



Экз. № 1

МИНИСТЕРСТВО ОБОРОНЫ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
(МИНОБОРОНЫ РОССИИ)
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
**ГЛАВНЫЙ НАУЧНЫЙ
МЕТРОЛОГИЧЕСКИЙ ЦЕНТР**
МИНИСТЕРСТВА ОБОРОНЫ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

г. Мытищи, Московская обл., 141006

« 28 » 10 2025 г. № 13/ 4929

На № 02-08/8852 от 06.10.2025

Генеральному директору
федерального государственного
унитарного предприятия
«Всероссийский научно-
исследовательский институт
физико-технических и
радиотехнических измерений»

С.И.ДОНЧЕНКО

п/о Менделеево, Солнечногорский
район, Московская область, 141570

ав. Шинириджин

Уважаемый Сергей Иванович!

г. Балашиха 29.11.25
г. 1.11.25

В соответствии с требованиями Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации 24 сентября 2013 года № 842, направляю отзыв на диссертацию и автореферат диссертационной работы Матвеева Алексея Игоревича на тему: «Разработка методов уменьшения погрешности передачи единицы мощности электромагнитных колебаний в волноводных трактах СВЧ-диапазона и средств их реализации», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.2.10 «Метрология и метрологическое обеспечение».

Приложение: на 5 л., экз. № 1, 2.

С уважением,

Заместитель начальника ФГБУ «ГНМЦ» Минобороны России
(по научной работе)

Ю. Клейменов

Ю. Клейменов

ФГУП «ВНИИОТРИ»	
Вх. №	<u>22366</u>
«01»	<u>11</u> <u>20</u> <u>25</u> г.
на	<u>1</u> листах
приложение на	<u>10</u> листах

УТВЕРЖДАЮ
Заместитель начальника
ФГБУ «ГНМЦ» Минобороны России
(по научной работе)
доктор технических наук, старший
научный сотрудник

Клейменов Ю.А.

«15» 2025 г.

Отзыв ведущей организации

на диссертационную работу Матвеева Алексея Игоревича
«Разработка методов уменьшения погрешности передачи единицы мощности
электромагнитных колебаний в волноводных трактах СВЧ-диапазона и средств
их реализации», представленную на соискание ученой степени кандидата
технических наук по специальности:
2.2.10 – «Метрология и метрологическое обеспечение»

Диссертационная работа Матвеева Алексея Игоревича выполнена в Федеральном государственном унитарном предприятии «Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений» (ФГУП «ВНИИФТРИ») и посвящена решению актуальной научной задачи, заключающейся в разработке методов и средств уменьшения погрешности рассогласования при передаче единицы мощности электромагнитных колебаний (ЭМК) в волноводных трактах СВЧ-диапазона.

На рассмотрение представлены диссертация и автореферат диссертации. Структурно диссертационная работа содержит введение, четыре главы, заключение, список использованной литературы и приложения.

Во **введении** Матвеев А.И. обосновал актуальность темы исследований, обусловленную возросшими требованиями потребителей к точностным характеристикам эталонов мощности ЭМК и необходимостью сокращения погрешности рассогласования, которая является доминирующей составляющей в суммарной погрешности передачи единицы мощности. Сформулированы цель, задачи, положения, выносимые на защиту, научная новизна, практическая значимость работы, а также приведены сведения о достоверности и апробации результатов.

В первой главе проведен анализ существующей в Российской Федерации системы передачи единицы мощности ЭМК в волноводных трактах и ее соответствия современным потребностям. Автором выявлено, что эксплуатируемые прецизионные средства измерений не удовлетворяют современным требованиям к вторичным эталонам по величине модуля коэффициента отражения входа и погрешности передачи. Установлены основные источники погрешности, в частности, значительный вклад погрешности рассогласования (Θ_p) и недостаточная точность измерений модуля эффективного коэффициента отражения выхода ваттметров проходного типа $|\Gamma_3(f)|$. На основе проведенного анализа сформулирована общая и частные задачи исследований.

Вторая глава посвящена разработке метода измерений S-параметров СВЧ-термисторов в волноводных трактах. Для решения задачи автором разработана оригинальная конструкция термисторного датчика мощности (ТВ-1) со сниженной высотой стенки прямоугольного волновода, что позволило минимизировать индуктивность выводов термистора. Разработан комплект волноводных трансформаторов и калибровочных мер для проведения измерений в нестандартных трактах с использованием векторного анализатора цепей. Экспериментально определена зависимость S-параметров термистора от установленного электрического сопротивления, что является основой для последующего проектирования широкополосных преобразователей.

В третьей главе приведены результаты разработки и исследования широкополосного волноводного преобразователя мощности оконечного типа с многозондовой системой термисторов. Для достижения значения модуля коэффициента отражения входа $|\Gamma_{вх}(f)| \leq 0,03$ во всем рабочем диапазоне частот предложена конструкция с четырьмя термисторами, расстояния между которыми рассчитаны с применением аппроксимации полиномом Чебышева 2-го порядка. Разработан и реализован алгоритм координатного спуска для настройки сопротивлений термисторов, обеспечивающий поиск глобального минимума коэффициента отражения. Экспериментально подтверждено достижение $|\Gamma_{вх}(f)| \leq 0,03$ и доверительных границ относительной погрешности поправочного множителя не более $\pm 0,8 \%$.

Четвертая глава содержит решение задачи повышения точности измерений модуля эффективного коэффициента отражения выхода ваттметров проходного типа $|\Gamma_3(f)|$. Автором разработан датчик мощности рассогласованный (ДМР) с переменной фазой коэффициента отражения, позволяющий измерять $|\Gamma_3(f)|$ без нарушения целостности конструкции ваттметра. Погрешность измерений $|\Gamma_3(f)|$ удалось снизить в 2,5 раза (с $\pm 0,016$ до $\pm 0,006$). Экспериментально опробован метод передачи единицы мощности ЭМК с использованием комбинированного ваттметра, включающего многозондовый преобразователь и ДМР, что позволило снизить погрешность передачи единицы мощности до $\pm 0,8 \%$ за счет шестикратного уменьшения погрешности рассогласования.

В **заключении** изложены основные результаты выполненной работы.

Автореферат диссертации в полной мере отражает содержание диссертационной работы Матвеева А.И.

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.

Сформулированная в работе **цель** – уменьшение погрешности передачи единицы мощности электромагнитных колебаний в волноводных трактах СВЧ-диапазона – имеет важное научное и практическое значение для метрологического обеспечения измерений в радиоэлектронике, радиолокации и связи.

Научная новизна полученных результатов заключается в следующем:

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 расчета 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 $|\Gamma_3(f)|$ и в 2 раза снизить погрешность передачи единицы мощности ЭМК.
4. Установлены и использованы ключевые зависимости погрешности передачи единицы мощности от $|\Gamma_3(f)|$, $|\Gamma_{вх}(f)|$ 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.

Практическая значимость работы состоит в том, что разработанные методы и средства внедрены в метрологическую практику:

- многозондовые преобразователи мощности оконечного типа включены в состав компарирующей установки ГЭТ 26-2010 и используются для передачи единицы мощности ЭМК;

- разработанные датчики мощности рассогласованные применяются при серийном выпуске и настройке ваттметров проходного типа;

- созданная измерительная система К6-19 аттестована в качестве эталона 1-го разряда;

- разработаны и внедрены серийные ваттметры оконечного типа МЗ-122 и проходного типа М1-37.

Основные положения и результаты работы внедрены в ФГУП «ВНИИФТРИ» и используются в повседневной метрологической деятельности.

Материалы диссертации отражены в 16 научных трудах, среди которых: 5 статей в изданиях из перечня ВАК, 10 публикаций в сборниках материалов научно-технических конференций, получены 5 патентов на полезные модели и 2 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Диссертация и автореферат написаны грамотным научным языком, аккуратно оформлены, материал изложен последовательно и системно.

По диссертационной работе имеются следующие замечания, не снижающие общей положительной оценки:

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 упрощенной аппроксимацией для грубых расчетов $\Gamma_{\text{вх}}$ трансформатора, она учитывает только первое отражение от каждой ступени, игнорируя: переотражения между ступенями, взаимное влияние неоднородностей, фазовые накопления.

Погрешность оценки по такой формуле может составлять от 10 % до 30 %, что, как правило, приводит к необходимости дополнительной настройки трансформатора вручную после изготовления. В дальнейшей работе рекомендуется использовать рекуррентную формулу расчета, учитывающую множественные переотражения сигнала на ступенях трансформатора.

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

Перечисленные замечания носят частный характер и не влияют на оценку научной и практической ценности работы.

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

Рекомендуем результаты и выводы диссертации использовать для дальнейшего развития эталонной базы Российской Федерации в области измерений мощности СВЧ.

В целом диссертационная работа Матвеева Алексея Игоревича 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 удовлетворяет критериям, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор – **Матвеев Алексей Игоревич**, достоин присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.2.10 – «Метрология и метрологическое обеспечение».

Отзыв рассмотрен и одобрен на заседании НТС ФГБУ «ГНМЦ» Минобороны России, протокол № 10-2025 от «21» октября 2025 года.

Ведущий научный сотрудник
доктор физико-математических наук

Хайруллин Р.З.

Начальник 212 лаборатории
кандидат технических наук

Закутин А.А.

Заместитель начальника отдела –
начальник 131 лаборатории
кандидат технических наук

Харитонов Е.Ю.