

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 32.1.004.01,
СОЗДАННОГО НА БАЗЕ ФГУП «ВСЕРОССИЙСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕ-
ДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИХ И РАДИОТЕХ-
НИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ» ФЕДЕРАЛЬНОГО АГЕНТСТВА ПО ТЕХНИ-
ЧЕСКОМУ РЕГУЛИРОВАНИЮ И МЕТРОЛОГИИ, ПО ДИССЕРТАЦИИ
НА СОИСКАНИЕ
УЧЁНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № _____

решение диссертационного совета от 26.11.2025 протокол № 6

О присуждении **Матвееву Алексею Игоревичу**, гражданину Россий-
ской Федерации, учёной степени кандидата технических наук.

Диссертация «Разработка методов уменьшения погрешности передачи единицы мощности электромагнитных колебаний в волноводных трактах СВЧ-диапазона и средств их реализации» по специальности 2.2.10 «Метрология и метрологическое обеспечение» (технические науки) принята к защите 17 сентября 2025 г. (протокол № 3) диссертационным советом 32.1.004.01, созданным на базе Федерального государственного унитарного предприятия «Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений» (ФГУП «ВНИИФТРИ») Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии, Россия, 141570, Московская обл., г.о. Солнечногорск, п.г.т. Менделеево, промзона ВНИИФТРИ, корпус 11. Диссертационный совет утверждён Приказом Министерства науки и высшего образования Российской Федерации № 79/нк от 26.01.2022 г.

Соискатель Матвеев Алексей Игоревич, 1991 года рождения, в 2014 г. окончил Национальный исследовательский университет «МИЭТ» по специальности 210304 «Радиоэлектронные системы». В период с 2017 по 2022 г. проходил обучение в аспирантуре ФГУП «ВНИИФТРИ». С июня 2015 по ноябрь 2023 г. работал в должности инженера, а с декабря 2023 по н.в. — в должности научного сотрудника лаборатории 111 Научно-исследовательского

отделения метрологии радиотехнических и электромагнитных измерений (НИО-1) ФГУП «ВНИИФТРИ».

Научный руководитель — Малай Иван Михайлович, доктор технических наук, доцент, заместитель генерального директора по радиотехническим и электромагнитным измерениям ФГУП «ВНИИФТРИ».

Официальные оппоненты:

Николаев Алексей Владимирович — доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник ФГБУН «Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук» (ИМАШ РАН), г. Москва,

Лялин Константин Сергеевич, кандидат физико-математических наук, доцент, заместитель главного конструктора «Института микроприборов и систем управления им. Л.Н. Преснухина» (Институт МПСУ), г. Москва,

дали положительные отзывы, в которых показали, что диссертация соответствует требованиям пп. 9–11, 13, 14 «Положения о порядке присуждения учёных степеней», утверждённого постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени кандидата наук, а её автор заслуживает присуждения искомой ученой степени.

Ведущая организация — Федеральное государственное бюджетное учреждение «Главный научный метрологический центр» Министерства обороны Российской Федерации (ФГБУ «ГНМЦ» Минобороны России), г. Мытищи, — в своём **положительном отзыве**, подписанном ведущим научным сотрудником, доктором физико-математических наук **Хайруллиным Рустамом Зиннатулловичем**; начальником 212 лаборатории, кандидатом технических наук **Закутиным Александром Александровичем**; заместителем начальника отдела — начальником 131 лаборатории, кандидатом технических наук **Харитоновым Евгением Юрьевичем** и утверждённым заместителем начальника ФГБУ «ГНМЦ» Минобороны России (по научной работе), доктором технических наук, старшим научным сотрудником **Клейменовым Юрием Анатольевичем**, указала, что основным достоинством работы

Матвеева А.И. является практическая направленность полученных автором результатов исследований. Результаты и выводы диссертации рекомендуют использовать для дальнейшего развития эталонной базы Российской Федерации в области измерений мощности СВЧ.

Ведущая организация **отметила**, что актуальность темы диссертации обусловлена потребностями развития эталонной базы России в области СВЧ-измерений мощности, необходимостью обеспечения прослеживаемости к государственному первичному эталону и ужесточением требований к точности рабочих эталонов. Разработка методов и средств, направленных на уменьшение ключевой составляющей погрешности — погрешности рассогласования, является своевременной и востребованной.

Ведущая организация также **отметила**, что результаты диссертации обладают научной новизной, к которой относит следующее:

1. Впервые разработан метод измерений S-параметров термистора, установленного в волноводном тракте, в диапазоне частот от 5,64 до 37,50 ГГц, позволяющий определить зависимость его коэффициентов отражения и передачи от электрического сопротивления.

2. Предложены и реализованы алгоритмы расчёта многозондовых систем термисторов с использованием аппроксимации Чебышева, обеспечивающие взаимную компенсацию переотражений и достижение коэффициента отражения входа не более 0,03.

3. Разработан и исследован датчик мощности рассогласованный, применение которого в составе комбинированного ваттметра позволило в 2,5 раза повысить точность измерений $|\Gamma_{\Sigma}(f)|$ и в 2 раза снизить погрешность передачи единицы мощности ЭМК.

4. Установлены и использованы ключевые зависимости погрешности передачи единицы мощности от эффективного модуля коэффициента отражения выхода ваттметров проходного типа $|\Gamma_{\Sigma}(f)|$ и модуля коэффициента отражения входа ваттметров оконечного типа $|\Gamma_{ВХ}(f)|$ и точности их измерений, что позволило существенно повысить точность по сравнению с применяемыми

подходами.

Достоверность и обоснованность научных результатов и выводов подтверждена использованием апробированного математического аппарата, результатами математического и электродинамического моделирования, а также экспериментальными исследованиями на аппаратуре государственного первичного эталона ГЭТ 26-2010 и при аттестации вторичных и рабочих эталонов.

Материалы диссертации отражены в 16 научных трудах, среди которых 5 статей — в журналах из перечня ВАК российских рецензируемых изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертации. Диссертантом получено 5 патентов и 2 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Диссертация и автореферат написаны ясным научным языком, аккуратно оформлены, материал изложен последовательно и системно. Автореферат соответствует содержанию диссертации и корректно представляет достигнутые результаты.

В отзыве ведущей организации также имеются вопросы и замечания:

1. Недостаточно подробно раскрыты потенциальные возможности масштабирования разработанных методов для частотных диапазонов выше 37,5 ГГц.

2. Следовало бы более детально осветить вопросы долговременной стабильности метрологических характеристик разработанных преобразователей.

3. При описании практической значимости работы во введении не упомянуто, что результаты исследований уже внедрены в серийных ваттметрах оконечного типа МЗ-122 и проходного типа М1-37, это упоминается только в заключении.

4. Формула (26) является упрощённой аппроксимацией для грубых расчетов $|\Gamma_{\text{вх}}(f)|$ трансформатора; она учитывает только отражение от каждой ступени, игнорируя переотражения между ступенями, взаимное влияние неоднородностей, фазовые накопления.

5. Недостаточно подробно рассмотрен экономический эффект от внедрения предложенных методов.

Ведущая организация отмечает, что имеющиеся замечания носят рекомендательный характер, не снижают научную значимость диссертации и общую положительную оценку работы.

По своему содержанию диссертационная работа соответствует специальности 2.2.10 «Метрология и метрологическое обеспечение».

Ведущая организация рекомендует использовать результаты и выводы диссертации для дальнейшего развития эталонной базы Российской Федерации в области измерений мощности СВЧ и делает вывод, что в целом диссертационная работа Матвеева А.И. представляет собой законченную научную квалификационную работу, содержащую новое решение актуальной научной задачи, имеющей важное теоретическое и прикладное значение. Выводы, рекомендации и выносимые на защиту основные положения достаточно обоснованы. По уровню решения важной научно-технической задачи и её практической значимости диссертационная работа в достаточной мере отвечает требованиям п.п. 9–11, 13, 14 «Положения о порядке присуждения учёных степеней», утверждённого постановлением Правительства РФ № 842 от 24.09.2013 г., предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её автор — **Матвеев Алексей Игоревич** — заслуживает присуждения ему учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.2.10 «Метрология и метрологическое обеспечение».

Соискатель имеет 36 опубликованных научных работ, в том числе по теме диссертации опубликовано 16, из них в рекомендованных ВАК рецензируемых изданиях опубликовано 5 работ:

1. Матвеев А.И., Перепелкин В.А., Чирков И.П. Исследование волноводных прецизионных термоэлектрических преобразователей мощности миллиметрового диапазона длин волн // Альманах современной метрологии. — 2021. — № 2 (26). — С. 37–44. (ВАК)

2. Матвеев А.И., Коудельный А.В., Малай И.М., Перепелкин В.А., Чирков И.П. Государственный первичный эталон единицы мощности электромагнитных колебаний в диапазоне частот 37,5–118,1 ГГц ГЭТ 167-2021 // Измерительная техника. — 2022. — № 6. — С. 3–8. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2022-6-3-8>. (ВАК, Scopus)

3. Матвеев А.И. Волноводные термисторные ваттметры оконечного типа в диапазоне частот 16,7–37,5 ГГц // Измерительная техника. — 2022. — № 1. — С. 58–61. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2022-1-58-61>. (ВАК, Scopus)

4. Матвеев А.И., Михайлов Д.Б., Полянчева А.В. Исследование стабильности метрологических характеристик первичных измерительных преобразователей мощности в волноводных трактах // Прикладная физика. — 2023. — № 2. — С. 97–102. (ВАК).

5. Matveev A., Platitsina P., Chirkov I., Shpagin D. Microwave Thermal Power Sensors // 2024 IEEE 9th All-Russian Microwave Conference (RMC), Moscow, Russian Federation. 2024. P. 246–251. <https://doi.org/10.1109/RMC62880.2024.10846911>.

5 патентов на полезные модели:

1. Матвеев А.И., Перепелкин В.А., Семенов В.А., Чирков И.П. Многозондовый преобразователь мощности оконечного типа. Патент на полезную модель № 191197, заявка № 2019114754. Дата регистрации в Государственном реестре полезных моделей Российской Федерации 29.07.2019 г.

2. Матвеев А.И., Чирков И.П. Датчик мощности волноводный рассогласованный. Патент на полезную модель RU216734U1, 15.12.2022. Заявка № 2022132989 от 19.05.2022.

3. Матвеев А.И., Шпагин Д.А., Жогун М.В. Преобразователь мощности проходного типа на основе применения матрицы термисторных СВЧ-датчиков. Патент на полезную модель RU213532 U1, 15.09.2022. Заявка № 2022113403 от 19.05.2022.

4. Матвеев А.И., Чирков И.П. Термисторный СВЧ-датчик. Патент на полезную модель RU221462U1, 08.11.2023. Заявка № 2023116375 от 22.06.2023.

5. Матвеев А.И., Чирков И.П., Жогун М.В. Преобразователь мощности термисторный оконечного типа. Патент на полезную модель RU 224970 U1, 10.04.2024. Заявка № 2023135585 от 27.12.2023.

и 2 свидетельства о государственной регистрации программ ЭВМ

1. Матвеев А.И., Чирков И.П. Установка компарирующая ОО КА ИМЭК. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № RU2019664257. Заявка № 2019663421. Дата регистрации: 28.10.2019. Дата публикации: 01.11.2019. Язык программирования: C++. Объем: 1470 Кб.

2. Матвеев А.И., Чирков И.П. Расчёт КСВН и потерь в многозондовых преобразователях мощности СВЧ. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024688823. Заявка № 2024688092. Дата регистрации: 19.11.2024. Дата публикации: 02.12.2024.

В положительном отзыве официального оппонента Николаева Алексея Владимировича, доктора технических наук, профессора, главного научного сотрудника ФГБУН «ИМАШ РАН» имеются следующие вопросы (рекомендации):

1. Автор не представил обоснование преимуществ использования полиномов Чебышева перед другими методами аппроксимации в задаче расчёта расстояний между СВЧ-термисторами в многозондовой системе.

2. Автор выбрал уровень доверительной вероятности $P = 0,95$, однако не привёл достаточного обоснования. Следует объяснить, какими соображениями руководствовался автор при выборе именно этого уровня, почему он считается оптимальным для метрологических задач.

3. Автор ограничился диапазоном измерений мощности от 1 до 10 мВт, что обусловлено высокими показателями точности преобразователя мощности при передаче единицы мощности. Вместе с тем дополнительная оценка

динамического диапазона работы ваттметра позволила бы подтвердить устойчивость характеристик прибора вне указанного диапазона и сделала бы исследование более полным.

4. Автор ссылается на государственный первичный эталон ГЭТ 26-2010 для подтверждения метрологических характеристик разработанных средств измерений, однако методика их определения раскрыта неполно. Необходимо уточнить, проводились ли финальные измерения непосредственно в микрокалориметре или на специальной компарирующей установке эталона.

Указанные замечания не являются критическими и не снижают значимости для теории и практики проектирования средств измерений. Замечания носят рекомендательный характер и не затрагивают основные положения диссертационной работы, а также общую положительную оценку диссертации.

Вывод официального оппонента Николаева А.В.:

— тема диссертации актуальна, диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную работу, в которой на основании выполненных автором исследований разработаны положения, совокупность которых можно квалифицировать как решение важной задачи в области измерительной техники в СВЧ-диапазоне;

— результаты диссертации обладают научной новизной, практической значимостью, прошли апробацию, в достаточной степени представлены в научных трудах автора;

— результаты диссертационных исследований имеют перспективу использования в деятельности метрологических институтов и измерительных лабораторий;

— диссертация соответствует требованиям «Положения о присуждении учёных степеней», утверждённого Постановлением Правительства РФ № 842 от 24.09.2013 г., предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её автор Матвеев Алексей Игоревич заслуживает присуждения учёной степени

кандидата технических наук по специальности 2.2.10 «Метрология и метрологическое обеспечение» (технические науки).

В положительном отзыве официального оппонента Лялина Константина Сергеевича, кандидата физико-математических наук, доцента, заместителя главного конструктора «Института микроприборов и систем управления им. Л.Н. Преснухина» (Институт МПСУ), имеются следующие замечания и рекомендации:

1. Схема передачи единицы мощности ЭМК от государственного первичного эталона через вторичный эталон к эталону 1-го разряда могла бы быть раскрыта более подробно для лучшего понимания реализации разработанных методов в полной метрологической цепи широким кругом специалистов из других областей радиотехники.

2. Не сформулированы конкретные технические требования к векторным анализаторам цепей, используемым для измерений S-параметров термисторов, в части точности, динамического диапазона и неопределённости измерений.

3. В диссертационной работе соискатель раскрывает, что разработанный преобразователь мощности оконечного типа реализован на методе замещения СВЧ-мощности постоянным током каждым СВЧ-термистором, а измеренная мощность является суммой мощностей четырёх СВЧ-термисторов. Следовало бы более детально раскрыть алгоритм суммирования измеренных мощностей для полного понимания принципов работы разработанного преобразователя мощности.

4. Отсутствует анализ влияния температурной нестабильности на метрологические характеристики разработанных преобразователей мощности в условиях длительной эксплуатации.

5. Не представлен сравнительный анализ массогабаритных показателей и экономической эффективности разработанных средств измерений с существующими аналогами, что важно для оценки их конкурентоспособности.

Перечисленные замечания носят рекомендательный характер и не снижают общей положительной оценки диссертационной работы. Матвеев А.И. выполнил большой объём исследовательской, инженерно-технической и технологической работы.

Общий вывод официального оппонента Лялина К.С.:

Диссертационная работа Матвеева А.И. представляет собой завершённое исследование, в котором решена актуальная задача повышения точности измерений мощности СВЧ-диапазона. Теоретические и экспериментальные результаты работы имеют практическую значимость, подтверждённую внедрением в метрологическую практику.

Предложенные методы и алгоритмы позволяют существенно снизить погрешность измерений и обеспечивают соответствие современным требованиям к эталонной базе. Результаты работы вносят значительный вклад в развитие метрологического обеспечения радиоэлектронной отрасли.

Диссертационная работа соответствует требованиям пп. 9–14 «Положения о порядке присуждения учёных степеней», утверждённого постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени кандидата наук. Уровень проведённого исследования, научная новизна и практическая ценность результатов полностью соответствуют критериям, предъявляемым к диссертационным работам, и отвечает требованиям ВАК. Автор Матвеев А.И. достоин присуждения учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.2.10 «Метрология и метрологическое обеспечение».

На автореферат поступили отзывы специалистов из 12 организаций, все отзывы положительные, в отзывах имеются вопросы и замечания:

1) от академика РАН, доктора физико-математических наук, главного научного сотрудника Кукушкина Игоря Владимировича (ИФТТ РАН, г. Черноголовка):

1. В тексте пояснения к формулам (5) и (6) значится, что Z является импедансом термистора. Однако из формул (5) и (6) следует, что Z — это нормированный импеданс на импеданс свободного пространства $Z_0 = 377 \text{ Ом}$.

2. На странице 11 указаны диэлектрическая проницаемость и габаритные размеры используемого в диссертации термистора. Логично в этом месте привести конкретную марку используемого термистора.

3. В автореферате не очень явно обозначена главная «изюминка» диссертации, что путём регулировки сопротивлений R_{t_1} , R_{t_2} , R_{t_3} , R_{t_4} достигается значение модуля коэффициента отражения для каждого поддиапазона, что обеспечивает работу во всём диапазоне частот волноводного тракта. То есть то, что входной тракт ваттметра перестраиваемый.

4. Для разработанного ваттметра оконечного типа в автореферате не описана методика/процедура измерения самой мощности излучения. Автор ограничивается общими словами, что «многозондовая система термисторов выполняет функцию чувствительного элемента».

2) от кандидата технических наук, руководителя проектов Просыпкина Сергей Евгеньевича (ООО «Диполь», г. Москва):

1. Отсутствие информации о схемах передачи единицы мощности ЭМК в индустриально развитых странах и сравнении достигнутых в работе результатов с мировым уровнем.

2. Из автореферата не понятно, каким образом измеряется мощность ЭМК при использовании многозондового ваттметра оконечного типа.

3. В главе 4 делается вывод о том, что модуль коэффициента отражения $|\Gamma_{\Sigma}(f)|$ невозможно измерить с помощью современных СИ без нарушения целостности конструкции. В работе автор ссылается на методы измерений $|\Gamma_{\Sigma}(f)|$, описанные в ГОСТ 8.392-80. Однако, по моему мнению, на современном этапе

развития измерительной техники это можно сделать, заменив, например, генератор и измерительную линию векторным анализатором цепей, а волноводную нагрузку с переменным модулем и фазой — волноводным трансформатором сопротивлений (Maury, Focus). Это позволит избавиться от ручной регулировки фазы ДМК и полностью автоматизировать процесс измерений.

4. В диссертации основной упор делается на измерение и снижение модулей коэффициента отражения $|\Gamma_{\text{ВХ}}(f)|$ и $|\Gamma_{\text{Э}}(f)|$, однако в практике измерений мощности в целях уменьшения погрешности рассогласования даже на уровне рабочих средств измерений имеются примеры использования комплексных значений этих параметров, что позволяет в ещё большей степени скомпенсировать погрешность рассогласования «источник сигнала — измеритель мощности». Примером могут служить калибраторы мощности проходного типа серии NRPC и измерители мощности оконечного типа серии NRP компании Rohde & Schwarz, у которых комплексные значения коэффициентов отражения измеряются в процессе заводской калибровки и записываются в память приборов.

3) от кандидата физико-математических наук, менеджера по работе с ключевыми заказчиками Никольского Максима Андреевича (ООО «Планар СПб», г. Санкт-Петербург):

1. Не приведён сравнительный анализ, показывающий преимущества предложенного подхода по минимизации погрешности рассогласования по сравнению с другими подходами.

2. Применение критерия $|\Gamma_{\text{ВХ}}(f)|$ не более 0,03 для результатов таблицы 1 не учитывает необходимый технологический запас для выпуска серийных средств измерений и их производства.

3. Приведённые на графике рисунка 10 границы погрешности не соответствуют указанным в тексте.

4. Не приведено обоснование выбора предложенного дизайна рассогласованного ваттметра.

4) от доктора технических наук, главного научного сотрудника ОКБ-42 Лемешко Николая Васильевича (АО «Корпорация “Комета”», г. Москва):

1. Автор не раскрыл методику измерения мощности многозондовым преобразователем мощности оконечного типа. В представленных материалах отсутствует описание принципа формирования итогового значения мощности на основе показаний отдельных термисторов.

2. Отсутствует сравнительный анализ эффективности предложенных методов минимизации погрешности рассогласования с известными зарубежными и отечественными аналогами, что не позволяет в полной мере оценить научно-технический уровень выполненных разработок.

3. В работе не вполне корректно сформулировано «...позволяет определить зависимость модулей коэффициентов отражения и передачи термистора от электрического тока...» В дальнейшем автор использует корректную формулировку «...позволяет определить зависимость модулей коэффициентов отражения и передачи термистора от электрического сопротивления...» (с.7 автореферата, 4 абзац сверху).

5) от кандидата технических наук, доцента, ведущего инженера Репина Александра Вячеславовича и ведущего инженера Иванова Алексея Ивановича (ООО «Бюро 1440», г. Москва):

1. Автор подробно раскрывает задачу по уменьшению погрешности рассогласования, зависящей от $|\Gamma_{\text{ВХ}}(f)|$ и $|\Gamma_{\text{Э}}(f)|$, и обоснованно выбирает путь снижения данной составляющей погрешности передачи единицы мощности ЭМК. Вместе с тем в автореферате не обоснован выбор метода минимизации погрешности рассогласования. Целесообразным представляется рассмотрение альтернативных подходов, в частности возможности применения Г-коррекции с использованием комплексных коэффициентов отражения сличаемых ваттметров.

2. В автореферате недостаточно чётко освещено, что модуль коэффициента отражения входа ваттметра может быть настроен на работу как в согласованном режиме ($|\Gamma_{\text{вх}}(f)|$ менее 0,03), так и в рассогласованном режиме ($|\Gamma_{\text{вх}}(f)|$ более 0,2). Данная функция ваттметра может применяться для контроля стабильности модуля эффективного коэффициента отражения выхода калибраторов мощности.

3. На рис. 10 автореферата, вероятно, неправильно подобрана шкала для отображения доверительных границ суммарной относительной погрешности.

6) от доктора технических наук, профессора, главного научного сотрудника центра 1.9 НИЧ Гусинского Александра Владимировича (БГУИР, г. Минск):

1. Отсутствуют сведения о том, проводился ли анализ действующей поверочной схемы для средств измерений мощности электромагнитных колебаний. Просим отразить, требуется ли её пересмотр (актуализация) в связи с внедрением результатов, обеспечивающих повышение точности передачи единицы мощности электромагнитных колебаний в отличие от ранее используемых подходов.

7) от доктора физико-математических наук Панаса Андрея Ивановича и главного метролога Галанского Сергея Владимировича (АО «НПП “Исток” им А.И. Шокина», г. Фрязино):

1. При анализе графического материала автореферата выявлен недочёт оформления. На рисунке 10 наблюдаются расхождения между приведёнными численными значениями погрешностей и их графическим представлением.

2. В автореферате отсутствует анализ динамического диапазона преобразователей мощности оконечного типа.

3. Недостаточно подробно освещены вопросы воспроизводимости результатов настройки многозондовых преобразователей мощности оконечного типа в условиях серийного производства.

8) от начальника лаборатории 441 (поверки и испытаний радиотехнических и виброакустических СИ, СИ времени и частоты, СИ телерадиовещательной аппаратуры) Голышака Станислава Николаевича (ФБУ «НИЦ ПМ — РОСТЕСТ», г. Москва):

1. Автор исследовал стабильность метрологических характеристик разработанных преобразователей мощности, однако в автореферате данный вопрос освещён фрагментарно. Более полное представление результатов исследования стабильности позволило бы оценить перспективы практического применения разработок в качестве вторичных эталонов.

2. В автореферате не представлен сравнительный анализ метрологических характеристик разработанных преобразователей мощности с современными зарубежными аналогами. Представление такой информации позволило бы оценить конкурентные преимущества предложенных технических решений и их соответствие международным стандартам точности измерений.

9) от кандидата технических наук, старшего научного сотрудника, ведущего научного сотрудника Быканова Владимира Васильевича (ФГБУ «ВНИИР», г. Мытищи):

1. В автореферате отсутствует сравнительный анализ с современными зарубежными аналогами, что не позволяет оценить конкурентоспособность разработки.

2. Не приведены данные о воспроизводимости результатов при серийном производстве преобразователей мощности.

3. Требуется уточнение методики суммирования мощностей в многозондовой системе термисторов.

10) от заведующего кафедрой «Теоретическая радиотехника», доктора технических наук, профессора Кузнецова Юрия Владимировича (ФГБОУ «НИУ МАИ», г. Москва):

1. Не приведена методика расчёта предельных значений S-параметров термисторов в волноводных трактах СВЧ-диапазона.

2. Не представлена методика оценки влияния результатов измерения S-параметров термисторов на уменьшение погрешности передачи единицы мощности ЭМК в волноводных трактах в диапазоне частот от 5,64 до 37,5 ГГц.

3. Заявленный эффект уменьшения погрешности передачи единицы мощности ЭМК в волноводных трактах в диапазоне частот от 5,64 до 37,5 ГГц не отображён ни на одном рисунке автореферата, иллюстрирующем результаты расчёта и измерений параметров разработанного волноводного ваттметра оконечного типа (см. рис. 3, 8, 9, 10, 12, 13 и таблицу 1), все данные анализировались в диапазоне частот от 16 до 26 ГГц.

11) от кандидата технических наук, заслуженного метролога Российской Федерации, начальника отдела «Измерение параметров коаксиальных трактов и устройств на СВЧ» Евграфова Владимира Ивановича (ФГУП «ВНИИФТРИ», Западно-Сибирский филиал, г. Новосибирск):

1. К недостаткам автореферата следует отнести отсутствие ссылки на прослеживаемость результатов исследований в части измерения коэффициентов отражения и уменьшения погрешности из-за рассогласования разработанных компонентов средств измерения мощности на ГЭТ 219-2024 «Государственный первичный эталон единиц комплексного коэффициента отражения и комплексного коэффициента передачи в волноводных трактах в диапазоне частот от 2,14 до 178,4 ГГц».

12) от кандидата технических наук, ведущего инженера по метрологии научно-исследовательского отдела законодательной и теоретической метрологии РУП «БелГИМ», г. Минск, Булатова Олега Владимировича:

1. На странице 9 автореферата вместо выражения «опубликованы в 16 статьях» следовало употребить выражение «опубликованы в 16 работах», т.к. в сборнике конференции публикуются тезисы докладов, доклады, материалы

или труды (по усмотрению редактора сборника); следовало уделить больше внимания оформлению списка авторских работ (см. пункты 2, 9, 10).

В целом авторы отзывов заключают, что автореферат достаточно хорошо и полно освещает поставленные перед диссертантом задачи, методы их решения и достигнутые им результаты, представленная диссертационная работа является законченной научно-квалификационной работой и соответствует всем требованиям ВАК, автор работы Матвеев Алексей Игоревич заслуживает присуждения учёной степени кандидата технических наук.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обоснован их известностью, компетентностью, авторитетом и наличием публикаций в научно-техническом направлении, к которому относится диссертация Матвеева А.И., а также способностью однозначно определить научную и практическую ценность диссертации.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

1. Разработан метод измерений S -параметров термисторов в волноводных трактах СВЧ-диапазона с использованием векторного анализатора цепей. Определена зависимость параметров $S_{11}(f)$ и $S_{21}(f)$ термистора от установленного на нём электрического сопротивления. Практическая реализация метода позволяет проводить проверку термисторов, используемых в преобразователях мощности СВЧ, на соответствие предъявляемым к ним требованиям.

2. Разработан и исследован многозондовый преобразователь мощности оконечного типа на основе термисторов СВЧ. Определена зависимость модуля коэффициента отражения входа измерительного преобразователя мощности оконечного типа за счёт зависимости от сопротивления термисторов R_{t_1} , R_{t_2} , R_{t_3} , R_{t_4} . Определены расстояния между СВЧ-термисторами, при которых

векторы коэффициентов отражения термисторов $S_{11}(R_{t_1})$, $S_{11}(R_{t_2})$, $S_{11}(R_{t_3})$, $S_{11}(R_{t_4})$ взаимно компенсируются. В результате работы создан измерительный преобразователь мощности оконечного типа, модуль коэффициента отражения входа которого не превышает 0,03 на произвольных точках рабочего диапазона частот волноводного тракта.

3. Реализованные многозондовые измерительные преобразователи мощности оконечного типа на основе термисторов СВЧ позволили снизить погрешность передачи единицы мощности электромагнитных колебаний в 2 раза, что обеспечивает передачу единицы мощности ЭМК от разработанного преобразователя мощности оконечного типа эталону 1-го разряда, при этом погрешность передачи не превышает 0,8 %.

4. Разработана методика измерений $|\Gamma_{\Sigma}(f)|$ (МИ 3610-2018) и СИ для её реализации, подтверждена их работоспособность при аттестации эталона 1-го разряда. В ходе выполнения аттестации практически подтверждено повышение точности измерений $|\Gamma_{\Sigma}(f)|$ в 2,5 раза за счёт уменьшения её доминирующих составляющих. Разработанные датчики мощности рассогласованные практически реализованы в рамках создания высокотехнологичных мест по настройке и градуировке ваттметров, разрабатываемых в рамках соглашения с Министерством промышленности и торговли России.

Научная новизна полученных в работе результатов заключается в следующем:

1. Впервые предложен и разработан метод измерений S-параметров термистора, установленного в волноводном тракте, который, в отличие от традиционных измерений параметров на постоянном токе, позволяет определить зависимость модулей коэффициентов отражения и передачи термистора от электрического тока в диапазоне частот от 5,64 до 37,50 ГГц.

2. Впервые предложены и внедрены алгоритмы расчёта расстояний между термисторами с применением аппроксимации функции частотной зависимости коэффициента отражения полиномом Чебышева 2-го порядка, что

обеспечивает взаимокompенсацию переотражений от термисторов и приводит к существенному уменьшению модуля коэффициента отражения входа многозондовых ваттметров оконечного типа.

3. Доказано, что использование метода совокупных измерений модуля $|\Gamma_{\text{э}}(f)|$ с использованием рассогласованных датчиков мощности, обеспечивающих изменение фазы коэффициента отражения при неизменном модуле коэффициента отражения, в отличие от метода косвенных измерений обеспечивает повышение точности измерений в 2 раза.

4. Изучены ключевые зависимости погрешности передачи единицы мощности ЭМК от модулей коэффициента отражения $|\Gamma_{\text{э}}(f)|$ и $|\Gamma_{\text{вх}}(f)|$, а также точности их измерений. Использование этих зависимостей позволяет существенно повысить точность передачи единицы мощности электромагнитных колебаний в отличие от применяемых подходов.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:

— многозондовая система термисторов применена при разработке волноводных преобразователей мощности оконечного типа в диапазоне частот от 5,64 до 37,50 ГГц, что позволяет минимизировать коэффициент отражения входа менее 0,03;

— использование датчиков мощности рассогласованных позволило повысить точность измерений $|\Gamma_{\text{э}}(f)|$ без нарушения целостности конструкции ваттметров проходного типа;

— создание и применение комбинированного волноводного ваттметра, в состав которого входят многозондовые преобразователи мощности оконечного типа (7 волноводных трактов) и датчики мощности рассогласованные (7 волноводных трактов), позволяют передавать единицу мощности СВЧ в волноводных трактах в диапазоне частот от 5,64 до 37,50 ГГц от ГЭТ 26-2010 к стационарному комплекту измерительной системы К6-19 с погрешностью не более 0,8 %.

Результаты работы внедрены во ФГУП «ВНИИФТРИ», что подтверждено актом реализации (внедрения) следующих результатов диссертационной работы:

— многозондовых преобразователей мощности оконечного типа, которые включены в состав компарирующей установки ГЭТ 26-2010 и используются для передачи единицы мощности ЭМК вторичным и рабочим эталонам;

— высокотехнологичного рабочего места для серийного выпуска ваттметров проходного типа с целью определения $|\Gamma_{\text{э}}(f)|$ выпускаемой продукции, в котором применён разработанный датчик мощности с изменяемой фазой коэффициента отражения входа;

— измерительной системы К6-19 и её аттестации в качестве эталона 1-го разряда в волноводных трактах в частотном диапазоне от 5,64 до 37,5 ГГц;

— программ и методик испытаний в целях утверждения типа транспортируемого комплекта измерительной системы К6-19, в состав которого входят ваттметр комбинированный, применяемый для передачи единицы мощности СВЧ от ГЭТ 26-2010 стационарному комплекту ведомственных эталонов мощности ЭМК.

Результаты работы внедрены в Управлении метрологии Вооруженных Сил Российской Федерации, что подтверждено актом реализации (внедрения), результаты диссертационной работы использованы:

— при разработке и серийном выпуске измерительной системы К6-19, эксплуатируемой в региональных центрах метрологии Минобороны России в качестве эталона 1-го разряда мощности электромагнитных колебаний в диапазоне частот от 5,64 до 37,50 ГГц;

— при разработке ваттметров поглощаемой мощности (МГФК.411151.005) и индикаторов мощности рассогласованных (МГФК.411523.063), планируемых к поставке и эксплуатации в Вооруженных Силах Российской Федерации;

— при разработке МИ 3610-2018 «Методика измерений модуля эффективного коэффициента отражения волноводных ваттметров проходного типа» с применением измерительной системы К6-19.

Результаты работы внедрены в ФБУ «Нижегородский ЦСМ», что подтверждено актом о внедрении результатов диссертационной работы:

— результаты диссертационной работы внедрены в рабочий процесс по поверке преобразователей мощности СВЧ оконечного и проходного типов. Использование результатов диссертационной работы способствовало повышению эффективности и качества проводимых работ в области измерений мощности электромагнитных колебаний.

Достоверность результатов исследования подтверждается использованием апробированного математического аппарата, успешной экспериментальной проверкой предложенных технических решений и точностных характеристик предложенных решений на аппаратуре государственного первичного эталона ГЭТ 26-2010, подтверждением теоретических выводов и результатами практических измерений при аттестации ВЭ и РЭ 1-го разряда.

Личный вклад автора заключается в обосновании и реализации оригинальных подходов к уменьшению погрешности передачи размера единицы мощности ЭМК в СВЧ-диапазоне. Автором лично проведены все теоретические расчёты и получены результаты электродинамического моделирования составных частей преобразователей мощности, а также выполнены экспериментальные исследования в ходе выполнения работы, подтвердившие эффективность предложенных технических решений по снижению погрешности рассогласования. Автор подготовил связанные с работой публикации и провёл апробацию результатов на различных научно-практических конференциях.

В ходе защиты диссертации соискатель Матвеев А.И. согласился с замечаниями и рекомендациями, изложенных ведущей организацией,

