



МИНОБРНАУКИ РОССИИ

**Федеральное государственное
автономное образовательное
учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский
университет «Московский институт
электронной техники»**

Шокина пл., д.1, г. Зеленоград, Москва, 124498
Тел.: +7(499) 731 44 41 Факс: +7(499) 710 22 33
E-mail: netadm@miet.ru <http://www.miet.ru>

ОГРН 1027739615584

07.11.2025 № 98-5758/4-8
на № _____

Ученому секретарю
Диссертационного совета
32.1.004.01

к.ф.-м.н. Балаханову М.В.

141570, п.о. Менделеева,
Солнечногорский р-он,
Московская область, промзона
ФГУП ВНИИФТРИ, корпус 11
office@vniiftri.i-u
balah@vniiftri.ru

Уважаемый Михаил Валентинович!

Направляю Вам Отзыв официального оппонента, к.ф.-м.н., доцента Лялина Константина Сергеевича, на диссертацию Матвеева Алексея Игоревича на тему: «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.

кандидат физико-математических наук, доцент, заместитель главного конструктора Института микроприборов и систем управления (Институт МПСУ), Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники»» (НИУ МИЭТ).

Лялин Константин Сергеевич	
Вх. №	23382
« 07 »	11 2025 г.
на	1
листьях	4
приложение на	4
листьях	

010315

ОТЗЫВ

отзыв официального оппонента,
к.ф.-м.н. Лялина Константина Сергеевича
на диссертационную работу Матвеева Алексея Игоревича
на тему:

«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»

Актуальность

Мощность электромагнитных колебаний справедливо считается одним из фундаментальных параметров в радиофизике и радиотехнике СВЧ-диапазона. Особое значение точные измерения мощности приобретают в контексте приемо-передающих трактов современных радиоэлектронных систем, где этот параметр непосредственно определяет энергетический потенциал, дальность действия, помехозащищенность и в конечном счете – эффективность функционирования всего комплекса.

В условиях стремительного развития технологий связи пятого и шестого поколений (5G/6G), активного освоения миллиметрового диапазона длин волн, а также повышения требований к точности спутниковой навигации и радиолокации, проблема обеспечения единства и точности измерений СВЧ-мощности выходит на первый план. Погрешность рассогласования, являющаяся центральным объектом исследования в диссертации Матвеева А.И., традиционно составляет доминирующую долю в суммарной погрешности измерения мощности. Ее минимизация – это не просто метрологическая задача, а насущная потребность развития высокотехнологичных отраслей.

Разработанные автором методы и средства, направленные на уменьшение погрешности рассогласования за счет снижения коэффициента отражения входов преобразователей и повышения точности измерения коэффициентов отражения выходов проходных ваттметров, носят ярко выраженный прикладной характер. Их практическая ценность для радиотехники и проектирования приемо-передающих трактов проявляется в нескольких аспектах.

Во-первых, создание многозондовых преобразователей мощности с коэффициентом отражения $\leq 0,03$ позволяет существенно повысить точность калибровки и поверки измерительных каналов в передатчиках и приемниках. Это напрямую влияет на точность установки уровня выходной мощности передающих устройств и оценку уровня сигнала в приемных измерительных комплексах, что критически важно для энергоэффективности и электромагнитной совместимости систем.

Во-вторых, предложенная методика точного измерения эффективного коэффициента отражения выходов проходных ваттметров без нарушения целостности их конструкции (с использованием датчика мощности рассогласованного) открывает новые возможности для оперативного контроля и диагностики состояния согласования в реальных, эксплуатируемых трактах.

В-третьих, достигнутое снижение погрешности передачи единицы мощности до $\pm 0,8\%$ создает необходимый запас по точности для обеспечения прослеживаемости рабочих средств измерений к государственным эталонам. Это является фундаментом для достоверного сопоставления результатов измерений, проводимых в разных научных и производственных организациях, и способствует развитию кооперации в рамках отечественной радиоэлектронной промышленности.

Таким образом, диссертационная работа Матвеева А.И. решает актуальную научно-техническую задачу, имеющую прямое отношение к повышению точности, надежности и эффективности современных и перспективных радиотехнических систем и приемо-передающих трактов СВЧ-диапазона. Полученные результаты вносят существенный вклад в развитие метрологического обеспечения одной из ключевых отраслей – радиоэлектроники, что подчеркивает своевременность и востребованность проведенного исследования.

Во **введении** диссертации Матвеев А.И. комплексно обосновал актуальность темы, обусловленную необходимостью снижения доминирующей составляющей погрешности передачи единицы мощности ЭМК. Автор четко сформулировал цель, задачи, научную новизну и практическую значимость работы, определил положения, выносимые на защиту, и представил сведения о достоверности результатов, подтвержденной апробацией на оборудовании ГЭТ 26-2010 и в научных публикациях. Структура введения отражает логичную последовательность исследования от постановки проблемы к путям её решения.

В **первой главе** диссертации Матвеевым А.И. проведен комплексный анализ современного состояния системы передачи единицы мощности электромагнитных колебаний в волноводных трактах СВЧ-диапазона. Автор демонстрирует, что существующий парк вторичных эталонов мощности электромагнитных колебаний (ЭМК) не обеспечивает последовательную передачу единицы мощности в соответствии с современными требованиями.

Критический анализ существующих ваттметров оконечного типа, иллюстрируется данными, представленными в таблице 1 диссертации, показывает их несоответствие современным требованиям по коэффициенту отражения. Автор предлагает перспективное решение - использование согласующих волноводно-волноводных трансформаторов с многозондовой системой термисторов, что позволяет достичь коэффициента отражения не более 0,03. Также приведена уточненная оценка доминирующей части погрешности рассогласования измерительных трактов, достигающей $\pm 1,2\%$. Этот вывод, подкрепленный оценкой бюджета погрешности, представленной на рисунке 4.

Автор аргументированно обосновывает необходимость использования термисторов в качестве чувствительных элементов, подчеркивая их преимущества: высокую чувствительность, стабильность характеристик и способность работать в широком частотном диапазоне. На рисунках 5 и 6 наглядно показаны сравнительные характеристики различных типов чувствительных элементов, подтверждающие выбор термистора как оптимального решения.

Проведенный в первой главе комплексный анализ демонстрирует научную зрелость автора в области метрологии. Логичная структура изложения, подкрепленная убедительными экспериментальными данными и наглядной визуализацией результатов, является основой для последующих прикладных разработок. Проработка частных задач при передаче единицы мощности ЭМК свидетельствует о системном подходе к исследованию.

Вторая глава диссертации демонстрирует интересный подход автора к решению важной задачи - измерений S-параметров СВЧ-термисторов в диапазоне рабочих частот. Разработанный оригинальный метод измерений в СВЧ диапазоне, позволяет впервые установить количественную зависимость модулей коэффициентов отражения и передачи от электрического сопротивления (рис. 31, 32, 35, 36) в рабочем диапазоне частот.

Особого внимания заслуживает предложенная автором конструкция сниженного волноводного тракта высотой 1 мм (рис. 13 и 14, с. 41), позволившая минимизировать паразитную индуктивность выводов термистора. Автором получен патент на термисторный СВЧ-датчик, что подтверждает уникальность предложенного решения.

Методическая проработка главы отличается комплексностью подхода: разработка комплекта волноводных согласующих трансформаторов (параграф 2.5) и специализированных калибровочных мер для TRL-калибровки обеспечила воспроизводимость результатов измерений с погрешностью не более $\pm 0,008$.

Практическая значимость работы подтверждается установлением критериев пригодности термисторов, где определены допустимые диапазоны S_{11} (0,05-0,50) и S_{21} (0,80-0,98). Представленные результаты определения зависимости S-параметров от сопротивления демонстрируют высокую сходимость теоретических и экспериментальных данных.

Полученные результаты имеют существенное значение для разработки прецизионных ваттметров поглощаемой мощности, поскольку отбор термисторов теперь осуществляется по их высокочастотным характеристикам, а не только по параметрам на постоянном токе.

Глава характеризуется глубиной проработки и последовательной научной аргументацией.

Третья глава диссертации представляет разработку широкополосного волноводного преобразователя мощности с низким коэффициентом отражения. Предложенная автором многозондовая конструкция преобразователя (рис. 44, 45,

с. 74, 75) с чебышевским распределением термисторов демонстрирует принципиально новый подход к проблеме согласования в СВЧ-трактах, в котором термистор не только чувствительный элемент, но и согласующая неоднородность!

Разработанный автором алгоритм координатного спуска (с. 79-85) для настройки модуля коэффициента отражения входа путем регулирования сопротивлений термисторов $R_{t1}-R_{t4}$ представляет собой значительное методическое достижение. На примере преобразователя мощности в тракте сечения $11 \times 5,5$ мм автор убедительно показывает (рис. 50, с. 86), что применение данного алгоритма позволяет достичь значений $|\Gamma_{вх}(f)| \leq 0,03$ во всем рабочем диапазоне частот волноводного тракта.

Практическая реализация в виде опытных образцов ваттметров подтверждает технологичность предложенных решений. Автор не только разработал теоретическую основу, но и довел исследования до практической реализации, что характеризует его как зрелого исследователя, способного решать комплексные научно-технические задачи.

Глава вносит существенный вклад в развитие методов измерений мощности СВЧ и задает новый стандарт точности для волноводных преобразователей мощности. Полученные результаты открывают перспективы для создания нового поколения отечественных эталонных средств измерений.

В **четвертой главе** диссертации представлены прикладные результаты исследования, направленные на решение задачи повышения точности измерений модуля эффективного коэффициента отражения выхода ваттметров проходного типа $|\Gamma_{э}(f)|$.

Особого внимания заслуживает разработанный автором датчик мощности рассогласованный (ДМР), конструкция которого подробно описана на страницах 98-104 и представлена на рисунках 57 и 58. Уникальность данного решения заключается в возможности измерений $|\Gamma_{э}(f)|$ без нарушения целостности конструкции измерительных приборов, что имеет существенное практическое значение для метрологической практики. В том числе, измерение коэффициента отражения выхода СВЧ генераторов без отстройки от несущей частоты.

Сравнительный анализ данных, проведенных экспериментальных исследований (рис. 62, с. 109) убедительно демонстрируют повышение точности измерений в 2,5 раза - с $\pm 0,016$ до $\pm 0,006$, что наглядно показывает преимущества разработанного ДМР перед существующими средствами измерений.

Результаты апробации разработанных методов передачи единицы мощности ЭМК в ходе аттестации эталона 1-го разряда «Калибратор мощности М1-10» демонстрируют их готовность к внедрению в метрологическую практику. Экспериментальные данные, приведенные в параграфе 4.4, подтверждающие достижение погрешности передачи на уровне $\pm 0,8\%$ (таблица 8, с. 116), что свидетельствует о двухкратном повышении точности по сравнению с существующими методами.

Представленные в главе материалы свидетельствуют о существенном вкладе

автора в развитие системы передачи единицы мощности ЭМК.

В разделе «заключение» перечислены основные положения, выносимые на защиту, практическая значимость и приведены основные итоги диссертационной работы.

Научная новизна диссертационной работы Матвеева А.И. заключается в следующем:

1. Разработан и экспериментально подтвержден метод измерения S-параметров термисторных преобразователей в нестандартизированных волноводных трактах СВЧ-диапазона, позволяющий установить количественную зависимость коэффициентов отражения и передачи от электрического сопротивления в частотном диапазоне 5,64-37,50 ГГц.

2. Предложены и реализованы оригинальные алгоритмы синтеза многозондовых систем термисторов с применением аппроксимации полиномами Чебышева второго порядка, обеспечивающие взаимную компенсацию векторов переотражений и достижение коэффициента отражения входа не более 0,03 во всем рабочем диапазоне частот.

3. Создана конструкция датчика мощности рассогласованного с регулируемой фазой коэффициента отражения, применение которого в составе комбинированного ваттметра позволило повысить точность измерений $|\Gamma_{\Sigma}(f)|$ в 2,5 раза (с $\pm 0,016$ до $\pm 0,006$) и обеспечить двукратное снижение погрешности передачи единицы мощности ЭМК.

4. Установлены и экспериментально подтверждены ключевые зависимости составляющих погрешности передачи единицы мощности от точностных характеристик средств измерений $|\Gamma_{\Sigma}(f)|$ и $|\Gamma_{\text{вх}}(f)|$, позволившие разработать комплексную методику минимизации погрешности рассогласования в измерительных трактах.

5. Полученные результаты защищены патентами на полезные модели и представляют собой существенный вклад в развитие теории и практики измерений мощности электромагнитных колебаний СВЧ-диапазона.

Практическая значимость исследования заключается в успешном внедрении разработанных методик и инструментов в метрологическую практику:

- многозондовые преобразователи мощности оконечного типа интегрированы в компарирующую установку ГЭТ 26-2010;
- разработанные датчики мощности рассогласованного типа применяются при массовом производстве и настройке ваттметров проходного типа;
- разработаны и запущены в серийное производство ваттметры оконечного типа МЗ-122 и проходного типа М1-37.

Основные положения и результаты работы внедрены в ФГУП «ВНИИФТРИ» при организации выпуска серийной продукции.

Достоверность результатов диссертации подтверждена комплексом теоретических и экспериментальных методов. Апробация на государственном

эталоны ГЭТ 26-2010 и аттестация эталонов 1-го разряда доказали воспроизводимость и стабильность характеристик разработанных методов и средств передачи единицы мощности ЭМК.

Результаты диссертационного исследования прошли **необходимую апробацию** и 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.

Автореферат соответствует содержанию и структуре диссертации. отражает основное содержание работы, а положения, выносимые на защиту, соответствуют представленным в диссертации результатам.

Замечания по диссертационной работе:

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 неопределенности 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.

Заключение

Диссертационная работа Матвеева А.И. представляет собой завершённое исследование, в котором решена актуальная задача повышения точности

измерений мощности в СВЧ-диапазоне. Теоретические и экспериментальные результаты имеют практическую значимость, подтверждённую внедрением в метрологическую практику.

Предложенные методы и алгоритмы позволяют снизить погрешность передачи единицы мощности ЭМК и обеспечивают соответствие современным требованиям к эталонной базе РФ. Результаты работы вносят значительный вклад в развитие метрологического обеспечения радиоэлектронной отрасли.

Диссертация и автореферат написаны грамотным научным языком, материал изложен последовательно и системно. Работа соответствует требованиям пунктов 9-14 Положения о порядке присуждения учёных степеней (утверждено постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 № 842), а её автор, А.И. Матвеев, заслуживает присуждения учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.2.10 «Метрология и метрологическое обеспечение».

Отзыв составил
кандидат физико-математических наук,
доцент, заместитель главного
конструктора Института
микроприборов и систем управления
(Институт МПСУ), Федеральное
государственное автономное
образовательное учреждение высшего
образования «Национальный
исследовательский университет
“Московский институт электронной
техники”» (НИУ МИЭТ).
Почтовый адрес: 124498, Москва,
г. Зеленоград., площадь Шокина, дом 1.
Тел. моб.: +7-(499)-720-87-55.
E-mail: kstl@mieee.ru

/Лялин К.С./

«05» ноября 2025 года

Подпись Лялина Константина Сергеевича удостоверяю:

Мухомов (М.П. Заичева) по пор. ОРП.

