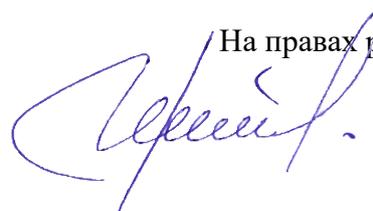


На правах рукописи



Матвеев Алексей Игоревич

РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ УМЕНЬШЕНИЯ ПОГРЕШНОСТИ
ПЕРЕДАЧИ ЕДИНИЦЫ МОЩНОСТИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ
КОЛЕБАНИЙ В ВОЛНОВОДНЫХ ТРАКТАХ СВЧ-ДИАПАЗОНА
И СРЕДСТВ ИХ РЕАЛИЗАЦИИ

Специальность 2.2.10 — Метрология и метрологическое обеспечение

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Менделеево — 2025

Работа выполнена в Федеральном государственном унитарном предприятии «Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений» (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 лаборатории компьютерных систем автоматизации производства и цифровых технологий Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук» (ФГБУН «ИМАШ РАН»), г. Москва.

Лялин Константин Сергеевич, кандидат физико-математических наук, доцент, заместитель директора «Института микроприборов и систем управления им. Л.Н. Преснухина» (Институт МПСУ), Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет “Московский институт электронной техники”» (НИУ МИЭТ), г. Зеленоград, г. Москва.

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение «Главный научный метрологический центр» Министерства обороны Российской Федерации (ФГБУ «ГНМЦ» Минобороны России), г. Мытищи, Московская обл.

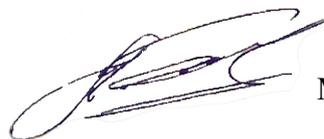
Защита диссертации состоится « 26 » ноября 2025 г. в _____ часов на заседании Диссертационного совета 32.1.004.01 при Федеральном государственном унитарном предприятии «Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений» (ФГУП «ВНИИФТРИ»).

141570, п.г.т. Менделеево, г.о. Солнечногорск, Московская обл.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГУП «ВНИИФТРИ» https://www.vniifri.ru/activity/dissertation_council/preliminary_consideration/

Автореферат разослан « ____ » _____ 2025 г.

Ученый секретарь Диссертационного совета,
кандидат физико-математических наук



М.В. Балаханов

Введение

Актуальность темы диссертации. Измерения мощности электромагнитных колебаний (ЭМК) являются одним из основных видов радиоизмерений в области сверхвысоких частот (СВЧ) и широко применяются в радиолокации, спутниковой связи, радиоастрономии, микроэлектронике и других областях радиоэлектроники. Высокий уровень технических характеристик современных радиоэлектронных комплексов и систем невозможно гарантировать без высокоточных измерений мощности электромагнитных колебаний, которые выполняют на различных этапах жизненного цикла изделий. При этом значительная часть измерительных задач в СВЧ-диапазоне связана с измерениями мощности в волноводных трактах. Точность таких измерений обеспечивается за счет использования СВЧ-ваттметров (преобразователей мощности), прослеживаемых к исходным эталонам единицы мощности электромагнитных колебаний.

Государственный первичный эталон единицы мощности электромагнитных колебаний в коаксиальных и волноводных трактах ГЭТ 26-2010 обеспечивает воспроизведение, хранение и передачу единицы мощности ЭМК в диапазоне от $1 \cdot 10^{-3}$ до $1 \cdot 10^{-2}$ Вт в диапазоне частот от 0,03 до 37,5 ГГц. Волноводные тракты с прямоугольными сечениями 35×15 ; $28,5 \times 12,6$; 23×10 ; 17×8 ; 16×8 ; $11 \times 5,5$; $7,2 \times 3,4$ мм, приведенные в ГОСТ 13317-89, обеспечивают работу в диапазоне частот от 5,64 до 37,50 ГГц. Передача единицы мощности ЭМК рабочим эталонам (РЭ) 1-го разряда в волноводных трактах выполняется методом прямого сличения их с вторичными эталонами (ВЭ) единицы мощности ЭМК, аттестованными на ГЭТ 26-2010. Схема передачи единицы мощности ЭМК РЭ 1-го разряда (ваттметру проходного типа) от ВЭ (ваттметра оконечного типа) приведена на рисунке 1.

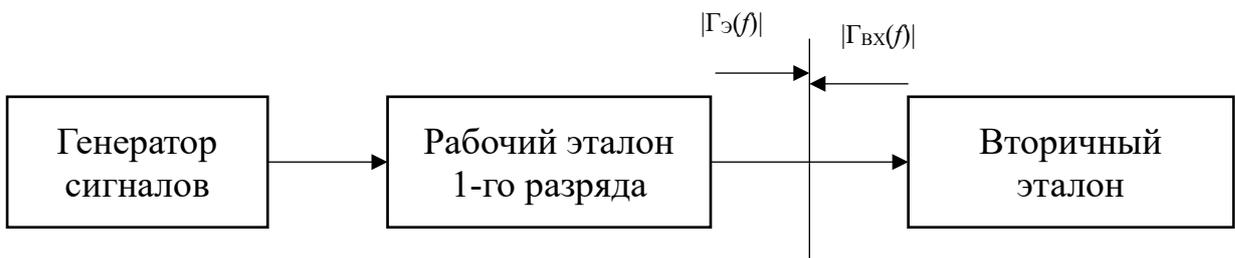


Рисунок 1 — Схема передачи единицы мощности ЭМК от ВЭ эталону 1-го разряда

При передаче единицы мощности ЭМК от ГЭТ 26-2010 или ВЭ эталону 1-го разряда определяют $\alpha(f)$ — частотный коэффициент (поправочный множитель), а уравнение измерений в таком случае имеет вид:

$$\alpha(f) = \frac{P_{ВЭ}}{N_{РЭ}} \cdot \frac{1}{|1 - \Gamma_{\text{Э}}(f) \cdot \Gamma_{\text{ВХ}}(f)|^2}, \quad (1)$$

где $P_{ВЭ}$ — измеренное значение мощности ВЭ; $N_{РЭ}$ — показания ваттметра проходного типа; $|\Gamma_{\text{Э}}(f)|$ — модуль эффективного коэффициента отражения выхода ваттметра проходного типа; $|\Gamma_{\text{ВХ}}(f)|$ — модуль коэффициента отражения входа ваттметра оконечного типа.

Доверительные границы относительной погрешности частотного коэффициента аттестуемого эталона определяются в соответствии с ГОСТ Р 8.736-2011 следующим выражением:

$$\Delta = \frac{\Theta + \Theta_p + t \cdot S}{S + \sqrt{S_p^2 + S_{\Theta}^2}} \cdot \sqrt{S^2 + S_p^2 + S_{\Theta}^2}, \quad (2)$$

где основными составляющими погрешности передачи единицы мощности ЭМК по схеме, приведенной на рисунке 1, являются: Θ — граница неисключенной систематической погрешности (НСП) эталонного ваттметра ВЭ; S — среднее квадратическое отклонение (СКО) результата измерений из-за неповторяемости фланцевых соединений; t — коэффициент Стьюдента; S_p — СКО неисключенной систематической погрешности рассогласования; S_{Θ} — СКО суммы составляющей НСП вторичного эталона; Θ_p — границы погрешности рассогласования.

Основной вклад в суммарное значение доверительных границ погрешности частотного коэффициента эталона 1-го разряда вносит Θ_p , значение которой определяют по уравнению:

$$\Theta_p = 2 \cdot |\Gamma_{\text{Э}}(f)| \cdot |\Gamma_{\text{ВХ}}(f)| \cdot 100 \%. \quad (3)$$

При этом Θ_p может достигать величины $\pm 1,2 \%$, что в 3 раза больше остальных составляющих в уравнении (2). В настоящее время возросло число потребителей новых эталонов мощности ЭМК с улучшенными точностными характеристиками доверительных границ относительной погрешности значений частотного коэффициента с $\pm 2,5 \%$ до $\pm 1,6 \%$ в диапазоне частот от 16,7 до 37,5 ГГц. Это привело к уменьшению запаса по точности между эталонами 1-го разряда и ВЭ.

Кроме того, уравнение (3) не учитывает погрешность измерений $|\Gamma_{\text{Э}}(f)|$ и $|\Gamma_{\text{ВХ}}(f)|$, что приводит к существенному увеличению погрешности измерений мощности ЭМК. С учетом погрешности измерений $|\Gamma_{\text{Э}}(f)|$ и $|\Gamma_{\text{ВХ}}(f)|$ уравнение Θ_p будет иметь вид:

$$\Theta_p = \sqrt{\left(2|\Gamma_{\text{Э}}||\Gamma_{\text{ВХ}}|\right)^2 + \left(\frac{\partial \Theta}{\partial \Gamma_{\text{Э}}(f)} \cdot \Delta|\Gamma_{\text{Э}}|\right)^2 + \left(\frac{\partial \Theta}{\partial \Gamma_{\text{ВХ}}(f)} \cdot \Delta|\Gamma_{\text{ВХ}}|\right)^2}, \quad (4)$$

где $\Delta|\Gamma_{\text{Э}}|$ — границы погрешности измерений $|\Gamma_{\text{Э}}|$; $\Delta|\Gamma_{\text{ВХ}}|$ — границы погрешности измерений $|\Gamma_{\text{ВХ}}|$.

В настоящее время возможности уменьшения $|\Gamma_{\text{Э}}(f)|$ ограничиваются конструктивными особенностями применяемых волноводных направленных ответвителей в ваттметрах проходного типа, а также технологическими ограничениями при их производстве.

Погрешность измерений $|\Gamma_{\Sigma}(f)|$ существующими средствами измерений (СИ) в настоящее время составляет $\pm 0,016$ при измеряемой величине $|\Gamma_{\Sigma}(f)| \leq 0,03$. Таким образом, вклад погрешности измерений $|\Gamma_{\Sigma}(f)|$ в суммарное значение Θ_p может достигать 50 %, что существенно снижает достоверность оценки погрешности рассогласования (Θ_p). Поэтому необходимо разработать методы и СИ величины $|\Gamma_{\Sigma}(f)|$, обеспечивающие повышение точности измерений и позволяющие выполнять измерения без нарушения целостности конструкции РЭ (ваттметров проходного типа).

Кроме того, необходимо уменьшить значения $|\Gamma_{ВХ}(f)|$. Для того чтобы обеспечить требуемый запас по точности, необходимо уменьшить величину $|\Gamma_{ВХ}(f)|$ с 0,15 до величины, не превышающей 0,03 во всем рабочем диапазоне частот.

Предлагаемые подходы к повышению точности измерений $|\Gamma_{\Sigma}(f)|$ и уменьшению $|\Gamma_{ВХ}(f)|$ обеспечат снижение погрешности рассогласования до 0,4 %, что позволит повысить точность передачи единицы мощности ЭМК.

Для передачи единицы мощности ЭМК от ГПЭ вторичным эталонам и рабочим эталонам 1-го разряда, как правило, используют термисторные ваттметры оконечного типа благодаря высокой стабильности их метрологических характеристик.

Исследованию методов передачи единицы мощности СВЧ с использованием термисторных ваттметров посвящены работы Фрумкина В.Д., Чуйко В.Г., Проненко В.И., Механикова А.И. и др., в которых был предложен ряд подходов к уменьшению погрешности рассогласования. Однако рассмотренные в работах названных авторов решения могут эффективно применяться только на частотах, каждая из которых ограничена конструкцией преобразователей мощности, и не могут обеспечивать достаточной точности во всем рабочем диапазоне частот приемо-передающего тракта. Это подтверждает актуальность поиска путей уменьшения погрешности рассогласования при воспроизведении и передаче единицы мощности ЭМК в волноводных трактах в диапазоне частот от 5,64 до 37,50 ГГц.

Целью диссертационной работы является уменьшение погрешности передачи единицы мощности электромагнитных колебаний в волноводных трактах СВЧ-диапазона.

Возросшие требования потребителей к точностным характеристикам эталонов 1-го разряда в расширенном диапазоне частот привели к несоответствию между точностными характеристиками существующей системы передачи единицы мощности ЭМК в волноводных трактах и современными требованиями к точности передачи единицы мощности ЭМК. Это подтверждает **актуальность научной задачи**, которая заключается в разработке методов уменьшения погрешности рассогласования при передаче единицы мощности электромагнитных колебаний в волноводных трактах и средств реализации этих методов.

Для решения научной задачи в диссертационной работе были поставлены и решены следующие **частные научные задачи**:

1. Разработать метод измерений S -параметров термисторов в волноводных трактах в диапазоне частот от 5,64 до 37,50 ГГц.
2. Разработать широкополосный волноводный преобразователь оконечного типа с коэффициентом отражения входа не более 0,03 ($|Γ_{вх}|$).
3. Разработать СИ модуля эффективного коэффициента отражения выхода ваттметров проходного типа с погрешностью измерений этого модуля не более $±0,008$ ($|Γ_{э}|$).
4. Разработать волноводные ваттметры оконечного типа, соответствующие требованиям, предъявляемым к вторичным эталонам ГПС для СИ мощности ЭМК в диапазоне частот от 5,64 до 37,50 ГГц.

Объектом исследования являются волноводные преобразователи мощности электромагнитных колебаний оконечного типа.

Предметом исследования выступают методы и СИ метрологических характеристик ваттметров СВЧ.

Положения, выносимые на защиту:

1. Разработанный метод измерений S -параметров термисторов в нестандартных волноводных трактах прямоугольного сечения позволяет определить диапазон регулировки модулей и фаз коэффициентов отражения (S_{11}) и передачи (S_{21}) термисторных СВЧ-датчиков, зависящий от величины установленного электрического сопротивления на интервалах S_{11} от 0,05 до 0,45 и S_{21} от 0,80 до 0,99.
2. Разработанные преобразователи мощности оконечного типа обеспечивают достижение значений модуля коэффициента отражения входа, не превышающих 0,03 на произвольных частотах волноводного тракта, за счет применения многозондовой системы термисторов, выполняющей одновременно функции согласующего трансформатора и чувствительного элемента.
3. Применение разработанного рассогласованного датчика мощности обеспечивает уменьшение погрешности измерений модуля эффективного коэффициента отражения выхода ваттметров проходного типа $|Γ_{э}|$ в 2 раза (с $±0,016$ до $±0,008$) за счет использования отражателя из радиопоглощающего материала и размещения чувствительного элемента на его отражающей плоскости в максимуме электромагнитного поля.
4. Использование разработанного ваттметра комбинированного, включающего многозондовый преобразователь мощности оконечного типа и датчик мощности рассогласованный, позволяет уменьшить относительную погрешность передачи единицы мощности электромагнитных колебаний до 2 раз за счет уменьшения погрешности рассогласования.

Методы исследования. При решении частных научных задач использовались математический аппарат теории цепей, возможности матричной алгебры и статистической обработки результатов измерений, методы математического моделирования, методы теории погрешности.

Достоверность результатов 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.

Научная новизна работы и полученных результатов:

1. 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. Предложены и внедрены алгоритмы расчета 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.

Практическая значимость результатов исследований заключается в интеграции многозондовой системы термисторов в волноводные преобразователи мощности оконечного типа в диапазоне частот от 5,64 до 37,50 ГГц, которая 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 комплексу измерительной системы К6-19 с погрешностью не более $\pm 0,8$ %.

Основные положения и **результаты работы внедрены** при разработке:

— многозондовых преобразователей мощности оконечного типа, которые включены в состав компарирующей установки ГЭТ 26-2010 [9] 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 применен разработанный датчик мощности с изменяемой фазой коэффициента отражения входа;

— измерительной системы К6-19 и ее 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 ГЭТ26-2010 стационарному комплексу ведомственных эталонов мощности ЭМК.

Личный вклад автора заключается в обосновании и реализации оригинальных подходов к уменьшению погрешности передачи размера единицы мощности ЭМК. Автором лично проведены все теоретические расчеты 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 провел апробацию результатов на различных научно-практических конференциях.

Апробация результатов диссертационной работы. Основные положения работы представлены на международных и всероссийских конференциях и конкурсах: Научно-практическая конференция молодых ученых, аспирантов и специалистов «Метрология в XXI веке» 2016–2023 гг.; Всероссийская научно-техническая конференция «Метрология в радиоэлектронике» 2016, 2018 гг.; Научно-техническая конференция АО «НПП “Исток” им. Шокина» «СВЧ-электроника» 2019 г.; Международная научно-техническая конференция «Метрология» 2019 г.; General Assembly and Scientific Symposium of the International Union of Radio Science URSI GASS 2020 г.; Всероссийская научно-практическая конференция молодых ученых и специалистов к 180-летию ВНИИМ им. Д.И. Менделеева 2022 г.; Всероссийская межвузовская научно-техническая конференция студентов и аспирантов «Микроэлектроника и информатика» 2022 г.; Всероссийская научно-практическая конференция молодых ученых и

специалистов «За нами будущее» и международный конкурс «Лучший молодой метролог КО-ОМЕТ» 2023 г.; IEEE 9th All-Russian Microwave Conference (RMC) 2024 г.; Всероссийская научно-техническая конференция «Электроника и микроэлектроника СВЧ» 2024 г.; Конференция РОСТЕХ «Метрология — основа качества» 2024 г.; Пилотный международный конкурс «Лучший молодой метролог МГС СНГ» 2024 г.

Материалы диссертации **опубликованы** в 16 статьях, в т. ч. в 5 статьях в изданиях из перечня ВАК российских рецензируемых изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертации, и 10 докладах на научно-технических конференциях. Получены 5 патентов на полезные модели, 2 свидетельства на программы для ЭВМ.

Структура и объем работы

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.

Основное содержание работы

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы; указана цель исследования; сформулированы основные положения, выносимые на защиту, научная новизна; определены практическая значимость результатов исследования и личный вклад автора.

В **главе 1** оценивается соответствие существующей в Российской Федерации системы передачи единицы мощности ЭМК в волноводных трактах современным потребностям предприятий промышленности и научно-исследовательских организаций. Проанализирован парк средств измерений, применяемых при передаче единицы мощности ЭМК.

Установлено, что находящиеся в эксплуатации прецизионные средства измерений не соответствуют современным требованиям, предъявляемым к вторичным эталонам в части модуля коэффициента отражения входа ($|\Gamma_{\text{вх}}(f)| \leq 0,1$) и погрешности передачи единицы мощности ЭМК ($\delta \leq \pm 1,2 \%$). Значения модуля коэффициента отражения находящихся в эксплуатации ваттметров оконечного типа $|\Gamma_{\text{вх}}(f)|$ увеличиваются с ростом частоты до значений 0,15, что приводит к значительному увеличению погрешности рассогласования при передаче единицы мощности СВЧ в диапазоне частот от 5,64 до 37,50 ГГц. Для уменьшения погрешности передачи единицы мощности ЭМК предложено уменьшать модуль коэффициента отражения входа ваттметров оконечного типа.

Для уменьшения $|\Gamma_{\text{вх}}(f)|$ предложено использовать согласующие волноводно-волноводные трансформаторы, к которым подключается многозондовая система термисторов, являющаяся одновременно и чувствительным элементом, и управляемой электрической неоднородностью в электромагнитном поле.

Погрешность рассогласования при передаче единицы мощности ЭМК также зависит от значений модуля эффективного коэффициента отражения выхода ваттметра проходного типа ($|\Gamma_{\text{э}}(f)|$) в соответствии с выражением (2). В настоящее время типовым значением $|\Gamma_{\text{э}}(f)|$ для волноводных ваттметров проходного типа в диапазоне частот от 5,64 до 16,70 ГГц является значение 0,03, а на частотах свыше 16,70 ГГц величина $|\Gamma_{\text{э}}(f)|$ достигает 0,05. В ходе оценки погрешности измерений $|\Gamma_{\text{э}}(f)|$ существующими методами и средствами измерений установлено, что она может достигать $\pm 0,016$, что снижает достоверность полученных результатов измерений $|\Gamma_{\text{э}}(f)|$. В ходе экспериментальной оценки источников погрешности измерений $|\Gamma_{\text{э}}(f)|$ установлено, что нестабильность модуля коэффициента отражения входа применяемых подвижных короткозамыкателей является доминирующей составляющей погрешности измерений $|\Gamma_{\text{э}}(f)|$.

В результате проведенного анализа сформулирована научная задача исследований, а также выделены частные научные задачи, решение которых позволяет уменьшить погрешность передачи единицы мощности ЭМК в волноводных трактах в диапазоне частот от 5,64 до 37,50 ГГц от ВЭ к эталонам 1-го разряда.

Глава 2 посвящена разработке метода измерений S -параметров СВЧ-термисторов, используемых в преобразователях мощности ЭМК, и исследованию зависимости модулей коэффициента отражения и передачи от электрического сопротивления, установленного на термисторе.

При производстве термисторов к основным характеристикам относят: номинальное сопротивление, температурный коэффициент сопротивления, мощность подогрева, вольтамперную характеристику, СКО уровня собственных шумов. Однако основные характеристики термистора, используемого в ваттметрах, определяют на постоянном токе, что не позволяет в полном объеме оценить возможность его использования в СВЧ-диапазоне на частотах от 5,64 ГГц до 37,5 ГГц. Наиболее информативными являются измеренные в СВЧ-диапазоне значения S -параметров термисторов, однако соответствующих методов исследования зависимостей коэффициента отражения и передачи термистора от электрического сопротивления в настоящее время нет.

При установке термистора в волноводные тракты стандартных сечений по ГОСТ 13317-89 в диапазоне частот от 5,64 до 37,50 ГГц длина проволочных выводов превышает длину тела термистора не менее чем в 2 раза. Из-за этого индуктивное сопротивление значительно

превышает емкостное и активное сопротивления рабочего тела термистора. Поэтому использование термистора в стандартизированном волноводном тракте приводит к снижению его чувствительности и, как следствие, уменьшению динамического диапазона измерений мощности ЭМК и нелинейной зависимости поправочного множителя термистора от частоты. Для уменьшения влияния индуктивного сопротивления разработан датчик СВЧ-мощности термисторный (ТВ-1), в котором высота стенки волновода b ТВ-1 была уменьшена до 1 мм, что представлено на рисунке 2.

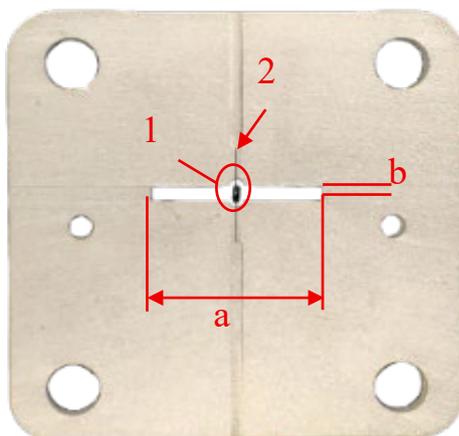


Рисунок 2 — Датчик СВЧ-мощности термисторный ТВ-1

Разработанная конструкция позволяет снизить индуктивное сопротивление термистора за счет минимизации длины проволочных выводов термистора. В волноводном тракте расположено только тело термистора (1 на рис. 2), а проволочные выводы находятся за его пределами (2 на рис. 2). Термистор в ТВ-1 установлен по центру широкой стенки в разработанном сниженном по узкой стенке волноводном тракте.

На основе данной конструкции ТВ-1 предложен метод исследования S -параметров термисторов, предназначенный для измерений в волноводных трактах прямоугольного сечений 35×1 , $28,5 \times 1$, 23×1 , 17×1 , 16×1 , 11×1 , $7,2 \times 1$ мм, обеспечивающих перекрытие по частоте от 5,64 до 37,50 ГГц. В ходе выполнения диссертационной работы метод исследования S -параметров был апробирован в трактах 11×1 и $7,2 \times 1$ мм. Определены зависимости модулей коэффициента отражения $S_{11}(f)$ и передачи $S_{21}(f)$ термистора от установленного электрического сопротивления.

Известно, что относительная диэлектрическая проницаемость термистора составляет $\epsilon_z \approx 10 \div 15$; при этом диаметр термистора — $d \approx 0,3$ мм, диаметр его выводов — $D \approx 0,025$ мм; длина тела термистора — $L \approx 1,2$ мм, а длина всего зонда с выводами — $l = b$ мм, где b — высота волноводного тракта. При наличии входных данных получены значения импеданса

термистора Z , через который выражаются теоретические значения $S_{11}(f)$ термистора и находятся в диапазоне от 0,05 до 0,50, для значений $S_{21}(f)$ находятся в диапазоне от 0,80 до 1,00:

$$S_{11}(f) = \frac{-1}{2Z+1}; \quad (5)$$

$$S_{21}(f) = \frac{2Z}{2Z+1}. \quad (6)$$

Полученные теоретические значения были использованы для подтверждения практических результатов измерений разработанным методом.

Для оценки значений модуля и фазы коэффициента отражения и передачи ТВ-1 предложен метод измерения $S_{11}(f)$, $S_{12}(f)$, $S_{21}(f)$, $S_{22}(f)$ термистора, который был реализован с применением векторного анализатора цепей. Поскольку волноводные тракты с разработанным поперечным сечением ($a \times 1$ мм, где a — стенка волновода, определяющая рабочий диапазон частот) не выпускаются, для смещения плоскости калибровки векторного анализатора цепей в произвольный волноводный тракт прямоугольного сечения разработаны комплекты волноводных согласующих трансформаторов электромагнитного поля с целью перехода из стандартизированного волноводного тракта по ГОСТ 13317-89 в требуемый произвольный волноводный тракт прямоугольного сечения. Разработаны волноводные ступенчатые трансформаторы с применением метода расчета неэквидистантных устройств. Было получено аналитическое значение модуля коэффициента отражения входа $|\Gamma_{\text{вх}}(f)|$ по выражению:

$$|\Gamma(f)| = \Gamma_R \cdot \prod_{i=1}^n \left| \cos \left(\frac{2\pi \cdot l_i}{\lambda_g(f)} \right) \right|, \quad (7)$$

где $\lambda_g(f)$ — длина волны в волноводе; l — длина волноводной ступени; $\Gamma_R = b1/b2$, где $b1$ — размер стенки b регулярного волновода в мм, $b2$ — размер стенки b сниженного волновода в мм.

Для уточнения взаимных переотражений векторов модулей и фаз ступенчатых неоднородностей было выполнено моделирование в системе автоматизированного проектирования. Подтверждено соответствие теоретических расчетов и практических измерений S_{11} волноводного ступенчатого трансформатора. Значения модуля коэффициента отражения входа разработанных волноводных ступенчатых трансформаторов не превышают 0,03. Сравнение математического расчета, электродинамического моделирования и практических измерений в диапазоне частот приведены на рисунке 3. Блок-схема измерений модулей коэффициента отражения и передачи термистора в сниженном по узкой стенке волноводном тракте представлена на рисунке 4.

Для калибровки векторных анализаторов цепей (ВАЦ) в предложенных нестандартных сечениях волноводных трактов разработан комплект калибровочных мер, каждый из которых включает в себя меры «Короткое замыкание» (Reflect), «Отрезок линии $\lambda/4$ » (Line), «Прямое

соединение» (Through). Разработанные меры позволили выполнять смещение плоскости калибровки методом TRL в произвольных волноводных трактах прямоугольного сечения.

Разработанный метод измерений параметров $S_{11}(R_t)$ и $S_{21}(R_t)$ термисторов в волноводных трактах СВЧ-диапазона в сниженном по узкой стенке волноводном тракте позволил определить зависимость параметров S_{11} и S_{21} термисторов от установленного электрического сопротивления (R_t). Теоретический расчет предельных значений S -параметров позволил задать критерий соответствия термисторов требованиям, при выполнении которых термистор может быть использован в измерительных преобразователях мощности оконечного типа. Результаты теоретического расчета и практического эксперимента приведены на рисунках 5 и 6.

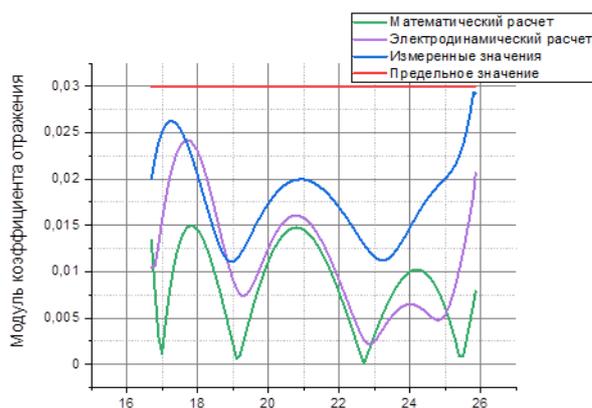


Рисунок 3 — Результаты расчета модуля коэффициента отражения и измерений макета волноводно-волноводного трансформатора



Рисунок 4 — Блок-схема установки измерений модулей коэффициента отражения и передачи термистора

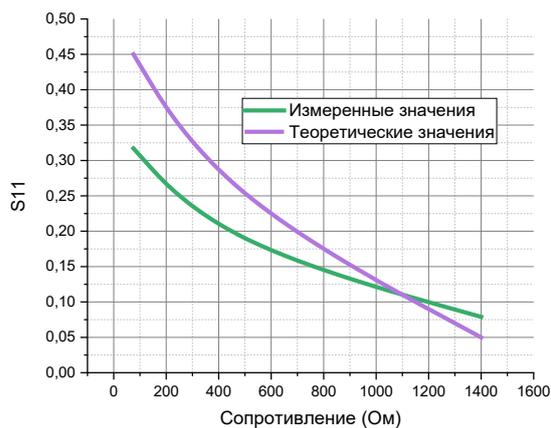


Рисунок 5 — Зависимость модуля коэффициента отражения термистора от электрического сопротивления

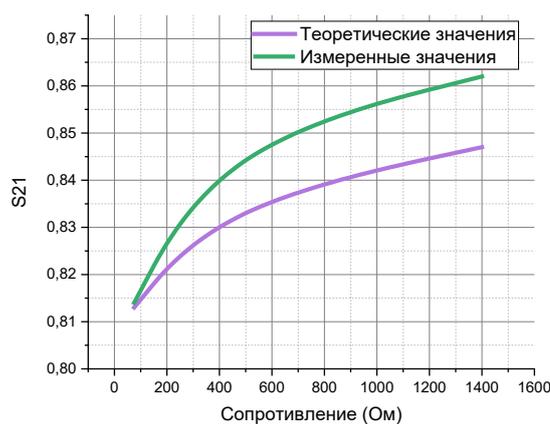


Рисунок 6 — Зависимость модуля коэффициента передачи термистора от электрического сопротивления

Было показано, что результаты теоретического расчета и практических исследований подтверждают зависимости параметров S_{11} и S_{21} от установленного электрического сопротивления термистора.

В результате проведенных исследований разработан метод измерений $S_{11}(f)$ и $S_{21}(f)$ термисторного СВЧ-датчика в сниженных по узкой стенке волноводных трактах СВЧ-диапазона. Определена зависимость параметров $S_{11}(R)$ и $S_{21}(R)$ термисторов от электрического сопротивления. Задан критерий соответствия термисторов требованиям для применения в измерительных преобразователях мощности: значения $S_{11}(R_i)$ должны находиться в пределах от 0,05 до 0,45, а значения $S_{21}(R_i)$ — в пределах от 0,80 до 1,00. Важно отметить, что модуль коэффициента отражения отдельно взятого термистора может превышать допустимое значение $S_{11}(f) \leq 0,03$ и достигать 0,45 (см. рисунок 5). Для достижения значений $|\Gamma_{\text{вх}}(f)| \leq 0,03$ было предложено использовать термистор совместно с волноводным согласующим трансформатором электромагнитного поля.

В главе 3 приведены результаты разработки согласующего широкополосного волноводного преобразователя мощности с настраиваемым коэффициентом отражения, который обеспечивает создание ваттметров оконечного типа с коэффициентом отражения входа не более 0,03.

В качестве прототипа была рассмотрена конструкция преобразователя мощности оконечного типа, в которой установлен один термисторный СВЧ-датчик.

Термисторный СВЧ-датчик обеспечивает возможность минимизации модуля коэффициента отражения (S_{11}) входа преобразователя мощности оконечного типа, используя предварительно измеренную зависимость S -параметров термистора (R_i) от установленного электрического сопротивления разработанным методом в ограниченном диапазоне частот.

Диапазон частот, в котором обеспечивается согласование с трактом, ограничен узким диапазоном частот, при котором длина СВЧ-тракта от места его размещения до короткозамыкателя соответствует четверти длины волны.

Предложено использовать двухрядные решетки термисторов (пара СВЧ-термисторов, расположенных последовательно вдоль волноводного тракта), позволяющие минимизировать коэффициент отражения входа преобразователя мощности оконечного типа. Установлено, что для достижения требуемого значения коэффициента отражения входа преобразователя мощности в диапазоне частот волноводного тракта требуется минимум две решетки.

Поэтому для достижения требуемых значений модуля коэффициента отражения входа измерительных преобразователей мощности оконечного типа на уровне, не превышающем 0,03, была предложена и реализована следующая конструкция. Вдоль линии распространения электромагнитной волны устанавливается несколько СВЧ-термисторов, объединенных в

регулируемую многозондовую систему (чувствительный элемент). Система образована двумя парами двухрядных решеток.

Расстояния между решетками (l_1 и l_2) получены методом аппроксимации частотной зависимости коэффициента отражения полиномом Чебышева 2-го порядка.

Для снижения индуктивности выпускаемых термисторов система СВЧ-термисторов реализована в волноводном тракте, сниженном по узкой стенке до 1 мм. Схема конструкции изображена на рисунке 7.

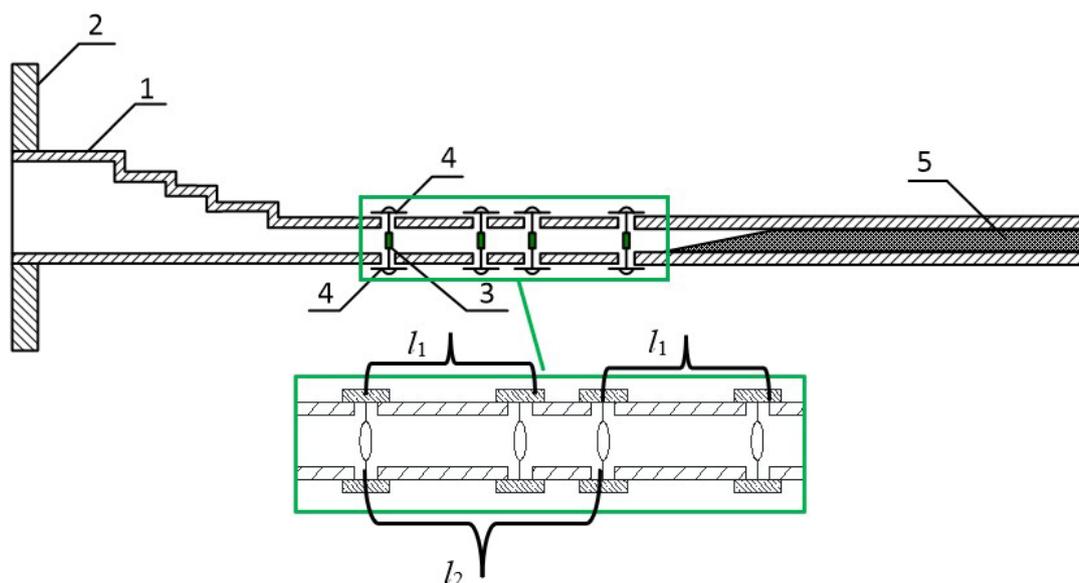


Рисунок 7 — Эскиз многозондового преобразователя мощности оконечного типа:

1 — волноводный канал; 2 — фланцевый соединитель; 3 — СВЧ-термистор (зонд);

4 — электрическая емкость; 5 — согласованная нагрузка

Предложенная конструкция обеспечивает взаимную компенсацию векторов переотраженных волн в измерительном тракте за счет использования априорной информации о зависимости модуля коэффициента отражения входа измерительного преобразователя мощности оконечного типа $|\Gamma_{ВХ}(f)|$ от установленного электрического сопротивления на каждом термисторе многозондовой системы ($R_{t_1}, R_{t_2}, R_{t_3}, R_{t_4}$).

Настройка модуля коэффициента отражения входа измерительного преобразователя мощности оконечного типа $|\Gamma_{ВХ}|(R_{t_1}, R_{t_2}, R_{t_3}, R_{t_4})$ выполнена на фиксированных частотах рабочего диапазона волноводного тракта путем регулировки электрического сопротивления каждого термистора многозондовой системы термисторов ($R_{t_1}, R_{t_2}, R_{t_3}, R_{t_4}$). Для поиска минимальных значений $|\Gamma_{ВХ}(f)|$ был разработан алгоритм поиска минимума методом координатного спуска. Коэффициент отражения входа многозондового преобразователя мощности

оконечного типа представлен в виде последовательно соединенных четырехполюсников в волноводном тракте и имеет параметры $S_{11}(f)$, $S_{21}(f)$, $S_{12}(f)$, $S_{22}(f)$. Таким образом, модуль коэффициента отражения входа определяется выражением:

$$|\Gamma_{\text{ВХ}}(f)| = S_{11} + \frac{S_{12} \cdot S_{21} \cdot \Gamma_{(t_1 \dots \text{НС})}}{1 - S_{22} \cdot \Gamma_{(t_1 \dots \text{НС})}}, \quad (8)$$

где S_{11} — модуль и фаза коэффициента отражения волноводного ступенчатого трансформатора; S_{21} — модуль и фаза коэффициента передачи волноводного ступенчатого трансформатора; $\Gamma_{(t_1 \dots \text{НС})}$ — суммарное значение модуля коэффициента отражения термисторов и согласованной нагрузки.

Настройка модуля коэффициента отражения входа преобразователя мощности оконечного типа с многоэлементной системой термисторов осуществлялась путем нахождения локального минимума для каждого термисторного СВЧ-датчика на фиксированной частоте волноводного тракта до достижения глобального минимума модуля коэффициента отражения входа преобразователя мощности. Поиск глобального минимума был выполнен на частотах с шагом 1 ГГц, обеспечивающим достижение $|\Gamma_{\text{ВХ}}(f)| \leq 0,03$ во всем диапазоне частот волноводного тракта. В процессе экспериментальной отработки настройки $|\Gamma_{\text{ВХ}}(f)|$ было показано, что поиск минимального значения коэффициента отражения входа преобразователя мощности необходимо осуществлять последовательно, начиная с последнего элемента многоэлементной структуры термисторов.

В результате экспериментального опробования разработанного алгоритма поиска минимальных значений $|\Gamma_{\text{ВХ}}(f)|$ преобразователя мощности оконечного типа подтверждено практическое достижение значений 0,03 и менее. Траектории координатного спуска при поиске минимального значения $|\Gamma_{\text{ВХ}}(f)|$ преобразователя мощности оконечного типа разработанным методом на фиксированных частотах изображены на рисунке 8 для фиксированных частот 16,70; 22,00; 25,86 ГГц, а на рисунке 9 в качестве примера приведены результаты настройки $|\Gamma_{\text{ВХ}}(f)|$ на фиксированных рабочих частотах волноводного тракта $11 \times 5,5$ мм, соответствующего частотному диапазону от 16,70 до 25,86 ГГц.

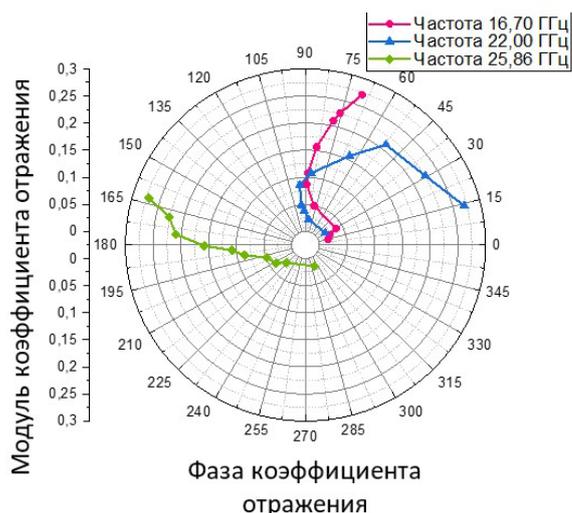


Рисунок 8 — Ход координатного спуска при поиске минимального значения модуля коэффициента отражения входа многоэлементного преобразователя мощности оконечного типа

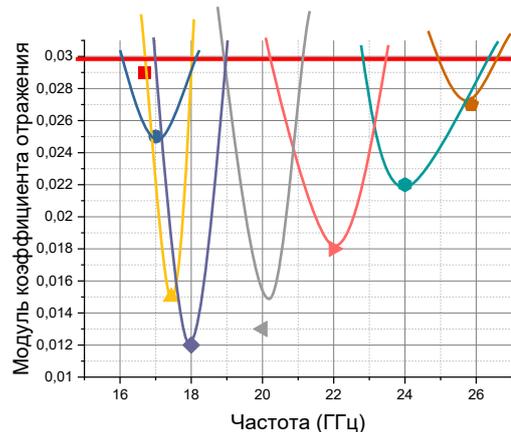


Рисунок 9 — Значения модуля коэффициента отражения входа многоэлементного преобразователя мощности оконечного типа на рабочих частотах

В результате настройки $|\Gamma_{\text{ВХ}}(f)|$ получен набор сопротивлений, зависящих от частоты $R_{t_1}(f)$, $R_{t_2}(f)$, $R_{t_3}(f)$, $R_{t_4}(f)$. Полученные значения сопротивлений $R_{t_1}(f)$, $R_{t_2}(f)$, $R_{t_3}(f)$, $R_{t_4}(f)$ применяются при измерениях на задаваемых частотах, в том числе при измерении поправочного множителя (калибровочного коэффициента). Пример набора сопротивлений приведен в таблице 1.

Таблица 1 — Рабочие сопротивления термисторов

Частота, ГГц	R_{t_1} , Ом	R_{t_2} , Ом	R_{t_3} , Ом	R_{t_4} , Ом	K_K	$ \Gamma_{\text{ВХ}} $
16,70	200	210	62	105	0,785	0,029
17,00	160	136	105	105	0,826	0,025
17,5	105	105	105	105	0,777	0,015
18,00	62	62	136	62	0,747	0,012
20,00	30	250	30	30	0,665	0,013
22,00	62	251	62	217	0,595	0,018
24,00	62	62	240	136	0,550	0,022
25,86	217	62	251	160	0,599	0,027

Определение поправочного множителя (частотный коэффициент) K_K и доверительных границ ($[t_{\Sigma}S_{\Sigma}]$) разработанного измерительного преобразователя мощности оконечного типа выполнялось с применением компарирующей установки из состава ГЭТ 26-2010. Полученные значения частотного коэффициента в зависимости от частоты ($K_K(f)$) и $[t_{\Sigma}S_{\Sigma}]$ приведены на рисунке 10.

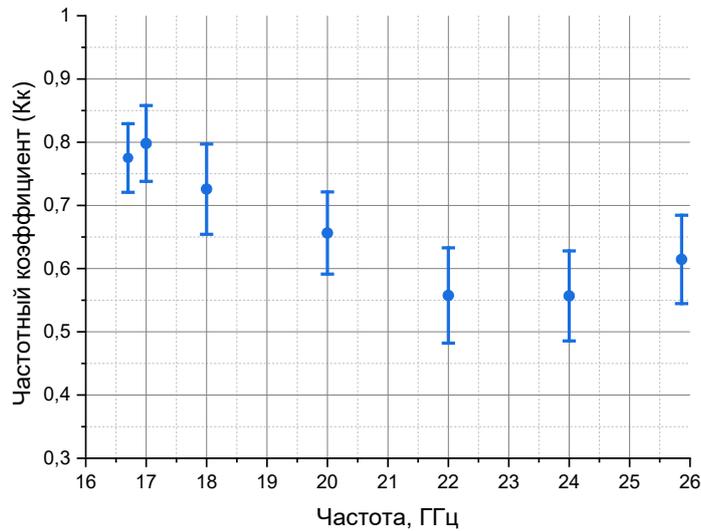


Рисунок 10 — Зависимость частотного коэффициента от частоты ($K_k(f)$) экспериментального образца преобразователя мощности оконечного типа и его доверительные границы суммарной относительной погрешности

В результате разработки согласующего широкополосного волноводного преобразователя с настраиваемым коэффициентом отражения созданы опытные образцы ваттметров оконечного типа с $|\Gamma_{\text{вх}}(f)| \leq 0,03$ (допуск 0,1). Доверительные границы суммарной относительной погрешности поправочного множителя не превышают $\pm 0,8\%$ при доверительной вероятности 0,95 (допустимое значение не более $\pm 1,2\%$). Полученные характеристики разработанного преобразователя мощности оконечного типа соответствуют требованиям, предъявляемым к вторичным эталонам согласно ГПС.

В главе 4 решена задача повышения точности измерений модуля эффективного коэффициента отражения выхода ваттметров проходного типа $|\Gamma_{\text{э}}(f)|$ в волноводных трактах. Приведены результаты экспериментальных исследований предложенного подхода к передаче единицы мощности ЭМК от разработанного измерительного преобразователя мощности оконечного типа к эталону 1-го разряда.

В соответствии с выражением (3) погрешность рассогласования (Θ_p) зависит от двух параметров и точности их измерений:

- модуля коэффициента отражения входа ваттметра оконечного типа $|\Gamma_{\text{вх}}(f)| \leq 0,03$;
- модуля эффективного коэффициента отражения выхода ваттметра проходного типа $|\Gamma_{\text{э}}(f)| \leq 0,03$ (аттестуемого эталона 1-го разряда мощности ЭМК).

В настоящее время пределы погрешности измерений $|\Gamma_{\text{э}}(f)|$ достигают $\pm 0,016$. При этом нормируемое значение составляет не более 0,03. При расчете погрешности передачи единицы мощности ЭМК используют полученное значение $|\Gamma_{\text{э}}(f)|$, определенное в ходе периодической аттестации эталона 1-го разряда. Существующие СИ не позволяют повысить точность

измерений модуля коэффициента отражения выхода $|\Gamma_{\text{Э}}(f)|$ без нарушения целостности конструкции.

С целью повышения точности измерений $|\Gamma_{\text{Э}}(f)|$ была предложена конструкция датчика мощности рассогласованного (ДМР), позволяющего измерять $|\Gamma_{\text{Э}}(f)|$ без нарушения целостности конструкции ваттметров проходного типа. Уменьшение погрешности измерений $|\Gamma_{\text{Э}}(f)|$ достигается за счет повышения калибровочного коэффициента датчика мощности рассогласованного при перемещении вдоль волноводного тракта в конструкции разработанного датчика мощности рассогласованного. Благодаря этому точность измерений $|\Gamma_{\text{Э}}(f)|$ повышена в 2,5 раза; таким образом, погрешность измерений $|\Gamma_{\text{Э}}(f)|$ уменьшена с $\pm 0,016$ до $\pm 0,006$. Внешний вид конструкции приведен на рисунке 11.

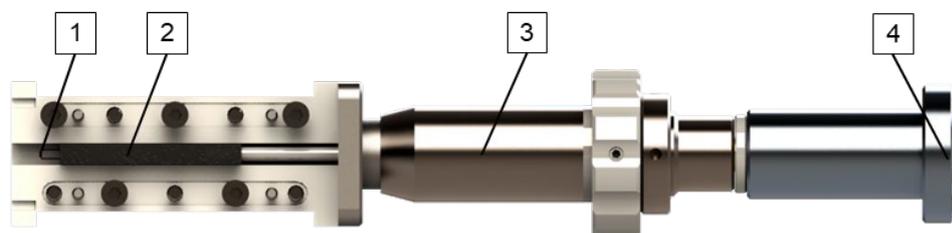


Рисунок 11 — Внешний вид конструкции ДМР: 1 — термисторный зонд;
2 — рассогласованная нагрузка; 3 — механизм перемещения;
4 — разъем подключения к измерительному блоку

Разработанный ДМР опробован при передаче единицы мощности ЭМК эталону 1-го разряда «Калибратор мощности М1-10» при выполнении работ по его аттестации. Выполнено сравнение полученных результатов с применением эксплуатируемых СИ для измерений $|\Gamma_{\text{Э}}(f)|$, находящегося в эксплуатации, и разработанных ДМР. Сравнение результатов измерений приведено на рисунке 12.

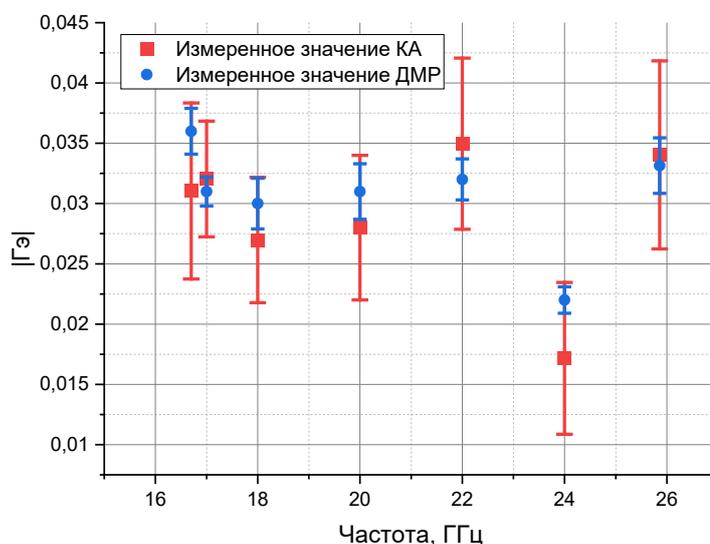


Рисунок 12 — Сравнение результатов измерений $|\Gamma_{\text{Э}}|$

Экспериментальное опробование метода передачи единицы мощности ЭМК с использованием комбинированного ваттметра, в состав которого входит многозондовый преобразователь мощности оконечного типа и датчик мощности рассогласованный с переменной фазой (ДМР), эталону 1-го разряда подтвердило возможность передачи единицы мощности ЭМК с двухкратным запасом по точности за счет уменьшения погрешности рассогласования измерительных трактов в шесть раз.

В результате экспериментальных исследований показано, что использование предложенных решений позволяет снизить погрешность передачи единицы мощности электромагнитных колебаний от ВЭ (разработанного комбинированного ваттметра) эталону 1-го разряда, при этом погрешность передачи единицы мощности ЭМК не превышает $\pm 0,8\%$. На рисунке 13 представлены типовые зависимости поправочного множителя ваттметра проходного типа и доверительные границы относительной погрешности этого множителя.

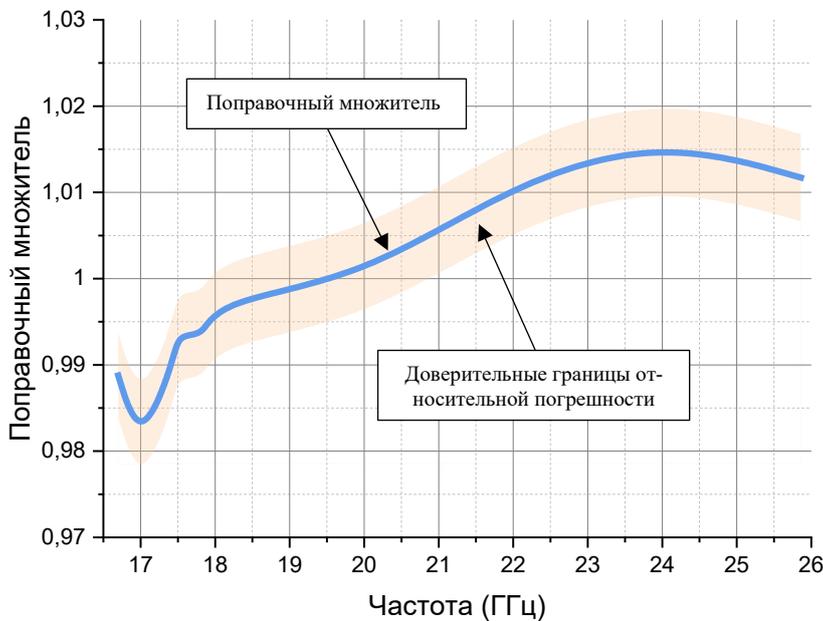


Рисунок 13 — Зависимость частотного коэффициента аттестуемого эталона 1-го разряда от частоты и погрешность передачи разработанным ваттметром комбинированным

Таким образом, разработан и экспериментально опробован метод измерений $|Г_{\text{э}}(f)|$. Использование предложенного подхода к передаче единицы мощности ЭМК ваттметром комбинированным (измерительные преобразователи мощности оконечного типа и рассогласованные датчики мощности) эталону 1-го разряда подтвердило практическую возможность повышения точности передачи единицы мощности электромагнитных колебаний в волноводных трактах СВЧ-диапазона.

Заключение

В диссертационной работе решены научные задачи, имеющие важное значение для развития эталонной базы Российской Федерации в области электромагнитных измерений в волноводных трактах СВЧ-диапазона. В ходе выполнения работы подтверждены теоретические расчеты и реализованы методы уменьшения погрешности передачи единицы мощности ЭМК в волноводных трактах СВЧ-диапазона с применением разработанного ваттметра комбинированного. В его состав входят комплект измерительных преобразователей мощности оконечного типа и комплект датчиков мощности рассогласованных, обеспечивающих работу в диапазоне мощностей $1 \cdot 10^{-3}$ до $1 \cdot 10^{-2}$ Вт в волноводных трактах с сечениями 35×15 , $28,5 \times 12,6$, 23×10 , 17×8 , 16×8 , $11 \times 5,5$, $7,2 \times 3,4$ мм в диапазоне частот от 5,64 до 37,50 ГГц. Основные результаты диссертации заключаются в следующем:

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 нем 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 счет 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 $\pm 0,8$ %.

4. Разработана методика измерений $|\Gamma_{\Sigma}|$ (МИ 3610-2018) и СИ для ее реализации, подтверждена их работоспособность при аттестации эталона 1-го разряда. В ходе выполнения аттестации практически подтверждено повышение точности измерений $|\Gamma_{\Sigma}|$ в 2,5 раза за счет уменьшения ее 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.

Практическая значимость диссертационной работы заключается в создании и внедрении:

- волноводных ваттметров оконечного типа с улучшенными метрологическими характеристиками;
- методик и СИ для аттестации эталонов;
- серийных ваттметров оконечного типа М3-122 и ваттметров проходного типа М1-37;
- системы измерительной К6-19 в качестве эталона 1-го разряда мощности ЭМК.

Таким образом, в диссертационной работе решена задача разработки методов уменьшения погрешности передачи единицы мощности электромагнитных колебаний в волноводных трактах СВЧ-диапазона и средств их реализации. Цель диссертационной работы достигнута.

Список работ, опубликованных автором по теме диссертации

1. Матвеев А.И. Оценка погрешности измерений волноводных ваттметров проходного типа при их разработке и производстве» // X Всероссийская научно-техническая конференция «Метрология в радиоэлектронике». Тезисы докладов. 20–22 июня 2016 г. — Менделеево: ФГУП «ВНИИФТРИ». — С. 187–190.
2. А.И. Матвеев «Обоснование выбора метода измерений модуля эффективного коэффициента отражения выхода волноводных ваттметров проходного типа при их разработке и производстве» // Метрология в XXI веке. Доклады VI научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов и специалистов. Менделеево 2 марта 2016 г. стр. 80-83.
3. Матвеев А.И., Перепелкин В.А. Эталоны-переносчики мощности СВЧ в волноводных трактах на основе многозондовых преобразователей // Альманах современной метрологии. — 2019. — №2 (18). — С. 65–72.
4. Матвеев А.И., Перепелкин В.А. Методы учета потерь в волноводно-волноводных переходах при передаче единицы мощности СВЧ // Международная научно-техническая конференция «Метрология-2019». Тезисы докладов. Минск, Республика Беларусь, 27–28 марта 2019 г. — С. 122–126.
5. Matveev A., Chirkov I., Malay I. Investigation of using reflective power sensor for equivalent source reflection measurements // General Assembly and Scientific Symposium of the International Union of Radio Science URSI GASS 2020. Warsaw University of Technology Baltic, October 2020. — P. 113–115.

6. Матвеев А.И. Средства и методы контроля модуля эффективного коэффициента отражения выхода многозондовых ваттметров проходного типа // VII Научно-практическая конференция молодых ученых, аспирантов и специалистов «Метрология в XXI веке». Материалы. — Менделеево: ФГУП «ВНИИФТРИ», 2020.
7. 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.
8. 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.
9. Матвеев Алексей Игоревич «Волноводные термисторные ваттметры оконечного типа в диапазоне частот 16,7–37,5 ГГц (izmt.ru)» Измерительная техника. 2022. № 1. С. 58-61. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2022-1-58-61>
10. Матвеев А.И. «Исследование и разработка многозондовых преобразователей мощности в волноводных трактах СВЧ диапазона» Сборник тезисов докладов I Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых и специалистов к 180-летию ВНИИМ им. Д.И. Менделеева // стр. 115-117 июнь 2022 года.
11. 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.
12. Матвеев А.И., Коршунов В.А., Чирков И.П., Миллер Е.В. Новая современная разработка в области измерений мощности СВЧ — автоматизированная измерительная система К6-19 // XIII Всероссийская научно-практическая конференция «Метрология в радиоэлектронике», п. Морозовка, г.о. Солнечногорск, Московская обл., 20–22 июня 2023 г. — Менделеево: ФГУП «ВНИИФТРИ», 2023. — С. 313.
13. Матвеев А.И. Разработка методов и средств уменьшения погрешности передачи единицы мощности электромагнитных колебаний в волноводных трактах» // I Всероссийская научно-практическая конференция молодых ученых и специалистов, X Международный конкурс «Лучший молодой метролог КООМЕТ — 2023». — С. 70.
14. Матвеев А.И., Пивак А.В., Чирков И.П. Разработка прецизионных средств измерений СВЧ-мощности // Электроника и микроэлектроника СВЧ. — 2024. — № 1. — С. 618–622.
15. Матвеев А.И. Разработка методов и средств уменьшения погрешности передачи единицы мощности электромагнитных колебаний в волноводных трактах СВЧ-диапазона //

Пилотный международный конкурс «Лучший молодой метролог МГС СНГ» 2024 г. Сборник тезисов докладов. — С. 134–135.

16. M. Alexey, P. Polina, C. Igor and S. Dmitry, "Microwave Thermal Power Sensors," 2024 IEEE 9th All-Russian Microwave Conference (RMC), Moscow, Russian Federation, 2024, pp. 246-251, doi: 10.1109/RMC62880.2024.10846911.

Патенты 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 Государственной 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.

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. Расчет 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.

ФГУП «ВНИИФТРИ».

Подписано в печать 18.09.2025.

Формат 70×90^{1/16}. Уч.-изд. л. 1,79

Объем п. л. Тираж 100 экз. Заказ №102

Полиграф. участок ФГУП «ВНИИФТРИ»,
141570, Россия, Московской обл., г.о. Солнечногорск, п.г.т Менделеево,