



**Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт машиноведения им. А.А. Благонравова
Российской академии наук
(ИМАШ РАН)**

Малый Харитоньевский пер., дом 4, Москва, 101000
телефон/факс: (495) 624-98-00, (495) 624-98-63, e-mail: info@imash.ru, www.imash.ru
ОКПО 00224588, ОГРН 1037700067492, ИНН 7701018175, КПП 770101001

05.11.2015 № 4503-01/12-578
На № 02-08/8853 от 06.10.2015

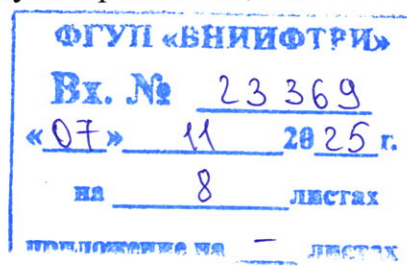
ОТЗЫВ

официального оппонента

на диссертационную работу МАТВЕЕВА Алексея Игоревича
«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»

Актуальность диссертационной работы.

Определение основных погрешностей передачи единицы мощности электромагнитных колебаний (ЭМК) в волноводных СВЧ-трактах и разработка мер по их устранению являются важнейшими задачами при проектировании методик и аппаратуры, направленных на повышение точности и надежности измерений СВЧ-мощности. Особое внимание уделяется конструкции эталонных устройств-переносчиков СВЧ-мощности, оснащенных специальными оконечными преобразователями и измерительными блоками. При создании эталонных средств измерений мощности используют чувствительные к СВЧ-полю диоды, термопары и термисторы. Наиболее чувствительным, стойким к перегрузкам СВЧ-мощности и статическому напряжению, как отмечает автор, является СВЧ-термистор.



Высокоточные измерения мощности ЭМК в волноводных СВЧ-трактах, используемых в современных радиоэлектронных средствах связи, навигации, локации и астрономии, обычно выполняют методом прямого сравнения с вторичными эталонами единиц СВЧ-мощности.

Используемые ранее для таких измерений отечественные ваттметры работают по принципу преобразования СВЧ-мощности в тепловую энергию с последующей регистрацией термо-ЭДС, пропорциональной величине падающей СВЧ-мощности. Основными недостатками данных приборов является нестабильность их чувствительных элементов, а также отсутствие цифровой архитектуры и невозможность интеграции в современные автоматизированные измерительные комплексы.

Для уменьшения погрешности передачи единицы СВЧ-мощности автор предложил новый метод и способ преобразования единицы мощности ЭМК, реализуемый в конструкции эталонных устройств-переносчиков СВЧ-мощности с применением согласующей электрической неоднородности и измерительных блоков. В качестве чувствительного элемента в такой измерительной системе используется термистор, который устанавливается в точке с максимальной напряженностью электрического поля волноводной линии передачи.

Принцип работы предложенных устройств основывается на изменении температуры термистора и соответственно его сопротивления под воздействием измеряемого СВЧ-поля, что позволяет фиксировать точный уровень передаваемой единицы СВЧ-мощности.

Исследования автора показали, что предложенный подход значительно уменьшает систематическую и случайную погрешность передачи единицы мощности ЭМК в волноводных линиях передачи прямоугольного сечения, заметно повышая общую точность и стабильность результатов радиотехнических измерений в диапазоне частот от 5,64 до 37,50 ГГц.

Таким образом, выбранная автором тема диссертации актуальна и обусловлена объективной потребностью совершенствования методов и средств радиотехнических измерений СВЧ-мощности, необходимых при передаче

единицы мощности ЭМК с использованием вторичных эталонов. Решение этой задачи достигается за счет внедрения цифровых технологий и методик измерений S-параметров векторным анализатором цепей (ВАЦ).

Общая характеристика диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Основное содержание работы изложено на 136 страницах. Включает 67 рисунков и 8 таблиц. Библиографический список состоит из 93 наименований на 10 страницах.

Объектом исследования являются волноводные преобразователи мощности ЭМК оконечного типа.

Целью диссертационного исследования является уменьшение погрешности передачи единицы мощности ЭМК в волноводных линиях передачи прямоугольного сечения.

Для достижения поставленных целей были использованы теория электрических цепей и сигналов, методы статистического анализа результатов радиоизмерений, а также подходы, основанные на функциях приближения. Эти научные инструменты обеспечили адекватность примененных полиномиальных моделей и позволили минимизировать погрешности измерений.

Предметом исследования являются методы и средства измерений метрологических характеристик преобразователей мощности при передаче единицы мощности ЭМК.

Основное содержание работы.

В первой главе изучены современные методы измерения СВЧ-мощности, выявлены основные причины погрешностей при передаче единиц мощности ЭМК. Особое внимание уделено выбору согласующих трансформаторов и чувствительных к СВЧ-полю термисторов.

Во второй главе описан оригинальный метод измерения S-параметров термисторов, используемых в качестве датчиков мощности в волноводных линиях передачи с нестандартным поперечным сечением. Разработанное устройство имеет продольный паз, позволяющий установить термистор именно там, где электрическое поле достигает максимальных значений. Такая установка

снижает воздействие паразитной индуктивности и увеличивает точность измерений. Для проведения исследований используется ВАЦ в заданной полосе частот. Специально разработанный набор калибровочных мер учитывает особенности конструкции волноводов нестандартного типа, обеспечивая точные результаты. Этот подход позволяет всесторонне исследовать поведение термистора в условиях СВЧ-поля, оценивая эффективность преобразования энергии ЭМК в тепло. Таким образом, новый метод существенно повышает информативность измерений и способствует лучшему пониманию взаимодействий термисторов с электромагнитным полем, что критически важно для разработки устройств контроля СВЧ-мощности.

В третьей главе исследуется преобразователь мощности ЭМК, использующий СВЧ-термистор и разработанный способ настройки коэффициента отражения. Установлено, что использование одиночного термистора не гарантирует достижение необходимого коэффициента отражения $|\Gamma_{\text{ВХ}}(f)|$ ниже 0,1. Автором предложена многозондовая система, представляющая собой матрицу термисторов, выполняющих роль чувствительного элемента и согласующего устройства для своего диапазона радиочастот, что позволило достичь коэффициента отражения меньше 0,1. Для точной настройки коэффициента отражения на входе использован алгоритм оптимизации, основанный на методе координатного спуска. Такой подход позволил минимизировать модуль коэффициента отражения $|\Gamma_{\text{ВХ}}(f)|$, достигнув показателя около 0,03 в широкой полосе частот.

Проведенные эксперименты подтвердили эффективность предложенной методики снижения погрешности передачи единицы мощности ЭМК, показывая полное соответствие стандартам, установленным для вторичных эталонов.

В четвертой главе автор рассматривает разработку нового метода и технических средств для измерения модуля эффективного коэффициента отражения $|\Gamma_{\text{ВХ}}(f)|$ входа ваттметра проходящей мощности. Для решения проблемы погрешности измерений были использованы стандартные методы косвенных измерений согласно действующему стандарту ГОСТ 8.392-80, внедрена

технология совокупных измерений и создана специальная конструкция рассогласованного датчика мощности.

Рассогласованный датчик позволил существенно сократить погрешность измерений $|\Gamma_{\Sigma}(f)|$: значение уменьшилось с $\pm 0,016$ до $\pm 0,006$. Практический опыт показал, что применение новых методик дает двукратный резерв точности за счет значительного снижения погрешности согласования измерительных каналов. Ошибка передачи была снижена до $\pm 0,8\%$ – показатель, соответствующий современным международным нормам для вторичных эталонов.

Научная новизна выполненных в диссертации исследований.

Разработан метод измерения S-параметров термисторов в волноводных трактах СВЧ-диапазона, позволяющий определять зависимость коэффициентов отражения и передачи от электрического сопротивления в диапазоне частот 5,64–37,50 ГГц. Предложена оригинальная методика расчета расстояний между термисторами с использованием аппроксимации полиномом Чебышева 2-го порядка. Разработаны алгоритмы настройки модуля коэффициента отражения с применением метода координатного спуска, позволяющие достигать значений $|\Gamma_{\text{вх}}|$ не более 0,03 в заданном диапазоне радиочастот.

Практическая значимость работы заключается в следующем:

разработана и внедрена многозондовая система термисторов в волноводные преобразователи мощности оконечного типа в диапазоне частот от 5,64 до 37,50 ГГц, что позволило минимизировать коэффициент отражения входа;

реализован метод уменьшения погрешности передачи единицы мощности ЭМК в промышленном образце эталона-переносчика с комплектом преобразователей и блоком измерительным для волноводных линий передачи.

Достоверность теоретических и практических результатов подтверждается различными способами апробации метода передачи размера единицы мощности ЭМК и проверкой долговременной стабильности метрологических характеристик волноводных ваттметров.

Апробация диссертационного исследования.

Материалы работы широко представлены в публикациях, а также доложены на международных и всероссийских конференциях. На основе результатов диссертационного исследования автором получено 5 полезных моделей и 2 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

По содержанию диссертации и автореферата можно сделать следующие замечания:

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

2. Автор выбрал уровень доверительной вероятности $P=0,95$, однако не привел 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.

Заключение о соответствии диссертации критериям, установленным Положением о порядке присуждения ученых степеней.

Проведенное исследование диссертационной работы Матвеева А.И. демонстрирует высокий уровень проработки заявленной проблематики. Работа посвящена решению актуальной задачи повышения точности передачи единицы мощности в СВЧ-диапазоне, что имеет существенное значение для современной метрологической практики.

В ходе анализа представленного материала выявлено, что автор успешно справился с поставленными задачами, предложив оригинальные технические решения и методологические подходы. Разработанные методы измерения S-параметров термисторов, алгоритмы расчета расстояний между элементами и способы компенсации многократных отражений существенно расширяют возможности современной измерительной техники.

Особую ценность представляют практические результаты исследования, включая достижение погрешности передачи единицы мощности на уровне $\pm 0,8\%$ при доверительной вероятности 0,95. Это достижение существенно улучшает существующие показатели и открывает новые перспективы для развития измерительной техники в СВЧ-диапазоне.

Автореферат соответствует основному содержанию диссертации. Диссертационное исследование соответствует требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям, и содержит все необходимые элементы научного труда. Работа характеризуется логичностью изложения, обоснованностью выводов и достоверностью полученных результатов.

На основании вышеизложенного можно заключить, что диссертационная работа Матвеева А.И. представляет собой законченную научно-квалификационную работу, в которой содержится решение задачи по уменьшению погрешности передачи единицы мощности ЭМК. Решение этой задачи вносит существенный вклад в развитие методов и средств измерений СВЧ-мощности. Результаты исследования имеют важное практическое значение и могут быть

использованы в деятельности метрологических институтов и измерительных лабораторий.

Диссертационная работа соответствует требованиям п. пп. 9-14 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук. Диссертационная работа отвечает требованиям ВАК, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор А.И. Матвеев, достоин присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.2.10 «Метрология и метрологическое обеспечение».

Отзыв составил:

доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник
лаборатории компьютерных систем автоматизации производства и
цифровых технологий ИМАШ РАН



Николаев Алексей Владимирович

«01» ноября 2025 г.

Почтовый адрес: 101000, Москва,
Малый Харитоньевский переулок, д.4.
Тел. моб.: +7-977-340-08-67.
E-mail: alarmoren@yandex.ru

Подпись руки Николаева А.В. заверяю:

Ученый секретарь ИМАШ РАН
кандидат технических наук



В.Ф. Юдкин