{опт} \leq x \leq x_{макс} \\ 0, & x \geq x_{макс} \end{cases} \quad (2)$$

$$x_{опт} = x_{макс} - \frac{x_{макс} - x_{мин}}{2} \quad (3)$$

$$\mu_{нб}(x; x_{д.макс}, x_{макс}) = \begin{cases} 0, & x \leq x_{д.макс} \\ \frac{x - x_{д.макс}}{x_{макс} - x_{д.макс}}, & x_{д.макс} \leq x \leq x_{макс} \\ 1, & x \geq x_{макс} \end{cases} \quad (4)$$

Дискретизация нечеткой переменной на четкие множества, соответствующие определенным в классификаторе подклассам, производится на основе заданных экспертом значений α .

Разработана новая методика многокритериальной идентификации технического состояния объекта контроля, основанная на качественной оценке значений критических параметров с помощью математического аппарата нечетких множеств и продукционной системы логического вывода, позволяющая оперативно обнаруживать и качественно оценивать недостаточный запас работоспособности и опасные изменения критических параметров, получить достоверную оценку технического состояния изделия.

Разработана комбинированная методика оптимизации процедуры диагностирования на основе байесовской и прецедентной модели представления знаний, обеспечивающая минимизацию расходования ресурса изделия при поиске неисправностей в БАСУ. Блок-схема предлагаемой методики показана на рисунке 5.

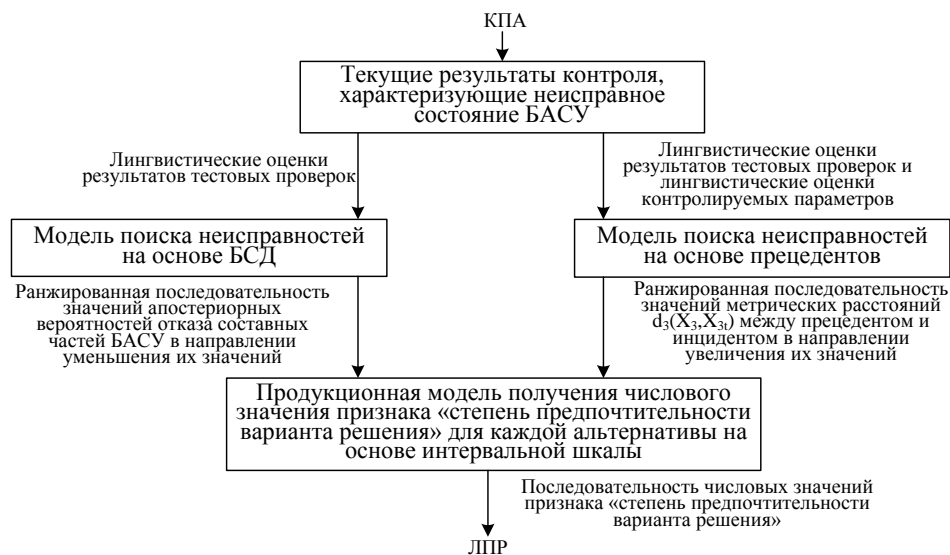


Рисунок 5 - Блок-схема комбинированной методики оптимизации процедуры диагностирования БАСУ

На рисунке 6 приведена топология БСД диагностирования БАСУ, где $A_1...A_5$ – составные части изделия, а $B_1...B_7$ – тестовые проверки.

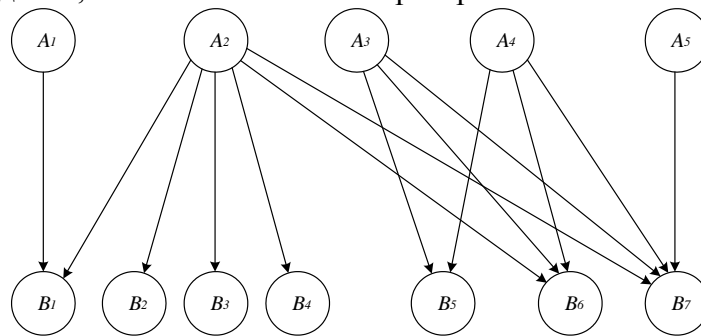


Рисунок 6 - Топология байесовской сети для процесса диагностирования БАСУ

Значения апостериорных вероятностей отказа составных частей БАСУ рассчитываются на основе формулы Байеса (5).

$$P(A|B) = \frac{P(B|A) \cdot P(A)}{P(B)}, \quad (5)$$

где $P(A)$ - безусловная вероятность наступления события A (априорная вероятность), $P(A|B)$ - условная вероятность наступления события A при наличии информации о событии B (апостериорная вероятность), $P(B|A)$ условная вероятность появления информации о событии B при наступлении события A , $P(B)$ - полная вероятность наступления события B .

Для вычисления метрических расстояний $d_3(X_3, X_{3t})$ между прецедентом и инцидентом предложено использовать модифицированную формулу Хэмминга:

$$d_3(X_3, X_{3t}) = \sum_{i=1}^j w_{x_{3i}} |x_{3i} - x_{3ti}|, \quad (6)$$

где $X_3 = x_{31}, x_{32}, \dots, x_{3j}$ - множество параметров БАСУ, описывающее данный прецедент в булевском формате, соответствующее 3-му уровню глубины поиска, $X_{3t} = x_{3t1}, x_{3t2}, \dots, x_{3tj}$ - множество параметров БАСУ, характеризующих инцидент, т.е. текущее состояние

отказа, $w_{x_{3i}}$ - весовой коэффициент, позволяющий учитывать относительную ценность каждого параметра x_{3i} .

Для сопоставления результатов параллельно работающих моделей, использующих разные критерии ранжирования, предлагается применить признак «степень предпочтительности варианта решения», а для определения числового значения признака для каждой альтернативы – интервальную шкалу и продукционную систему правил. Ранжированная последовательность числовых значений признака «степень предпочтительности варианта решения», полученных для каждого альтернативного решения, в направлении убывания их значений является оптимальным решением.

Разработанный в третьем разделе методический аппарат учитывает специфику предметной области и может использоваться для построения ИСППР на других предприятиях военно-промышленного комплекса.

В четвертом разделе рассмотрены методологические и методические аспекты оценки эффективности ТСПК сложных изделий типа БАСУ. Проведен анализ современного состояния проблемы оценки эффективности сложных систем, выявлены характерные особенности и сформулированы принципы решения задачи оценки эффективности ТСПК, позволяющие выполнить качественный анализ и оценку эффективности ТСПК. Построена диаграмма составляющих эффективности ТСПК, позволяющая провести качественную оценку потенциального положительного эффекта и более точно определить количественные показатели, направления и пути повышения эффективности ТСПК.

Разработана система классификации вида эффективности и выходного эффекта ТСПК (таблица 1), позволяющая, в зависимости от задачи анализа, рассматривать эффективность ТСПК с позиции разных уровней системной иерархии.

Разработана новая методика оценки эффективности ТСПК БАСУ на основе БСД и прагматического подхода к определению меры информации, позволяющая выявлять выходной эффект на различных уровнях системного рассмотрения и проводить анализ на разных стадиях ЖЦ изделия.

На уровне производственной системы эффективность ТСПК определяется совокупностью оценок экономической эффективности и технической эффективности:

$$P_{nc} = F(E^{тк}, E^{mex}). \quad (7)$$

Таблица 1 - Классификация вида эффективности и выходного эффекта

Уровни производственной системы	Вид эффективности	Рекомендуемый вид представления $K_{эф}$
Производственная система	Эффективность системы качества	Вероятность выпуска изделий заданного уровня качества - P_{nc}
Технологическая система приемочного контроля БАСУ	Качество функционирования ТСПК	Вероятность безошибочного и своевременного выполнения приемочного контроля - P_{oc}
Технологическая система принятия решений (ТСПР)	Качество решений	Коэффициент результативности ИСППР и АРМ ТСПК - $K_{рез}$.

В качестве целевого показателя, позволяющего оценивать качество функционирования ТСПК, на уровне непосредственного выполнения приемочного контроля, предложено использовать P_{oc} – вероятность безошибочного и своевременного выполнения приемочного контроля. Вычисление показателя P_{oc} предлагается выполнять на основе применения математического аппарата БСД по формуле:

$$P_{oc} = \frac{P(A=1) \cdot \prod_{k=1}^7 P(B_k / A=1)}{\sum_{n=1}^2 P(A_n) \cdot P(B_1 / A_n) \cdot P(B_2 / A_n) \cdot P(B_3 / A_n) \cdot P(B_4 / A_n) \cdot P(B_5 / A_n) \cdot P(B_6 / A_n) \cdot P(B_7 / A_n)}, \quad (8)$$

где A_n, B_k – узлы БСД.

В качестве показателя выходного эффекта ТСПР использован коэффициент результативности ИСППР и АРМ ТСПК $K_{рез.}$. Он определяется как математическое ожидание $M(C)$ и равен среднему арифметическому всех принимаемых значений C при числе рассматриваемых вариантов проведения приемочного контроля:

$$K_{рез.} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n C_i, \quad (9)$$

где C является количественным показателем ценности информации, интегральным измерителем результативности приемочного контроля и вычисляется по формуле В. И. Корогодина:

$$C = \frac{P_{\delta c1} - P_{\delta c0}}{1 - P_{\delta c0}}, \quad (10)$$

где $P_{\delta c1}$ - вероятность безошибочного и своевременного выполнения приемочного контроля с использованием ИСППР и АРМ ТСПК, $P_{\delta c0}$ - вероятность безошибочного и своевременного выполнения приемочного контроля без использования ИСППР и АРМ ТСПК.

Критерием эффективности, позволяющим сопоставлять различные варианты $u \in U$ построения ИСППР и АРМ ТСПК, является:

$$W(u^*) = \max_{u \in U} W(u), \quad (11)$$

где u^* - оптимальный вариант, обеспечивающий максимальную эффективность в приемочном контроле, u - варианты, удовлетворяющие условию $K_{рез.} \geq K_{рез.}^{mp}$, $K_{рез.}^{mp}$ - требуемое значение $K_{рез.}$.

Рассмотренный методологический подход и методика оценки эффективности ТСПК с ИСППР и АРМ при проведении приемочного контроля высоконадежных изделий с ограниченным ресурсом, расширяют сферу прикладных исследований теории эффективности и могут быть использованы при выполнении анализа с целью достижения высокой эффективности процесса функционирования технологических систем контроля.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Теоретико-методологические и инструментальные результаты диссертации имеют существенное значение для развития теории и практики технологического проектирования приемочного контроля на предприятиях военно-промышленного комплекса. Отличительная особенность полученных результатов состоит в том, что впервые разработана технология, основанная на системном подходе к применению современных информационных систем и методов теории искусственного интеллекта, обеспечивающая достоверную оценку состояния объекта контроля в условиях неопределенности в результатах контроля с максимальным сохранением технического ресурса изделия. В ходе выполнения диссертационной работы получены следующие основные результаты:

1. Проведен анализ современного состояния, тенденций и перспектив развития приемочного контроля БАСУ. Выявлены дестабилизирующие факторы и источники неисправностей, недостатки используемых методов контроля, технических средств, алгоритмического и информационного обеспечения, недостаточная разработанность проблемы технологии приемочного контроля в соответствии с современными требованиями.
2. Обоснована необходимость совершенствования существующей технологии приемочного контроля путем дополнения круга решаемых ею задач и целесообразность применения в качестве методологической основы проектирования технологического процесса и технического обеспечения приемочного контроля системных принципов, технологий интеллектуальной поддержки принятия решений и информационного сопровождения и поддержки ЖЦ продукции.

3. Предложен новый технологический процесс и новая организация проведения приёмочного контроля БАСУ, отличающиеся интеллектуализацией процесса принятия решений по результатам контроля и информационной поддержкой с использованием принципов CALS-технологий, что позволяет обеспечить достоверную оценку состояния объекта контроля и сохранить ресурс БАСУ, улучшить показатели трудоемкости и временных затрат при приемке и восстановлении изделия.

4. Впервые разработана ТСПК сложных ответственных изделий, реализующая предложенную технологию и отличающаяся от известных наличием интеллектуального структурного элемента и целостным представлением на структурном, функциональном, алгоритмическом, информационном и методическом уровнях.

5. Разработана структура информационной поддержки проектирования и функционирования ТСПК, позволяющая своевременно актуализировать базу данных и базу знаний (БЗ) ИСППР, предоставлять имеющуюся информацию другим участникам ЖЦ изделия, оперативно обмениваться информацией в рамках предприятия-изготовителя посредством АРМ ТСПК, проводить качественный мониторинг в ходе отработки технологии приемочного контроля.

6. Сформированы основные требования, разработана оригинальная концептуальная модель и принципы построения ИСППР, которая характеризуется целевыми интеллектуальными компонентами БЗ и обеспечивает возможность решения трудноформализуемых задач приемочного контроля.

7. Разработана методика многокритериальной идентификации технического состояния объекта контроля, основанная на качественной оценке значений критических параметров с помощью классификатора, реализованного на базе математического аппарата нечетких множеств с использованием функций принадлежности и системы продукционных правил, позволяющая получить достоверную оценку технического состояния.

8. Разработана комбинированная методика оптимизации процедуры диагностирования на основе байесовской и прецедентной модели представления знаний, обеспеченная байесовской сетевой моделью диагностирования, моделями прецедента и библиотеки прецедентов, позволяющая проводить автоматизированный анализ несоответствий в результатах контроля и устранение их причин, обеспечивая при этом минимизацию расходования ресурса изделия.

9. Разработана методика оценки эффективности ТСПК на основе БСД и прагматического подхода к определению меры информации с использованием сочетания системно-структурного и системно-функционального подходов, отличающаяся от известных тем, что дает возможность выявлять выходной эффект на различных уровнях системного рассмотрения, учитывая различный вклад ее элементов.

10. Произведена оценка эффективности новой технологии приемочного контроля БАСУ. Проведены частные организационно-технологические мероприятия, позволившие рассмотреть и сравнить оценочные показатели эффективности существующей и новой технологии. На основании экспертной обработки результатов и приближенных аналитических расчетов получена следующая прогнозирующая оценка эффективности ТСПК:

- уменьшение на 10 - 15% значения частного показателя относительного расхода ресурса изделия при контроле, диагностировании и ремонте;

- уменьшение на 25 - 30% значения частного показателя относительных затрат времени на контроль, диагностирование и ремонт;

- уменьшение на 20 - 25% значения частного показателя относительной трудоемкости выполнения контроля, диагностирования и ремонта.

11. Полученные теоретические результаты послужили основой для разработки изобретения «Способ технического контроля и диагностирования бортовых систем беспилотного летательного аппарата с поддержкой принятия решений и комплекс

контрольно-проверочной аппаратуры с интеллектуальной системой поддержки принятия решений для его осуществления» (Патент №2557771 от 29.06.15 г.).

12. Разработанные в диссертационной работе теоретические решения и практические рекомендации использованы в ОАО «Концерн «Гранит-Электрон» и ЗАО «НПЦ «Аквамарин» при разработке и реализации проектов совершенствования технологических процессов контроля сложных объектов, о чем имеется соответствующий акт.

13. Научные аспекты исследований нашли отражение в практических учебно-методических материалах и используются в учебном процессе на кафедре конструирования и технологии электронных и лазерных средств Санкт-Петербургского университета аэрокосмического приборостроения при проведении занятий по дисциплинам «Технология контроля электронных средств», «Технология производственного контроля приборов», «Интеллектуальные системы технологического проектирования», о чем имеется соответствующий акт.

14. Обозначено направление дальнейших исследований, связанное с разработкой методического обеспечения для прогнозирования технического состояния изделия, что создает предпосылки для перехода от традиционной технологии календарно-планового обслуживания и связанных с ней регламентных работ к новой, более эффективной технологии обслуживания изделия по его фактическому состоянию.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ

1. Патент на изобретение №2557771 от 29.06.15 г. Способ технического контроля и диагностирования бортовых систем беспилотного летательного аппарата с поддержкой принятия решений и комплекс контрольно-проверочной аппаратуры с интеллектуальной системой поддержки принятия решений для его осуществления / М.З. Левин, В.А. Смирнов, М.В. Уланов, А.Г. Давидчук, Д.И. Буравлев, С.Н. Зимин (РФ).
2. Смирнов В.А. Поиск неисправностей в бортовых системах управления в процессе приемочного контроля / В.А. Смирнов // Информационно-управляющие системы. 2013. №2. - С.24-28.
3. Смирнов В.А. Прецедентный подход к построению моделей процесса поиска неисправностей при диагностировании сложных технических систем / В.А. Смирнов // Т-Сотт: Телекоммуникации и транспорт. 2013. №6. - С. 73-78.
4. Смирнов В.А. Интеллектуализация технологии приемочного контроля сложных технических объектов / В.П. Ларин, В.А. Смирнов // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. 2014. №1. - С.191-196.
5. Смирнов В.А. Комбинированный метод диагностирования бортовых систем управления в технологии приемочного контроля / Ю.Ф. Подоплекин, В.А. Смирнов // Морской вестник. 2014. №1. - С. 79-82.
6. Смирнов В.А. Технология прогнозирующего контроля бортовых систем управления / Ю.Ф. Подоплекин, В.А. Смирнов // Морской вестник. 2014. №3. - С. 49-52.
7. Смирнов В.А. Приемочный контроль бортовых систем управления с использованием средств интеллектуального анализа данных / В.А. Смирнов // Т-Сотт: Телекоммуникации и транспорт. 2014. Т. 8. №11. - С. 99-103.
8. Смирнов В.А. Применение интеллектуальных моделей диагностирования при приемочном контроле сложных технических объектов / Ларин В.П., Смирнов В.А., Шелест Д.К. // Датчики и системы. 2015. №2. - С. 5-10.
9. Смирнов В.А. Управление информационным сопровождением процессов контроля PDM-системой / В.П. Ларин, В.А. Смирнов // Информационно-управляющие системы. В печати.

10. Смирнов В.А. Анализ процесса контроля, наладки и диагностирования сложной радиоэлектронной аппаратуры / В.А. Смирнов, Д.В. Смирнов // Высокие технологии, экономика, промышленность. Т. 2, Часть 2: Сборник статей 13-й международной научно-практической конференции "Фундаментальные и прикладные исследования, разработка и применение высоких технологий в промышленности и экономике". СПб: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. - С. 143-147.
11. Смирнов В.А. Конструкторско-технологические меры обеспечения электромагнитной совместимости при проектировании радиоэлектронной аппаратуры / В.А. Смирнов, Д.В. Смирнов // Высокие технологии, экономика, промышленность. Т. 2, Часть 2: Сборник статей 13-й международной научно-практической конференции "Фундаментальные и прикладные исследования, разработка и применение высоких технологий в промышленности и экономике". СПб: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. - С. 130-137.
12. Смирнов В.А. Методика построения комбинированных схем для локализации неисправностей при диагностировании сложных технических систем / В.А. Смирнов // Завалишинские чтения: сб. докл. / СПбГУАП. СПб, 2012. - С. 198-200.
13. Смирнов В.А. Информационные проблемы в принятии решений при контроле и диагностировании сложных технических систем / В.А. Смирнов // Материалы XIV Международного форума «Формирование современного информационного общества. Проблемы, перспективы, инновационные подходы», СПб: ГУАП, 2013. Т.2, - С. 145-147.
14. Смирнов В.А. Диагностирование бортовой системы управления на основе байесовских сетей доверия / В.А. Смирнов // Труды LXVIII научно-технической конференции СПбНТОРЭС, посвященной Дню радио, СПб, 2013. - С. 51-52.
15. Смирнов В.А. Качественная оценка контролируемых параметров на основе теории нечетких множеств / В.А. Смирнов // Труды LXVIII научно-технической конференции СПбНТОРЭС, посвященной Дню радио, СПб, 2013. - С. 52-54.
16. Смирнов В.А. Модель контролируемого параметра в бортовых системах управления / В.А. Смирнов // Сб. докл. научн. сессии ГУАП. СПбГУАП. СПб, 2013. Часть 2, - С. 74-77.
17. Смирнов В.А. Современный подход к совершенствованию технологических систем контроля и диагностирования сложных технических объектов / В.А. Смирнов // Сборник трудов Всероссийской научно-технической конференции «Теоретические и прикладные проблемы развития и совершенствования автоматизированных систем управления военного назначения». СПб: ВКА имени А.Ф. Можайского, 2013. Часть II. - С. 216-220.
18. Смирнов В.А. Методика формирования моделей прецедента и библиотеки прецедентов для принятия решений в системе приемочного контроля сложных технических объектов / В.П. Ларин, В.А. Смирнов // Известия ГУАП. Аэрокосмическое приборостроение: научный журнал. Выпуск 4. СПб: ГУАП, 2013. - С. 34-40.
19. Смирнов В.А. Совершенствование аппаратуры контроля и диагностирования бортовых систем управления // В.А. Смирнов / Арсенал. Военно-промышленное обозрение. 2013. №6. - С. 46-47.
20. Смирнов В.А. Информационная поддержка процессов контроля сложной высоконадежной аппаратуры / В.П. Ларин, В.А. Смирнов // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. Часть 1. 2014. №01. - С. 49-51.
21. Смирнов В.А. Информационная поддержка принятия решений в процессах контроля сложных технических объектов / Ларин В.П., Смирнов В.А., Шелест Д.К. // Приоритетные направления развития науки и технологий: докл. XIV Всерос. научн.-техн. конф. / Под общ. ред. В.М. Панарина. Тула: Изд-во «Инновационные технологии». 2014. - С. 68-71.

22. Смирнов В.А. Применение технологии предупреждения потенциальных отказов в приемочном контроле сложных технических объектов / В.А. Смирнов, Д.В. Смирнов // Высокие технологии, фундаментальные исследования, инновации: сборник статей 17-й международной научно-практической конференции "Фундаментальные и прикладные исследования, разработка и применение высоких технологий в промышленности и экономике". СПб: Изд-во Политехн. ун-та, 2014. - С. 69-71.
23. Смирнов В.А. Применение мягких вычислений для оценки работоспособности сложных технических систем / В.А. Смирнов, И.А. Пономарев // Высокие технологии, фундаментальные исследования, инновации: сборник статей 17-й международной научно-практической конференции "Фундаментальные и прикладные исследования, разработка и применение высоких технологий в промышленности и экономике". СПб: Изд-во Политехн. ун-та, 2014. - С. 65-67.
24. Смирнов В.А. Метод оценки эффективности информационной системы приемочного контроля / В.А. Смирнов, Д.В. Смирнов // Высокие технологии, фундаментальные исследования, инновации: сборник статей 17-й международной научно-практической конференции "Фундаментальные и прикладные исследования, разработка и применение высоких технологий в промышленности и экономике". СПб: Изд-во Политехн. ун-та, 2014. - С. 67-69.
25. Смирнов В.А. Некоторые аспекты оценки эффективности интеллектуальной системы поддержки процессов контроля сложных объектов / В.А. Смирнов // Сб. докл. научной сессии ГУАП. СПГУАП. СПб, 2014. Часть 2. - С. 119-126.
26. Смирнов В.А. Методика двухуровневой идентификации технического состояния сложной приборной аппаратуры с ограниченным ресурсом / В.А. Смирнов // Теоретические и прикладные аспекты современной науки: сборник научных трудов по материалам IV Международной научно-практической конференции: в 3 ч. Белгород: 2014. №4-1. - С. 166-174.
27. Смирнов В.А. Оценка эффективности приемочного контроля высоконадежных изделий / В.П. Ларин, В.А. Смирнов // Сборник трудов V Международной научно-практической конференции «Современные концепции научных исследований». М: 2014. № 5. - С. 68-74.
28. Smirnov V.A. Effectiveness of technological systems of high reliability products output control with limited resource / V.P. Larin, V.A. Smirnov // Materials of the I International scientific and practical conference, "Science and Education", 5-6 September 2014 on Technical sciences. Volume 19. Sheffield. Science and education LTD. V. 42-51. ISBN 978-0-9930712-0-1.
29. Смирнов В.А. Аспекты организации взаимодействия пользователей единого информационного пространства предприятия-изготовителя бортовых систем управления / В.А. Смирнов // Сборник трудов юбилейной LXX научно-технической конференции СПбНТОРЭС, посвященной Дню радио, СПб, 2015. Т. 1. – С. 51-52.
30. Смирнов В.А. Структура и принципы функционирования технологической системы приемочного контроля сложной приборной аппаратуры с ограниченным ресурсом / В.А. Смирнов // Сборник трудов юбилейной LXX научно-технической конференции СПбНТОРЭС, посвященной Дню радио, СПб, 2015. Т. 1. – С. 49-50.