На правах рукописи

Ермакова Мария Олеговна

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КАЧЕСТВА ПРОЦЕССА ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ ИСПЫТАНИЙ ЭЛЕКТРОРАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

2.5.22. Управление качеством продукции. Стандартизация. Организация производства

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2025

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» на кафедре «Метрология, стандартизация и сертификация».

Научный руководитель: **Монахова Вероника Павловна**
кандидат технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», заведующий кафедрой 207 «Метрология, стандартизация и сертификация».

Официальные оппоненты: **Полякова Марина Андреевна**
доктор технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», кафедра обработки материалов давлением им. М.И. Бояршинова, профессор кафедры;

Ларин Сергей Николаевич
кандидат технических наук, доцент, общество с ограниченной ответственностью «Региональный инжиниринговый центр», директор.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ» , г. Казань.

Защита состоится «23» декабря 2025 г. в 13:00 на заседании диссертационного совета 24.2.379.05, созданного на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева», по адресу: 443086, г. Самара, Московское шоссе, 34.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева» и на сайте https://ssau.ru/resources/dis_protection/ermakova.

Автореферат разослан «___» _____ 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.2.379.05
доктор технических наук, доцент Я.А. Ерисов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации. Космические электроракетные двигатели (ЭРД) активно применяются для решения научных и прикладных задач в космосе благодаря своей высокой экономичности, что позволяет в разы снизить массу космических аппаратов по сравнению с системами на жидкостных ракетных двигателях. Сфера их использования включает ориентацию, стабилизацию и коррекцию орбит спутников и орбитальных станций, а также обеспечение межорбитальных и дальних космических полетов. В настоящее время в России разработкой, проектированием, изготовлением и испытаниями ЭРД занимаются: АО ОКБ «Факел», АО ГНЦ «Центр Келдыша», ФГБОУ ВО «МАИ (НИУ)», в том числе НИИ «Научно–исследовательский институт прикладной механики и электродинамики», ФГАОУ ВО «МГТУ им. Н.Э. Баумана (НИУ)», ФГАОУ ВО «МФТИ (НИУ)», Бюро 1440, ООО «Орбитек». Для обеспечения надежности и безопасности эксплуатации таких двигателей необходимо проведение комплексных исследовательских испытаний, требующих единого системного подхода к оценке их качества.

Актуальность темы диссертации, определяется в научном плане – необходимостью разработки организационно-технических мероприятий по повышению качества процесса исследовательских испытаний электроракетных двигателей, в практическом отношении – апробацией методики квалиметрической оценки качества процесса исследовательских испытаний электроракетных двигателей при проведении исследовательских испытаний по определению интегральных параметров высокочастотного ионного двигателя малой мощности в ФГБОУ ВО «МАИ (НИУ)» с последующей возможностью практического применения на опытно-промышленных предприятиях, занимающихся разработкой и созданием ЭРД.

Степень разработанности темы. Фундаментальная теоретическая и методологическая база в области управления качеством была сформирована благодаря значительному вкладу как зарубежных, так и отечественных исследователей. Так, зарубежные ученые заложили ключевые принципы: Шухарт У. и Деминг Э. разработали методологию статистического контроля процессов и циклического непрерывного улучшения; Джуран Дж. и Кросби Ф. сформулировали системный подход к планированию качества; а значительный вклад в развитие системного подхода к качеству внес Фейгенбаум А., который ввел и обосновал концепцию TQM, заключающуюся в том, что высокое качество продукции должно формироваться на всех без исключения этапах ее жизненного цикла, начиная от проектирования и заканчивая послепродажным обслуживанием. В свою очередь, отечественная научная школа, представленная трудами В.В. Бойцова, Барвинок В.А., Азгальдова Г.Г., Белобрагина В.Я. и других, разработала теоретические основы квалиметрии и апробировала на практике комплексные системы управления качеством, что позволило успешно решать прикладные задачи повышения эффективности производства на отечественных предприятиях. Синтез этих достижений создал прочную основу для решения современных теоретических и практических задач в области менеджмента качества.

Ключевые научно-прикладные аспекты исследовательских испытаний ЭРД были глубоко проанализированы российскими учеными – Хартовым С.А., Гордеевым С.В., Вавиловым И.С., Кожевниковым В.В., Козловым О.В., Мельниковым А.В., а также зарубежными авторами – Хоффером Р.Р. и Шастри Р., которые рассматривают методы, методики и средства измерений. В работах Вавилова И.С. и Ячменева П.С. представлена методика определения малых тяг ионного двигателя АМ$\alpha\beta$–методом и конструкция испытательного стенда, а Кожевников В.В. и Надирадзе А.Б. исследовали особенности измерений параметров плазменных струй ЭРД различными типами зондов. Наиболее всесторонне проблема методологии исследовательских испытаний ЭРД была рассмотрена

Яковлевым Е.А., который указывает, что она должна быть основана на системном подходе для оценки эффективности как отдельных составляющих, так и всей системы в целом.

Цель работы: повышение качества процессов исследовательских испытаний электроракетных двигателей на основе проектирования процессных моделей и структурирования функции качества.

Задачи исследования:

1. Провести анализ состояния обеспечения качества процессов исследовательских испытаний электроракетных двигателей.
2. Разработать модели процессов исследовательских испытаний электроракетных двигателей, в которых учтена автоматизация элементов системы, влияющих на обеспечение достоверности результатов испытаний.
3. Разработать квалиметрическую модель оценки качества процессов исследовательских испытаний электроракетных двигателей.
4. Провести комплексную апробацию предложенных научно–технических решений на примере процессов исследовательских испытаний электроракетных двигателей – высокочастотного ионного двигателя.

Область исследования диссертации соответствует пунктам 8, 9 и 13 паспорта научной специальности 2.5.22: «Разработка научно-практического статистического инструментария управления качеством»; «Разработка и совершенствование научных инструментов оценки, мониторинга и прогнозирования качества продукции и процессов»; «Научные основы цифровых, автоматизированных комплексных систем управления производством и качеством работ на базе технических регламентов и стандартов».

Объектом исследования является процесс исследовательских испытаний электроракетных двигателей. **Предметом исследования** являются организационно-технические мероприятия по улучшению качества процесса испытаний электроракетных двигателей.

Методы исследования. Решение задач диссертационного исследования проведено на основе принципов Всеобщего управления качеством (TQM), положений теории качества, теории вероятности, методов математической статистики, процессного и системного подходов, квалиметрических методов оценки качества объектов, теории математического моделирования, теории планирования и организации эксперимента, а также экспериментальных исследований с целью проверки адекватности теоретических положений.

Разработка научно-прикладных программ поддержки предложенных решений осуществлялась в приложении Microsoft Excel, в среде графического программирования LabView и при помощи программного обеспечения на языках программирования высокого уровня – C++ и Python.

Научная новизна диссертации заключается в том, что в ней впервые:

1. Усовершенствованы общая и детализированная модели процессов исследовательских испытаний электроракетных двигателей, в которых учтена автоматизация элементов системы, влияющих на обеспечение качества процесса испытаний.
2. Разработана квалиметрическая модель оценки качества процессов исследовательских испытаний электроракетных двигателей, основанная на анализе процессных моделей этапов исследовательских испытаний электроракетных двигателей, включающая в себя новую развернутую номенклатуру показателей качества процессов исследовательских испытаний электроракетных двигателей с системой весовых коэффициентов всех элементов и предложенными шкалами их оценки.
3. Разработан подход к оценке точности результатов исследовательских испытаний электроракетных двигателей на основе специализированного научно-

программного комплекса с адаптацией современных методов обработки косвенных измерений для расчета интегральных параметров электроракетного двигателя – высокочастотного ионного двигателя.

4. Разработана процедура мониторинга и оценки уровни качества процессов исследовательских испытаний с обоснованием методов и инструментов управления качеством.

Теоретическая значимость исследования заключается в создании комплексного научно-технического инструментария, направленного на обеспечение и совершенствование качества процесса исследовательских испытаний электроракетных двигателей

Практическая значимость.

Результаты исследования позволяют:

– определять последовательность формирования комплекса показателей качества процессов исследовательских испытаний ЭРД на основе разработанных в соответствии с нотацией BPMN 2.0 моделей процессов;

– диагностировать на основе разработанной квалиметрической модели оценки качества процессов исследовательских испытаний ЭРД фактический уровень качества процессов исследовательских испытаний в испытательной лаборатории;

– принимать решения о внедрении мероприятий для повышения качества процессов исследовательских испытаний на основе оценки показателей качества элементов системы, влияющих на обеспечение достоверности результатов испытаний.

Реализация результатов работы. Результаты работы используются в учебном процессе кафедры «Метрология, стандартизация и сертификация», кафедры «Электроракетные двигатели, энергетические и энергофизические установки» ФГБОУ ВО «МАИ (НИУ)», а также в АО ОКБ «Факел», ООО «Орбитек» при проведении научно-исследовательских работ в области испытаний ЭРД, что подтверждено соответствующими актами.

Положения, выносимые на защиту:

1. Усовершенствованные общая и детализированные модели процессов исследовательских испытаний электроракетных двигателей, в которых учтена расширенная номенклатура и автоматизация элементов системы, влияющих на обеспечение достоверности результатов испытаний.

2. Разработанная квалиметрическая модель оценки качества процессов исследовательских испытаний электроракетных двигателей, основанная на анализе процессных моделей этапов исследовательских испытаний электроракетных двигателей, включающая в себя новую развернутую номенклатуру показателей качества процессов исследовательских испытаний электроракетных двигателей с впервые предложенными системой весовых коэффициентов и шкалами оценки всех показателей.

3. Разработанный подход к оценке точности результатов исследовательских испытаний электроракетных двигателей на основе специализированного научно-программного комплекса с адаптацией современных методов обработки косвенных измерений для расчета интегральных параметров электроракетного двигателя – высокочастотного ионного двигателя.

4. Процедура мониторинга качества процессов исследовательских испытаний с обоснованием методов и инструментов управления качеством.

Апробация результатов исследования. Основные результаты работы были представлены на Общероссийской научно-технической конференции «Молодежь. Техника. Космос» на секции «Современные технологии в авиа- и ракетостроении» (г. Санкт-Петербург, БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова, март 2023г. и март 2024г.); на Международной конференции «Авиация и космонавтика» на секции «Авиационные,

ракетные двигатели и энергетические установки» (г. Москва, МАИ (НИУ), ноябрь 2022г., 2023г., 2024г.); на XLIX и L Международной молодежной научной конференции «Гагаринские чтения» на секции «Авиационные, ракетные двигатели и энергетические установки» (г. Москва, МАИ (НИУ), апрель 2023г., 2024г.); на I Международной молодежной научной конференции «Новые материалы XXI века: разработка, диагностика, использование» (г. Москва, НИТУ «МИСиС», апрель 2020 г.).

Личный вклад автора. Постановка задач осуществлялась совместно с научным руководителем. Теоретические и практические исследования автором выполнены самостоятельно.

При непосредственном участии автора:

1. Разработана квалиметрическая модель оценки качества процессов исследовательских испытаний электроракетных двигателей, основанная на анализе процессных моделей этапов исследовательских испытаний электроракетных двигателей, включающая в себя новую развернутую номенклатуру показателей качества процессов исследовательских испытаний электроракетных двигателей с впервые предложенными системой весовых коэффициентов и шкалами оценки всех показателей.
2. Проведена оценка качества процесса исследовательских испытаний электроракетного двигателя – высокочастотного ионного двигателя в лабораторном комплексе «2ИУ-4В».
3. Проведена автоматизация управления процессом испытаний электроракетного двигателя – высокочастотного ионного двигателя, регистрации данных и обработки результатов измерений.
4. Разработана методика оценки точности результатов исследовательских испытаний электроракетных двигателей на основе унифицированного научно-программного комплекса с адаптацией современных методов обработки косвенных измерений (линеаризации, приведения, бутстрап) для расчета интегральных параметров электроракетного двигателя – высокочастотного ионного двигателя.
5. Разработана процедура мониторинга качества процессов исследовательских испытаний с обоснованием методов и инструментов управления качеством.

Связь работы с научными программами, темами, грантами. Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № FSFF-2023-0006) в рамках государственного задания федерального государственного бюджетного образовательного учреждения «Московский авиационный институт (национальный исследовательских университет)».

Публикации. По теме диссертации опубликовано 19 работ, из них: 7 – в научных изданиях, входящих в перечень ВАК России (из них 5 – по специальности 2.5.22. «Управление качеством продукции. Стандартизация. Организация производства»); 8 – в материалах и трудах международных и всероссийских научных конференций; 1 – патент на изобретение; 2 – свидетельство программы для ЭВМ; 1 – учебное издание.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы из 109 наименования и 7 приложений. Общий объем диссертации составляет 269 страниц, 27 рисунков и 14 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цель, задачи, научная новизна и практическая значимость работы, положения, выносимые на защиту.

В первой главе проведены исследования и анализ проблем управления качеством исследовательских испытаний электроракетных двигателей. По результатам анализа

систематизированы виды испытаний по основным признакам и выделены те виды испытаний, которым подвергаются при создании электроракетных двигателей его элементы, узлы, системы и весь двигатель в целом. (рисунок 1).

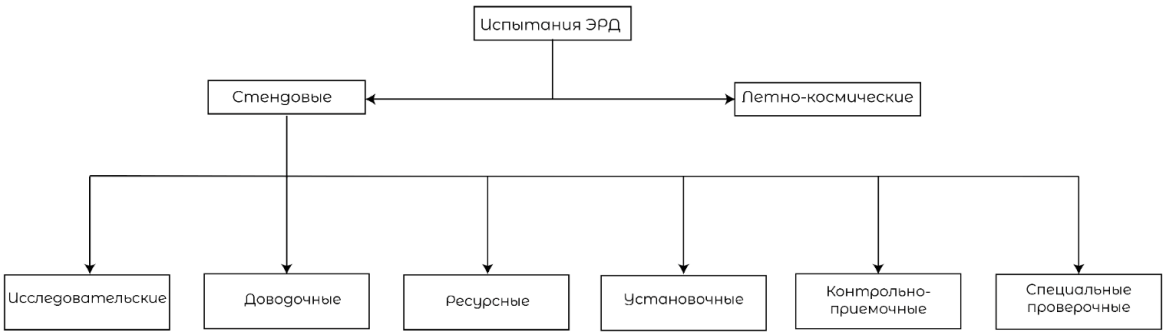

Рисунок 1 – Классификация испытаний ЭРД.

В результате проведенной систематизации и анализа нормативно-технических документов по областям применения ракетно-космической техники, была выявлена проблема отсутствия нормативно-технических документов национального уровня, регламентирующих понятие, порядок проведения, управление качеством и оценку качества исследовательских испытаний ЭРД.

Однако, ГОСТ Р 57945 «Система технологического обеспечения разработки и постановки на производство изделий космической техники. Термины и определения» устанавливает классификацию стадий работ для планирования процессов жизненного цикла продукции (ЖЦП) РКТ. Но в указанном стандарте отсутствует понятие исследовательских испытаний, хотя приводятся характеристики других видов испытаний: предварительных, приемочных, квалификационных, приемо-сдаточных, относящихся, в соответствии с ГОСТ 13504-81 «Межгосударственный стандарт. Система государственных испытаний продукции. Испытания и контроль качества продукции. Основные термины и определения», к контрольным испытаниям, проводимым для контроля качества объекта (опытных образцов, установочной серии, готовой продукции). В связи с этим, необходимо руководствоваться, установленным ГОСТ 16504 «Испытания и контроль качества продукции. Основные термины и определения», термином: исследовательские испытания – испытания, проводимые для изучения определенных характеристик свойств объекта.

Анализ нормативных документов также показывает наличие дополнительных групп требований, определяющих качество проведения испытаний РКТ. К ним относятся стандарты в области управления качеством, метрологического обеспечения, а также нормативы, устанавливающие требования к точности, воспроизводимости и достоверности результатов испытаний. Кроме того, важную роль играют документы, регулирующие стандартизацию процессов разработки и производства РКТ, включая методы контроля, сертификации и оценки соответствия.

Таким образом, проблема обеспечения качества исследовательских испытаний ЭРД требует интеграции трех элементов: процессного подхода ИСО 9000, специализированных метрологических практик и философии TQM. Её решение – это внедрение адаптивной СМК испытаний, которая представляет собой динамическую модель, непрерывно совершенствуемую на основе данных с каждого экспериментального цикла. Такая система обеспечивает прослеживаемость результатов – от первичных данных до итогового отчета, что является критически важным для обоснования принятия решений на дальнейших стадиях жизненного цикла создания космической техники.

Во второй главе диссертационного исследования проанализированы основные методологии моделирования процессов: структурная, объектно-ориентированная, имитационная, интегрированная. Для проектирования единой модели исследовательских испытаний ЭРД выбрана нотация BPMN 2.0, позволяющая в дальнейшем решать вопросы автоматизации исследуемой деятельности. Таким образом, были разработаны общая (рисунок 2) и детализированные модели основных этапов процесса исследовательских испытаний ЭРД: 1) планирование; 2) пуско-наладочные работы; 3) испытания; 4) обработка и анализ результатов испытаний; 5) принятие решений.

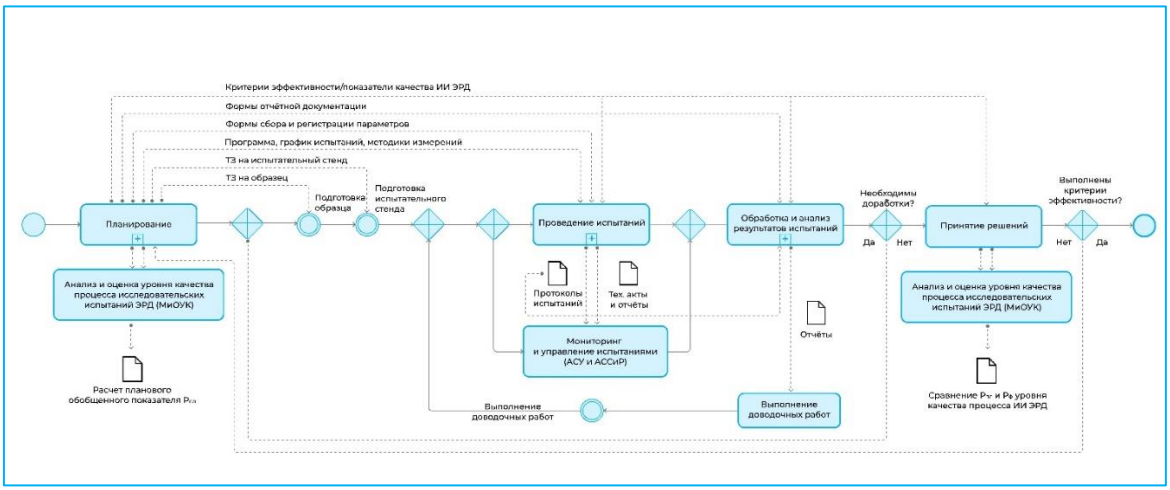

Рисунок 2 – Общая модель процесса исследовательских испытаний ЭРД.

В ходе работы были усовершенствованы обобщенная и детализированная модели процесса исследовательских испытаний ЭРД. Ключевым улучшением стала интеграция систем автоматизации, которые обеспечивают воспроизводимость экспериментальных условий и точную обработку данных, минимизируя человеческие ошибки и методические искажения. Проектирование моделей также позволило детализировать потоки данных, состав подпроцессов и их задачи, сформировав тем самым комплексную систему управления испытаниями (таблица 1).

Таблица 1 – Структура системы элементов модели управления процессом исследовательских испытаний ЭРД.

Этапы процесса исследовательских испытаний ЭРД / Группа подпроцессов	Планирование			Пуско-наладочные работы			Проведение испытаний			Обработка и анализ результатов			Принятие решений		
	Элементы модели процесса исследовательских испытаний ЭРД		Регламентирующие нормативные документы	Элементы модели процесса исследовательских испытаний ЭРД		Регламентирующие нормативные документы	Элементы модели процесса исследовательских испытаний ЭРД		Регламентирующие нормативные документы	Элементы модели процесса исследовательских испытаний ЭРД		Регламентирующие нормативные документы	Элементы модели процесса исследовательских испытаний ЭРД		Регламентирующие нормативные документы
	Подпроцессы	Основные задачи подпроцессов		Подпроцессы	Основные задачи подпроцессов		Подпроцессы	Основные задачи подпроцессов		Подпроцессы	Основные задачи подпроцессов		Подпроцессы	Основные задачи подпроцессов	
Функциональные															
Организационно-управленческие															
Финансово-экономические															

В таблице 2 приведен фрагмент элементов модели процесса исследовательских испытаний ЭРД, а именно, этап «Планирование». В такой структуре установлены подпроцессы и их задачи для основных этапов исследовательских испытаний ЭРД, при этом подпроцессы сгруппированы по трем классификационным признакам: функциональные, организационно-управленческие и финансово-экономические.

Таблица 2 – Элементы модели процесса исследовательских испытаний ЭРД, этап «Планирование», группа – «Функциональные» (фрагмент).

Этапы процесса исследовательских испытаний ЭРД	**Планирование**		**Регламентирующие нормативные документы**
	Элементы модели процесса исследовательских испытаний ЭРД		
Группа подпроцессов	**Подпроцессы**	**Основные задачи подпроцессов**	
Функциональные	Планирование эксперимента и разработка критериев эффективности процессов	− установление подлежащих измерению физических величин или параметров объекта	№ 102-ФЗ от 26.06.2008; ГОСТ Р ИСО 5725-2002 (Ч. 1-6); ГОСТ 8.417-2002; ГОСТ Р 8.820-2013; ГОСТ Р 59159-2020; ГОСТ Р 59160-2020
		.....	
		− установление требований к быстроте получения измерительной информации, ее дискретности	ГОСТ 16504-81; ГОСТ Р 59159-2020; ГОСТ 34.201-2020; ГОСТ 34.602-2020
		− установление требований к уровню автоматизации испытаний	ГОСТ Р 59159-2020; ГОСТ 34.201-2020; ГОСТ 34.602-2020
	Разработка моделей объекта и испытательного стенда	− установление метода измерений, позволяющего решить конкретную задачу испытаний	№ 102-ФЗ от 26.06.2008; ГОСТ Р 8.820-2013; ГОСТ Р 59159-2020; ГОСТ Р 59160-2020
		.....	
		− разработка автоматизированной информационно-измерительной системы (АИИС) сбора, обработки и анализа экспериментальных данных	№ 102-ФЗ от 26.06.2008; ГОСТ Р ИСО 5725-2002 (Ч. 1-6); ГОСТ Р 8.820-2013; ГОСТ Р 59159-2020; ГОСТ 59160-2020; РМГ 29- 2013
		− разработка проектной документации на объект и испытательный стенд	ГОСТ Р 56098-2017; ГОСТ Р 8.1024-2023; РМГ 63-2003
	Разработка программы и методики испытаний	− унификация требований к модели, средствам измерений, условиям проведения, обработке экспериментальных данных, квалификации операторов, обработке и оформлению результатов измерений	№ 102-ФЗ от 26.06.2008; ГОСТ Р ИСО 5725-2002 (Ч. 1-6); ГОСТ Р 56098-2017; ГОСТ Р 8.1024-2023; ГОСТ Р 8.820-2013; ГОСТ Р 59159-2020; ГОСТ 59160-2020; РМГ 29-2013; РМГ 63-2003

В третьей главе диссертационного исследования для изучения проблем обеспечения качества процесса исследовательских испытаний ЭРД разработана система показателей качества процесса исследовательских испытаний ЭРД, а также методика квалиметрической оценки качества, позволяющая учитывать большое количество показателей и, на основе расчета обобщенного комплексного показателя, принимать обоснованные решения по определению путей развития методологии и обеспечения качества исследовательских испытаний ЭРД.

Анализ полученных данных при моделировании процесса исследовательских испытаний ЭРД позволил выделить комплексные и единичные показатели качества процесса и построить древовидную структуру их связи (рисунок 3), отражающую взаимосвязь обобщенного комплексного показателя качества процесса (0-ой уровень) с комплексными и единичными показателями качества (1-ый, 2-ой и т.д. уровни).

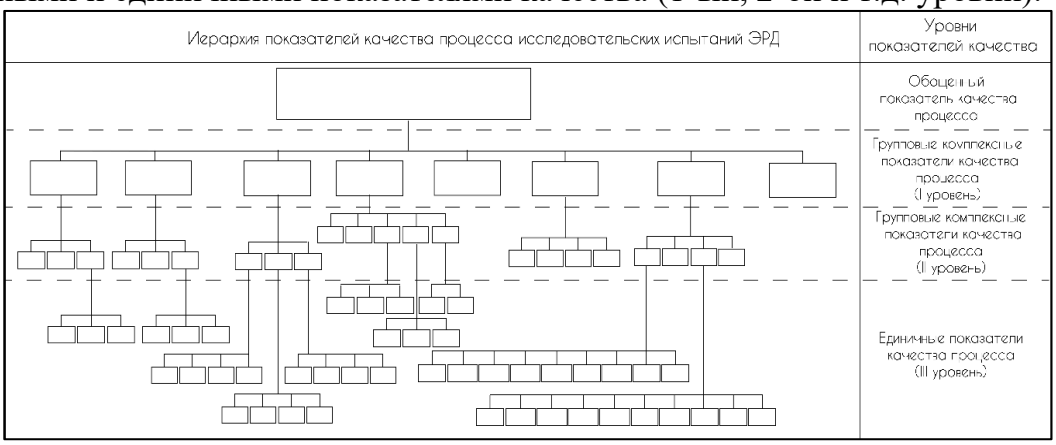

Рисунок 3 – Древовидная иерархическая структура показателей качества процесса исследовательских испытаний ЭРД.

Структура и содержание всех выделенных комплексных и единичных показателей качества, представляющих собой систему показателей качества исследовательских испытаний ЭРД, представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Система показателей качества процесса исследовательских испытаний ЭРД (фрагмент).

Уровни показателей качества исследовательских испытаний ЭРД			
0-ой уровень	**1-ый уровень**	**2-ой уровень**	**3-ий уровень**
P–качество процесса исследовательских испытаний ЭРД	P_1– качество объекта	$P_{1.1}$–качество разработки модели объекта	…….
		$P_{1.2}$–качество изготовления объекта	…….
	…..		
	P_3- качество автоматизации процесса испытаний	$P_{3.1}$–качество автоматизации управления процессом	$P_{3.1.1}$–качество разработки автоматизированной системы управления процессом
			…….
			$P_{3.1.4}$–качество эксплуатации автоматизированной системы управления процессом
		$P_{3.2}$–качество автоматизации	$P_{3.2.1}$–качество разработки автоматизированной системы

		регистрации первичных данных	регистрации первичных данных
			…….
			$P_{3.2.4}$–качество эксплуатации автоматизированной системы регистрации первичных данных
		$P_{3.3}$–качество автоматизации обработки результатов измерений	$P_{3.3.1}$–качество разработки автоматизированной системы обработки результатов измерений
			…….
			$P_{3.3.4}$–качество эксплуатации автоматизированной системы обработки результатов измерений

При разработке квалиметрической модели оценки качества процесса исследовательских испытаний ЭРД учитывались следующие отличительные особенности.

1. Для определения групповых комплексных (или комплексных) показателей был выбран метод средневзвешенных величин, позволяющий рассчитать групповые комплексные (или комплексные) показатели путем усреднения оценок отдельных показателей с учетом их коэффициентов весомости.

При таком подходе обобщенный комплексный показатель качества процесса исследовательских испытаний ЭРД ***P*** определяется в виде средневзвешенного арифметического с помощью метода свертки комплексных и единичных показателей на основе аддитивной схемы с учетом весовых коэффициентов значимости показателей качества:

$$P = \sum_{i=1}^{n} P_i \alpha_i,$$

где P_i – комплексные и единичные показатели качества 1-го уровня; α_i – их весовые коэффициенты значимости ($\alpha_i > 0$; $\sum_{i=1}^{n} \alpha_i = 1$).

Для оценки качества исследовательских испытаний ЭРД были выделены 8 групповых показателей качества 1-ого уровня: P_1 - качество объекта, P_2 - качество испытательного стенда, P_3 - качество автоматизации процесса испытаний, P_4 - качество проведения испытаний, P_5 - качество кадрового обеспечения, P_6 - безопасность процесса испытаний, P_7 - экономичность процесса испытаний, P_8 - экологичность процесса испытаний, которые в свою очередь определяются методом свёртки групповых комплексных показателей 2-го уровня, и т.д.; $\alpha_1 - \alpha_8$ – их весовые коэффициенты значимости. Например, групповой комплексный показатель качества автоматизации процесса испытаний (P_3) рассчитывается по формуле:

$$P_3 = \sum_{j=1}^{m} P_j \cdot \alpha_j,$$

где m – количество комплексных показателей качества автоматизации процесса испытаний; α_j – весовые коэффициенты значимости комплексных показателей; P_j – комплексные показатели качества автоматизации процесса испытаний:

$$P_j = \sum_{k}^{l} P_{jk} \cdot \alpha_{jk},$$

где l – количество единичных показателей качества автоматизации процесса испытаний P_{jk}; α_{jk} – их весовые коэффициенты значимости.

2. Коэффициенты весомости показателей качества и оценки единичных показателей назначались экспертами, а групповые комплексные и комплексные показатели определялись расчетным путем.

3. В качестве обязательного элемента в методику был включен расчет коэффициента конкордации.

4. Для оценивания показателей качества процесса исследовательских испытаний ЭРД были разработаны шкалы оценки показателей качества. Например, шкала оценки качества автоматизации процесса исследовательских испытаний ЭРД с градациями степени автоматизации параметров элементов, входящих в групповые комплексные показатели качества, включает (таблица 4):

– качество автоматизации управления процессом;

– качество автоматизации регистрации первичных данных;

– качество автоматизации обработки результатов измерений.

Таблица 4 – Шкала оценки качества автоматизации процесса испытаний ЭРД (фрагмент).

Наименование показателя	**Шкала**
Качество разработки автоматизированной системы управления процессом	0 – не удовлетворяет установленным требованиям пользователей; 1 – частичная автоматизация системы управления процессом (от 1 до 25 % параметров); 2 – частичная автоматизация системы управления процессом (от 25 % до 50 % параметров); 3 – частичная автоматизация системы управления процессом (от 50 % до 75 % параметров); 4 – полностью удовлетворяет установленным требованиям пользователей (от 75 % до 100 % параметров); 5 – «восхищенные требования» (интеграция автоматизированных систем управления процессом и регистрации данных и/или обработки результатов измерений)
Качество автоматизированной системы управления процессом	0 – не автоматизировано; 1 – присутствуют грубые ошибки в статическом/ динамическом/переходном режимах системы управления процессом (от 66% до 100%); 2 – присутствуют ошибки в статическом/ динамическом/переходном режимах системы управления процессом (от 33% до 66%); 3 – присутствуют частичные ошибки в статическом/ динамическом/переходном режимах системы управления процессом (от 1% до 33%); 4 – ошибки в статическом/динамическом/переходном режимах системы управления процессом отсутствуют; 5 – «восхищенные требования»
Качество автоматизации управления процессом	0 – не удовлетворяет установленным требованиям пользователей; 1 – частичная автоматизация системы управления процессом (от 1 до 25 % параметров); 2 – частичная автоматизация системы управления процессом (от 25 % до 50 % параметров); 3 – частичная автоматизация системы управления процессом (от 50 % до 75 % параметров); 4 – полностью удовлетворяет установленным требованиям пользователей (от 75 % до 100 % параметров); 5 – «восхищенные требования»

	(интеграция систем управления процессом и регистрации данных и/или обработки результатов измерений)

5. Оценку уровня качества процесса исследовательских испытаний ЭРД проводилась в соответствии с рассчитанным значением показателя ***P*** по таблице 5.

Таблица 5 – Шкала диагностирования уровня качества процесса исследовательских испытаний ЭРД.

Оценка	**Качество процесса исследовательских испытаний ЭРД**
$P \geq 0{,}8$	очень высокое
$0{,}6 \leq P < 0{,}8$	высокое
$0{,}4 \leq P < 0{,}6$	среднее
$0{,}2 \leq P < 0{,}4$	низкое
$0 \leq P < 0{,}2$	очень низкое

6. Для автоматизированного анализа и оценки уровня качества процесса исследовательских испытаний ЭРД разработано программное обеспечение на языке программирования Python, которое способно оперативно обрабатывать данные о состоянии процесса испытаний и выявлять отклонения.

В четвертой главе диссертационного исследования разработанная методика квалиметрической оценки качества процесса исследовательских испытаний ЭРД апробирована при проведении исследовательских испытаний по определению интегральных параметров (таблица 6) высокочастотного ионного двигателя (далее – ВЧИД) в ФГБОУ ВО «МАИ (НИУ)» (далее – МАИ) (рисунки 4–6).

Рисунок 4 – Установка «2ИУ-4В» МАИ.

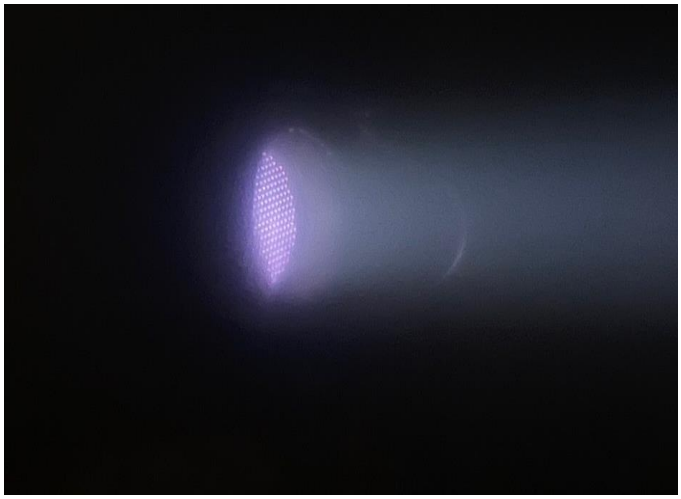

Рисунок 5 –Лабораторный образец ВЧИД в ходе исследовательских испытаний.

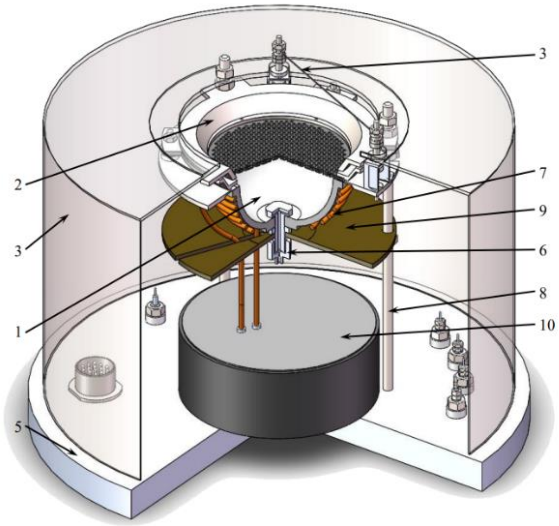

Рисунок 6 – Лабораторный образец ВЧИД:
Поз. 1 – разрядная камера; Поз. 2 – ионно-оптическая система;
Поз. 3 – кожух; Поз. 4 – нить накала; Поз. 5 – монтажный фланец;
Поз. 6 – узел газораспределителя;
Поз. 7 – полусферический индуктор; Поз. 8 – шпилька;
Поз. 9 – стеклотекстолитовый диск; Поз. 10 – ВЧГ

Таблица 6 – Интегральные параметры ВЧИД.

Наименование параметра	**Обозначение**	**Ед. изм.**	**Измеренное значение**
Потребляемая мощность	N	Вт	$N = N_{\text{П}} + N_{\text{ВЧГ}} + N_{\text{КН}}$, где $N_{\text{П}} = I_{\text{П}} \cdot U_{\text{ЭЭ}}$ – мощность пучка; $N_{\text{ВЧГ}} = I_{\text{П}} \cdot C_i$ – мощность, затраченная на ионизацию (C_i – цена иона (Вт/А)); $N_{\text{КН}}$ – мощность, затрачиваемая на нагрев нити накала катода нейтрализатора
Коэффициент использования рабочего тела	η_m	-	$\eta_m = \frac{I_{\text{П}}}{\left({}^{e}/_{M_i}\right) \cdot \dot{m}_{\Sigma}}$, где $e = 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ [Кл] – заряд электрона; $M_i = 2{,}18 \cdot 10^{-25}$ [кг] – масса иона ксенона; $M_i = 1{,}4 \cdot 10^{-25}$ [кг] – масса иона криптона; $\dot{m}_{\Sigma} = \dot{m}_{\text{П}} + \dot{m}_{\text{Н}}$ [кг] – полный расход рабочего тела; $\dot{m}_{\text{П}}$ – расход рабочего тела через газоразрядную камеру (РК); $\dot{m}_{\text{Н}}$ – расход рабочего тела через катод-нейтрализатор (КН), если он присутствует
.....			
Тяговый КПД	$\eta_{\text{Т}}$	-	$\eta_{\text{Т}} = \eta_m \cdot \eta_{\alpha} \cdot \eta_{\text{Э}}$
Мощность, потребляемая двигателем	N	Вт	$N = \frac{N_{\text{П}}}{\eta_{\text{Э}}}$

Тяга ВЧИД	T	мН	$T(\alpha, I_{П}, U_{ЭЭ}) = I_{П}\dfrac{1+\cos\alpha}{2}\sqrt{\dfrac{2\cdot U_{ЭЭ}\cdot M_i}{q_i}}$

Исследовательские испытания ВЧИД ММ проводятся согласно разработанному документу ПМИ 208-207-25 «Программа и методика проведения исследовательских испытаний высокочастотного ионного двигателя с повышенной экономичностью» (рисунок 7).

Для диагностирования уровня качества процесса исследовательских испытаний ВЧИД ММ было проведено анкетирование экспертов-специалистов МАИ в области исследовательских испытаний ЭРД по представленным шкалам оценки качества процесса в главе 3 данной диссертации. Итогом анализа стала автоматизированная интеграция оценок в комплексные показатели качества, учитывающие сразу несколько критериев – от модели объекта до стоимости и экологичности процесса исследовательских испытаний (рисунок 7).

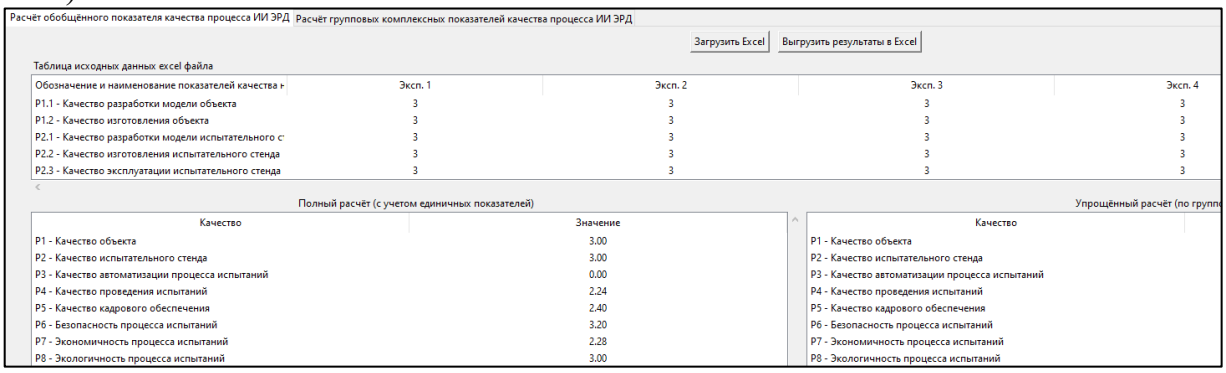

Рисунок 7 – Фрагмент расчета показателей качества процесса исследовательских испытаний ВЧИД ММ.

По значению обобщенного показателя диагностирован средний уровень качества – 0.55.

Построенная радарная диаграмма (рисунок 8), показывающая соотношение фактических и эталонных оценок по каждому анализируемому комплексному показателю качества, позволяет выявить возможные направления для внедрения мероприятий по повышению качества процесса исследовательских испытаний ВЧИД:

- экономичность процесса испытаний (5%);
- качеств автоматизации процесса испытаний (10%);
- качество кадрового обеспечения (15%).

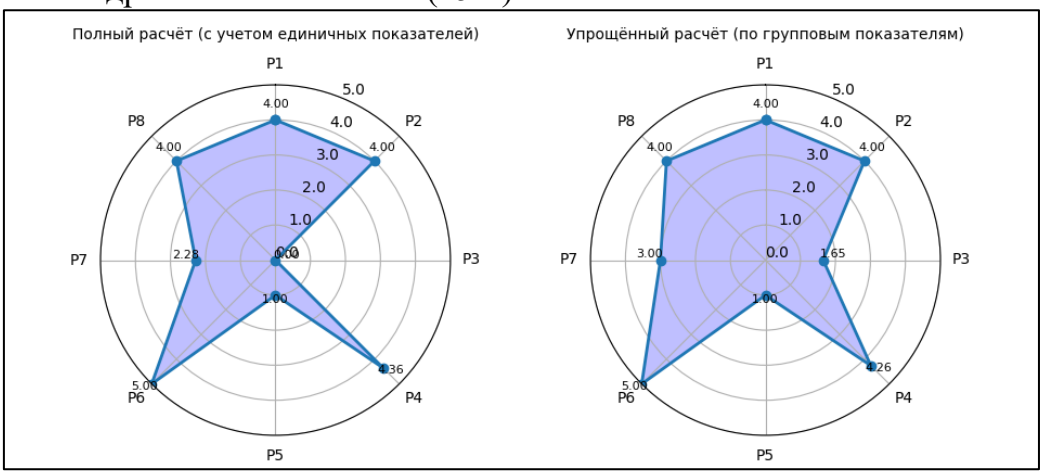

Рисунок 8 – Распределение оценочных показателей качества процесса исследовательских испытаний ЭРД.

Для повышения показателя качества процесса исследовательских испытаний ВЧИД, были разработаны мероприятия по автоматизации процесса исследовательских испытаний.

Первый блок работ посвящен созданию интегрированной системы управления процессом и регистрации первичных данных исследовательских испытаний ВЧИД. Второй блок работ был направлен на создание научно-программный комплекс статистической обработки результатов измерений при исследовательских ВЧИД.

С целью разработки интегрированной системы управления процессом и регистрации первичных данных исследовательских испытаний ВЧИД, в среде графического программирования LabView разработана измерительная цепь, позволяющая принимать и управлять данными на периферийных устройствах стенда. Лицевая панель программы (рисунок 9): слева присутствуют поля ввода информации – выбор COM-порта для передачи и приема данных, напряжения и тока питания на эмиссионном и ускоряющем электродах. С правой стороны представлена схема стенда и элементы отображения в виде плавающих шкал и четырех графиков: тяги, расхода, напряжения и силы тока на эмиссионном и ускоряющем электродах.

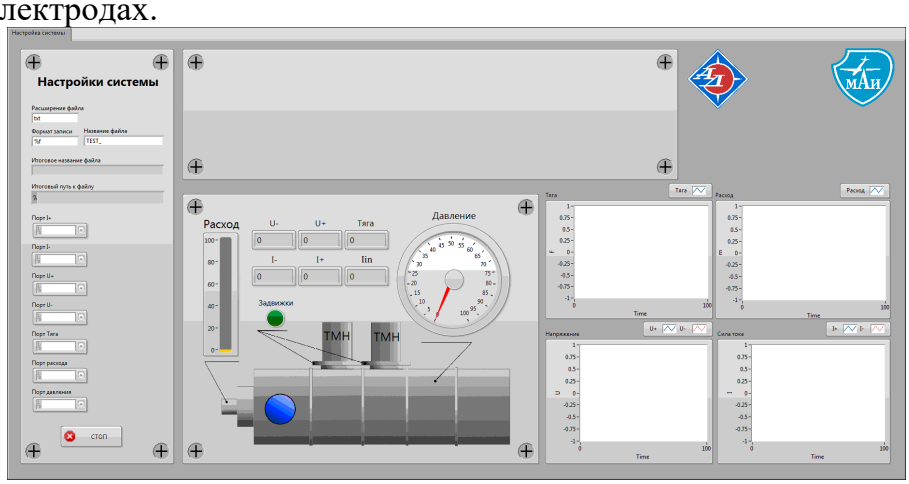

Рисунок 9 – Лицевая панель системы измерения характеристик ВЧИД.

Вторым важным этапом стало внедрение научно-программного комплекса статистической обработки результатов измерений (рисунок 10).

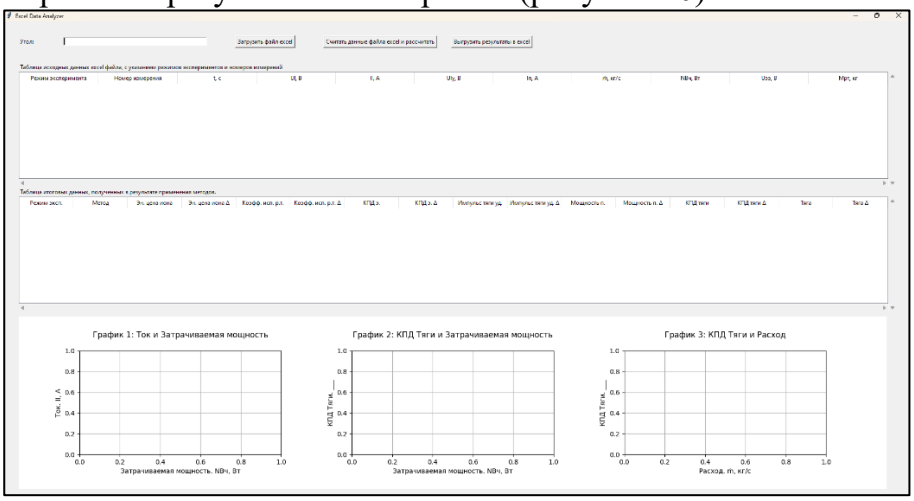

Рисунок 10 – Интерфейс пользователя научно-программный комплекса.

Анализ косвенных измерений и методы обработки результатов косвенных измерений стали фундаментом для разработки научно-программного комплекса статистической обработки данных исследовательских испытаний ВЧИД ММ. Существует несколько методов определения точечной оценки результата косвенного измерения и её

погрешности, к примеру, такие методы как: метод линеаризации, метод приведения, метод бутстрап, метод регрессионного анализа, метод Монте-Карло. Нами рассмотрены: линеаризация (рисунок 11), приведение (рисунок 11) и бутстрап (рисунок 12).

```
# метод линеаризации
for group in averages:
    if group not in method_linearization:
        method_linearization[group] = []
        method_linearization_error[group] = []

    #-----------------------------------------------------------------------
    # energy_value
    if averages[group][current_beam_column] != 0:
        energy_value = averages[group][power_column] / averages[group][current_beam_column]
    else:
        energy_value = None
    method_linearization[group].append(energy_value)

    # energy_value_error
    energy_value_error = (((1 / averages[group][current_beam_column]) ** 2) * msq[group][power_column] + (((averages[group][
    method_linearization_error[group].append(energy_value_error)

    #-----------------------------------------------------------------------
    # power_consumption
    power_consumption = averages[group][current_beam_column] * averages[group][voltage_energy_column] + averages[group][powe
    method_linearization[group].append(power_consumption)

    # power_consumption_error
    power_consumption_error = averages[group][current_beam_column] * ((msq[group][voltage_energy_column] + msq[group][power_
    method_linearization_error[group].append(power_consumption_error)

    #-----------------------------------------------------------------------
    # k_gas
    if gas_mass != 0 and averages[group][consumption_column] != 0:
        k_gas = averages[group][current_beam_column] / ((electron/gas_mass) * averages[group][consumption_column])
```

Рисунок 11 – Фрагмент программного кода, «Метод Линеаризации», «Метод Приведения».

```
# метод линеаризации
for group in averages:
    if group not in method_linearization:
        method_linearization[group] = []
        method_linearization_error[group] = []

    #-----------------------------------------------------------------------
    # energy_value
    if averages[group][current_beam_column] != 0:
        energy_value = averages[group][power_column] / averages[group][current_beam_column]
    else:
        energy_value = None
    method_linearization[group].append(energy_value)

    # energy_value_error
    energy_value_error = (((1 / averages[group][current_beam_column]) ** 2) * msq[group][power_column] + (((averages[group][
    method_linearization_error[group].append(energy_value_error)

    #-----------------------------------------------------------------------
    # power_consumption
    power_consumption = averages[group][current_beam_column] * averages[group][voltage_energy_column] + averages[group][powe
    method_linearization[group].append(power_consumption)

    # power_consumption_error
    power_consumption_error = averages[group][current_beam_column] * ((msq[group][voltage_energy_column] + msq[group][power_
    method_linearization_error[group].append(power_consumption_error)

    #-----------------------------------------------------------------------
    # k_gas
    if gas_mass != 0 and averages[group][consumption_column] != 0:
        k_gas = averages[group][current_beam_column] / ((electron/gas_mass) * averages[group][consumption_column])
```

Рисунок 12 – Фрагмент программного кода, «Метод бутстрап».

Внедрение автоматизированного научно-программного комплекса значительно повысило обобщенный показатель качества процесса исследовательских испытаний ЭРД, а именно с 0,55 до 0,65, что свидетельствует о высоком уровне качества процесса исследовательских испытаний ВЧИД (рисунок 13).

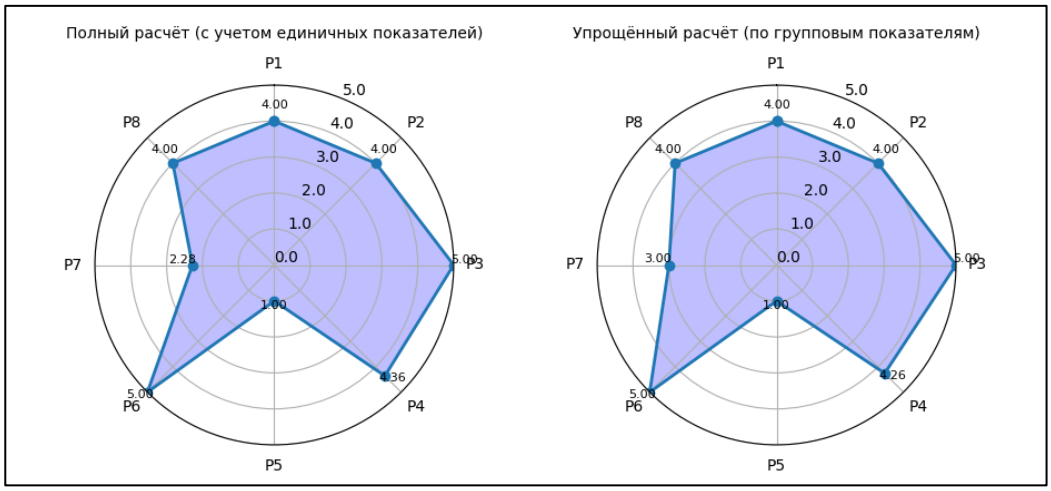

Рисунок 13 – Распределение оценочных показателей качества автоматизации процесса исследовательских испытаний ВЧИД ММ.

В рамках исследования рассмотрены методологические подходы к созданию документированной процедуры в области управления качеством, с учетом специфики исследовательских испытаний ЭРД. Проанализированы требования международных стандартов серии ИСО 9000 и ведомственных положений в области системы менеджмента качества. На основе проведенного анализа сформулированы принципы разработки процедуры мониторинга и оценки качества, включающие системность, объективность, воспроизводимость и адаптивность к изменяющимся условиям испытаний, а также разработана документированная процедура «Мониторинг и оценка уровня качества процесса исследовательских испытаний ЭРД».

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключении представлены основные результаты и выводы диссертационной работы.

В результате проведенного исследования решена важная научная задача в области обеспечения и повышения качества процесса исследовательских испытаний ЭРД, и достигнута цель диссертационного исследования на примере повышения качества процесса исследовательских испытаний ВЧИД ММ:

1. Усовершенствованы общая и детализированные модели процессов исследовательских испытаний ЭРД. Ключевым улучшением стал учёт внедрённой автоматизации элементов системы, обеспечивающих качество испытаний. Применяемые средства автоматизации обеспечивают систематический анализ состояния испытаний, что создаёт основу для анализа и совершенствования процессов и, как следствие, способствует повышению надёжности и эффективности создаваемой ракетно-космической техники. Выявлена взаимосвязь этапов процесса, разработана система элементов модели управления процессом исследовательских испытаний ЭРД, определены основные задачи подпроцессов, классифицированных по 3 группам: функциональные, финансово-экономические и организационно-управленческие. Показан уровень нормативно-технического обеспечения каждого элемента системы.

2. В результате структурирования функции качества процесса исследовательских испытаний электроракетных двигателей разработана система показателей качества процесса исследовательских испытаний ЭРД, включающая 48 комплексных и единичных показателей качества, характеризующих качество исследовательских испытаний ЭРД по 8 выделенным основным группам: качество объекта, качество испытательного стенда, качество автоматизации процесса исследовательских испытаний, качество проведения процесса испытаний, качество кадрового обеспечения, безопасность испытаний, экономичности, экологичности процесса исследовательских испытаний. Модель оценки качества процесса включает в себя новую развернутую номенклатуру показателей качества процессов исследовательских испытаний ЭРД с системой весовых коэффициентов всех элементов и предложенными шкалами их оценки.

3. Разработан подход к оценке точности результатов исследовательских испытаний ЭРД, основанная на применении специализированного научно-программного комплекса. Ключевой особенностью подхода является адаптация современных статистических методов к обработке косвенных измерений, что позволяет количественно оценить погрешность интегральных характеристик двигателя и повысить достоверность получаемых результатов (Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025682898. Заявл. № 2025682127 от 25.08.2025. Опубл. 28.08.2025).

4. Внедрение результатов диссертационного исследования позволило провести оценку качества проведения исследовательских испытаний ЭРД на стенде «2ИУ-4В» в ФГБОУ ВО «МАИ (НИУ)», выявить основные технические и организационные проблемы. Применение разработанных автоматизированных комплексов управления процессом, регистрации первичных данных и статистической обработки результатов измерений обеспечило рост показателя качества автоматизации процесса $\boldsymbol{P_3}$ – с 0 до 10%, в результате обобщенный комплексный показатель качества процесса исследовательских испытаний ЭРД повысился со среднего уровня (0,55) до высокого (0,65). Также, реализованные мероприятия позволили снизить временные затраты на проведение полного цикла испытаний: с 24 часов до 2 часов.

5. Разработана и внедрена регламентированная процедура «Мониторинг и оценка уровня качества процесса исследовательских испытаний электроракетных двигателей». Документ устанавливает единую методику контроля, фиксируя перечень

критически важных параметров, методы их измерений и критерии оценки. Ключевым элементом процедуры является формализованный алгоритм принятия управленческих решений по результатам анализа, который обеспечивает интеграцию принципов непрерывного улучшения в практику испытаний. Данный подход позволяет перейти от разовых корректировок к системному совершенствованию процесса, формируя замкнутый контур управления качеством на основе объективных данных.

6. Эффективность предложенных решений подтверждена практическим внедрением в исследовательскую деятельность промышленных предприятий. Разработанная методика обеспечения качества процесса исследовательских испытаний ЭРД успешно апробирована и внедрена в учебный процесс ФГБОУ ВО «МАИ (НИУ)», что зафиксировано соответствующими актами.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Перечень работ, опубликованных в изданиях, входящих в перечень ВАК:

1. **Ермакова М.О.**, Ерикова А.М., Монахова В.П., Карепин П.А. Исследовательские испытания электроракетных двигателей. Методология и управление процессом // Компетентность / Competency (Russia). – 2024. – № 9–10, стр. 72-81.

2. **Ермакова М.О.**, Ерикова А.М., Монахова В.П., Карепин П.А., Хартов С.А. Обеспечение качества процесса исследовательских испытаний электроракетных двигателей // Компетентность / Competency (Russia). – 2025. – № 5, стр. 55-61.

3. **Ермакова М.О.** Оценка качества процесса исследовательских испытаний электроракетных двигателей // Стандарты и качество. – 2025. – № 6, стр. 78-82.

4. **Ермакова М.О.** Применение экспертных методов при оценке качества процесса исследовательских испытаний электроракетных двигателей. Часть 1 // Контроль качества продукции. – 2025. – № 9, стр. 52-58.

5. **Ермакова М.О.** Применение экспертных методов при оценке качества процесса исследовательских испытаний электроракетных двигателей. Часть 2 // Контроль качества продукции. – 2025. – № 10, стр. 50-55.

Другие публикации:

6. **Ромашова М.О.** Возможности использования углеродного материала в конструкции теплоотводящих панелей холодильника-излучателя космического аппарата // 2-я Международная конференция «Композитные материалы и конструкции – 2021». Москва. Тезисы. – М.: Издательство «Перо», 2021.

7. **Ромашова М.О.**, Монахова В.П., Ерикова А.М., Хартов С.А. Метрологическое обеспечение испытаний двигателей летательных аппаратов в системе менеджмента качества научно-исследовательской деятельности вуза // 21-я Международная конференция «Авиация и космонавтика – 2022». 21–25 ноября 2022 года. Москва. Тезисы. – М.: Издательство «Перо», 2022.

8. **Ромашова М.О.**, Монахова В.П. Методика исследовательских испытаний электроракетных двигателей // Труды XV Общероссийской научно-технической конференции «Молодежь. Техника. Космос», направление 1 «Ракетно-космическая и авиационная техника», март 2023.

9. **Ромашова М.О.**, Монахова В.П. Подтверждение компетентности лаборатории вуза в области исследовательских испытаний двигателей летательных аппаратов // XLIX Международная молодёжная научная конференция «Гагаринские чтения», 2023. Тезисы. – М.: Издательство «Перо», 2023.

10. **Ермакова М.О.**, Монахова В.П., Хартов С.А. Автоматизированная система испытаний стенда «Исследование характеристик ЭРД» // 22-я Международная

конференция «Авиация и космонавтика – 2023». 20–24 ноября 2023 года. Москва. Тезисы. – М.: Издательство «Перо», 2023.

11. Архицкая К.А., **Ермакова М.О.**, Монахова В.П. Оценка качества измерительных процессов при проведении исследовательских испытаний сложных технических систем // 22-я Международная конференция «Авиация и космонавтика – 2023». 20–24 ноября 2023 года. Москва. Тезисы. – М.: Издательство «Перо», 2023.

12. Ровкина А.Э., **Ермакова М.О.** Разработка программного обеспечения для обработки косвенных измерений интегральных параметров ВЧИД // L Международная молодёжная научная конференция «Гагаринские чтения», 2024. Москва. Тезисы. - М.: Издательство «Перо», 2024.

13. **Ермакова М.О.**, Монахова В.П. Показатели качества процесса исследовательских испытаний электроракетных двигателей // АВИАЦИЯ И КОСМОНАВТИКА. Тезисы 23-ой Международной конференции. Москва, 2024.

14. В.П. Монахова, А.М. Ерикова, **М.О. Ромашова**, И.Н. Мирзоян. Статистические методы контроля и управления качеством продукции. Основные инструменты системы качества. Учебное пособие/ под редакцией В.П. Монаховой. – М.: Изд-во МАИ, 2023. – 100 с.

15. Батанов М.С., Монахова В.П., **Ромашова М.О.** Плотность распределения вероятности производной случайного процесса. Часть 1 // Компетентность / Competency (Russia). – 2022. – № 4, стр. 16-21.

16. Батанов М.С., Монахова В.П., **Ромашова М.О.** Плотность распределения вероятности производной случайного процесса. Часть 2 // Компетентность / Competency (Russia). – 2022. – № 5, стр. 17-28.

Патенты на полезную модель:

17. Еремин А.Г., **Ромашова М.О.**, Ромадова Е.Л., Белоглазов А.П. Холодильник-излучатель космического аппарата // Патент: RU 2784226 C1, 04.08.2022. Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский авиационный институт».

Свидетельства о регистрации программ для ЭВМ:

18. **Ермакова М.О.**, Монахова В.П., Подлесная В.Р. Специализированный научно-программный комплекс для обработки результатов исследовательских испытаний высокочастотного ионного двигателя // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025682898. Заявл. № 2025682127 от 25.08.2025. Опубл. 28.08.2025.

19. **Ермакова М.О.**, Подлесная В.Р. Программное обеспечние для автоматизированного мониторинга и оценки уровня каества процесса исследовательских испытаний электроракетных двигателей // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025687035. Заявл. № 2025686449 от 02.10.2025. Опубл. 08.10.2025.