

Федеральное государственное унитарное предприятие
«Всероссийский научно-исследовательский институт
физико-технических и радиотехнических измерений»

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

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель — Малай Иван Михайлович, доктор технических
наук, доцент

Менделеево — 2025

Оглавление

Введение.....	4
Глава 1. Основные метрологические задачи в области измерений мощности СВЧ.....	13
1.1. Обзор методов передачи единицы мощности электромагнитных колебаний в волноводных трактах.....	13
1.2. Определение доминирующих погрешностей при передаче единицы мощности электромагнитных колебаний в волноводных трактах.....	18
1.3. Анализ соответствия преобразователей мощности оконечного типа требованиям, предъявляемым к вторичным эталонам мощности ЭМК.....	20
1.4. Обоснование выбора пути уменьшения доминирующей погрешности при передаче единицы мощности ЭМК.....	26
1.5. Выводы по главе 1.....	31
Глава 2. Разработка метода измерений S -параметров термисторов СВЧ в волноводных трактах СВЧ-диапазона.....	33
2.1. Конструкция термисторного датчика СВЧ-мощности и его основные характеристики.....	33
2.2. Метод измерений модуля коэффициента отражения и передачи термистора СВЧ.....	35
2.3. Разработка волноводного фланца для исследования термисторного СВЧ-датчика.....	37
2.4. Разработка согласованного волноводно-волноводного трансформатора с целью снижения рассогласования.....	43
2.5. Разработка комплекта калибровочных мер в нестандартизированном волноводном тракте для векторного анализатора цепей.....	52
2.6. Исследование термисторного СВЧ-датчика.....	62
2.7. Выводы по главе 2.....	67
Глава 3. Разработки согласующего широкополосного волноводного преобразователя мощности с настраиваемым коэффициентом отражения входа.....	69
3.1. Исследование термисторного преобразователя мощности оконечного типа с одним термистором.....	69
3.2. Разработка многозондовой системы термисторов в преобразователях мощности оконечного типа.....	73
3.3. Алгоритм настройки модуля коэффициента отражения входа преобразователя мощности оконечного типа.....	79
3.4. Экспериментальное опробование настройки модуля коэффициента отражения входа преобразователя мощности.....	85

3.5. Определение метрологических характеристик разработанного преобразователя мощности оконечного типа	87
3.6. Выводы по главе 3	91
Глава 4. Экспериментальная апробация передачи единицы мощности ЭМК ваттметром комбинированным	93
4.1. Метод и средства повышения точности измерений модуля эффективного коэффициента отражения выхода аттестуемого ваттметра проходного типа	93
4.2. Методика измерений модуля эффективного коэффициента отражения выхода волноводных ваттметров проходного типа	104
4.3. Определение долговременной стабильности метрологических характеристик преобразователя мощности оконечного типа	110
4.4. Опробование метода передачи размера единицы мощности ЭМК с использованием комбинированного ваттметра	113
4.5. Применение преобразователя мощности оконечного типа в качестве эталона-переносчика.....	117
4.6. Выводы по главе 4	120
Заключение	122
Список сокращений	124
Список литературы	126
Приложение А	136

Введение

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 [1]. 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 (ГПЭ) единицы мощности электромагнитных колебаний в коаксиальных и волноводных трактах ГЭТ 26-2010 [2] 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 [3], обеспечивают работу в диапазоне частот от 5,64 до 37,50 ГГц. Передача единицы мощности ЭМК рабочим эталонам 1-го разряда (РЭ) 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.

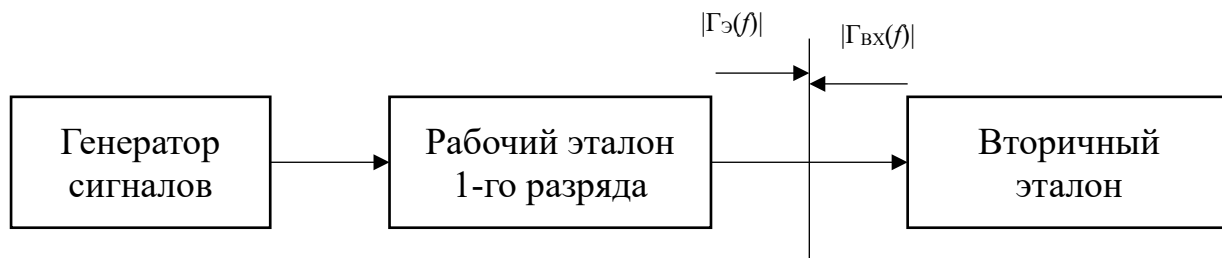


*Рисунок 1 — Схема передачи единицы мощности ЭМК
от ВЭ эталону 1-го разряда*

При передаче единицы мощности ЭМК от ГЭТ 26-2010 или вторичного эталона эталону 1-го разряда определяют $\alpha(f)$ — частотный коэффициент (поправочный множитель) [4]; уравнение измерений в таком случае имеет вид:

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

где $P_{\text{ВЭ}}$ — измеренное значение мощности вторичным эталоном; $N_{\text{РЭ}}$ — 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 8.381-2011 [5] следующим выражением:

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

где основными составляющими погрешности передачи единицы мощности ЭМК по схеме, приведенной на рисунке 1, являются: Θ — границы неисключенной систематической погрешности (НСП) эталонного ваттметра ВЭ; S — среднее квадратическое отклонение (СКО) среднего арифметического значения; t — коэффициент Стьюдента; $S_{\text{Р}}$ — СКО погрешности рассогласования; S_{Θ} — СКО суммы НСП вторичного эталона; $\Theta_{\text{Р}}$ — границы погрешности рассогласования.

Основной вклад в суммарное значение доверительных границ погрешности частотного коэффициента эталона 1-го разряда вносит $\Theta_{\text{Р}}$, значение которой определяют по уравнению:

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

При этом $\Theta_{\text{Р}}$ 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 $\Theta_{\text{Р}}$ будет иметь вид:

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

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

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

Предлагаемые подходы к повышению точности измерений $|\Gamma_{\text{Э}}(f)|$ и уменьшению $|\Gamma_{\text{ВХ}}(f)|$ 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 [6].

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 [7]. 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 приемопередающего 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.

Таким образом, 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 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 ($|\Gamma_{\text{вх}}|$).

3. Разработать СИ модуля эффективного коэффициента отражения выхода ваттметров проходного типа с погрешностью измерений этого модуля не более $\pm 0,008$ ($|\Gamma_{\text{э}}|$).

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 $|\Gamma_{\text{э}}|$ в 2 раза (с $\pm 0,016$ до $\pm 0,008$) 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. Все перечисленные подходы применялись в комплексе для достижения поставленных целей исследования и обеспечения достоверности полученных результатов.

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 вторичного эталона и рабочих эталонов 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), позволяет передавать единицу мощности СВЧ в волноводных трактах в диапазоне частот от 5,64 до 37,50 ГГц от ГЭТ 26-2010 к стационарному комплекту измерительной системы К6-19 [8] 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;

— разработке 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;

— разработке 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;

— разработке 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 комплекту 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 КООМЕТ» 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 15 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.

Глава 1. Основные метрологические задачи в области измерений мощности СВЧ

1.1. Обзор методов передачи единицы мощности электромагнитных колебаний в волноводных трактах

Государственный первичный эталон воспроизводит, хранит и передает единицу мощности ЭМК. Воспроизведение единицы мощности электромагнитных колебаний в микрокалориметре осуществляется путем преобразования падающей электромагнитной энергии в тепловую с помощью калориметрического преобразователя мощности оконечного типа [10]. Затем полученная тепловая энергия методом замещения сравнивается с мощностью постоянного тока, что в настоящее время является наиболее точным методом, применяемым во всех национальных метрологических лабораториях [11]. В России передача единицы мощности ЭМК осуществляется в соответствии с поверочной схемой. Согласно Приказу ФАТРИМ № 3461 от 30 декабря 2019 г. [12], передача размера единицы мощности СВЧ может выполняться двумя методами: методом непосредственного сличения ваттметра оконечного типа (ВО) с ваттметром проходного типа (ВП) или методом непосредственного сличения при помощи эталона сравнения, при котором сличаются два ВО или два ВП (рисунок 2). Эталон сравнения выполняет роль компаратора, имеющего малую случайную погрешность.

Ниже рассмотрена только одна модель непосредственного сличения ваттметра оконечного типа (ВО) с ваттметром проходного типа (ВП) (см. рисунок 2а).

Метод непосредственного сличения ВО и ВП получил широкое распространение благодаря простоте реализации и минимальным требованиям к оборудованию. Он не требует сложных эталонов сравнения, а использует стандартные приборы, доступные в большинстве метрологических лабораторий, а также позволяет проводить измерения в реальных условиях эксплуатации без разборки дополнительных СИ. Хотя метод имеет повышенную погрешность рассогласования ($\pm 1,2\%$), его

универсальность и удобство эксплуатации делают его основным выбором для проведения поверочных работ в РФ.

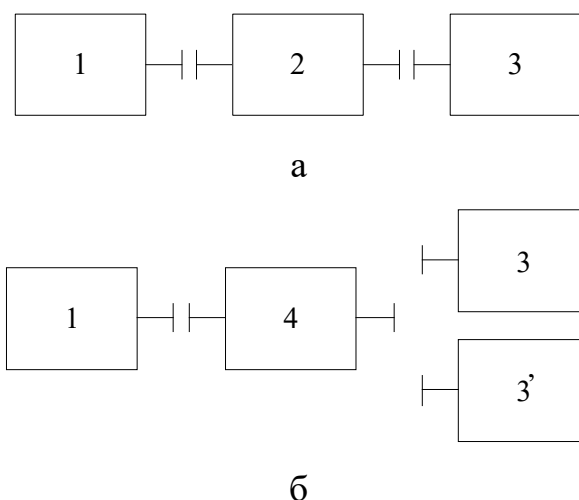


Рисунок 2 — Схемы сличений ваттметров:

а — метод непосредственного сличения ВО с ВП; б — метод непосредственного сличения двух ВО при помощи эталона сравнения;

1 — генератор; 2 — ВП; 3, 3' — ВО; 4 — эталон сравнения проходящей мощности

При передаче единицы мощности электромагнитных колебаний возникает систематическая погрешность измерения мощности ваттметром на частоте (f). Измерения проводятся на опорном уровне мощности ($1 \pm 0,1$ мВт), при этом искомая систематическая составляющая погрешности ваттметра зависит только от частоты измеряемой мощности СВЧ. Для исключения этой систематической погрешности в результат измерений вносится поправка — калибровочный коэффициент. Для ваттметров оконечного типа его принято обозначать $K_K(f)$ (1), а для ваттметров проходного типа — $\alpha(f)$.

Частотный коэффициент рассчитывается по формулам [13]:

$$K_K(f) = \frac{P_{BO}}{N_{ВП} \cdot \alpha(f)} \cdot \frac{1}{|1 - \Gamma_{Э}(f) \cdot \Gamma_{ВЭТ}(f)|^2}, \quad (5)$$

$$\alpha(f) = \frac{N_{\text{BO}}}{P_{\text{ВП}} \cdot K_{\text{К}}} \cdot \frac{1}{|1 - \Gamma_{\text{Э}}(f) \cdot \Gamma_{\text{ВЭТ}}(f)|^2}, \quad (6)$$

где P_{BO} — измеренное значение мощности вторичным эталоном; $P_{\text{ВП}}$ — измеренное значение мощности вторичным эталоном; $N_{\text{ВП}}$ — показания ваттметра проходного типа; N_{BO} — показания ваттметра проходного типа; $\Gamma_{\text{Э}}(f)$ — модуль эффективного коэффициента отражения выхода ваттметра проходного типа; $\Gamma_{\text{ВЭТ}}(f)$ — модуль коэффициента отражения входа ваттметра оконечного типа.

В случае передачи единицы мощности ЭМК ваттметру оконечного типа измеренное значение ВП ($P_{\text{ВП}}$) принимается за действительное (опорное), и, наоборот, при передаче единицы мощности ЭМК ваттметру проходного типа измеренное значение ВО ($P_{\text{ВО}}$) принимается за действительное (опорное). При дальнейших выкладках предполагается, что значение единицы мощности ЭМК передается от ВО — вторичного эталона к ВП — эталону 1-го разряда.

Частотный коэффициент $\alpha(f)$ ваттметра проходного типа, которому выполняется передача единицы мощности ЭМК, — это поправочный множитель для определения действительного значения результата измерения проходящей мощности в нагрузку.

Наиболее широкое применение имеют ваттметры оконечного типа. Для их проверки применяются ваттметры проходного типа, метрологические характеристики которых соответствуют требованиям, предъявляемым к эталонам 1-го разряда мощности ЭМК. Такая практика применяется во всем мире.

Первые ВП были применены в NIST (США) для стабилизации мощности при калибровке преобразователей в сухом микрокалориметре [14] и выполняли роль обратной связи для генератора СВЧ-мощности, позволяя стабилизировать мощность генератора.

Дальнейшее развитие ВП получили в волноводных трактах. Данные ВП созданы на основе направленных ответвителей (НО) с распределенной областью связи. Структурная схема НО приведена на рисунке 3.

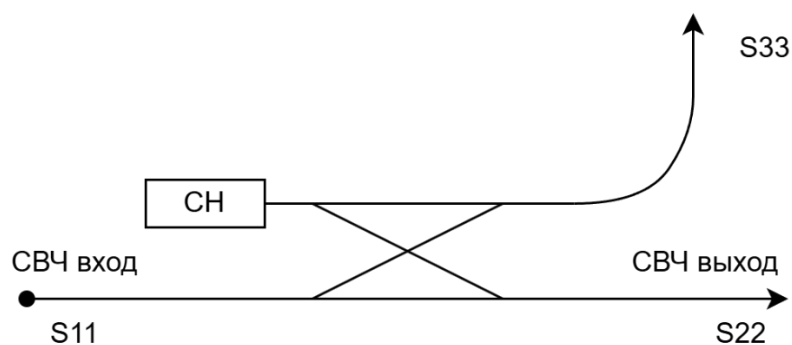


Рисунок 3 — Структурная схема направленного ответвителя

Боковое плечо (S33) НО нагружается ВО. Такую комбинацию НО и ВО принято называть калибратором мощности. Исследования калибраторов мощности показали, что мощность, падающая на вход ВО, помещенного на первичный выход НО, не зависит от коэффициента отражения генератора, а зависит от коэффициентов матрицы рассеяния НО [15].

Из матрицы коэффициентов рассеяния НО рассчитывают модуль эффективного коэффициента отражения $|\Gamma_{\text{Э}}(f)|$ по уравнению [16]:

$$|\Gamma_{\text{Э}}(f)| = \dot{S}_{22} - \frac{\dot{S}_{32} \cdot \dot{S}_{31}}{\dot{S}_{21}}, \quad (7)$$

где $\dot{S}_{22}$ — коэффициент отражения выхода НО; $\dot{S}_{32}$, $\dot{S}_{31}$, $\dot{S}_{21}$ — коэффициенты передачи НО.

В связи с развитием коаксиальной техники аналогичные калибраторы появились и в коаксиальном тракте. Однако широкополосные коаксиальные направленные ответвители не обладают хорошим согласованием выхода и высокой направленностью. Применение большого количества узкополосных НО для аттестации эталонных ВО является более эффективным, способным повысить точность измерений.

Поэтому были разработаны НО, на основе которых были созданы первые серийные ВП. В настоящее время выпускаются НО в диапазоне частот от 5,64 до 37,50 ГГц.

Параллельной веткой развития ВП становятся двенадцатиполюсники [17] — устройства, работающие по принципу измерительной линии. Тем или иным образом реализованные зонды ответвляют часть мощности и позволяют создать «картину» распределения поля. Такие устройства требуют проведения процедуры калибровки при помощи мер волнового сопротивления и определения параметров всего устройства на основе решения системы нелинейных уравнений. Несмотря на ряд недостатков, явным преимуществом двенадцатиполюсников является хорошее согласование откалиброванного устройства, а также одновременное измерение падающей мощности и коэффициента стоячей волны по напряжению (КСВН) калибруемого ВО.

В состав государственного первичного эталона входит компарирующая установка, в которой применяются калибраторы мощности на основе направленных ответвителей.

Эталоны мощности электромагнитных колебаний 1-го разряда представляют собой аналогичные устройства — калибраторы мощности [18]. Поэтому для передачи единицы мощности электромагнитных колебаний применяются вторичные эталоны, выполненные в виде ваттметров оконечного типа. Однако в настоящее время эталоны мощности ЭМК 1-го разряда преимущественно аттестуются на государственном первичном эталоне, что негативно сказывается на его ресурсе.

Эксплуатируемые вторичные эталоны мощности ЭМК устарели и зачастую не соответствуют заявленным метрологическим характеристикам [19].

Таким образом, современные методы передачи единицы мощности ЭМК обеспечивают требуемую точность измерений, однако существующий парк вторичных эталонов мощности ЭМК не позволяет организовать их последовательную передачу в полном объеме. Основные проблемы связаны с характеристиками эксплуатируемых ваттметров оконечного типа, что приводит к дефициту запаса точности между вторичными эталонами и эталонами 1-го разряда мощности ЭМК.

Для выявления путей решения данной проблемы необходимо детально проанализировать все источники погрешностей при передаче единицы мощности ЭМК

[20]. Это позволит определить доминирующие факторы, влияющие на точность передачи единицы мощности ЭМК. В связи с этим в следующем разделе проведен анализ источников погрешностей передачи единицы мощности ЭМК с целью выявления доминирующих составляющих.

Такой подход позволит не только выявить доминирующие составляющие погрешности передачи единицы мощности ЭМК, но и определить направления совершенствования измерительной базы для обеспечения требуемой точности передачи единицы мощности ЭМК.

1.2. Определение доминирующих погрешностей при передаче единицы мощности электромагнитных колебаний в волноводных трактах

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

$$\alpha(f) = \frac{P_{\text{ВЭТ}}}{N_{\text{РЭ}}} \cdot \frac{1}{|1 - \Gamma_{\text{Э}}(f) \cdot \Gamma_{\text{ВЭТ}}(f)|^2}, \quad (8)$$

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

Доверительные границы относительной погрешности частотного коэффициента аттестуемого эталона определяются следующим выражением:

$$[t_{\Sigma} S_{\Sigma}]_{\alpha(f)} = \frac{\Theta + \Theta_{\text{Р}} + t \cdot S}{S + S_{\Theta}} \cdot [S_{\Sigma}]_{\text{РЭ}}. \quad (9)$$

Основными составляющими погрешности при передаче единицы мощности ЭМК по схеме, приведенной на рисунке 2а, являются:

— значения НСП эталонного ваттметра ВЭ (Θ) по формуле:

$$[\Theta]_{\alpha} = \Theta_{\text{ГЭТ26}} + \Theta_{\text{Р}}; \quad (10)$$

— СКО среднего значения отношения показаний РЭ и ВЭ (S) по формуле:

$$[S]_{\alpha} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \left(\left(\frac{P_{\text{ЭТ}}}{P_{\text{К}}} \right)_i - \left(\frac{P_{\text{ЭТ}}}{P_{\text{К}}} \right)_{\text{СР}} \right)^2}{n \cdot (n-1)}} \cdot 100\%; \quad (11)$$

— СКО погрешности из-за рассогласования (S_p) по формуле:

$$S_p = \sqrt{2} \cdot |\Gamma_{\text{ГЭТ}}| \cdot |\Gamma_{\text{Э}}| \cdot 100\%; \quad (12)$$

— СКО суммы НСП (S_{Θ}) по формуле:

$$[S_{\Theta}]_{\alpha} = \sqrt{\frac{1}{3} \cdot \Theta_{\text{ГЭТ}}^2 + \frac{1}{2} \cdot \Theta_p^2}; \quad (13)$$

— погрешность из-за рассогласования измерительных трактов (Θ_p) по формуле:

$$\Theta_p = 2 \cdot \Gamma_{\text{Э}}(f) \cdot \Gamma_{\text{ВЭТ}}(f) \cdot 100\%. \quad (14)$$

Используя уравнение (9), выполнена оценка бюджета относительной погрешности частотного коэффициента аттестуемого эталона. Этот позволяет провести детальный анализ всех составляющих погрешности и определить их вклад в суммарную относительную погрешность частотного коэффициента. Результаты оценки бюджета погрешности показаны на рисунке 4, где наглядно представлены данные о вкладе каждой составляющей относительной погрешности частотного коэффициента.

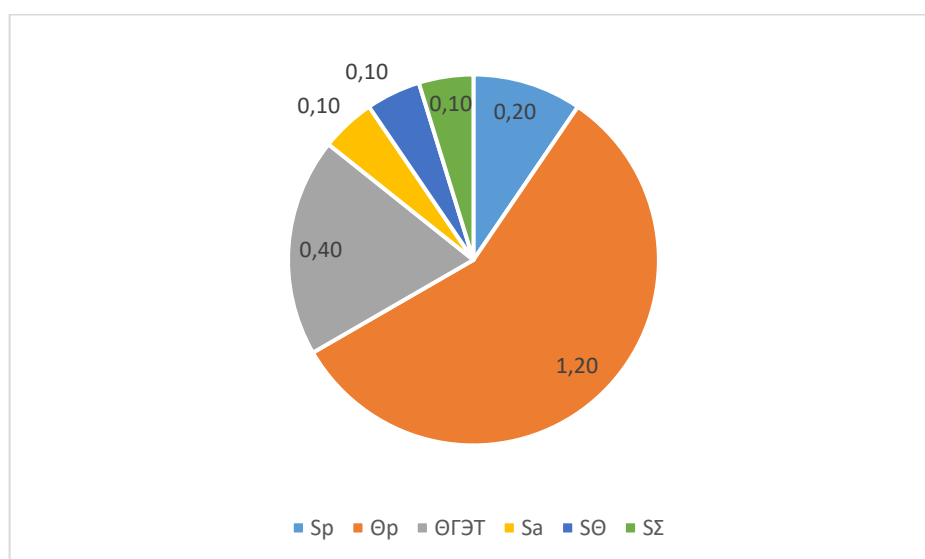


Рисунок 4 — График оценки бюджета относительной погрешности частотного коэффициента аттестуемого эталона

Основной вклад в суммарное значение доверительных границ погрешности частотного коэффициента эталона 1-го разряда вносит Θ_p , значение которой определяют по формуле (14), и Θ_p может достигать величины $\pm 1,2 \%$; при этом сумма остальных составляющих не превышает значения, полученного по формуле:

$$\delta = \sqrt{\Theta^2 + S^2 + S_p^2 + S^2} = \pm 0,4 \%. \quad (15)$$

Появление новых эталонов мощности ЭМК 1-го разряда с улучшенными точностными характеристиками привело к сокращению запаса по точности между эталонами 1-го разряда и вторичными эталонами мощности ЭМК. Однако для последовательной передачи единицы мощности ЭМК по схеме, приведенной на рисунке 2а, требуется обеспечить запас по точности не менее чем в 1,5 раза. Исходя из анализа источников погрешности, следует, что одним из наиболее рациональных вариантов решения данной задачи представляется уменьшение модуля $|\Gamma_{вэ}(f)|$. Для того чтобы обеспечить требуемый запас по точности, необходимо уменьшить модуль $|\Gamma_{вэ}(f)|$ до величины, не превышающей 0,03 во всем рабочем диапазоне частот [21].

Проведенный анализ показал, что доминирующей составляющей погрешности передачи единицы мощности ЭМК является погрешность рассогласования, достигающая $\pm 1,2 \%$. Сумма остальных составляющих погрешности не превышает $\pm 0,4 \%$. Выявлено, что существующий парк вторичных эталонов не обеспечивает необходимый запас точности между эталонами 1-го разряда и вторичными эталонами мощности ЭМК. В связи с этим необходимо проанализировать парк эксплуатируемых СИ на соответствие требованиям, предъявляемым к вторичным эталонам мощности ЭМК, с целью обновления парка вторичных эталонов мощности ЭМК.

1.3. Анализ соответствия преобразователей мощности оконечного типа требованиям, предъявляемым к вторичным эталонам мощности ЭМК

Для выявления характеристик проведен анализ серийно выпускаемых ваттметров оконечного типа утвержденного типа [22] на соответствие требованиям вторичных эталонов. Рассмотрены преобразователи мощности как отечественного

производства, так и импортные, с волноводным входом и коаксиальным входом с коаксиально-волноводным переходом (КВП).

Серийно изготавливаемые ваттметры оконечного типа приведены в таблице 1.

Таблица 1 — Серийно изготавливаемые ваттметры оконечного типа

Тип СИ	Производитель	№ Госреестра, дата окончания действия сертификата	Диапазон частот, ГГц	Тип тракта	Диапазон измерений мощности, дБм	КСВН
Волноводные						
M1-25M/08	ООО НПП «Элмика»	—	25,95–37,5	7,2 × 3,4	от –30 до 13	1,10
N8486AR +ПВВ	Фирма Agilent Technologies, Малайзия	58375-14, 29.08.2019	26,5–40	UG-599/U волноводный WR-28 [23]	от –35 до 20	1,40
N8486AQ +ПВВ	Фирма Agilent Technologies, Малайзия	58375-14, 29.08.2019	33–50	UG-358/U волноводный WR-22	от –35 до 20	1,50
Коаксиальные						
NRP-Z51 + КВП	Фирма Rohde & Schwarz GmbH & Co. KG, Германия	37008-08, 08.05.2018	0–18	2,92 мм	от –30 до 20	1,20
NRP-Z55 + КВП	Фирма Rohde & Schwarz GmbH & Co. KG, Германия	37008-08, 08.05.2018	0–40	2,92 мм	от –30 до 20	1,30
NRP-Z56 + КВП		43642-10, 01.04.2015	0–50	2,4 мм	от –30 до 20	1,30
N8481A + КВП	Фирма Agilent Technologies, Малайзия	58375-14, 29.08.2019	0,01–18	N типа	от –35 до 20	1,37
N8485A + КВП	Фирма Agilent Technologies, Малайзия	58375-14, 29.08.2019	0,01–26,5	IX типа 3,5 мм	от –35 до 20	1,33
M5-40...43	Вильнюс, СССР	—	5,64–17,44	35–16 мм	от –20 до 10	1,40
M5-44...45	Вильнюс, СССР	—	16,7–37,5	11, 7,2 мм	от –20 до 10	1,50

С сечениями волноводных трактов, соответствующими ГОСТ 51914-2002 [24], представлена продукция фирмы ООО НПП «Элмика» [25] в диапазоне частот от 25,95 до 37,5 ГГц. Для других волноводных трактов возможно использование

коаксиальных и волноводных ваттметров импортного производства с коаксиально-волноводными и волноводно-волноводными переходами.

Из-за применения серийно выпускаемых ваттметров невозможно сравнить нормируемые для эталонов мощности пределы допускаемой погрешности ваттметров с неопределенностью значений калибровочных коэффициентов ваттметров.

Также для серийных ваттметров не нормируют кратковременную и долговременную нестабильность калибровочных коэффициентов. Такие параметры можно оценить, только исходя из поверочной практики ваттметров за последние 10 лет.

Диодные ваттметры не применяются в качестве прецизионных измерителей мощности из-за их существенных недостатков: низкой точности измерений (погрешность около 5–10 % против 1,2–5 % у тепловых преобразователей), нестабильности показаний (высокая чувствительность к изменениям условий окружающей среды и форме сигнала). В современных условиях для прецизионных измерений мощности используются ваттметры, основанные на тепловых методах измерения мощности, которые обеспечивают высокую точность, стабильность показаний в различных условиях эксплуатации.

Исходя из практических наблюдений, термоэлектрические ваттметры производителя Keysight [26] имеют менее стабильный калибровочный коэффициент из-за использования встроенных калибраторов мощности, необходимых для подготовки к работе прибора. Нестабильность калибратора, случайные погрешности, возникающие при повторных соединениях приборов, достигают 0,5 %.

Наиболее стабильные ваттметры оконечного типа — это термоэлектрические ваттметры производства Rohde & Schwarz NRP-Z51, NRP-Z55 с диапазоном рабочих частот от 0 до 40 ГГц [27]. Благодаря разработанным технологиям фирмы такие ваттметры не требуют проведения калибровки от встроенного источника перед проведением измерений, а изменение калибровочного коэффициента (среднее квадратическое значение изменений калибровочного коэффициента на всех частотах поверки) составляет 0,1–0,4 % за год. Такие ваттметры используются в составе

ГЭТ 26-2010 в качестве эталонных ваттметров, применяемых в коаксиальных трактах для хранения и передачи единицы мощности вторичным и рабочим эталонам, рабочим эталонам 1-го разряда в ряде региональных ЦСМ.

Применение переходов ухудшает коэффициент отражения входа, что не соответствует требованиям вторичных эталонов волноводных трактов: в диапазоне частот от 0 до 18 ГГц он не превышает 1,2 ($\Gamma_{\text{во}}(f) \leq 0,1$) [28], а свыше 18 ГГц — превышает это значение. Как следствие, это ведет к увеличению погрешности рассогласования, которая может достигать $\pm 1,2$ %. Поэтому коаксиальные ваттметры с коаксиально-волноводными переходами не соответствуют требованиям вторичных эталонов.

Термисторные преобразователи мощности М5-40–М5-45 показали себя очень надежными, стабильными СИ. Несколько комплектов преобразователей использовались в нескольких региональных центрах стандартизации в качестве РЭ 1-го разряда. Конструктивно термисторный преобразователь мощности состоит из волноводного перехода, поглощающего элемента (термистора) и короткозамыкателя.

Работа такого преобразователя мощности основана на методе замещения. В преобразователе рассеивается мощность постоянного тока. После подачи мощности СВЧ чувствительный элемент подвергается нагреву от мощности постоянного тока и мощности СВЧ, вследствие чего меняется его сопротивление. Изменением мощности постоянного тока добиваются восстановления первоначального сопротивления. Измеряемая мощность СВЧ будет пропорциональна изменению мощности постоянного тока с точностью до неэквивалентности рассеивания мощностей в теле термочувствительного элемента [29].

Термисторные преобразователи мощности используются в Государственном первичном эталоне мощности электромагнитных колебаний в диапазоне частот от 5,64 до 37,50 ГГц. Они также входят в состав компарирующей установки, и их используют для передачи единицы мощности СВЧ от ГПЭ рабочим эталонам мощности 1-го разряда (калибраторам мощности).

Конструктивно термисторные ваттметры представляют собой волноводный отрезок заданного сечения волновода, в котором используются волноводные трансформаторы. Термисторные ваттметры обладают высокой стабильностью во времени на интервалах более 10 лет. Недостатком таких ваттметров является большое рассогласование с измерительным трактом. Однако известно, что коэффициент отражения изменяется в зависимости от установленного на термисторе сопротивления.

Важно отметить, что термисторные преобразователи мощности имеют ряд достоинств относительно других чувствительных элементов для применения в эталонной технике:

- высокая стабильность во времени (данный критерий относится к СИ, аттестованным в качестве вторичных эталонов);
- стойкость к перегрузочной мощности СВЧ, подаваемой на чувствительный элемент;
- статистика выхода из строя в процентном соотношении в год.

На рисунке 5 приведена гистограмма долговременной стабильности преобразователей с чувствительными элементами диод, термистор и термопара.

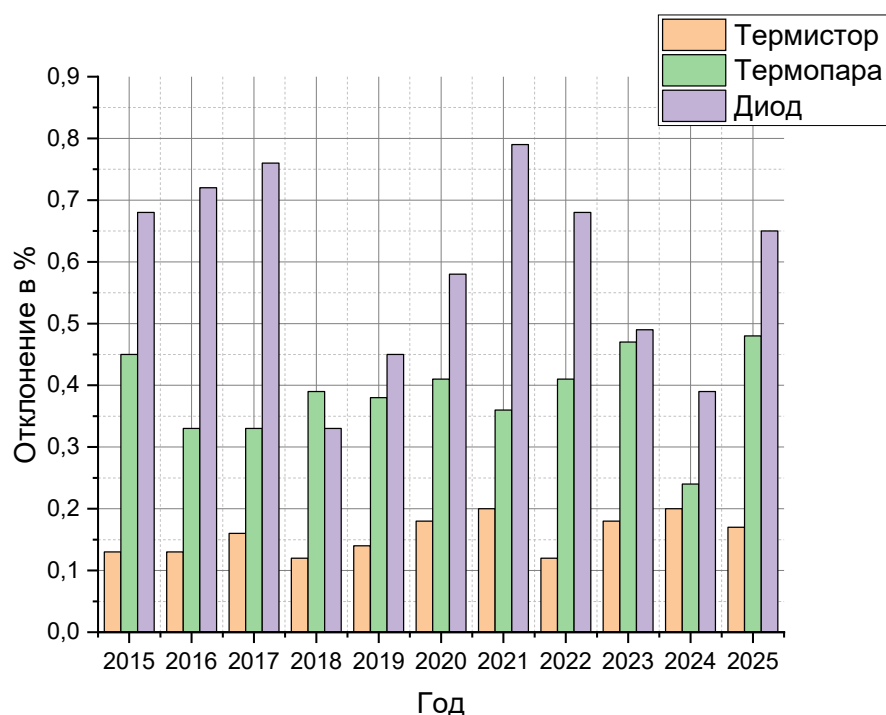


Рисунок 5 — Долговременная стабильность во времени чувствительных элементов (отклонение калибровочного коэффициента в год)

Долговременная стабильность термистора, исходя из наблюдений за 10-летний период, показывает лучший результат среди рассмотренных чувствительных элементов. Случайная погрешность диодного чувствительного элемента достигает 0,5 %, термопары — 0,2 %, а термистора — не более 0,1 %; это в 2 раза стабильнее термопары и в 5 — диода.

Проведено исследование стойкости к перегрузочной мощности, результаты которой приведены на рисунке 6.

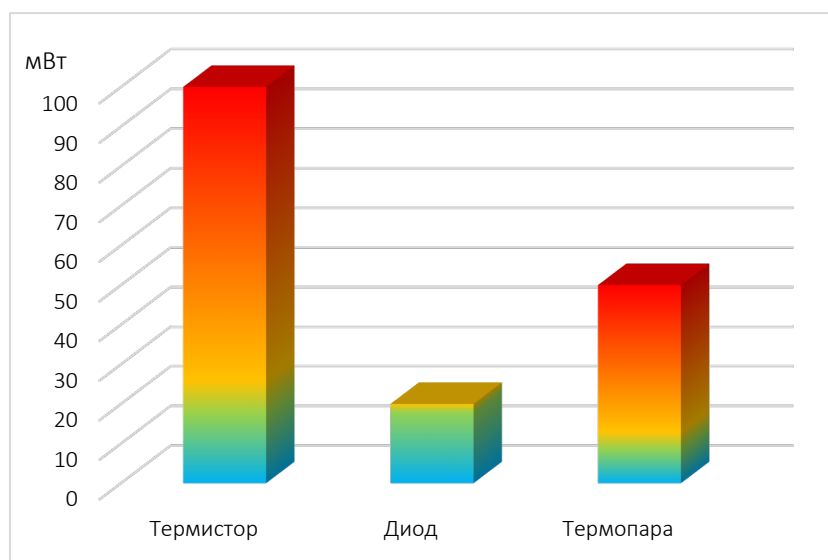


Рисунок 6 — Стойкость к перегрузочной мощности и статическому напряжению

Мощность перегрузки статического напряжения диода является наименьшей. Несоблюдение правил эксплуатации, а именно работа без заземления и антистатических покрытий, может привести к повреждению СИ и полному выходу его из строя, что недопустимо для эталонной техники. Также есть риск выгорания термопары из-за статического электричества.

В настоящее время СВЧ-термопары отечественного производства не выпускаются. Термисторы обладают высокой стойкостью к статическим напряжениям, а мощность СВЧ, подаваемая на термистор, может достигать сотен милливатт. Поэтому в дальнейшем термистор выбран как чувствительный элемент, который является наиболее перспективным при создании эталонных средств мощности электромагнитных колебаний с долговременной стабильностью. Важно отметить, что

есть предпосылки достижения модуля коэффициента отражения входа менее 0,1, поскольку за счет изменения сопротивления, установленного на термисторе, изменяется его коэффициент отражения входа, что позволит достичь согласования на фиксированных частотах и обеспечить модуль коэффициента отражения не более 0,05.

Проведенный анализ показал, что существующие преобразователи мощности оконечного типа не соответствуют современным требованиям к вторичным эталонам по ключевым параметрам: модулю коэффициента отражения (превышающему допустимые 0,1), долговременной стабильности. При этом термисторные преобразователи продемонстрировали наилучший метрологический потенциал благодаря стабильности характеристик (0,5 % в год) и устойчивости к перегрузкам, однако их широкое применение ограничено конструктивными и технологическими факторами. Данные преобразователи имеют существенный недостаток — повышенный модуль коэффициента отражения входа ($|\Gamma_{\text{во}}(f)|$), достигающий значений до 0,15 в рабочем диапазоне частот. Однако проведенные исследования выявили ряд перспективных направлений для уменьшения этого параметра.

Полученные результаты свидетельствуют, что доминирующее влияние на погрешность передачи оказывает именно погрешность рассогласования, которая зависит от $|\Gamma_{\text{во}}(f)|$. В связи с этим особую актуальность приобретает вопрос поиска оптимальных методов уменьшения $|\Gamma_{\text{во}}(f)|$ для снижения погрешности рассогласования и повышения точности передачи единицы мощности ЭМК. В следующем разделе рассмотрим более детально существующие подходы к решению этой проблемы и их эффективность.

1.4. Обоснование выбора пути уменьшения доминирующей погрешности при передаче единицы мощности ЭМК

Исследованию методов передачи единицы мощности СВЧ с использованием термисторных ваттметров посвящены работы Фрумкина В.Д., Чуйко В.Г., Проненко В.И., Механикова А.И., в которых был предложен ряд подходов по уменьшению погрешности из-за рассогласования, возникающей при передаче единицы

мощности ЭМК [30]. Однако рассмотренные в данных работах решения могут эффективно применяться только на фиксированных частотах.

Особую актуальность проблема рассогласования приобретает в случаях, когда фаза коэффициента отражения исследуемого СИ неизвестна; таким образом, невозможно использовать Γ -коррекцию для исключения погрешности из-за рассогласования измерительных трактов. К таким случаям относятся эталоны 1-го разряда мощности ЭМК, находящиеся в эксплуатации, поскольку без нарушения целостности конструкции удастся определить фазу коэффициента отражения выхода эталона 1-го разряда.

Значения модуля коэффициента отражения находящихся в эксплуатации ваттметров оконечного типа $|\Gamma_{вэ}(f)|$ увеличиваются с ростом частоты до значений 0,15, что приводит к значительному увеличению погрешности из-за рассогласования при передаче единицы мощности СВЧ в диапазоне частот от 5,64 до 37,50 ГГц. Для уменьшения погрешности передачи единицы мощности ЭМК целесообразно уменьшать модуль коэффициента отражения входа ваттметров оконечного типа.

Наиболее эффективным способом минимизации погрешности из-за рассогласования является использование ваттметров оконечного типа с малым коэффициентом отражения входа. Это особенно важно при работе с источниками СВЧ-сигналов, например при настройке и калибровке генераторов [31]. В процессе установки уровня выходного сигнала генератора, когда коэффициент отражения его выхода неизвестен, применение согласованного ваттметра позволяет существенно снизить погрешность измерения мощности СВЧ.

При использовании идеально согласованного ваттметра оконечного типа его влияние на погрешность из-за рассогласования минимизируется, что позволяет точнее устанавливать уровень мощности СВЧ-сигнала на генераторе. Это становится возможным благодаря снижению влияния отраженной волны на измеряемый сигнал.

Согласно действующим нормативным требованиям (пункт 3.2.2 приказа Росстандарта № 3461 от 30.12.2020), для обеспечения необходимой точности измере-

ний модуль коэффициента отражения ваттметра оконечного типа не должен превышать 0,1, а погрешность передачи единицы мощности СВЧ должна составлять не более $\pm 1,2$ % для вторичных эталонов.

На текущий момент существующие ваттметры оконечного типа не соответствуют данным требованиям, что создает определенные сложности при проведении высокоточных измерений мощности СВЧ. Это подчеркивает необходимость дальнейших исследований и разработок в области создания более совершенных преобразователей мощности оконечного типа с улучшенными метрологическими характеристиками.

Коэффициент отражения входа ваттметра оконечного типа является одним из ключевых параметров, определяющих точность измерений мощности электромагнитных колебаний в волноводных трактах. Его уменьшение имеет существенные преимущества:

1. Повышение точности измерений. При уменьшении коэффициента отражения снижается погрешность рассогласования между измерительным устройством и измеряемой средой. Это напрямую влияет на точность передачи единицы мощности электромагнитных колебаний, что особенно важно при работе в диапазоне частот от 5,64 до 37,50 ГГц.

2. Улучшение метрологических характеристик. Снижение коэффициента отражения позволяет использовать ваттметры оконечного типа в качестве эталонов-переносчиков мощности СВЧ. Такие приборы могут выступать как возимые и вторичные эталоны для передачи единицы мощности или как исходные СИ в составе рабочих эталонов.

Таким образом, уменьшение коэффициента отражения входа ваттметра оконечного типа является целесообразным решением, позволяющим существенно повысить точность измерений, расширить область применения прибора и улучшить его метрологические характеристики в целом. Это особенно актуально для современных измерительных систем, где требуется высокая точность и стабильность показаний.

Согласно пункту 3.2.2 приказа Росстандарта № 3461 от 30.12.2020, модуль коэффициента отражения такого ваттметра не должен превышать 0,1, а погрешность передачи единицы мощности СВЧ должна быть не более $\pm 1,2\%$ для вторичных эталонов мощности ЭМК. Исходя из таблицы 1, в настоящее время нет ваттметров окончного типа, удовлетворяющих этим требованиям.

Важно отметить, что погрешность из-за рассогласования измерительных трактов зависит также от модуля $|\Gamma_{\text{э}}(f)|$ (3), который относится к калибраторам мощности, используемым в качестве эталонов 1-го разряда.

Эффективный коэффициент отражения $|\Gamma_{\text{э}}(f)|$ является одной из нормируемых характеристик эталонов 1-го разряда (ваттметров проходного типа), определяющей точность измерения мощности СВЧ. В работе рассматриваются методы повышения точности $|\Gamma_{\text{э}}(f)|$ с целью повышения достоверности результатов измерений.

В настоящее время возможности уменьшения $|\Gamma_{\text{э}}(f)|$ ограничиваются конструктивными особенностями применяемых ваттметров проходного типа, а также технологическими ограничениями при их производстве.

Методы по измерению эффективного коэффициента отражения у ваттметров проходного типа, изложенные в ГОСТ 8.392-80 [32], предполагают использование комплекса аппаратуры, в т. ч. измерительных линий, снятых с производства еще в 1990-х гг., что делает измерения трудно реализуемыми на практике, процесс измерений является трудоемким, требует большого количества времени, а погрешность измерений $|\Gamma_{\text{э}}(f)|$ при этом достигает $\pm 0,016$.

При разработке и производстве волноводных ваттметров проходного типа необходимо измерять $|\Gamma_{\text{э}}(f)|$ в диапазоне частот от 5,64 до 37,50 ГГц.

В свою очередь, метод измерений модуля $|\Gamma_{\text{э}}(f)|$ НО векторным анализатором цепей делает измерения менее трудоемкими, более точными, более быстрым, позволяет получить более подробные характеристики $|\Gamma_{\text{э}}(f)|$; позволяет измерить больший объем изготавливаемой продукции за меньшее количество времени [33].

Результаты измерений $|\Gamma_{\text{э}}(f)|$ векторным анализатором цепей представлены на рисунке 7.

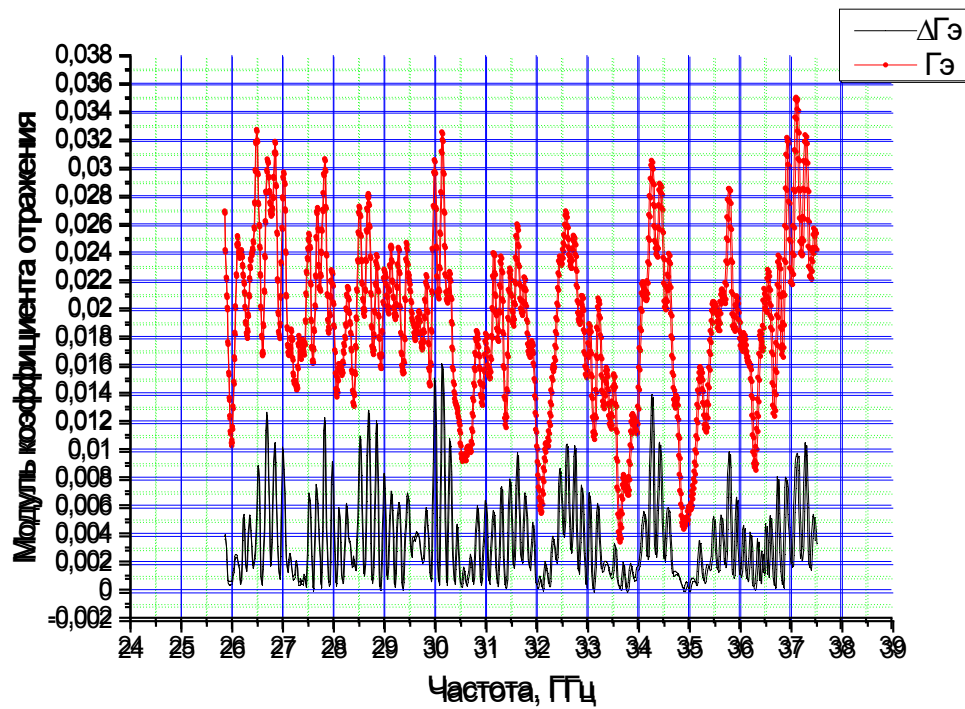


Рисунок 7 — Значения и погрешность определения $|\Gamma_{\varepsilon}(f)|$
волноводного направленного ответвителя сечения $7,2 \times 3,4$ мм

С применением векторных анализаторов цепей (ВАЦ) [34] процесс измерений стал менее трудоемким, более быстрым, но такой метод подходит только на этапе разработки и изготовления направленных ответвителей, входящих в состав ваттметров проходного типа. В процессе эксплуатации ваттметров проходного типа (калибраторов мощности) векторным анализатором цепей невозможно измерить $|\Gamma_{\varepsilon}(f)|$ без нарушения целостности конструкции (разбора). Разбор не допускается, поскольку это приведет к измерению частотных коэффициентов калибраторов мощности, а как следствие — увеличению погрешности передачи.

Важно отметить, что существующие подходы к уменьшению погрешности рассогласования эффективны только на фиксированных частотах, а конструктивные особенности ваттметров проходного типа ограничивают возможности дальнейшего снижения коэффициента отражения.

В связи с этим целесообразно рассмотреть возможность разработки новых ваттметров оконечного типа, соответствующих требованиям к вторичным эталонам мощности ЭМК. Для достижения необходимого снижения модуля коэффициента

отражения $|\Gamma_{ВЭ}(f)|$ предлагается использовать инновационный подход — применение согласующих волноводно-волноводных трансформаторов со встроенной многозондовой системой термисторов [35]. Такая конструкция позволит не только обеспечить требуемую чувствительность измерений, но и выступит в роли согласующей электрической неоднородности для электромагнитного поля, что существенно улучшит метрологические характеристики приборов.

Таким образом, для повышения точности передачи единицы мощности ЭМК требуется комплексный подход, включающий как совершенствование конструкций измерительных приборов, так и разработку новых методов и СИ.

1.5. Выводы по главе 1

Проведенное исследование метрологических задач в области измерений мощности СВЧ позволяет сделать ряд важных обобщений. Анализ показал, что существующие методы передачи единицы мощности электромагнитных колебаний обеспечивают достаточную точность измерений, однако парк вторичных эталонов мощности ЭМК не обеспечивает последовательную передачу единицы мощности в соответствии с современными требованиями. Особенно актуальным является вопрос рассогласования измерительных трактов, который вносит наибольший вклад в суммарную погрешность передачи единицы мощности ЭМК.

В настоящее время большинство эксплуатируемых ваттметров окончечного типа не соответствуют требованиям, предъявляемым к вторичным эталонам мощности ЭМК. Существующие методы передачи единицы мощности, хотя и обеспечивают высокую точность измерений, не позволяют организовать их последовательную передачу в полном объеме из-за характеристик используемых ваттметров окончечного типа. Это приводит к дефициту запаса точности между вторичными эталонами и эталонами 1-го разряда мощности ЭМК.

Анализ источников погрешностей показал, что доминирующей составляющей является погрешность из-за рассогласования измерительных трактов, достигающая $\pm 1,2\%$. При этом сумма остальных составляющих погрешности не превышает

$\pm 0,4$ %. Существующие ваттметры оконечного типа не соответствуют требованиям по коэффициенту отражения, который должен быть не более 0,1.

Для решения выявленных проблем необходимо комплексное совершенствование измерительной базы. Требуется уменьшить модуль коэффициента отражения входа ваттметров оконечного типа до значения не более 0,03. Также необходимо разработать новые средства и методы измерения модуля эффективного коэффициента отражения. Перспективным направлением является использование согласующих волноводно-волноводных трансформаторов с многозондовой системой термисторов, что позволит существенно улучшить метрологические характеристики приборов.

Таким образом, для повышения точности передачи единицы мощности ЭМК необходимо реализовать комплексный подход, включающий совершенствование конструкций ваттметров оконечного типа, разработку новых СИ модуля эффективного коэффициента отражения и методов их измерения.

В главе 2 представлены результаты разработки метода измерений S -параметров термисторных СВЧ-датчиков, включая конструктивные особенности термисторного датчика, методику измерений его параметров в волноводных трактах, а также описание разработанного комплекта калибровочных мер для проведения точных измерений. Особое внимание будет уделено исследованию влияния различных факторов на метрологические характеристики термисторных датчиков и способам их оптимизации.

Глава 2. Разработка метода измерений S -параметров термисторов СВЧ в волноводных трактах СВЧ-диапазона

2.1. Конструкция термисторного датчика СВЧ-мощности и его основные характеристики

Термистор — это терморезистор, изготовленный из специального полупроводникового материала, обладающего большим отрицательным температурным коэффициентом сопротивления [36].

К основным характеристикам термистора относят:

номинальное сопротивление — базовое сопротивление при исходной температуре $(23 \pm 1)^\circ\text{C}$;

температурный коэффициент сопротивления — определяет изменение сопротивления при нагреве;

мощность подогрева — мощность, при которой термистор работает в оптимальном режиме;

вольтамперная характеристика — зависимость между напряжением и током;

уровень собственных шумов — определяет минимальную измеряемую мощность.

В СВЧ-диапазоне используются термисторы двух основных типов:

— бусинковые термисторы имеют меньшую поверхность охлаждения и, соответственно, большую чувствительность;

— стержневые термисторы обладают более высокой электрической прочностью и меньшим реактивным сопротивлением.

Чувствительность термисторов находится в диапазоне от 10 до 100 Ом/мВт. Рабочая точка термистора выбирается на участке с максимальной крутизной характеристики для достижения максимальной чувствительности.

Разработанные во ФГУП «ВНИИФТРИ» термисторы СВЧ целесообразно использовать в ваттметрах, работающих в диапазоне от 5,64 до 37,50 ГГц [37]. Тер-

мисторы из оксидов металлов изготавливаются путем смешивания порошков оксидов металлов с добавками, которые регулируют их свойства, такие как номинальное (холодное) электрическое сопротивление, температурный коэффициент сопротивления и т. д. Затем смесь прессуется в форму и подвергается спеканию при высокой температуре. В результате спекания образуется плотный керамический материал с высокой теплопроводностью. Однако при изготовлении термисторов определяют их номинальное электрическое сопротивление и вольтамперную характеристику (ВАХ) на постоянном токе или токе низкой частоты не более 100 кГц [38], в то время как применяют термисторы в преобразователях мощности СВЧ-диапазона.

Осуществлять качественный отбор и проверять характеристики термисторов СВЧ на низких частотах нецелесообразно, поскольку ВАХ не является информативным параметром при использовании термистора в СВЧ-диапазоне. Для большинства термисторов ВАХ соответствует теоретическим выкладкам [39]. В свою очередь, на практике термисторы, изготовленные по различным технологиям, применяют в преобразователях СВЧ-мощности, и их ВАХ также соответствует теоретическим выкладкам. Однако характеристики преобразователей мощности, такие как частотный коэффициент и модуль коэффициента отражения входа, получаются кардинально разными в зависимости от партии термисторов и их номинального сопротивления. Поэтому для эксплуатации термисторов в СВЧ-диапазоне необходимо ввести дополнительные параметры, которыми можно охарактеризовать термисторы в СВЧ-диапазоне.

Наиболее информативными в СВЧ-диапазоне являются S -параметры [40], представленные в виде модуля и фазы коэффициентов отражения и передачи. Поэтому предложено разработать метод измерений S -параметров с применением векторного анализатора цепей.

2.2. Метод измерений модуля коэффициента отражения и передачи термистора СВЧ

В основу разработанного метода измерений положен комплексный подход к исследованию S -параметров термисторных СВЧ-датчиков в волноводных трактах нестандартного сечения.

Конструктивная реализация измерительной системы базируется на размещении термистора в специально разработанном волноводном канале с поперечным сечением $a \times b$ мм, соответствующем рабочему диапазону частот от 5,64 до 37,50 ГГц.

Конструктивное решение позволяет легко устанавливать в центре широкой стенки (а) чувствительный элемент в зоне максимальной напряженности электрического поля, что обеспечивает эффективное поглощение падающей СВЧ-мощности. Стоит отметить минимизацию паразитной индуктивности за счет выноса выводов термистора за пределы волноводного канала.

Измерительная база включает следующие СИ:

- ВАЦ с коаксиальными измерительными портами;
- комплект специальных волноводных трансформаторов для согласования;
- набор калибровочных мер для нестандартизированного волноводного тракта.

Методика проведения измерений реализуется по схеме TRL-калибровки, включающей [41]:

Through — прямое соединение измерительных портов;

Reflect — стандарт отражения;

Line — четвертьволновый отрезок.

Схема измерений модуля и фазы коэффициента отражения и передачи термистора СВЧ приведена на рисунке 8.

Применение ступенчатых волноводных трансформаторов с коэффициентом отражения не более 0,03 позволяет минимизировать потери при переходе из стандартизированного тракта в нестандартизированный. Следует отметить компактность конструкции — общая длина перехода не превышает 40 мм.



Рисунок 8 — Блок-схема установки измерений модулей и фазы коэффициента отражения и передачи термистора

Процедура измерений включает последовательность операций:

1. Сборка измерительной схемы, приведенной на рисунке 8.
2. Проведение калибровки в нестандартизированном волноводном тракте.
3. Выполнение измерений модулей и фаз коэффициентов отражения (S_{11} , S_{22}) и передачи (S_{21} и S_{12}).
4. Верификация результатов путем сопоставления с теоретическими расчетами.
5. Расчет неопределенности измерений модуля и фазы коэффициента отражения и передачи.

Метод позволит определить зависимость модулей коэффициентов отражения и передачи от электрического сопротивления термистора, что подтвердит соответствие этого метода сформулированным теоретическим критериям.

Для реализации метода измерений S -параметров термисторов необходимо разработать:

- волноводный фланец для исследования термисторного СВЧ-датчика в не-стандартизированном волноводном тракте;
- комплект специальных волноводных трансформаторов для перехода из стандартизированного в нестандартизированный волноводный тракт;
- наборы калибровочных мер для нестандартизированных волноводных трактов.

Таким образом, представленная методология измерений позволяет получить полную картину электродинамического поведения термисторного СВЧ-датчика в условиях его практического применения, что является необходимым условием для его эффективного использования в разрабатываемых ваттметрах оконечного типа.

Особого внимания заслуживает тот факт, что разработанный метод позволяет проводить комплексное исследование характеристик термисторов непосредственно в рабочем диапазоне частот, что существенно повышает достоверность получаемых результатов по сравнению с традиционными методами измерений на постоянном токе.

2.3. Разработка волноводного фланца для исследования термисторного СВЧ-датчика

Конструктивно термисторный СВЧ-датчик включает в себя волноводный фланец с волноводным каналом, в котором расположен термистор. Его выводы подключены к электрическим емкостям, установленным на корпус волновода, через которые с помощью сигнальных проводов осуществляется соединение с автобалансной мостовой схемой [42].

Эквивалентная схема термистора [43] приведена на рисунке 9.

При измерении коэффициентов отражения и передачи четырехполюсника в волноводных трактах используют ВАЦ совместно с калибровочными волноводными мерами, позволяющими смещать измерительную плоскость в плоскость проведения калибровки (градуировки) для дальнейших измерений. ВАЦ применяют в стандартизированных комплектах калибровочных мер в волноводных трактах, в то

время как измерение коэффициентов отражения и передачи термистора необходимо выполнять в нестандартизированных волноводных трактах. Использование термистора в стандартизированных волноводных трактах приводит к увеличению индуктивного сопротивления. Оно возникает из-за проволочных выводов (L_1), как показано на рисунке 9. В результате образуется электрический шунт, функция частотной характеристики которого нелинейная в диапазоне рабочих частот. Также это приводит к снижению чувствительности, и, как следствие, преобразователь мощности будет иметь узкий диапазон измеряемой мощности.

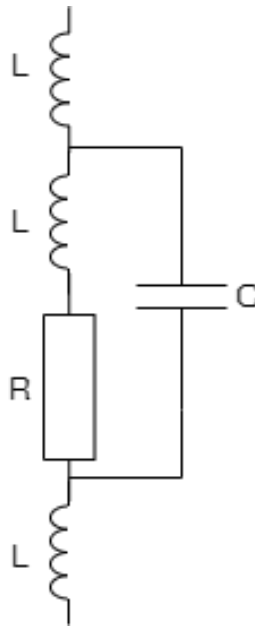


Рисунок 9 — Эквивалентная схема термистора в волноводе:

L — индуктивное сопротивление; R — реактивное сопротивление;

C — емкостное сопротивление

Источником этих недостатков являются проволочные выводы термистора; многократно увеличивается индуктивное сопротивление L (рисунок 9), поскольку длина проволочных выводов превышает длину тела термистора не менее чем в 2 раза. Высота рабочего тела термистора СВЧ составляет 1,2 мм, диаметр — 0,3 мм. Исходя из эквивалентной электрической схемы термистора, представленной на рисунке 9, при таком включении значительно увеличивается индуктивное сопротивление, которое, в свою очередь, приводит к шунтированию электромагнитного

поля. Для уменьшения индуктивного сопротивления предложено уменьшать волноводный канал до размеров термистора СВЧ, что позволяет сократить длину проволочных выводов. Снижение волноводного канала также необходимо для концентрирования электромагнитного поля на рабочее тело термистора.

На рисунке 10 приведено изображение рабочего тела термистора с выводами в стандартизированном волноводном тракте $11 \times 5,5$ мм.

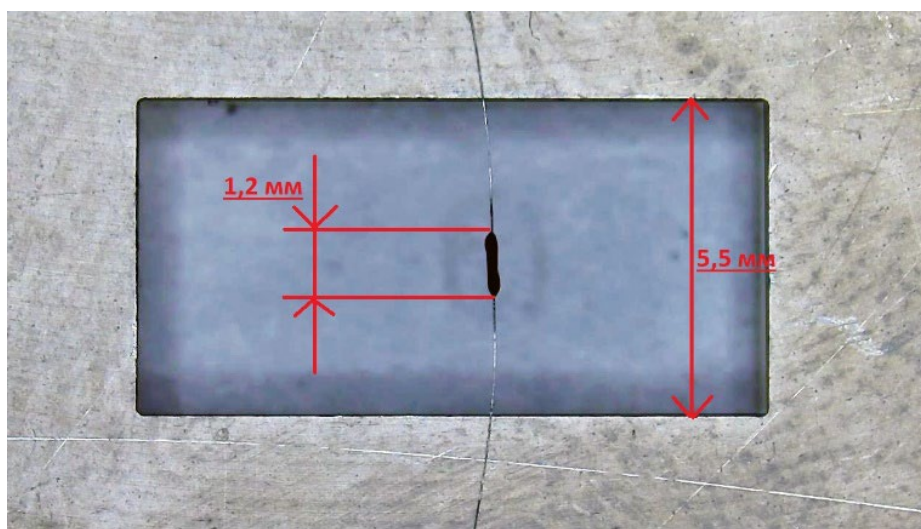


Рисунок 10 — Термистор СВЧ в стандартизированном волноводном тракте

Для размещения термистора требуется волноводный канал размером не более 1,0 мм, чтобы уменьшить индуктивное сопротивление. Исключение наведения электромагнитной волны предложено осуществлять конструктивным уменьшением канала до размеров рабочего тела термистора таким образом, чтобы выводы термистора находились за пределами волноводного канала, как это показано на рисунке 11.

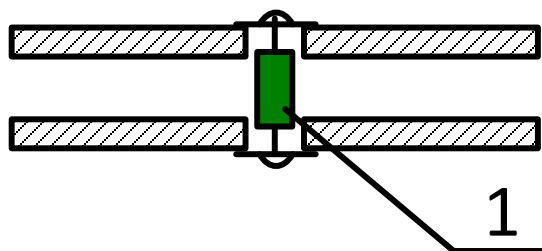


Рисунок 11 — Схематичная установка термистора в нестандартизированном волноводном тракте высотой 1 мм

Поскольку размер волноводного сечения (a) определяет рабочий диапазон частот, для проверки характеристик в диапазоне частот волноводных трактов размер сечения волновода (a) соответствует ГОСТ РВ 51914-2002. В свою очередь, СИ коэффициентов отражения и передачи работают в стандартизированных волноводных трактах.

Чтобы осуществить переход в нестандартизированный волноводный канал, предложено уменьшить стенку (b). Высота стенки (b) была уменьшена до размеров рабочего тела термистора, равного $1 \pm 0,01$ мм. На рисунке 12 приведены габаритные размеры термистора в волноводном тракте стандартизированного сечения $11 \times 5,5$ мм (рисунок 12а) и нестандартизированного сечения 11×1 мм (рисунок 12б).

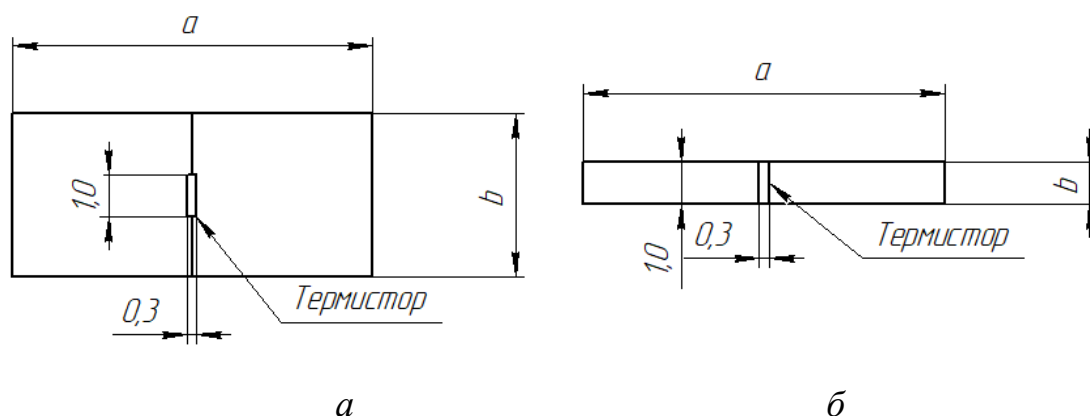


Рисунок 12 — Эскиз волноводных каналов с термистором:

a — габаритные размеры термистора в стандартизированном сечении волновода; b — габаритные размеры термистора в нестандартизированном сечении волновода. На рисунке a геометрические размеры $a \times b$ приведены в соответствии с ГОСТ 51914-2002; на рисунке b — размер b соответствует геометрическим размерам рабочего тела термистора

Для оценки поглощаемой мощности, характеризуемой модулем коэффициента передачи, термистор устанавливают по центру широкой стенки в разработанном нестандартизированном волноводном тракте в точке максимальной напряженности

электрического поля. За счет этого достигается максимальное поглощение падающей СВЧ-мощности термисторным СВЧ-датчиком.

Поэтому для установки термистора разработана конструкция волноводного отрезка для исследования его параметров на СВЧ непосредственно в рабочем диапазоне частот преобразователя мощности оконечного типа. Конструкция термисторного СВЧ-датчика показана на рисунке 13, а на рисунке 14 изображен изготовленный образец.

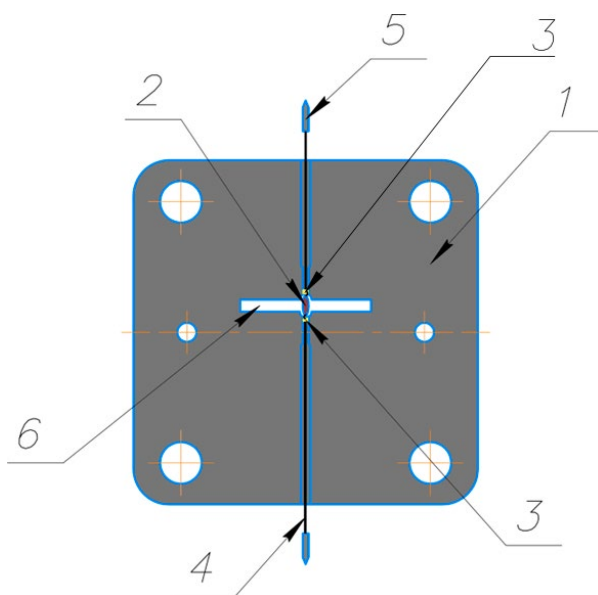


Рисунок 13 — Эскиз конструкции термисторного СВЧ-датчика:

1 — волноводный фланцевый соединитель; 2 — термистор; 3 — электрические емкости; 4 — сигнальные провода; 5 — контакты для подключения измерительного блока с автобалансной мостовой схемой; 6 — волноводный канал

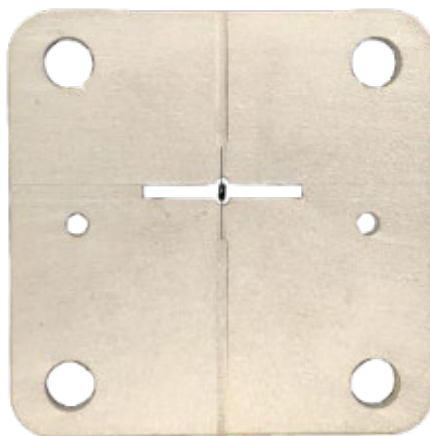


Рисунок 14 — Вставка с термистором

Конструктивно разработанный термисторный СВЧ-датчик мощности является детектором, который может быть подключен к волноводному измерительному тракту посредством соединения со стандартизированным фланцем для измерения мощности электромагнитных колебаний. Измерения мощности СВЧ осуществляются методом замещения и определяются по формуле [44]:

$$P_{\text{СВЧ}} = P_0 - P_1 = \frac{U_0^2 - U_1^2}{R},$$

где P_0 — мощность подогрева термистора; P_1 — мощность подогрева термистора при поданном сигнале СВЧ; U_0 — напряжение в термисторе; U_1 — напряжение в термисторе при поданном сигнале СВЧ; R — сопротивление термистора.

Техническим результатом является унификация термисторного СВЧ-датчика для применения в различных конструкциях преобразователей мощности СВЧ оконечного и проходного типа для измерения мощности электромагнитных колебаний при их разработке.

Результат достигается за счет того, что конструкция датчика мощности СВЧ обеспечивает совместимость с соответствующим частотному диапазону фланцевым соединителем, выполненным в соответствии с ГОСТ РВ 51914-2002. При этом термисторный СВЧ-датчик включает в себя волноводный фланец с волноводным каналом, в котором расположен термистор. Выводы термистора подключены к электрическим емкостям, через которые с помощью сигнальных проводов осуществляется соединение с измерительным блоком с автобалансной мостовой схемой.

Термисторный СВЧ-датчик работает следующим образом: устройство подключается к волноводному тракту, в который подается мощность СВЧ; распространяемая электромагнитная волна в отрезке волноводного тракта попадает на термистор, установленный в волноводном канале волноводного фланца. Мощность электромагнитных колебаний детектируется термистором и через сигнальные провода передается в измерительный блок с автобалансной мостовой схемой. Измерительная информация отображается на экране измерительного блока или персональной вычислительной машины через специальное программное обеспечение.

Таким образом, для применения векторного анализатора цепей в нестандартизированных волноводных трактах необходимо разработать волноводный согласующий трансформатор электромагнитного поля с модулем коэффициента отражения не более 0,03 для снижения потерь в измерительном тракте.

2.4. Разработка согласованного волноводно-волноводного трансформатора с целью снижения рассогласования

Плавные волноводные переходы используются для согласования нагрузок и могут рассматриваться как предельный случай ступенчатого перехода при увеличении числа ступенек n до бесконечности и неизменной длине перехода. Наиболее часто употребляются на практике экспоненциальный чебышевский переход и вероятностный переход, являющийся предельным случаем ступенчатого перехода с максимально плоской характеристикой. Эффективность согласования зависит от скорости изменения волнового сопротивления вдоль линии. Чем медленнее изменяется высота между трактами, тем шире полоса согласования и больше длина перехода. Недостатком плавных экспоненциальных переходов является их большая длина при значительных перепадах волнового сопротивления. При этом длина оптимального чебышевского перехода — в 3 раза меньше. Среди плавных переходов при одинаковых перепадах волновых сопротивлений, нижней граничной частоте и допуске на рассогласование наименьшую длину имеют чебышевские переходы [45].

Ступенчатые трансформаторы (переходы) применяются для согласования линии с нагрузкой, имеющей небольшую реактивную составляющую. Ступенчатые трансформаторы представляют собой каскадное включение отрезков линий передачи с различными волновыми сопротивлениями, но имеющими одинаковую длину. Волновые сопротивления соседних ступенек отличаются на небольшую величину, и отражения от них невелики. Принцип работы ступенчатого трансформатора заключается в том, что всегда найдется хотя бы пара ступенек, отражение от которых компенсируется. Чем больше ступенек, тем лучше согласование и шире

полоса пропускания. Структура трансформатора определяется числом ступенек. Свойства трансформатора описываются его частотной характеристикой, которая представляет собой зависимость рабочего затухания L от частоты. Под рабочим затуханием понимают величину:

$$L = 10 \log \left(\frac{P_{\text{вх}}}{P_{\text{вых}}} \right) [\text{дБ}]. \quad (16)$$

Поэтому при разработке целесообразно применять ступенчатые волноводные переходы.

Разработка ступенчатого волноводно-волноводного трансформатора, сниженного по узкой стенке поперечного сечения волноводного тракта, необходима для снижения потерь при переходе между волноводными трактами и согласования стандартного волноводного тракта с нестандартным волноводным сечением. Коэффициент отражения такого трансформатора не должен превышать значение модуля коэффициента отражения и должен стремиться к нулю. При значении более 0,03, согласно уравнению (1), значение преобразователя мощности СВЧ превысит допустимое значение модуля коэффициента отражения входа.

Исходными данными для расчета приняты размеры прямоугольных волноводных трактов. Расчеты выполнены для волноводных трактов 35×15 , 23×10 , 17×8 , 16×8 , $11 \times 5,5$, $7,2 \times 3,4$ мм, что соответствует частотному диапазону от 5,64 до 37,50 ГГц. Далее подробно рассмотрен ход разработки на примере тракта $11 \times 5,5$ мм.

Длины волн в волноводе $\lambda_{\text{в}}$, соответствующие частотному диапазону от 16,70 до 25,86 ГГц, находятся в диапазоне от 31,12 до 13,62 мм (1):

$$\lambda_{\text{в}} = \frac{\lambda}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{2a} \right)^2}}, \quad (17)$$

где $\lambda \approx 30/f$ (ГГц).

Коэффициент перекрытия q характеризует ширину рабочего диапазона устройства. Он определяется как отношение максимальной длины волны ($\lambda_{\max}$) к минимальной длине волны ($\lambda_{\min}$) в рабочем диапазоне и определен по формуле (18):

$$q = \frac{\lambda_{\text{в max}}}{\lambda_{\text{в min}}}. \quad (18)$$

Средняя гармоническая длина волны рассчитана по формуле (19):

$$\lambda_{\text{ср}} = \frac{2 \cdot \lambda_{\text{в min}} \cdot \lambda_{\text{в max}}}{\lambda_{\text{в min}} + \lambda_{\text{в max}}}. \quad (19)$$

Отношение волновых сопротивлений равно отношению высот рассчитываемых волноводов, поэтому перепад волнового сопротивления определяется по формуле (20):

$$R = \frac{b_1}{b_2}, \quad (20)$$

где b_1 — размер стенки b регулярного волновода в мм; b_2 — размер стенки b сниженного волновода в мм.

В приближенной теории распространения электромагнитной волны в волноводе, справедливой при условии, что модуль коэффициента отражения каждой неоднородности (ступеньки) составляет не более 0,33, определено понятие гипотетический коэффициент отражения, модуль которого вычисляется по формуле (21):

$$|\Gamma_R| = \frac{1}{2} \ln R. \quad (21)$$

Число неоднородностей рассчитано по формуле (22). При $q = 3$, $R = 11$ и $|\Gamma_{\max}| = 0,05$ получаем порядок полинома Чебышева $n = 3$, что соответствует числу ступенек перехода $m = 8$ ($m = 2^n$):

$$n \geq \frac{\ln \left(\frac{\ln R}{|\Gamma|_{\max}} \right)}{\ln \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{q+1}{q-1} \right)}. \quad (22)$$

Коэффициент отражения одной ступеньки определяется по формуле (23):

$$|\Gamma_1| = \frac{1}{2m} \cdot \ln R. \quad (23)$$

Расстояния между двумя ступеньками l_3 , между парами ступенек l_2 и четверками ступенек l_1 определялись по формуле [46] (24):

$$l_k = \frac{\lambda_{гср}}{4} \cdot \frac{1}{1 + x_k \cdot \frac{q-1}{q+1}}. \quad (24)$$

Величины x_k равны значениям корней полинома Чебышева 3-й степени на интервале $(-1;1)$, (расчетные значения корней полинома: $x_1 = -0,866$; $x_2 = 0$; $x_3 = 0,866$).

Таким образом, по формуле (24) определены значения $l_1 = 7,163$; $l_2 = 4,738$; $l_3 = 3,539$ мм.

Рассчитаны длины каждой ступеньки в последовательности от размера 5,5 мм к 1 мм. Высоты волноводных отрезков между ступеньками (b_i) определены по формуле (25):

$$b_{i+1} = b_i \cdot e^{-2|\Gamma_1|}, \quad i = 0 \dots 7; \quad b_0 = 5,5 \text{ мм}. \quad (25)$$

Результаты расчетов приведены на рисунке 15.

Коэффициент отражения перехода в предположении отсутствия потерь в стенках волновода и при пренебрежении переотражениями между ступеньками рассчитывался по формуле (26):

$$|\Gamma(f)| = \Gamma_R \cdot \left| \cos\left(\frac{2\pi \cdot l_1}{\lambda_g(f)}\right) \cdot \cos\left(\frac{2\pi \cdot l_2}{\lambda_g(f)}\right) \cdot \cos\left(\frac{2\pi \cdot l_3}{\lambda_g(f)}\right) \right|. \quad (26)$$

Результаты расчета модуля коэффициента отражения ступенчатого перехода приведены на рисунке 16.

Полученные размеры элементов волноводного перехода принимались за первое приближение и уточнялись с помощью автоматизированной системы проектирования в электродинамической среде [47]. Так, на отрезке длиной всего 40 мм получена модель волноводно-волноводного перехода (ВВП), модуль коэффициента отражения которого не превышает 0,03.

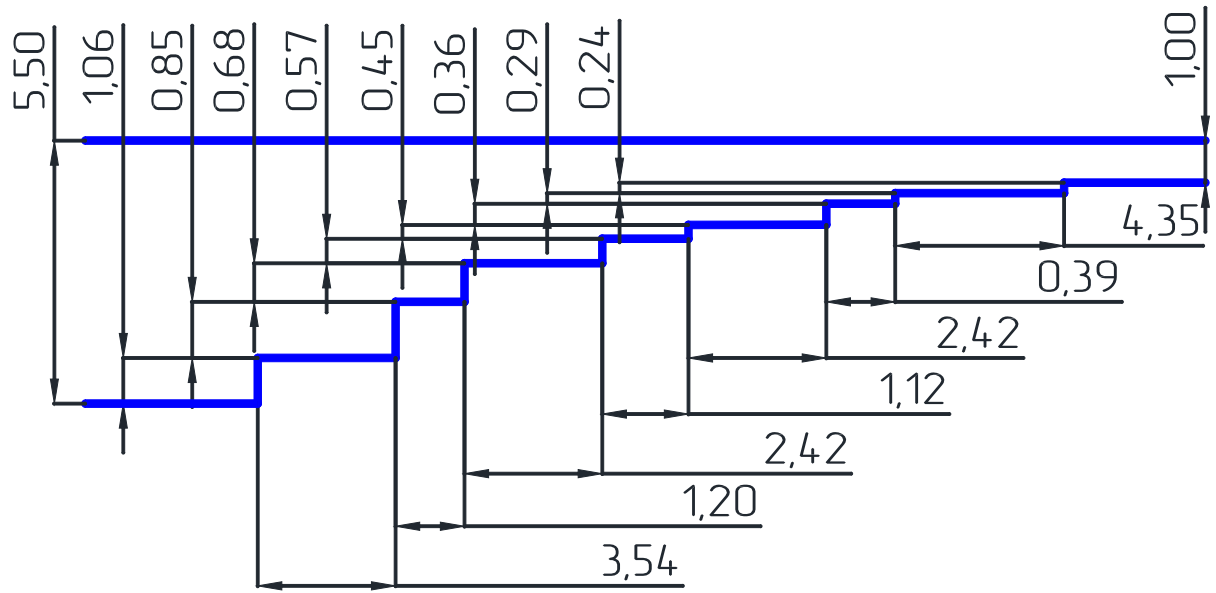


Рисунок 15 — Длины и высоты ступенек перехода

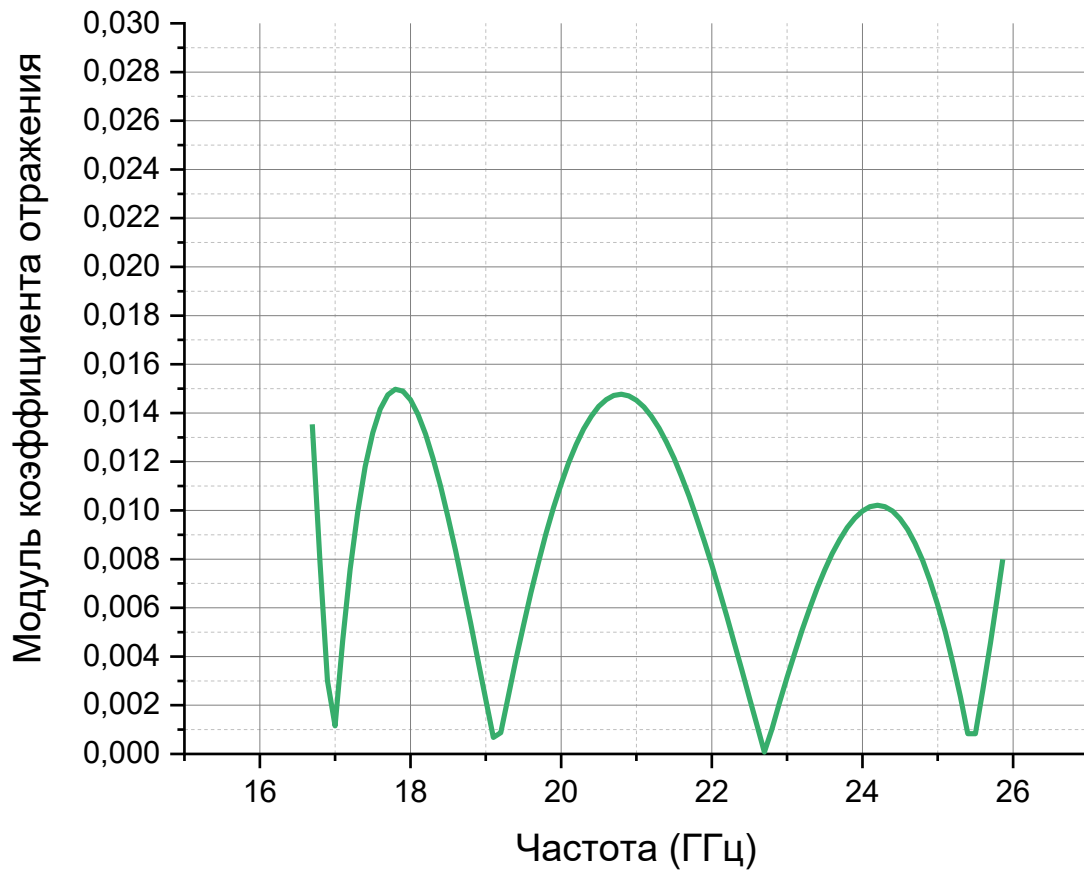


Рисунок 16 — Модуль коэффициента отражения волноводно-волноводного ступенчатого перехода, полученного аналитической оценкой

Поскольку в первом приближении предполагалось отсутствие потерь в стенках ВВП и пренебрегали переотражениями, то в дальнейшем необходимо выполнить моделирование в автоматизированной системе проектирования для учета потерь и переотражений между ступеньками ВВП.

Спроектированная модель ВВП представлена на рисунке 17. Показана ступенчатая структура перехода, полученная методом расчета неэквидистантных устройств. Также видно, что длина всего перехода составляет не более 40 мм.

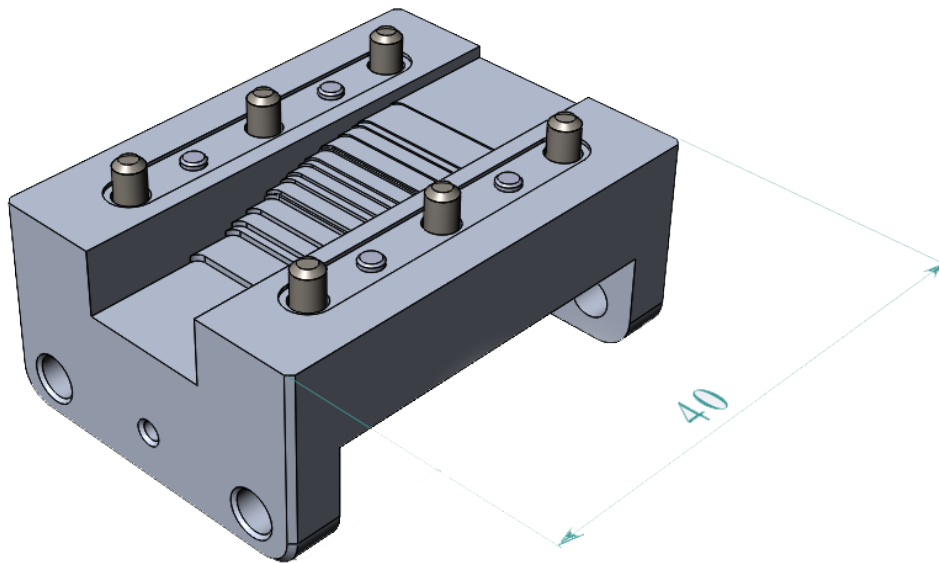


Рисунок 17 — Модель ступенчатого перехода (без верхней части)

Внесение модели в систему автоматизированного проектирования (САПР) выполнено путем построения данной модели. В построенной модели объявлены глобальные переменные — длины и высоты ступенек, полученные аналитической оценкой, — которые САПР позволяет оптимизировать, исходя из заданного критерия. Таким критерием является значение $S_{11} \leq 0,03$, где плоскость S_{11} (порта 1) расположена со стороны стандартизированного волноводного тракта.

Далее выполнено разбиение модели, которая представляет собой сетку, на малые ячейки. Сеточное разбиение позволяет провести интегральный расчет малых ячеек для решения уравнений Максвелла. При этом существуют два основных типа

сетки: гексаэдральная, которая применяется для ортогональных декартовых структур и обеспечивает высокую точность расчетов, и тетраэдральная, используемая для сложных геометрических форм с возможностью автоматической генерации на основе поверхности модели. В работе использована гексаэдральная из-за простоты геометрической формы и для снижения времени расчетов.

На рисунке 18 приведена гексаэдральная сетка разбиения со ступенчатой структурой с введенным минимальным радиусом в углах ступеней.

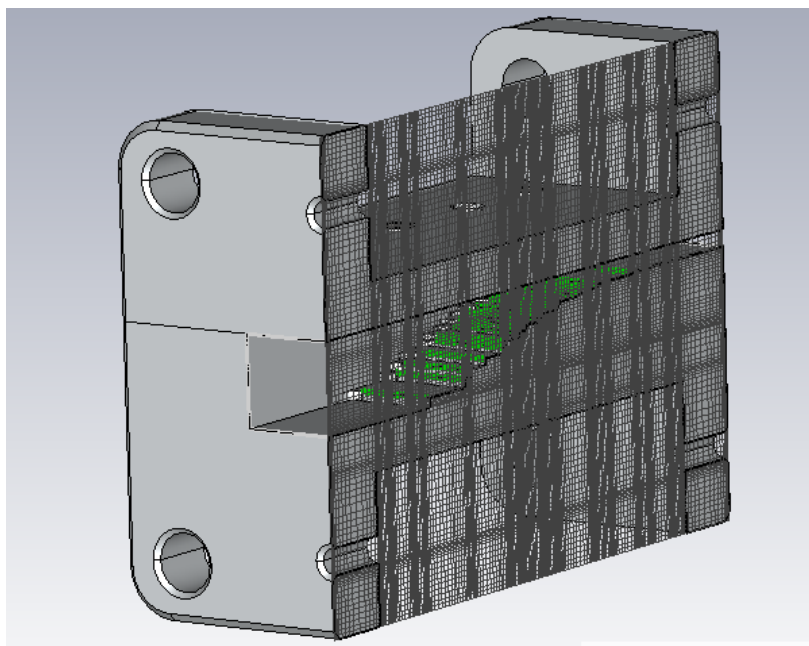


Рисунок 18 — Сетка разбиения при расчете параметров чебышевского перехода

В результате моделирования был подтвержден аналитический расчет, однако из-за введения потерь и введения радиусов фрезы ($R = 0,75$ мм) значения модуля коэффициента отражения увеличились до 0,035. В свою очередь, оптимизация геометрических размеров ступенек позволила сохранить значения в допуске 0,03 по модулю коэффициента отражения.

Верификация полученных результатов выполнена путем сравнения результатов, полученных математическими расчетами, методом расчета неэквидистантных устройств и методом электродинамического моделирования в системе автоматизированного проектирования. Результаты соответствуют полученным теоретическим

расчетам, а значение модуля коэффициента отражения входа не превышает 0,03. Полученные результаты приведены на рисунке 19.

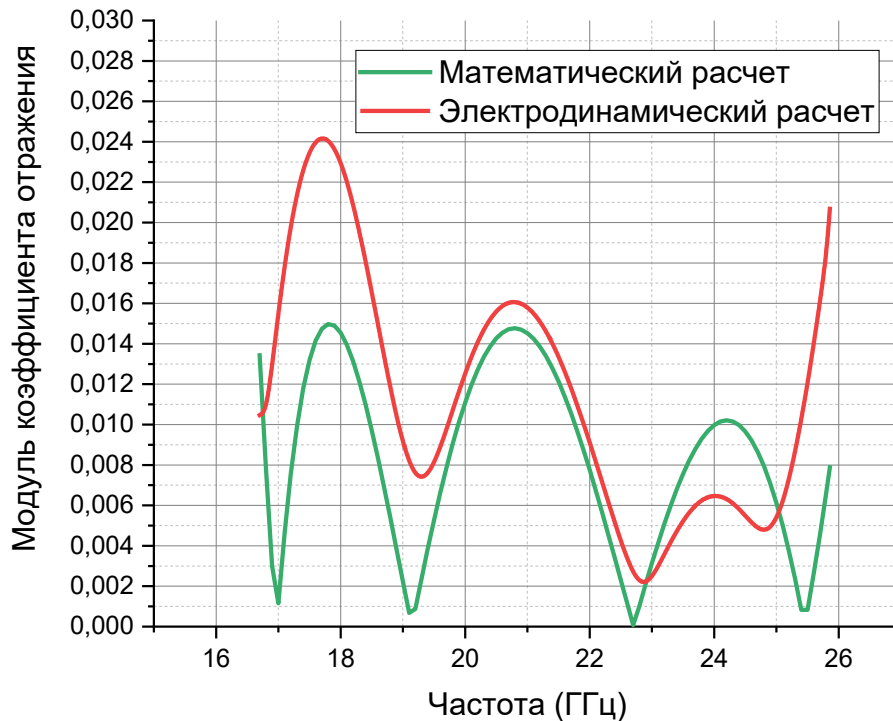


Рисунок 19 — Сравнение коэффициентов отражения волноводно-волноводного трансформатора

Коэффициент передачи такого перехода составляет не более $-0,1$ дБ. Результат моделирования во всей полосе частот волноводного тракта $11 \times 5,5$ мм приведен на рисунке 20.

В результате разработки получен волноводный трансформатор для перехода между трактами стандартизированного и нестандартизированного типа. Волноводно-волноводные чебышевские трансформаторы имеют согласующую длину не более 15 мм для тракта $11 \times 5,5$ мм, а общая длина изделия составляет не более 40 мм. На рисунке 21 приведена фотография изготовленных образцов волноводных трансформаторов.

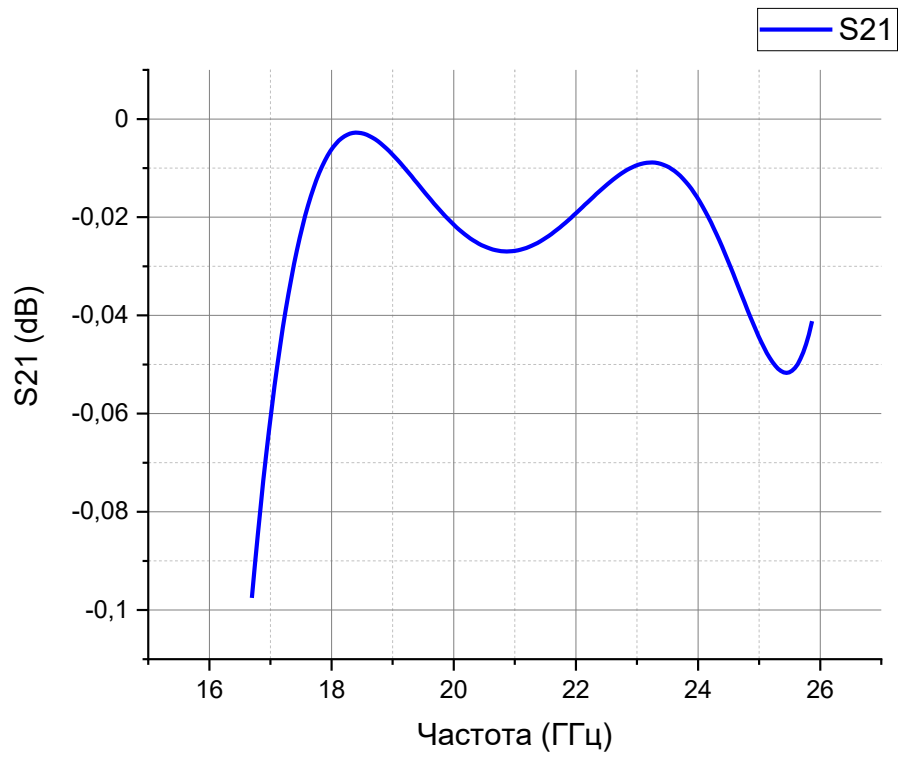


Рисунок 20 — Коэффициент передачи волноводно-волноводного трансформатора

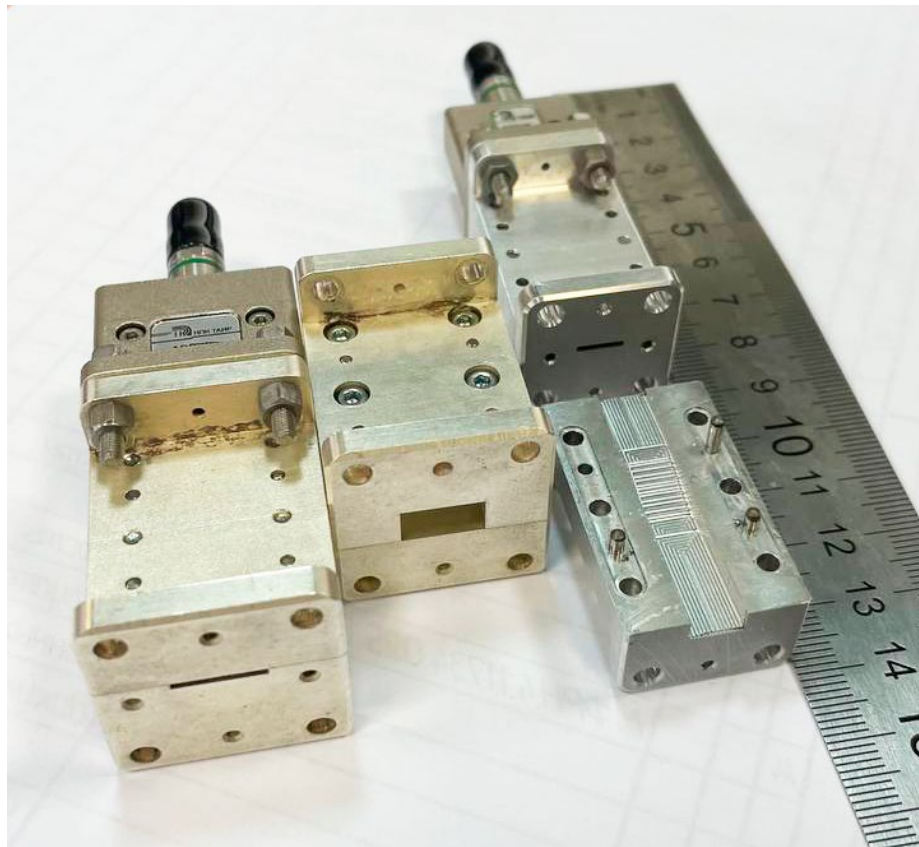


Рисунок 21 — Изготовленные образцы волноводно-волноводных трансформаторов

В результате проделанной работы получен чебышевский переход, модуль коэффициента отражения [48] которого не превышает $|\Gamma| < 0,028$, что удовлетворяет требованию $|\Gamma_{\max}| \leq 0,03$. Коэффициент передачи этого перехода не превышает значения $-0,1 \pm 0,05$ дБ. Из чего следует, что потери, вносимые разработанным переходом, незначительные и такой трансформатор целесообразно применить при исследовании термистора в нестандартизированном сечении волноводного тракта, а также при построении конструкции ваттметра оконечного типа.

Для полноценной реализации измерительного комплекса необходимо разработать калибровочный комплект волноводных мер, который позволит:

- сместить плоскость калибровки в нестандартизированное сечение волноводного тракта;
- компенсировать систематические ошибки измерений векторного анализатора цепей.

2.5. Разработка комплекта калибровочных мер в нестандартизированном волноводном тракте для векторного анализатора цепей

Векторный анализатор цепей имеет параметры искажающих цепей. Параметры искажающих цепей могут быть обозначены как компоненты ошибок e_{ik} . Большинство компонентов ошибки могут быть интерпретированы как исходные данные. Математическая компенсация влияния искажающей цепи на результат измерений представляет собой коррекцию системной ошибки. Систематические ошибки измерений, которые останутся некомпенсированными после коррекции ошибки системы, могут быть интерпретированы. Они зависят от точности определения компонентов ошибки e_{ik} . В таблице 2 приведены типовые исходные данные и эффективные системные данные для векторных анализаторов цепей при калибровке [49] в стандартизированном волноводном тракте.

*Таблица 2 — Сравнение исходных системных данных
и эффективных системных данных ВАЦ*

Системные данные	Исходные системные данные	Эффективные системные данные
Поправка на отражение	≤ 2 дБ	$\leq 0,04$ дБ
Поправка на направленность	≥ 29 дБ	≥ 46 дБ
Рассогласование источника	≥ 29 дБ	≥ 39 дБ
Поправка на передачу	≤ 2 дБ	$\leq 0,06$ дБ
Изоляция	≥ 29 дБ	≥ 130 дБ
Рассогласования	≥ 29 дБ	≥ 44 дБ

Для оценки компонентов ошибки e_{ik} применяется процедура, известная как калибровка. Существуют различные методики калибровок [50], к основным из которых относят: TRM, TRL [51] и TNA. Эти методики позволяют исследовать четырехполюсники и получать их S -параметры (S_{11} , S_{21} , S_{12} , S_{22}). Однако техника калибровки TRL позволяет достичь высокоэффективной направленности, которая приводит к улучшению качества согласования измерительного порта. Поэтому далее в работе рассмотрена калибровка типа TRL и представлены меры, разработанные для реализации техники калибровки TRL.

В методике калибровки TRL (Through, Reflect, Line) используют три меры. При решении системы уравнений (27) методом TRL переносится плоскость калибровки в нестандартизированный волноводный тракт [52]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{S}_{11T} = \dot{E}_{DF} + \dot{E}_{RF} \frac{\dot{E}_{LF}}{(1 - \dot{E}_{SF} \dot{E}_{LF})}; \\ \dot{S}_{21T} = \frac{\dot{E}_{TF}}{(1 - \dot{E}_{SF} \dot{E}_{LF})}; \\ \dot{S}_{12T} = \frac{\dot{E}_{TR}}{(1 - \dot{E}_{SR} \dot{E}_{LR})}; \\ \dot{S}_{22T} = \dot{E}_{DR} + \dot{E}_{RR} \frac{\dot{E}_{LR}}{(1 - \dot{E}_{SR} \dot{E}_{LR})}; \\ \dot{S}_{11R} = \dot{E}_{DF} + \dot{E}_{RF} \frac{\dot{I}_R}{(1 - \dot{E}_{SF} \dot{I}_R)}; \\ \dot{S}_{22R} = \dot{E}_{DR} + \dot{E}_{RR} \frac{\dot{I}_R}{(1 - \dot{E}_{SR} \dot{I}_R)}; \\ \dot{S}_{11Lr} = \dot{E}_{DF} + \frac{\dot{E}_{RF} (\dot{S}_{11L} - \dot{E}_{LF} (\dot{S}_{11L} \dot{S}_{22L} - \dot{S}_{21L} \dot{S}_{12L}))}{1 - \dot{E}_{SF} \dot{S}_{11L} - \dot{S}_{22L} \dot{E}_{LF} + \dot{E}_{SF} \dot{E}_{LF} (\dot{S}_{11L} \dot{S}_{22L} - \dot{S}_{21L} \dot{S}_{12L})}; \\ \dot{S}_{21Lr} = \frac{\dot{E}_{TF} (1 - \dot{S}_{22L} \dot{E}_{LF})}{1 - \dot{E}_{SF} \dot{S}_{11L} - \dot{S}_{22L} \dot{E}_{LF} + \dot{E}_{SF} \dot{E}_{LF} (\dot{S}_{11L} \dot{S}_{22L} - \dot{S}_{21L} \dot{S}_{12L})}; \\ \dot{S}_{12Lr} = \frac{\dot{E}_{TR} (1 - \dot{S}_{11L} \dot{E}_{LR})}{1 - \dot{E}_{SR} \dot{S}_{22L} - \dot{S}_{11L} \dot{E}_{LR} + \dot{E}_{SR} \dot{E}_{LR} (\dot{S}_{11L} \dot{S}_{22L} - \dot{S}_{21L} \dot{S}_{12L})}; \\ \dot{S}_{22Lr} = \dot{E}_{DR} + \frac{\dot{E}_{RR} (\dot{S}_{22L} - \dot{E}_{LR} (\dot{S}_{11L} \dot{S}_{22L} - \dot{S}_{21L} \dot{S}_{12L}))}{1 - \dot{E}_{SR} \dot{S}_{22L} - \dot{S}_{11L} \dot{E}_{LR} + \dot{E}_{SR} \dot{E}_{LR} (\dot{S}_{11L} \dot{S}_{22L} - \dot{S}_{21L} \dot{S}_{12L})}. \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} (27.1) \\ (27.2) \\ (27.3) \\ (27.4) \\ (27.5) \\ (27.6) \\ (27.7) \\ (27.8) \\ (27.9) \\ (27.10) \end{array}$$

Мера Through — это прямое соединение измерительных портов ВАЦ. При этом длина линии считается равной 0 мм. Поэтому плоскость калибровки для двух портов единая, как это показано на рисунке 22.

Данная мера может быть описана уравнениями (27.1...27.4).

Соединение считается идеальным, однако в действительности окна волноводов изготовлены не идеально, в результате чего возникает ошибка калибровки. Поэтому векторный анализатор цепей измеряет непосредственно параметры Through.

Полученные результаты измерений меры Through, записанные в память ВАЦ, будут использованы для решения системы уравнений (27) для связи действительных значений и эффективных параметров в опорной плоскости калибровки.

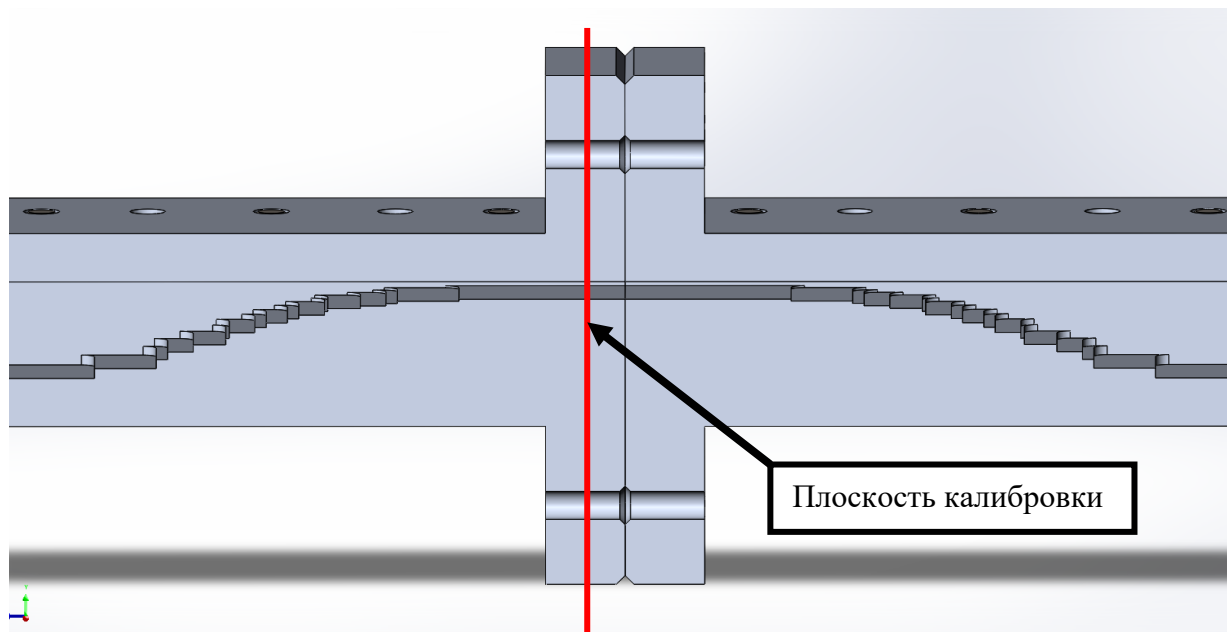
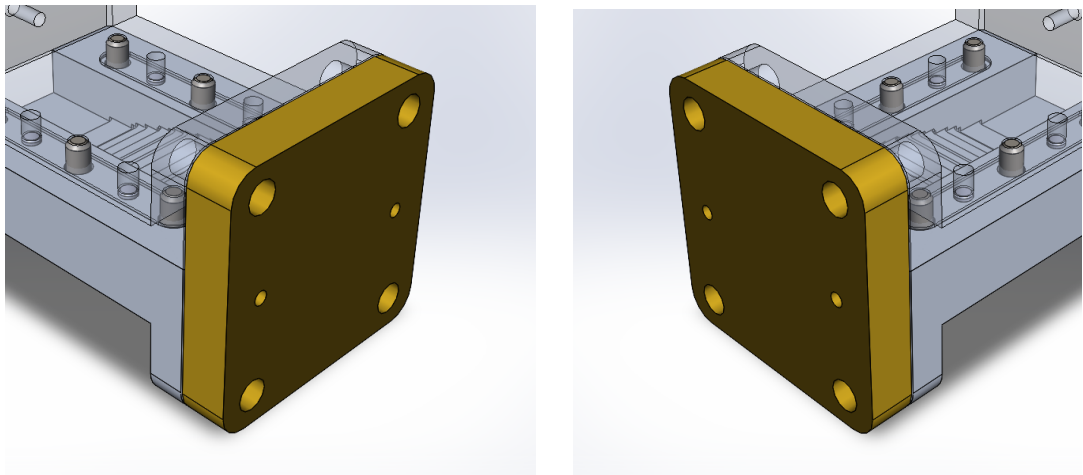


*Рисунок 22 — Прямое соединение портов (Through)
в разрезе при выполнении калибровки*

Поскольку в волноводных трактах не существует меры холостого хода (Open), вместо нее используют меру отражения (короткое замыкание) Reflect, результаты измерений которой используются при решении уравнений 27.5 и 27.6.

Этот стандарт поочередно подключают к волноводному порту, как показано на рисунке 23.



а

б

Рисунок 23 — Поочередное подключение стандарта Reflect к порту 1 (а) и порту 2 (б) при выполнении калибровки

В случае использования методики калибровки TRL точное значение не является необходимым. Однако коэффициент отражения должен быть одинаков в обоих измерительных портах ВАЦ.

Линейный стандарт (Line) — это двухпортовый отрезок линии передачи, длина которого в большинстве случаев равна $\lambda_v/4$. Разность фаз между коэффициентами передачи Through и Line должна находиться в пределах от 20° до 160° (200° до 340°).

Стандарт Line включают между измерительными портами при выполнении калибровки, как показано на рисунке 24.

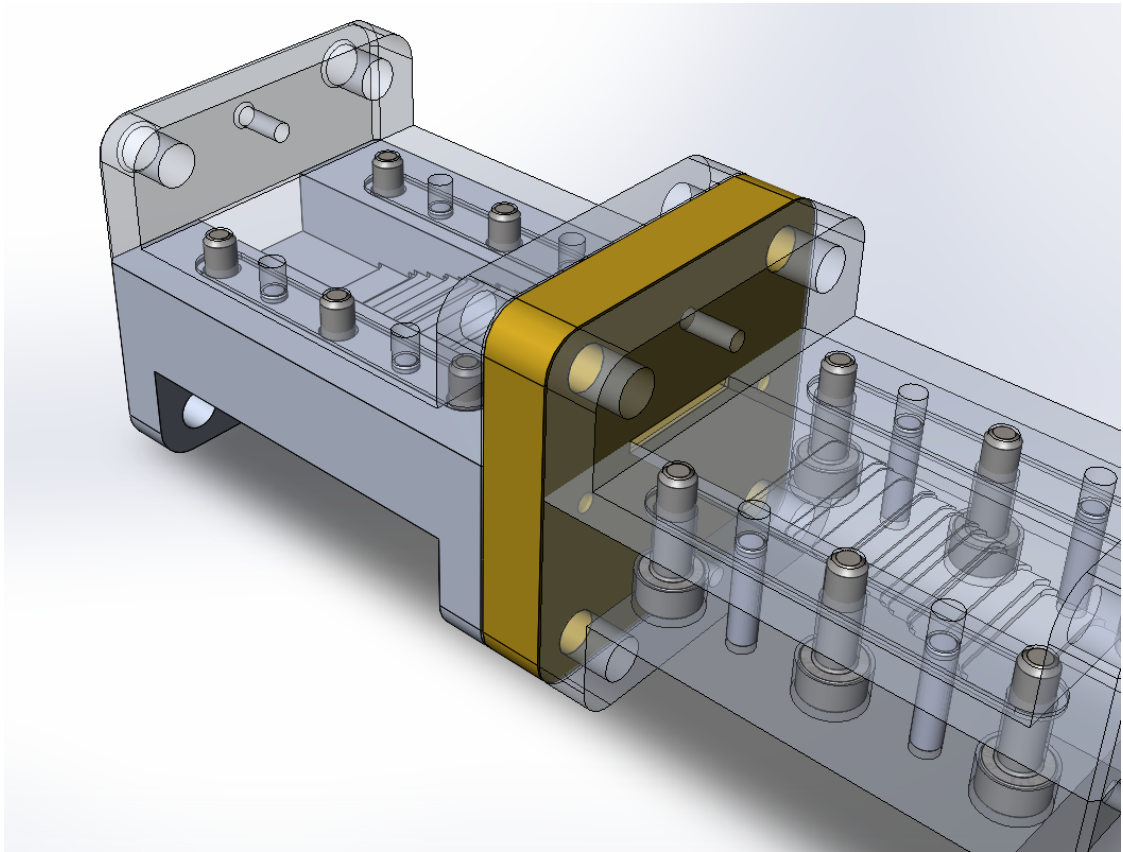


Рисунок 24 — Соединение портов через стандарт Line при выполнении калибровки

Данный стандарт необходим для решения части системы уравнения (27.7...27.10). При выполнении калибровки ВАЦ автоматически измеряет ее электрическую длину и использует в решении системы уравнений (27).

Исходными данными для расчета стандарта Line длиной $\lambda_v/4$ является диапазон рабочих частот волноводного тракта. Для этого необходимо выбрать среднюю частоту диапазона. Так, для волноводного тракта 11×1 мм средней частотной точкой будет $f = 21,28$ ГГц. При этом длина волны на этой частоте в волноводе составит 18,364 мм, согласно уравнению (17). Таким образом, получена длина стандарта Line, равная:

$$L = \lambda_v/4 = 18,364/4 = 4,591. \quad (28)$$

С использованием системы автоматизированного проектирования построена 3D-модель калибровочной меры и рассчитан фазовый сдвиг с помощью разрабо-

танного стандарта Line $\lambda_v/4$ для тракта 11×1 мм. На рисунке 25 приведена 3D-модель стандарта, а на рисунке 26 — фазовый сдвиг в диапазоне частот от 16,70 до 25,86 ГГц.

Создание файла калибровки для разработанных стандартов включает в себя внесение данных полученных стандартов. Процедура зависит от марки векторного анализатора цепей. Каждый производитель создает свой формат. В данном случае использовался векторный анализатор цепей Keysight [53], [54], и далее приведен пример создания мер на этом анализаторе. Для других производителей процедура будет аналогична, и основные отличия заключаются в пунктах меню анализатора цепей.

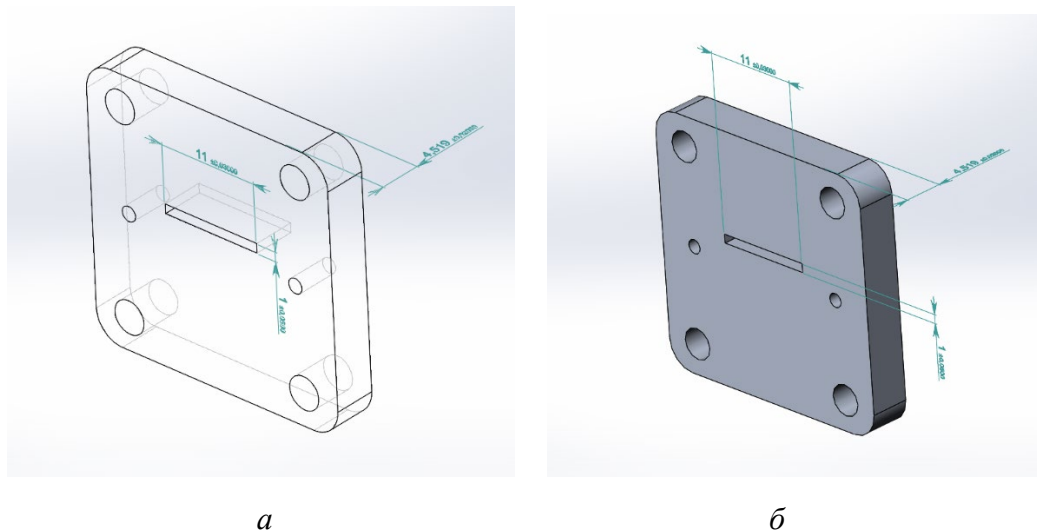


Рисунок 25 — Разработанная калибровочная мера Line $\lambda_v/4$:

а — эскиз 3D-модели стандарта; б — 3D-модель стандарта

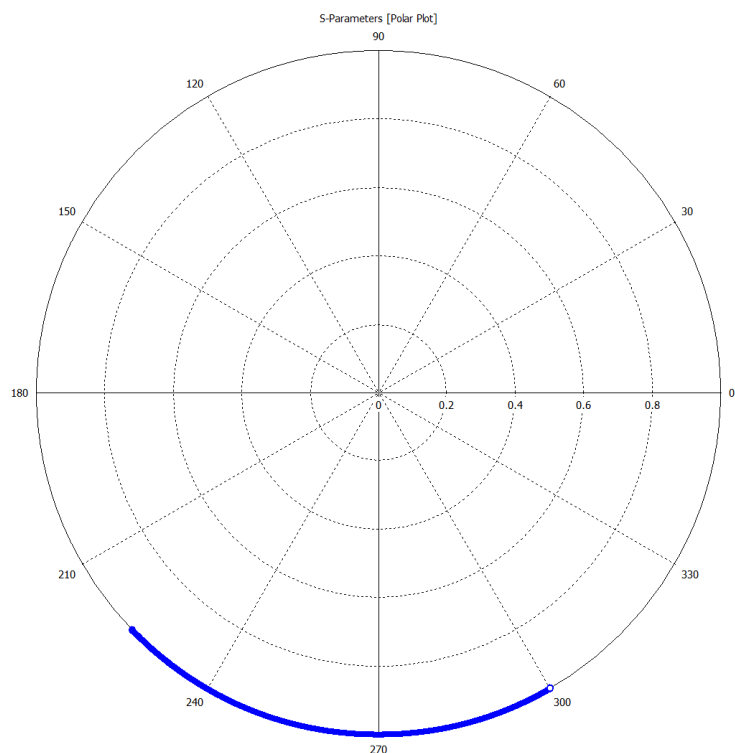


Рисунок 26 — Фазовый сдвиг стандартом Line $\lambda_e/4$ в тракте 11×1 мм

В результате опробования калибровки получены эффективные системные данные. Результаты приведены в таблице 3.

Таблица 3 — Сравнение системных данных ВАЦ до и после калибровки

Системные данные	Исходные системные данные	Эффективные системные данные
Поправка на отражение	$\leq 0,3$ дБ	$\leq 0,02$ дБ
Поправка на направленность	≥ 16 дБ	≥ 44 дБ
Рассогласование источника	≥ 8 дБ	≥ 31 дБ
Поправка на передачу	≤ 2 дБ	$\leq 0,2$ дБ
Изоляция	≥ 18 дБ	≥ 100 дБ
Рассогласование	≥ 10 дБ	≥ 43 дБ

Проведена оценка неопределенности измерений, относящейся к векторному анализатору цепей и калибровочным мерам нестандартизированного сечения волноводного тракта $11 \times 5,5$ мм. Результаты расчета представлены на рисунках 27–30.

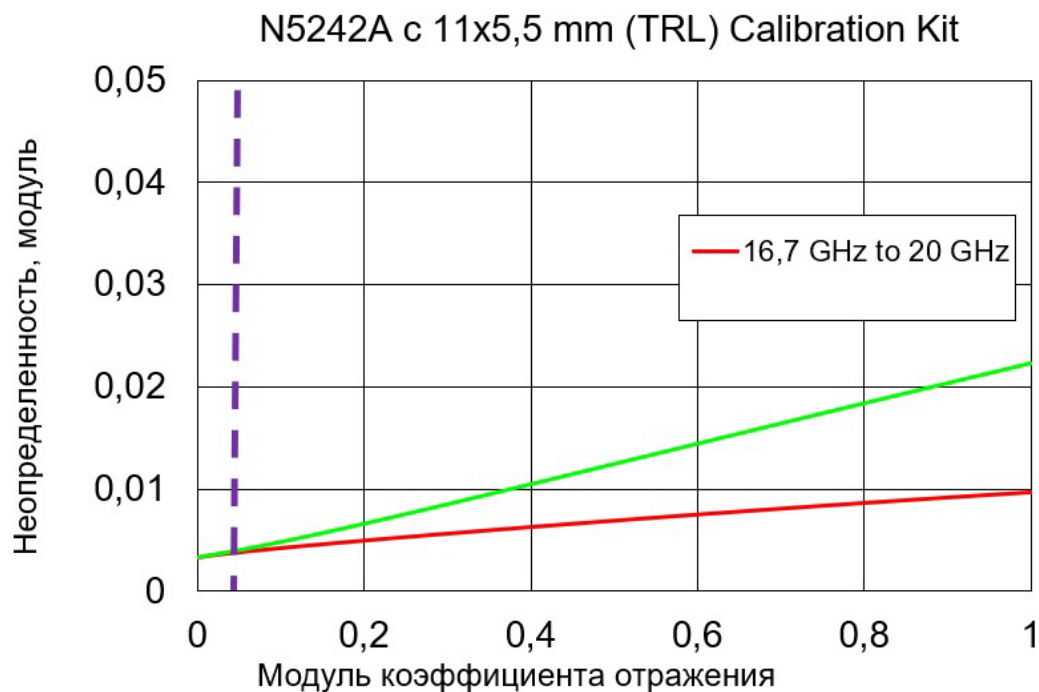


Рисунок 27 — Неопределенность измерений модуля коэффициента отражения

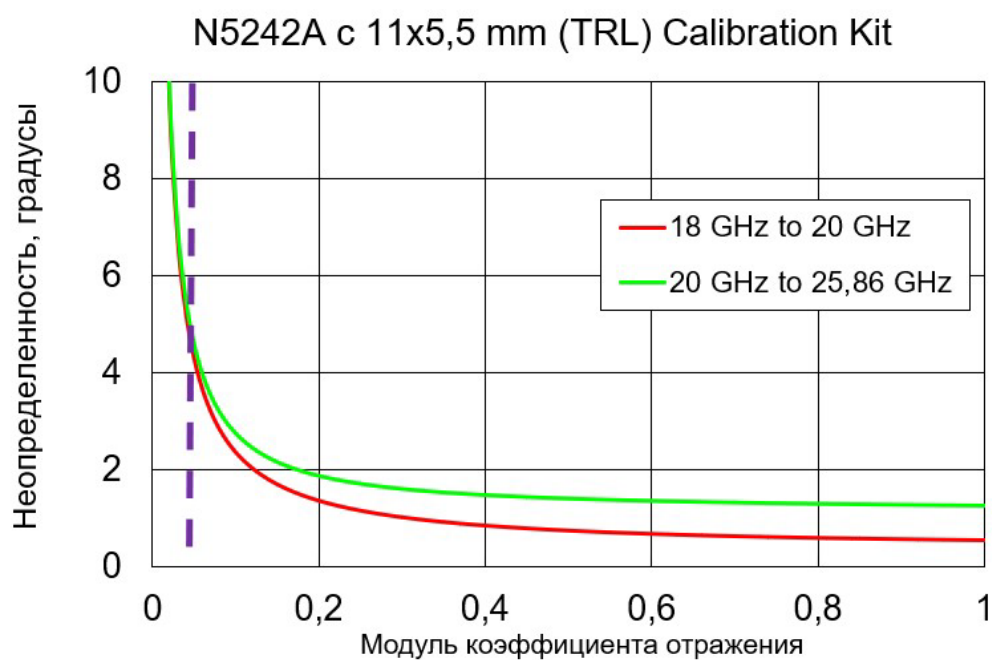


Рисунок 28 — Неопределенность измерений фазы коэффициента отражения

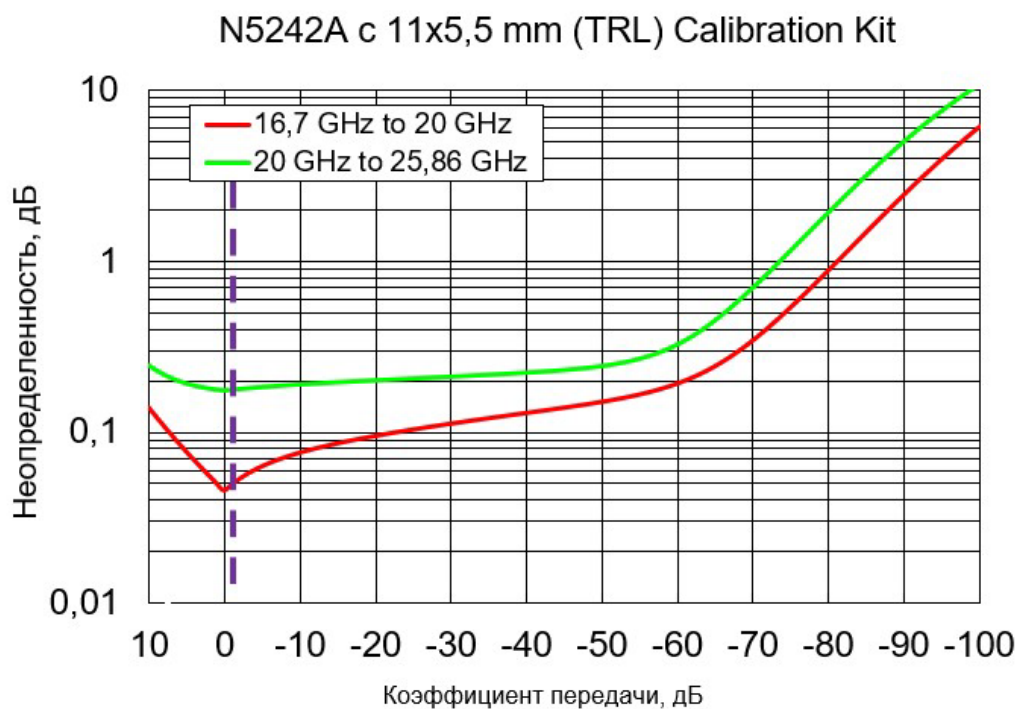


Рисунок 29 — Неопределенность измерений коэффициента передачи в дБ

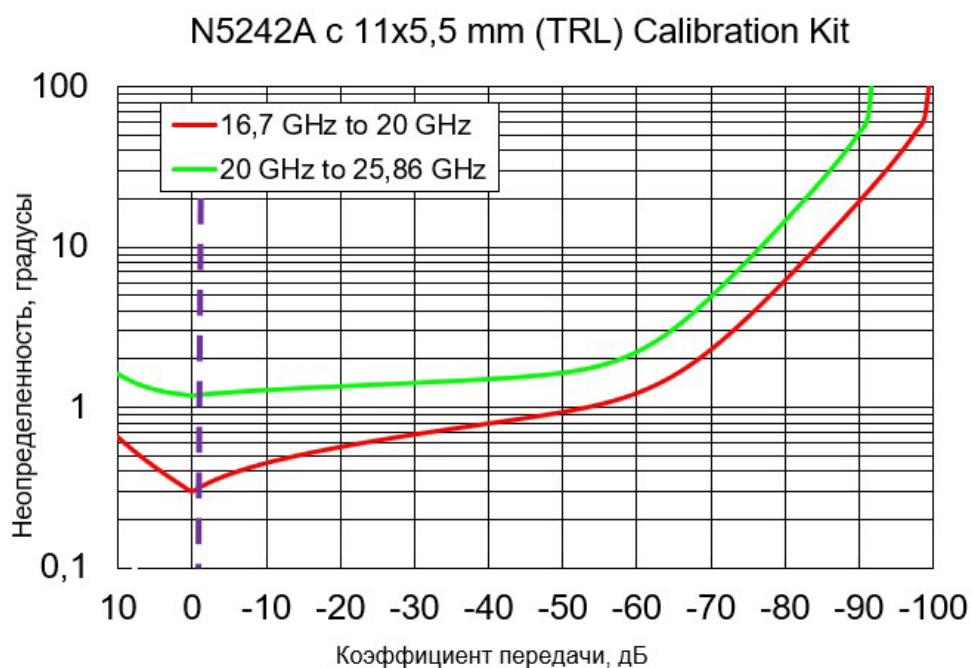


Рисунок 30 — Неопределенность измерений фазы коэффициента передачи

Таким образом, разработанная система калибровки обеспечивает необходимую точность и достоверность измерений в нестандартизированном волноводном тракте, что позволяет использовать ее для проведения высокоточных исследований термисторных СВЧ-датчиков.

2.6. Исследование термисторного СВЧ-датчика

В ходе исследования определена зависимость модулей коэффициентов отражения и передачи термисторов в зависимости от установленного электрического сопротивления.

Показано, что разработанный метод измерений параметров модуля коэффициента отражения и передачи термисторов в волноводных трактах СВЧ-диапазона в нестандартизированном тракте позволяет определить диапазон регулировки коэффициентов отражения и передачи термистора в зависимости от установленного электрического сопротивления в диапазоне значений модуля от 0,001 до 1. Сравнения результатов теоретического расчета и практических результатов экспериментов приведены на рисунках 31 и 32.

Показано, что полученные результаты исследований подтверждают теоретический расчет зависимости модулей коэффициента отражения и передачи термистора от электрического сопротивления. Разработанный метод измерений параметров термисторов в волноводных трактах СВЧ-диапазона в нестандартизированном сечении позволяет определить диапазон регулировки коэффициентов отражения и передачи в зависимости от установленного электрического сопротивления. Таким образом, термистор может быть использован в качестве согласующей неоднородности в ваттметрах оконечного типа.

Исследована зависимость матрицы рассеяния термистора СВЧ от установленного сопротивления в диагонали термисторного моста. Рассмотрены подходы по исследованию статических и динамических характеристик термисторов в волноводных трактах. В связи с тем, что термисторный СВЧ-датчик имеет малые габаритные размеры, в регулярном волноводе возникает индуктивность на выводах, что приводит к шунтированию электрического тока, протекающего через него.

Терморезистор устанавливается в точке максимальной напряженности электрического поля. В таком положении достигается максимальное поглощение мощности термисторным СВЧ-датчиком.

Для исследования коэффициентов матрицы рассеяния термистора необходимо разработать технологическую оснастку и методику исследования.

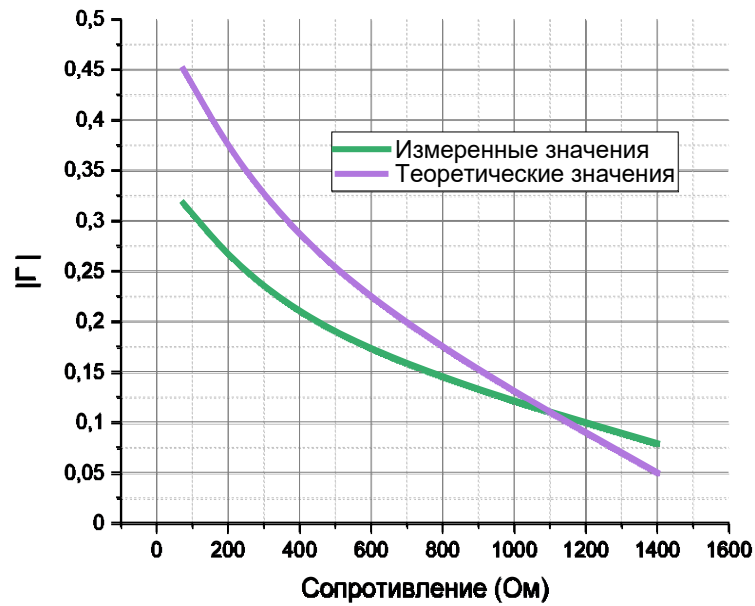


Рисунок 31 — Зависимость модуля коэффициента отражения термистора от электрического сопротивления

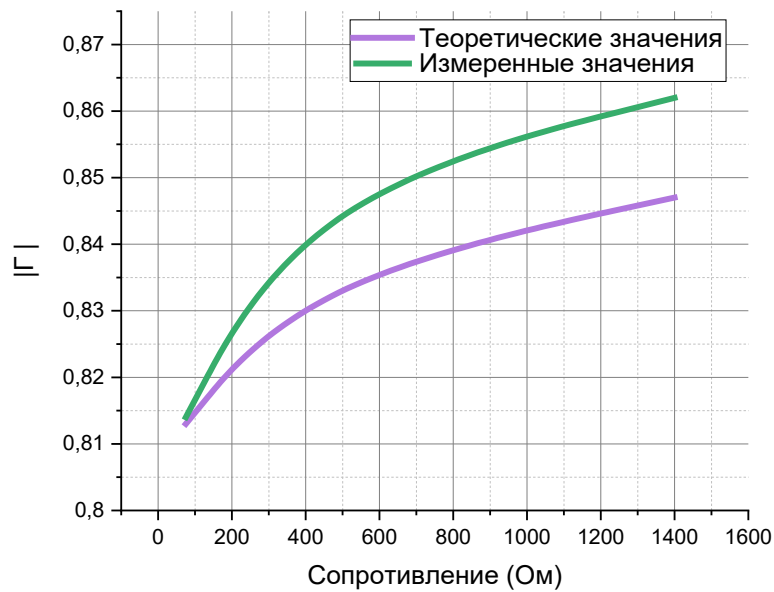


Рисунок 32 — Зависимость модуля коэффициента передачи термистора от электрического сопротивления

Для исследования и определения матрицы рассеяния термистора в волноводных трактах разработаны волноводные сниженные переходы по узкой стенке до 1 мм. Структурная схема термисторного зонда представлена на рисунке 33.

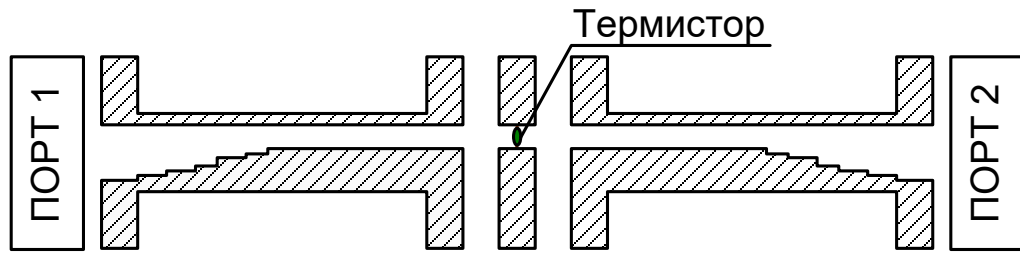


Рисунок 33 — Схема исследования термисторного зонда

Фотография установки для измерений матрицы рассеяния приведена на рисунке 34.

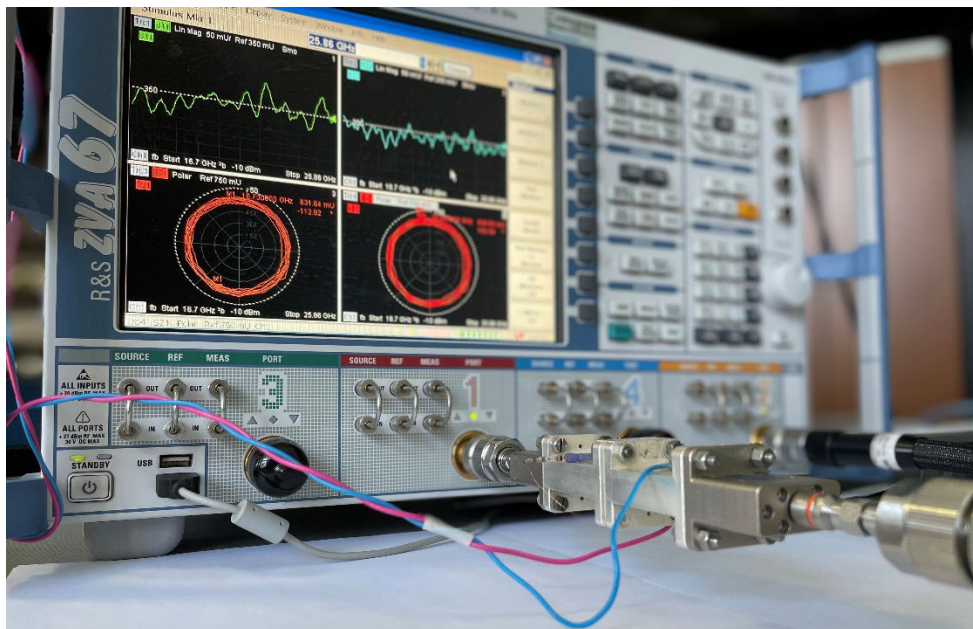


Рисунок 34 — Измерительный стенд матрицы рассеяния термисторных СВЧ-датчиков

Проведенные измерения матрицы рассеяния позволяют получить данные и использовать их в моделировании термистора в СВЧ-технике. До настоящего времени определение характеристик термисторов проводилось на постоянном токе. Новый подход к исследованию характеристик термистора в диапазоне СВЧ позволил исследовать зависимость коэффициентов отражения и передачи в рабочей полосе частот его применения от сопротивления, установленного на термисторе. Результаты, полученные в ходе опробования метода измерений, представлены на рисунках 35 и 36 соответственно.

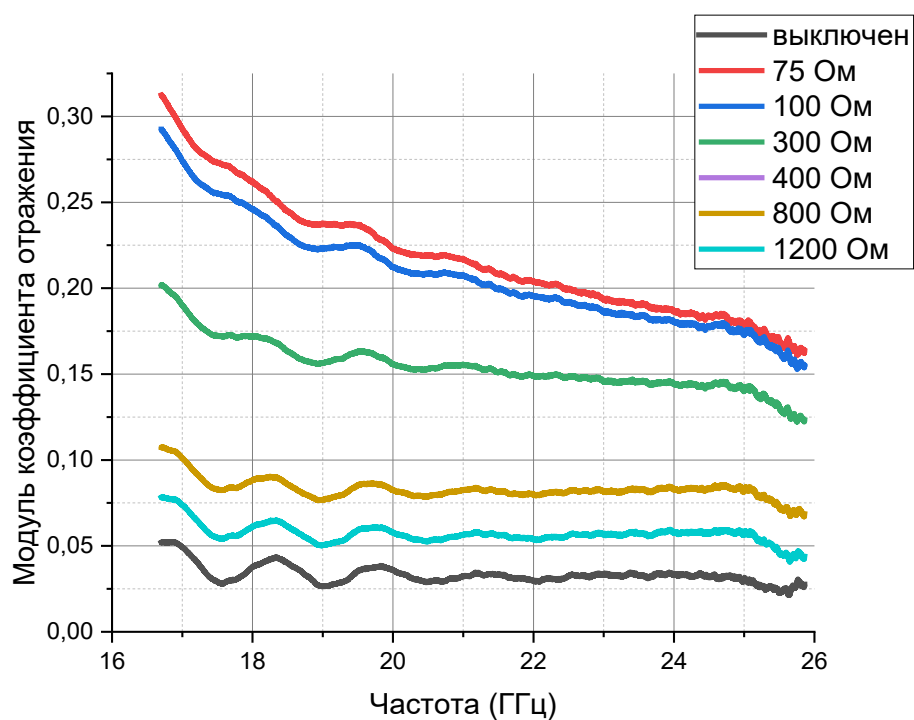


Рисунок 35 — Зависимость модуля коэффициента отражения от сопротивления термистора

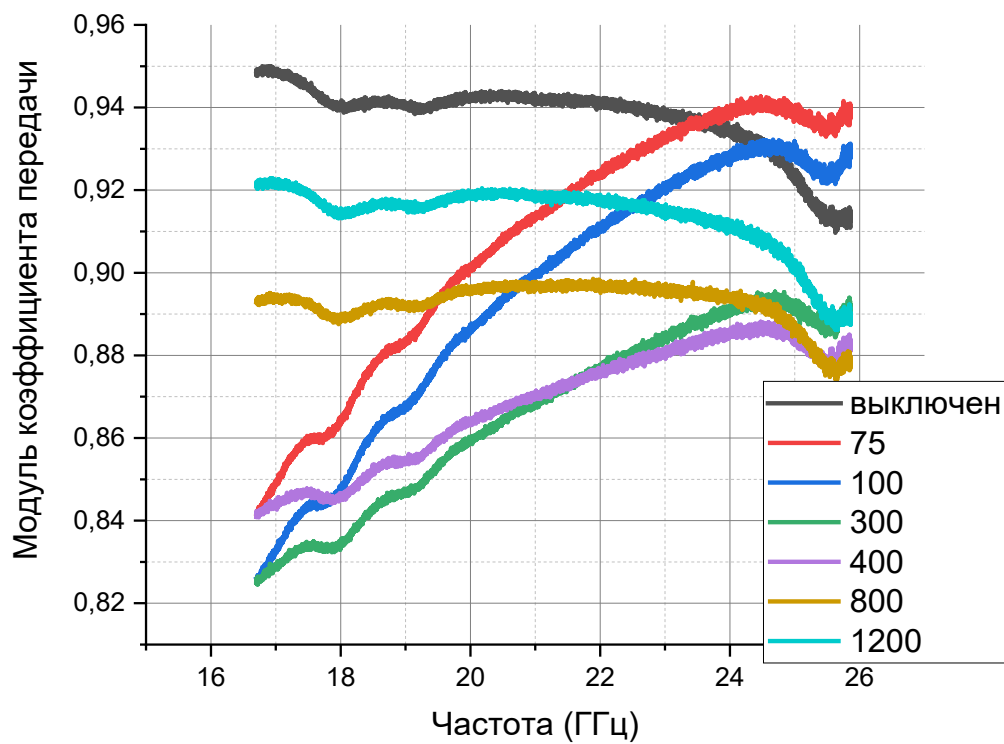


Рисунок 36 — Зависимость модуля коэффициента передачи от сопротивления термистора

Проведено исследование влияния окружающей температуры на мощность подогрева при фиксированных сопротивлениях. Результаты измерений приведены на рисунке 37.

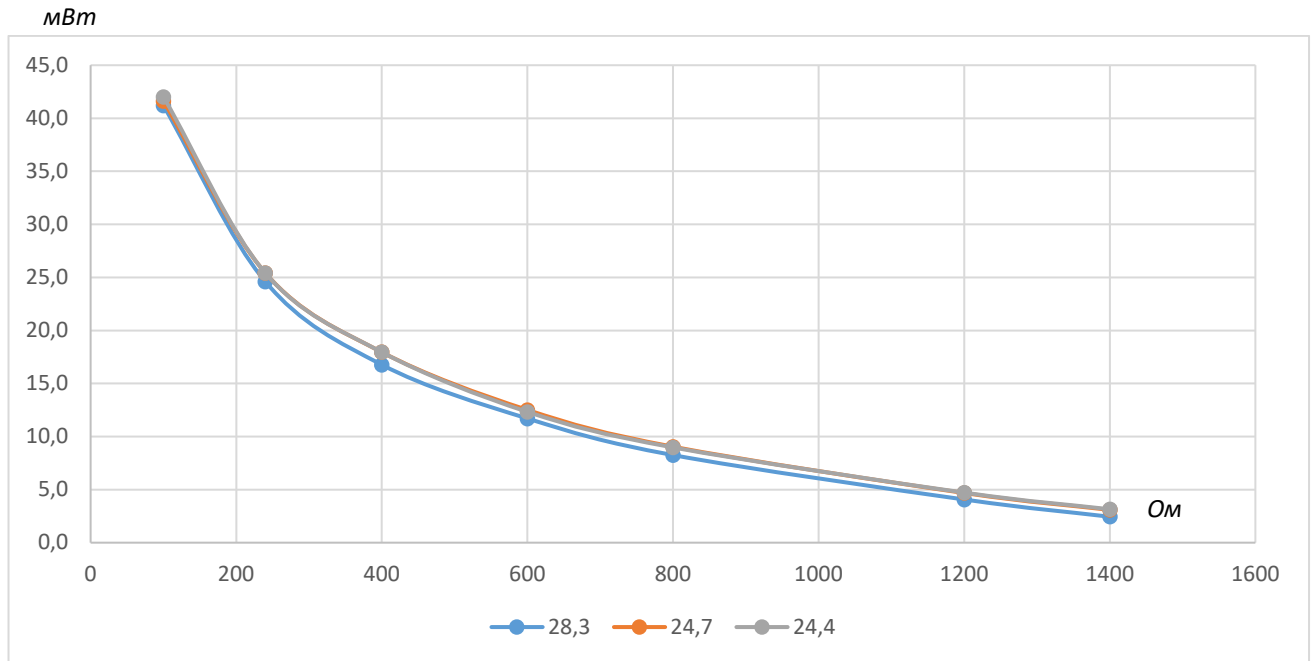


Рисунок 37 — Зависимость мощности подогрева от установленного сопротивления

Мощность подогрева мало зависит от температуры окружающей среды. В таком случае термокомпенсационный термистор не потребуется в ваттметре.

Проведено исследование зависимости холодного сопротивления, т. е. режима, в котором термистор выключен и через него не течет электрический ток. Результаты измерений приведены на рисунке 38.

Полученные результаты исследования матрицы рассеяния термисторного СВЧ-зонда доказывают возможность регулировки коэффициента отражения в зависимости от сопротивления термистора. Однако стоит отметить, что один термисторный СВЧ-датчик не способен обеспечить требуемый коэффициент отражения на произвольной частоте во всем рабочем диапазоне частот.

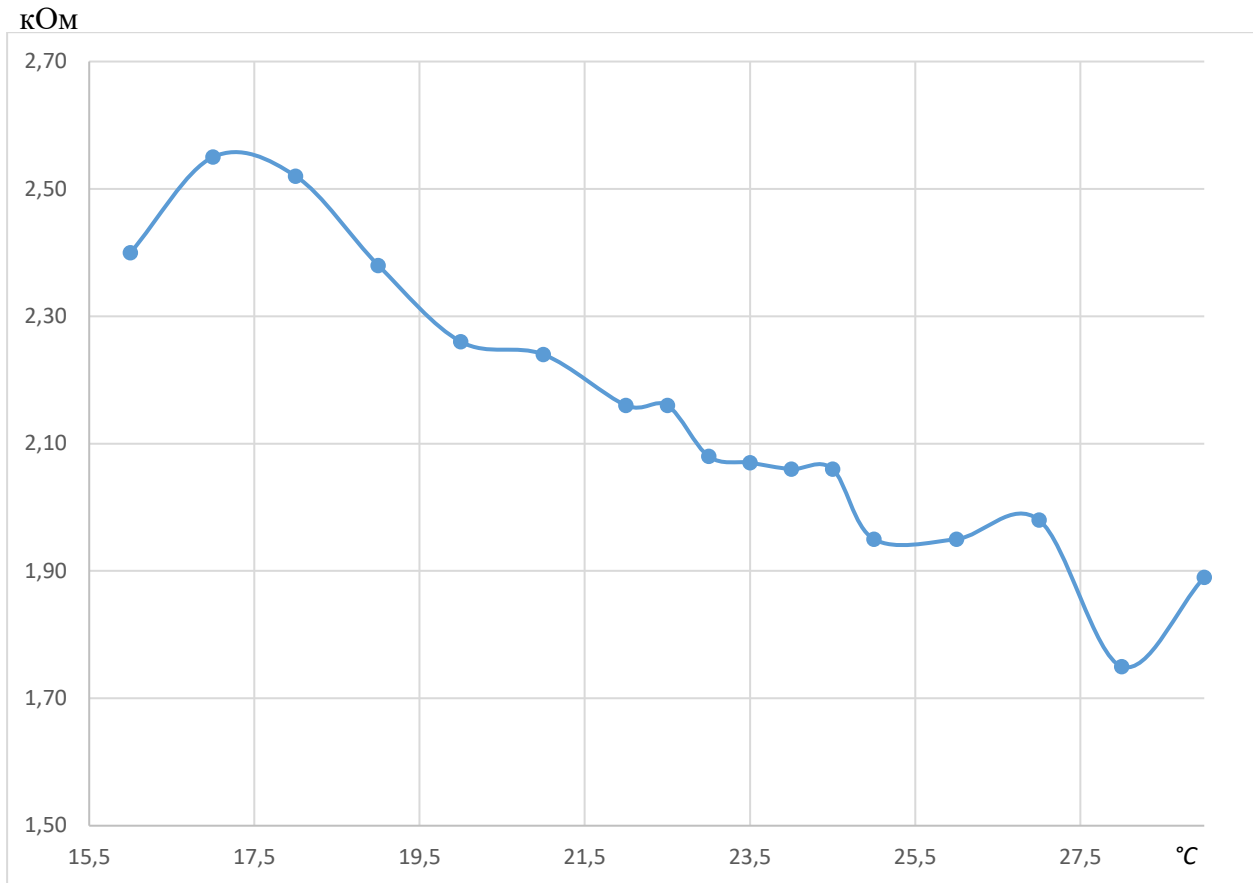


Рисунок 38 — Зависимость сопротивления от температуры окружающей среды

2.7. Выводы по главе 2

В результате проведенных исследований и разработок был сформирован комплексный подход к измерению S -параметров термисторных СВЧ-датчиков в волноводных трактах нестандартного сечения.

Ключевым достижением стало создание специальной конструкции измерительной системы с волноводным каналом, позволяющей эффективно размещать термистор в зоне максимальной напряженности электрического поля. Это обеспечило минимизацию паразитной индуктивности.

Разработанный метод измерений, основанный на использовании векторного анализатора цепей и специальных волноводных трансформаторов, позволил проводить комплексное исследование характеристик термисторов непосредственно в рабочем диапазоне частот. Такой подход существенно повысил достоверность получаемых результатов по сравнению с традиционными методами измерений на постоянном токе.

Важным результатом работы стало создание согласованного волноводно-волноводного трансформатора чебышевского типа, обеспечивающего минимальные потери при переходе между волноводными трактами. Коэффициент отражения разработанного трансформатора не превышает 0,03, что удовлетворяет всем требованиям точности измерений.

Для обеспечения высокой точности измерений был разработан специальный калибровочный комплект волноводных мер для калибровки по методике TRL в нестандартизированных трактах. Это позволило существенно улучшить такие параметры системы, как направленность (до 44 дБ) и изоляция (до 100 дБ), а также уменьшить поправки на отражение и передачу.

Проведенные исследования матрицы рассеяния термистора в зависимости от установленного сопротивления подтвердили возможность регулировки коэффициента отражения в рабочем диапазоне частот. Полученные результаты демонстрируют высокую стабильность термистора как чувствительного элемента и его перспективность для применения в ваттметрах оконечного типа.

Разработанная методология измерений позволяет получить полную картину электродинамического поведения термисторного СВЧ-датчика в условиях практического применения, что является необходимым условием для его эффективного использования в ваттметрах оконечного типа.

Таким образом, проведенные исследования и разработки создали основу для дальнейшего совершенствования методов измерения параметров термисторных СВЧ-датчиков и расширения их применения в современной измерительной технике.

Глава 3. Разработки согласующего широкополосного волноводного преобразователя мощности с настраиваемым коэффициентом отражения входа

3.1. Исследование термисторного преобразователя мощности оконечного типа с одним термистором

В качестве ближайшего аналога (прототипа) взяты термисторные преобразователи оконечного типа М5-40...45 [55].

Известные волноводные преобразователи мощности оконечного типа М5-40...45, которые конструктивно представляют собой преобразователи мощности, выполнены в виде волноводного перехода в защитном кожухе. Внутри волноводного перехода расположены рабочая термисторная вставка (рабочий термистор) и термокомпенсирующая термисторная вставка. На внешней части перехода расположено термосопротивление, каждый элемент которого имеет свой проводник в кабеле со штепселями для подключения к автобалансному термисторному мосту. Конструкция приведена на рисунке 39.

Недостатком серии преобразователей мощности оконечного типа М5-40...45 является относительная погрешность измерения мощности, которая могла достигать $\pm 5\%$ по причине неполного согласования с измерительным трактом. Это обусловлено КСВН, достигающим 1,5 ($|\Gamma| \approx 0,2$), что повышает относительную погрешность измерения мощности электромагнитных колебаний [56].

Был выполнен ряд попыток настроить согласование преобразователя мощности оконечного типа серии М5-44 путем изменения рабочего сопротивления термистора [57]. Рабочее сопротивление преобразователя мощности составляет 400 Ом. При настройке использовались сопротивления 200, 240, 400, 500, 600 Ом. Измерения коэффициента отражения были последовательно выполнены, начиная с наименьшего сопротивления. Схема установки измерений представлена на рисунке 40.

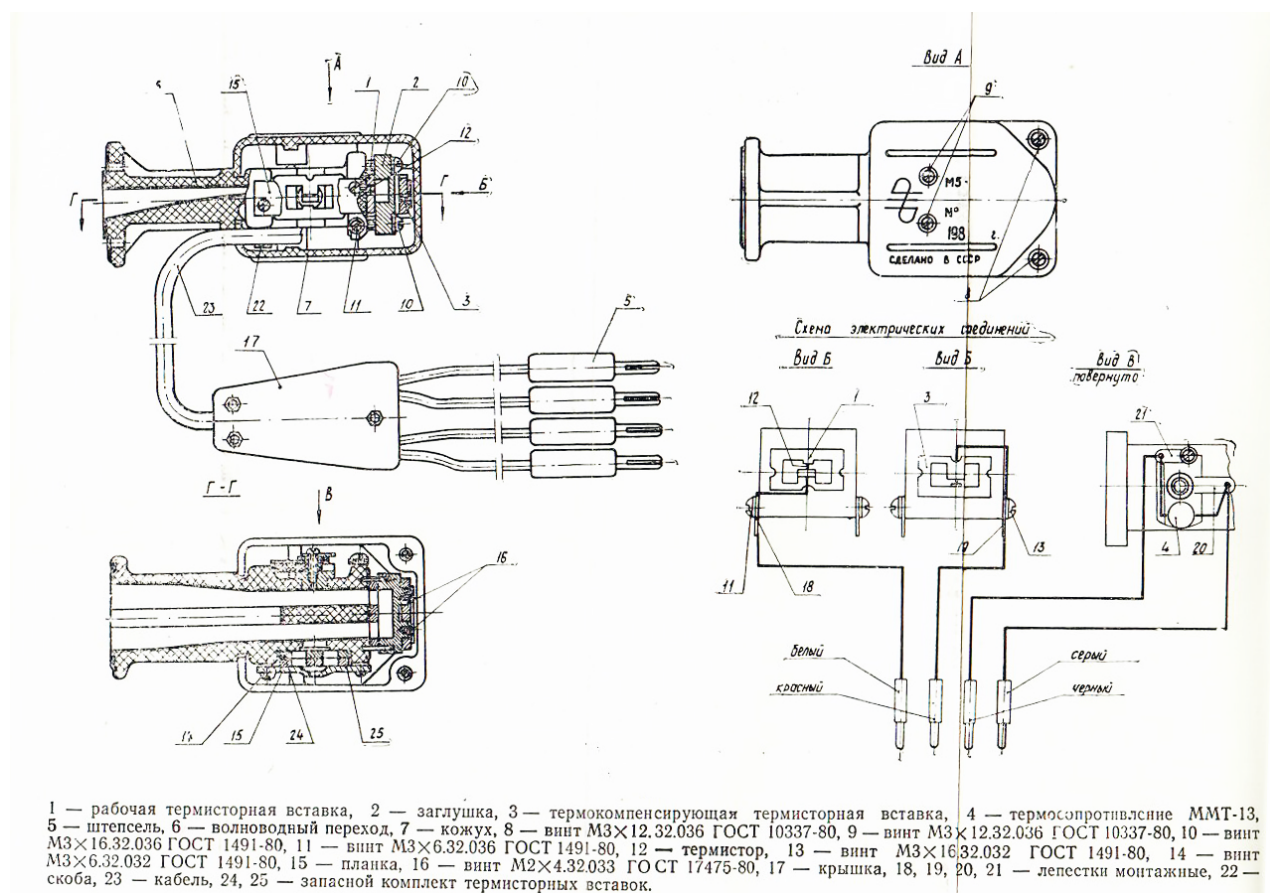


Рисунок 39 — Конструкция преобразователей мощности серии М5-40...45

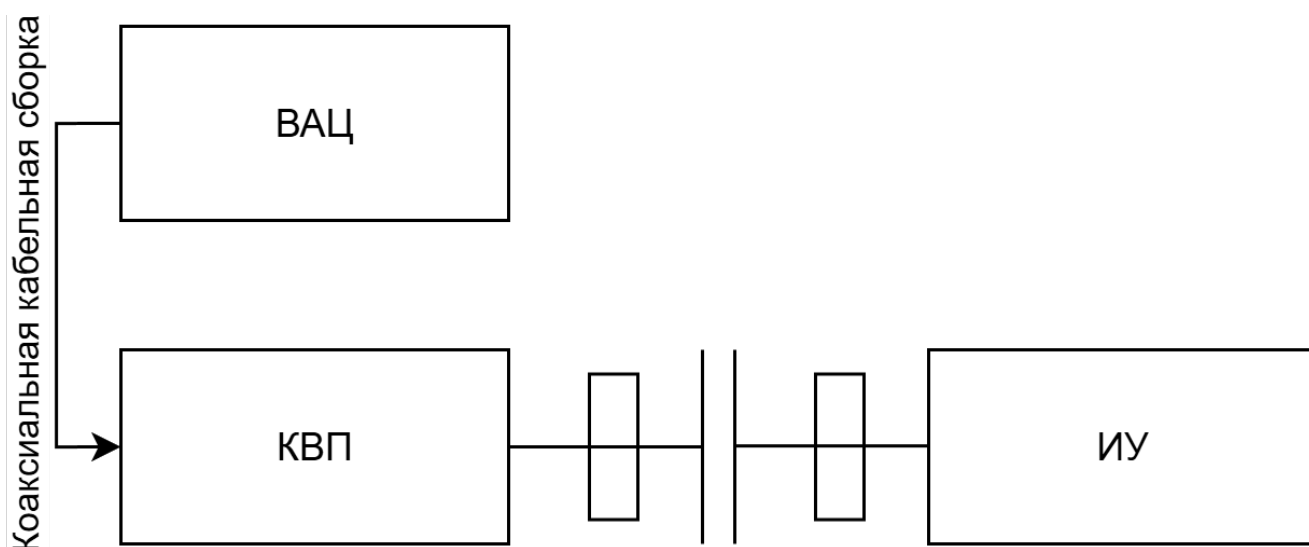


Рисунок 40 — Схема установки для измерений модуля коэффициента отражения входа преобразователей мощности в волноводных трактах:

ВАЦ — векторный анализатор цепей; КВП — коаксиально-волноводный переход;

ИУ — исследуемое устройство

Результаты измерений модуля коэффициента отражения входа преобразователя мощности М5-44 при различных сопротивлениях приведены на рисунке 41. Анализ полученных результатов позволил установить, что достичь коэффициента отражения входа преобразователя мощности путем регулировки сопротивления не удастся, что не удовлетворяет требованиям вторичных эталонов, а именно модуль коэффициента отражения входа превышает допустимое значение 0,1.

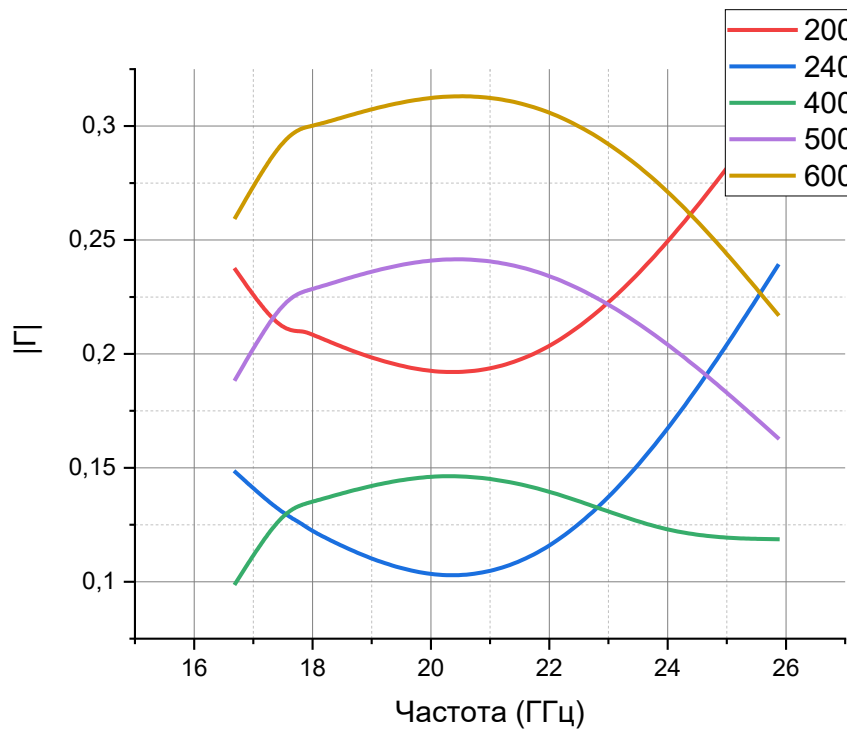


Рисунок 41 — Измеренные значения модуля коэффициента отражения входа преобразователя мощности М5-44

Также важно, что преобразователи мощности М5-40...45 сняты с производства в начале 1990-х гг.

Однако полученные результаты подтверждают возможность настройки коэффициента отражения входа преобразователей мощности. Поэтому предложено разработать конструкцию преобразователя мощности оконечного типа с использованием полученного в главе 2 согласующего трансформатора для уменьшения модуля коэффициента отражения входа ваттметра оконечного типа, что позволит достичь значения модуля коэффициента отражения входа менее 0,1.

Размещение терморезистора выполнено по центру широкой стенки, где напряженность электрического поля максимальна. В таком положении терморезистора достигается максимальное поглощение мощности СВЧ. За термисторным датчиком расположен поглощающий элемент. Эскиз разработанного преобразователя мощности термисторного оконечного типа с одним термистором представлен на рисунке 42.

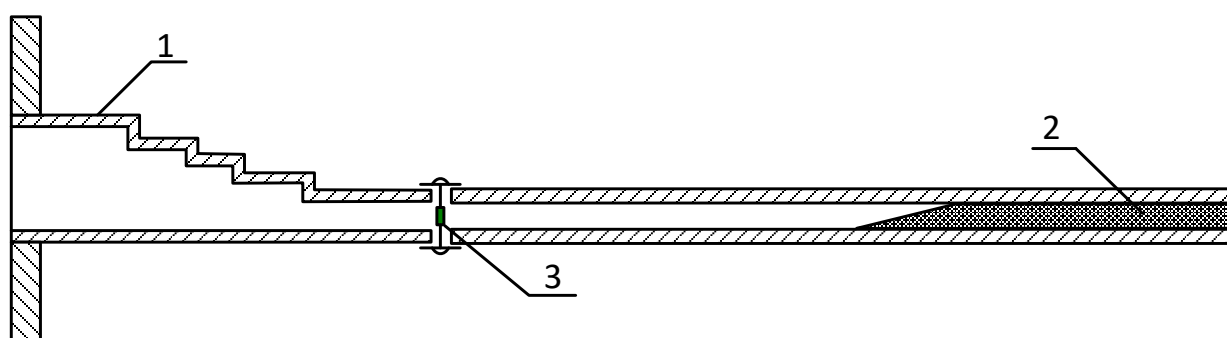


Рисунок 42 — Эскиз разработанного преобразователя мощности оконечного типа с одним термистором: 1 — волноводный ступенчатый переход; 2 — поглощающий элемент; 3 — термисторный СВЧ-зонд

Для преобразователя мощности оконечного типа разработан комплект чертежей и изготовлен опытный образец с одним термистором. После чего проведены измерения, аналогичные измерениям преобразователя серии М5-44; при настройке использовались сопротивления 100, 200, 240, 400, 500, 600 Ом.

Результаты измерений модуля коэффициента отражения входа разработанного опытного образца представлены на рисунке 43.

Проведенный анализ позволил установить, что достигнутые характеристики по модулю коэффициента отражения входа ($|\Gamma|$) разработанного преобразователя мощности лучше характеристик модуля коэффициента отражения входа преобразователя мощности М5-44. Однако в диапазоне частот $20 \pm 0,8$ ГГц и $25 \pm 0,5$ ГГц требуемые характеристики достигнуты. Один термисторный [58] зонд в полном объеме не удовлетворяет требованиям вторичных эталонов в части модуля коэффициента отражения входа.

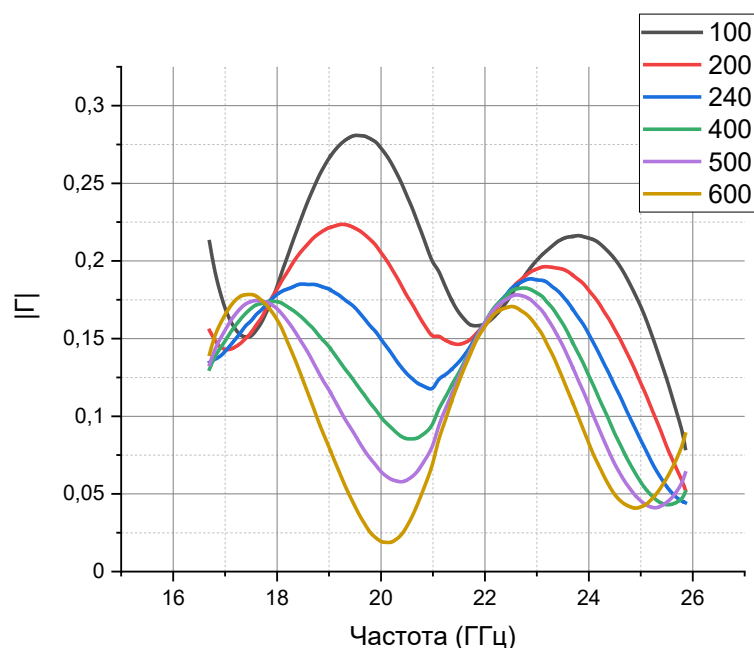


Рисунок 43 — Модуль коэффициента отражения входа преобразователя мощности оконечного типа с одним термистором

Поэтому попытка уменьшить доминирующую составляющую погрешности передачи единицы мощности ЭМК, связанную с погрешностью рассогласования, не была полностью успешной [59].

Таким образом, возникает необходимость поиска новых технических решений для улучшения метрологических характеристик преобразователей мощности оконечного типа во всем рабочем диапазоне частот волноводного тракта. В частности, требуется разработка методов и конструкций, позволяющих минимизировать модуль коэффициента отражения входа преобразователей мощности оконечного типа.

3.2. Разработка многозондовой системы термисторов в преобразователях мощности оконечного типа

Многозондовая система термисторов представляет собой совокупность нескольких термисторных СВЧ-датчиков, установленных в волноводном тракте на специальных расстояниях друг от друга для обеспечения требуемых характеристик согласования модуля коэффициента отражения входа.

Для снижения коэффициента отражения входа предложено заменить один термистор на многозондовую систему термисторов, что позволит снизить модуль коэффициента отражения входа, а также повысить коэффициент эффективности преобразователя. Эта система также позволит настраивать модуль коэффициента отражения входа разработанного преобразователя мощности оконечного типа. Эскиз предлагаемой конструкции преобразователя мощности оконечного типа представлен на рисунке 44.

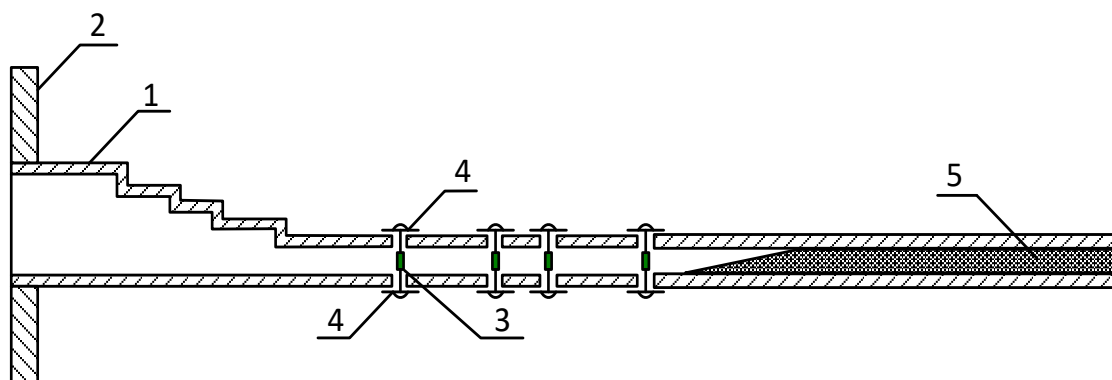


Рисунок 44 — Эскиз многозондового преобразователя мощности оконечного типа: 1 — волноводный канал; 2 — фланцевый соединитель; 3 — СВЧ-термистор (зонд); 4 — электрическая емкость; 5 — согласованная нагрузка

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 [60]. Использование четырех термисторов в многозондовой системе обусловлено необходимостью достижения требуемого модуля коэффициента отражения, поскольку каждая пара термисторов способна работать лишь в части рабочего диапазона частот. Схематичное представление многозондовой системы термисторов представлено на рисунке 45.

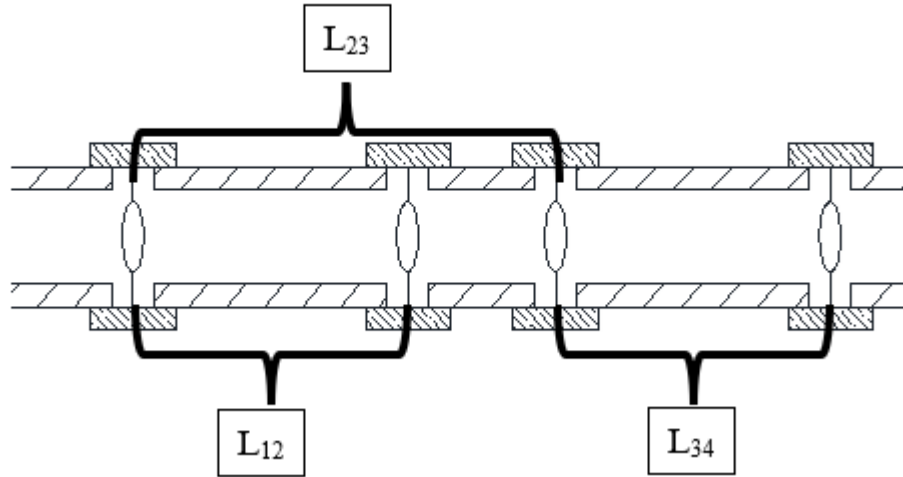


Рисунок 45 — Положения термисторных СВЧ-датчиков
в волноводном канале 11×1 мм

Меньшее количество термисторов не позволяет обеспечить требуемый коэффициент отражения входа во всем рабочем диапазоне частот, а большее количество усложняет конструкцию без существенного улучшения модуля коэффициента отражения входа преобразователя мощности оконечного типа.

Таким образом, первая решетка термисторов (L_{12}) перекрывает диапазон частот от 16,7 до 20 ГГц; вторая решетка термисторов (L_{23}) — от 20 до 23 ГГц; третья решетка термисторов (L_{34}) — от 23 до 25,86 ГГц.

Расстояния между термисторными СВЧ-датчиками в первом приближении рассчитывались путем аппроксимации коэффициента отражения терморезисторов полиномом Чебышева 2-го порядка [61] по уравнению (29):

$$L_i = \frac{\lambda_{\text{cp}}}{4} \cdot \frac{1}{1 + X_s \cdot \frac{q-1}{q+1}}, \quad (29)$$

где $\lambda_{\text{cp}} = \frac{2\lambda_{\text{max}}\lambda_{\text{min}}}{\lambda_{\text{max}} + \lambda_{\text{min}}}$, $q = \frac{\lambda_{\text{max}}}{\lambda_{\text{min}}}$; X_s — корни полинома Чебышева; q — коэффициент перекрытия частотного диапазона.

Далее по уравнению (30) рассчитывается коэффициент отражения многозональной системы термисторных СВЧ-датчиков:

$$|\Gamma_{\text{пто}}(f)| = \Gamma_R \cdot \left| \cos\left(\frac{2\pi \cdot L_{12}}{\lambda_B(f)}\right) \cdot \cos\left(\frac{2\pi \cdot L_{23}}{\lambda_B(f)}\right) \cdot \cos\left(\frac{2\pi \cdot L_{34}}{\lambda_B(f)}\right) \right|. \quad (30)$$

При этом потери в термисторных СВЧ-датчиках и взаимные переотражения между ними не учитывались. Это допустимо для термисторных СВЧ-датчиков, мало возмущающих поле в тракте. Это условие не выполняется, т. к. зонды располагаются по центру волновода и имеют заметную проводимость, с тем чтобы в термисторах поглотилась существенная доля мощности СВЧ, падающей на вход преобразователя. Поэтому дальнейшее уточнение расстояний между зондами производилось с помощью разработанной компьютерной программы, в которой каждый термистор моделируют в виде комплексного сопротивления в бесконечной идеальной линии передачи [62].

В качестве исходных данных для расчета приняты: диаметр ($d_T = 0,3$ мм) и длина термистора ($L_T = 1,2$ мм); диаметр ($d_B = 0,025$ мм) и длина ($d_B = 0,8$ мм) выводных контактов, и сопротивление термистора постоянному току. Активная и реактивная части этого сопротивления, а также реактивное сопротивление выводов рассчитывались исходя из модели индуктивного стержня в прямоугольном волноводе [63]. Путем изменения сопротивления термисторов находились минимальные значения. Полученные результаты расчета положения термисторных СВЧ-датчиков (L_{12}, L_{23}, L_{34}) приведены на рисунке 46.

The screenshot shows a software window with the following sections:

- Зонд (Probe):**
 - Fв(ГГц) = 25,9
 - Fн(ГГц) = 16,7
 - Fкз = 17,86 ГГц
 - Nf = 100
 - Buttons: Загрузить параметры, Рассчитать
- Расстояния (мм) (Distances in mm):**
 - L12 = 3,60
 - L23 = 2,10
 - L34 = 3,60
 - Lкз = 6,5
- Разрешение (Resolution):**
 - ☒ Точно
 - ☐ Грубо
- Сопротивление (Ом) (Resistance in Ohms):**
 - Rт1 = 700
 - Rт2 = 550
 - Rт3 = 600
 - Rт4 = 600
- График (Graph):**
 - № зонда:
 - ☐ 1
 - ☐ 2
 - ☐ 3
 - ☐ 4
 - ☒ Все
 - ☒ Зонд (КСВН)
☐ Зонд (потери)
☐ Зонды+КЗ (КСВН)
- Buttons:** Сохранить

Рисунок 46 — Значения расстояний между термисторами и их сопротивлениями в рабочем диапазоне частот

При полученных расстояниях между термисторами L_{12} , L_{23} , L_{34} и сопротивлениями термисторов R_{t_1} , R_{t_2} , R_{t_3} , R_{t_4} удастся достигать значений модуля коэффициента отражения многозондовой системы термисторов менее 0,05. Эти значения представлены на рисунке 47.

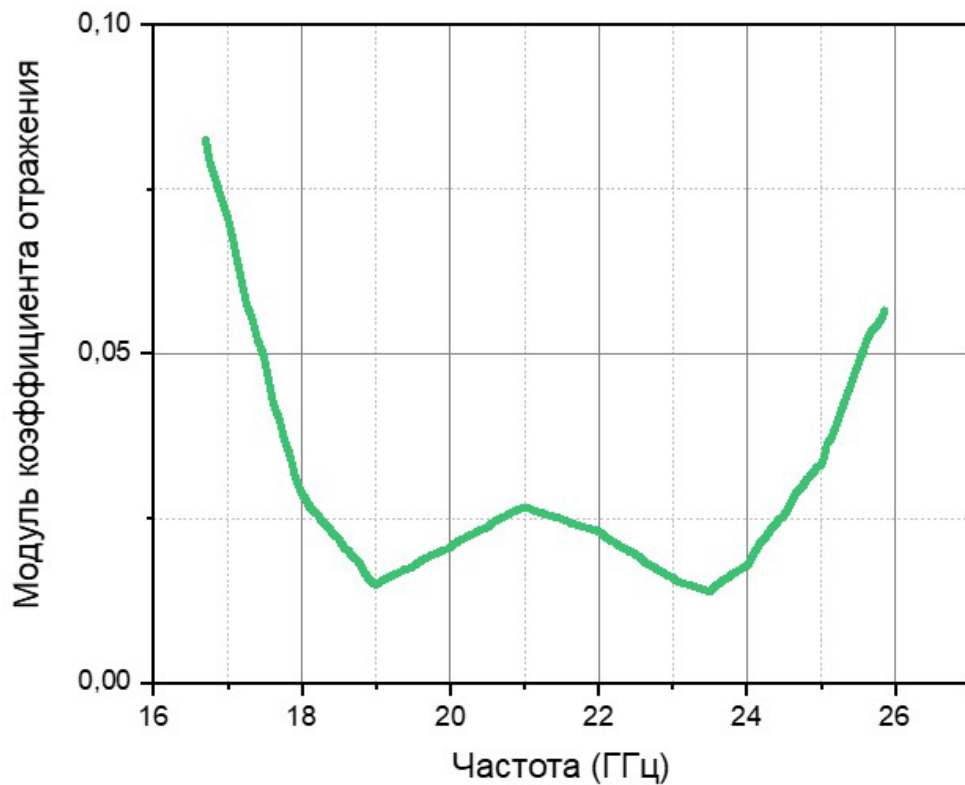


Рисунок 47 — Значения модуля коэффициента отражения многозондовой системы термисторов, полученные аналитической оценкой

Путем регулировки сопротивления R_{t_1} , R_{t_2} , R_{t_3} , R_{t_4} достигается значение модуля коэффициента отражения для каждого поддиапазона, что обеспечивает работу во всем диапазоне частот волноводного тракта. Поэтому для каждого частотного поддиапазона необходимо подобрать требуемые R_{t_1} , R_{t_2} , R_{t_3} , R_{t_4} .

Результаты расчета модуля коэффициента отражения входа преобразователя мощности, полученные аналитическим методом, приведены на рисунке 48.

При аналитическом расчете достаточным количеством наборов сопротивлений является три. Значения сопротивлений для рабочих частот приведены в таблице 4.

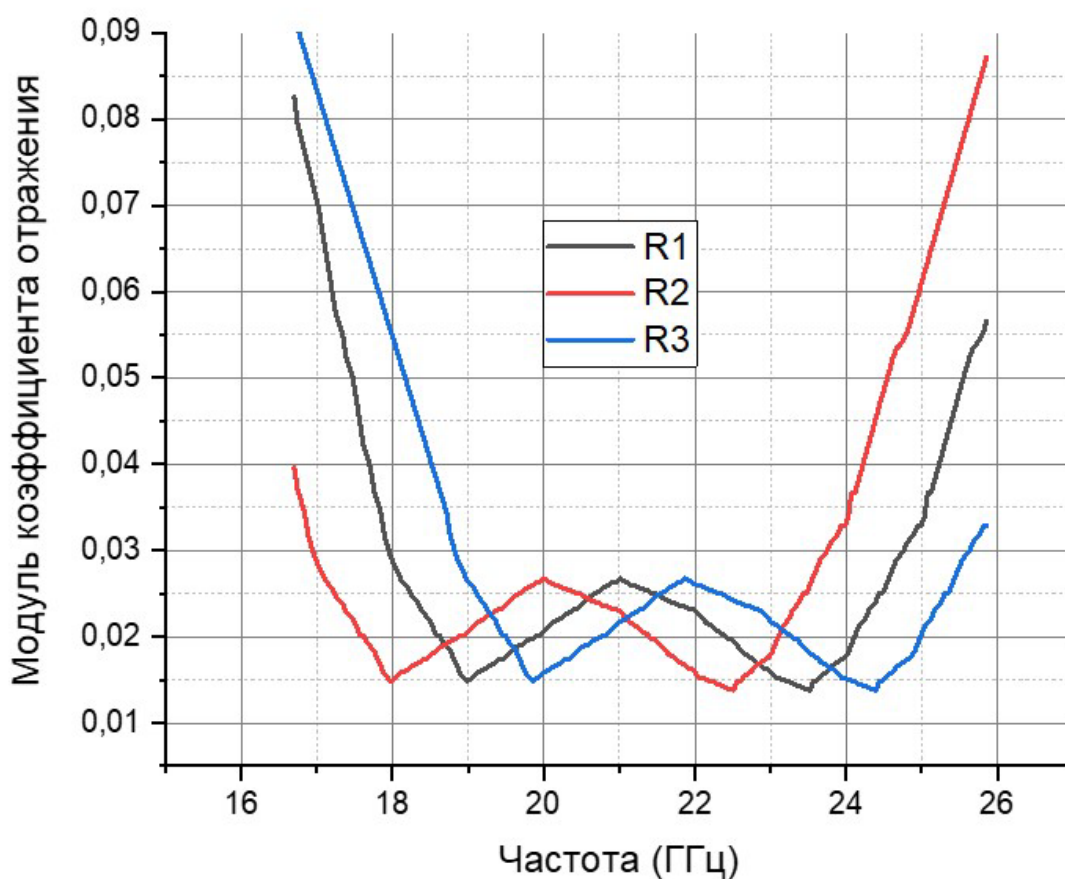


Рисунок 48 — Результаты расчета коэффициентов отражения многозондовой системы термисторов: R_1 — набор сопротивлений № 1; R_2 — набор сопротивлений № 2; R_3 — набор сопротивлений № 3

Таблица 4 — Рабочие сопротивления термисторов

Частота, ГГц	R_{t_1} , Ом	R_{t_2} , Ом	R_{t_3} , Ом	R_{t_4} , Ом	$ \Gamma $
16,70	500	350	300	400	0,04
17,00	500	350	300	400	0,03
17,50	500	350	300	400	0,03
17,85	500	350	300	400	0,03
18,00	500	350	300	400	0,02
19,00	500	350	300	400	0,03
20,00	700	550	600	600	0,03
21,00	700	550	600	600	0,02
22,00	700	550	600	600	0,02
23,00	900	750	700	800	0,02
24,00	900	750	700	800	0,03
25,00	900	750	700	800	0,03
25,86	900	750	700	800	0,04

Таким образом, проведенные исследования и расчеты позволяют сделать выводы о том, что разработанная многозондовая система термисторов с четырьмя СВЧ-датчиками обеспечивает достижение требуемых характеристик согласования с модулем коэффициента отражения входа не более 0,05 во всем рабочем диапазоне частот (от 16,7 до 25,86 ГГц). Конструктивное решение с использованием двух пар двухрядных решеток термисторов позволяет обеспечить согласование с измерительным трактом за счет минимизации взаимных переотражений между элементами во всей полосе рабочих частот волноводного тракта.

3.3. Алгоритм настройки модуля коэффициента отражения входа преобразователя мощности оконечного типа

Настройка модуля коэффициента отражения входа измерительного преобразователя мощности оконечного типа $|\Gamma_{\text{ВХ}}| (R_{t_1}, R_{t_2}, R_{t_3}, R_{t_4})$ 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 $|\Gamma_{\text{ВХ}}(f)|$ был разработан алгоритм поиска минимума методом координатного спуска [64]. Коэффициент отражения входа многозондового преобразователя мощности оконечного типа представлен в виде последовательно соединенных четырехполюсников в волноводном тракте и имеет параметры $S_{11}(f), S_{21}(f), S_{12}(f), S_{22}(f)$.

Исходными данными при настройке $|\Gamma|$ входа являются: $R_{t_1}, R_{t_2}, R_{t_3}, R_{t_4}$ — значения сопротивлений, полученные аналитическим методом и приведенные в таблице 4.

Измерительное оборудование:

- векторный анализатор цепей с настроенным диапазоном частот в соответствии с волноводным трактом;
- калибровочный набор волноводных мер для выполнения калибровки ВАЦ [65];

— измеритель мощности термисторный унифицированный (ИМТУ) МЗ-121 (имеет 4 канала (А, В, С, D) и возможность автоматизации) [66].

Схема установки для поиска минимума $|\Gamma_{\text{ВХ}}|$ приведена на рисунке 49.

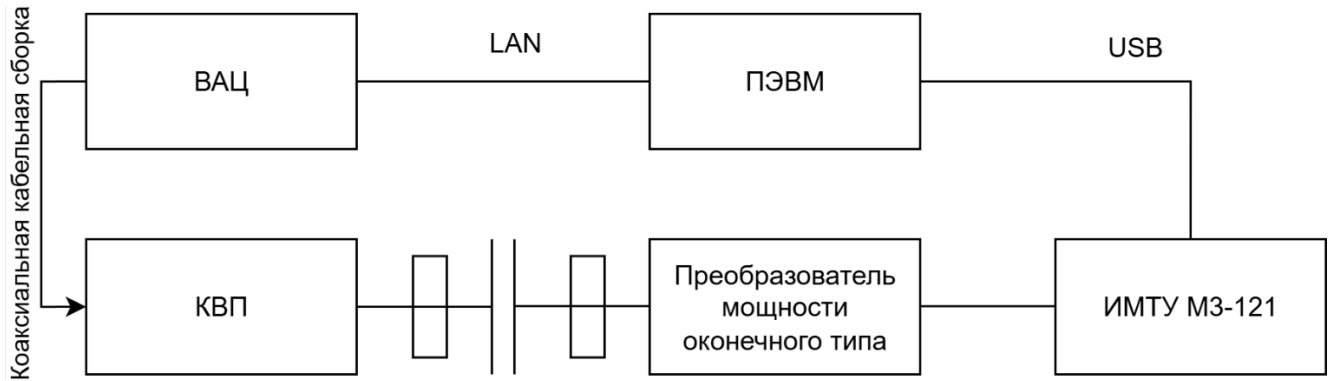


Рисунок 49 — Значения модуля коэффициента отражения с начальными сопротивлениями R_{t_1} , R_{t_2} , R_{t_3} , R_{t_4}

Для начала измерительных работ на векторном анализаторе цепей установлен диапазон частот в соответствии с исследуемым волноводным трактом. Для тракта $11 \times 5,5$ мм диапазон частот составляет от 16,70 до 25,86 ГГц.

Сопротивления R_{t_1} , R_{t_2} , R_{t_3} , R_{t_4} установлены в измерительном блоке МЗ-121 для каналов А, D, С, D. При использовании возможностей МЗ-121 данные таблицы 4 могут быть записаны в память, и с изменением частоты будут установлены требуемые значения сопротивлений:

$$R_{t_0} = [R_{t_1}(f), R_{t_2}(f), R_{t_3}(f), R_{t_4}(f)], \quad (31)$$

где R_{t_0} — волновое сопротивление передающего тракта (импеданс).

Задана точность поиска ε (например, 0,001) и шаг изменения ΔR .

Максимальное число итераций составило: $\max_iter = 1000$.

Шаги регулировки: $\Delta R_{\text{Г}} = 100$ Ом (грубо), $\Delta R_{\text{Т}} = 10$ Ом (точно).

Весовые коэффициенты влияния термисторов:

$w = [0.5, 0.3, 0.15, 0.05]$ (сумма = 1).

Далее рассмотрен модуль коэффициента отражения как функция сопротивлений, которую можно записать по уравнению:

$$\Gamma = S_{11} + \sum_{i=1} 4w_i \cdot S_{21}(i) \cdot \left| \Gamma_i(R_{t_i}) \right| \cdot S_{12}(i) \cdot e^{-j^2 \beta l_i}, \quad i = 1 \dots 4, \quad (32)$$

где $\left| \Gamma_i(R_{t_i}) \right|$ — коэффициент отражения i -го термистора; $\left| \Gamma_i(R_{t_i}) \right| = \frac{R_{t_i} - Z_0}{R_{t_i} + Z_0}$ (коэффициент отражения термистора), $Z_0 = 653, 491, 444$ Ом для частот 16,70; 22,00; 25,86 ГГц; $\beta = 2\pi/\lambda$, l_i — расстояние до термистора.

Грубая настройка ($\Delta R_\Gamma = 100$ Ом).

Для каждой частоты из таблицы:

— загрузить начальные сопротивления: $R_t = [R_{t_1}, R_{t_2}, R_{t_3}, R_{t_4}]$;

— измерить векторным анализатором цепей $|\Gamma_{\text{ВХ}}(f)|$;

— перейти для следующей частоты.

Далее реализован цикл оптимизации поиска минимального значения в грубом режиме $|\Gamma_\Gamma|$. Итерации поиска выполняют, пока $|\Gamma_\Gamma| > 0,03$; максимальное число комбинаций 1000; в случае достижения $|\Gamma_\Gamma| < 0,03$, итерации останавливают.

Поиск начинается с 1-го термистора (R_{t_1}), далее для каждого термистора в порядке убывания веса ($1 \rightarrow 4$).

Сохранить текущее сопротивление и записать в память МЗ-121: $R_{t_i}^{\text{old}} = R_{t_i}^{\text{new}}$.

Направление 1: увеличить R_{t_i} на ΔR_Γ :

$$R_{t_i}^{\text{new}} = \min(R_{t_i} + \Delta R_\Gamma, R_{t_{\max}}).$$

Измерить модуль коэффициента отражения входа преобразователя мощности путем считывания данных с векторного анализатора цепей.

Если увеличилось относительно $|\Gamma|$, перейти к направлению 2. Если $|\Gamma_\Gamma| \leq 0,05$, прервать настройку и записать данные сопротивлений в память. Также переход к другому направлению может быть выбран, если достигнут локальный минимум для проверки.

Направление 2: уменьшить R_{t_i} на ΔR_Γ :

$$R_{t_i}^{\text{new}} = \min(R_{t_i} - \Delta R_\Gamma, R_{t_{\max}}).$$

Если увеличилось относительно $|\Gamma|$, перейти к следующему термистору. Если $|\Gamma_r| \leq 0,05$, прервать настройку и записать данные сопротивлений в память. Также переход к другому направлению может быть выбран, если достигнут локальный минимум для проверки.

Обновление сопротивлений выполняется каждый раз, если $\Gamma^{\text{new}} < \Gamma_r$: $R_{t_i} = R_{t_i}^{\text{new}}$, $\Gamma_r = \Gamma^{\text{new}}$; если условие не выполняется, то вернуть $R_{t_i}^{\text{old}}$.

После окончания грубой настройки необходимо перейти к точной настройке (цикл оптимизации с уменьшенным шагом) — для каждого термистора проверять оба направления ($\pm \Delta R_t$).

Обновлять R_{t_i} , только если $\Gamma^{\text{new}} < \Gamma_r$.

Точная настройка позволяет максимально приблизиться к требуемому значению $|\Gamma|$ и не пропустить локальный минимум.

Далее данный цикл реализован в качестве циклического кода:

Параметры системы

$Z0 = [Z0f]$ *# Характеристическое сопротивление*

$weights = [0.5, 0.3, 0.15, 0.05]$ *# Весовые коэффициенты*

$Rt_min = [500, 350, 300, 400]$ *# Минимальные значения Rt*

$Rt_max = [900, 750, 700, 800]$ *# Максимальные значения Rt*

def compute_Gamma(Rt, freq):

Заглушка для расчета Γ (реализуется через S-параметры и уравнения)

$S11 = 0.1$ *# Пример: коэффициент отражения входа*

$beta = 2 * np.pi * freq / 3e8$ *# Упрощенный расчет β*

$sum_term = 0$

for i in range(4):

$l_i = 0.1 * (i+1)$ *# Пример: расстояние до термистора*

$S21 = 0.8 - 0.1*i$ *# Пример: коэффициент передачи*

$S12 = 0.8 - 0.1*i$ *# Пример: обратный коэффициент*

$Gamma_i = (Rt[i] - Z0) / (Rt[i] + Z0)$

$phase = np.exp(-2j * beta * l_i)$

```

    sum_term += weights[i] * S21 * Gamma_i * S12 * phase
Gamma = np.abs(S11 + sum_term)
return Gamma

def optimize_Rt(freq, Rt_init):
    Rt = Rt_init.copy()
    Gamma_current = compute_Gamma(Rt, freq)
    iter_count = 0
    Gamma_history = []
    while Gamma_current > 0.03 and iter_count < 1000:
        # Грубая настройка
        for i in range(4): # Порядок: 0 (Rt1) → 3 (Rt4)
            Rt_old = Rt[i]
            # Проверка увеличения
            Rt[i] = min(Rt[i] + 100, Rt_max[i])
            Gamma_new = compute_Gamma(Rt, freq)
            if Gamma_new < Gamma_current:
                Gamma_current = Gamma_new
            else:
                Rt[i] = Rt_old # Откат
            # Проверка уменьшения
            Rt[i] = max(Rt[i] - 100, Rt_min[i])
            Gamma_new = compute_Gamma(Rt, freq)
            if Gamma_new < Gamma_current:
                Gamma_current = Gamma_new
            else:
                Rt[i] = Rt_old
        # Точная настройка
        for i in range(4):
            Rt_old = Rt[i]
            for delta in [10, -10]:

```

```

Rt[i] = np.clip(Rt_old + delta, Rt_min[i], Rt_max[i])
Gamma_new = compute_Gamma(Rt, freq)
if Gamma_new < Gamma_current:
    Gamma_current = Gamma_new
    break
else:
    Rt[i] = Rt_old
Gamma_history.append(Gamma_current)
iter_count += 1
return Rt, Gamma_current, Gamma_history
# Пример использования
freq = 22.0 # ГГц
Rt_init = [700, 550, 600, 600] # Начальные значения из таблицы
Rt_opt, Gamma_opt, history = optimize_Rt(freq, Rt_init)
print(f"Оптимальные сопротивления: {Rt_opt}")
print(f"Минимальный Г: {Gamma_opt:.4f}")

```

Таким образом, проведенные разработка и исследования алгоритма координатного спуска для минимизации модуля коэффициента отражения $|\Gamma|$ входа многозондового преобразователя мощности позволили достичь следующих результатов, в которых реализована двухэтапная настройка (грубая с шагом 100 Ом и точная с шагом 10 Ом), при которой требуется 10–50 итераций для достижения целевого значения (глобального минимума). Установлено, что наибольший вклад в минимизацию $|\Gamma|$ вносит первый термистор (R_{t_1} , вес 0,5), что подтверждает важность его первоочередной настройки. Последовательная оптимизация термисторов в порядке убывания веса ($R_{t_1} \rightarrow R_{t_4}$) позволила сократить время поиска оптимальных сопротивлений. Использование начальных табличных данных обеспечило сокращение времени настройки и повысило воспроизводимость результатов.

Результаты работы подтверждают, что предложенный метод координатного спуска является эффективным инструментом для точной настройки модуля коэффициента отражения входа волноводных преобразователей мощности конечного типа.

Однако требуется экспериментальное опробование разработанного алгоритма настройки модуля коэффициента отражения входа преобразователя мощности конечного типа.

3.4. Экспериментальное опробование настройки модуля коэффициента отражения входа преобразователя мощности

На опытном образце многозондового преобразователя мощности конечного типа проведено экспериментальное опробование алгоритма настройки модуля коэффициента отражения входа преобразователя мощности.

Результаты настройки, полученные путем измерений модуля коэффициента отражения входа макета многозондового преобразователя мощности конечного типа, представлены на рисунке 50.

Настройка модуля коэффициента отражения входа преобразователя мощности конечного типа с многоэлементной системой термисторов осуществлялась до нахождения локального минимума на каждой частотной точке рабочего диапазона, как показано на рисунке 50. В процессе экспериментальной отработки настройки $|\Gamma_{ВХ}(f)|$ было показано, что поиск минимального значения коэффициента отражения входа преобразователя мощности необходимо осуществлять, последовательно начиная с первого термисторного элемента многоэлементной структуры термисторов.

Опробован разработанный алгоритм поиска минимальных значений $|\Gamma_{ВХ}(f)|$; в результате подтверждено практическое достижение $|\Gamma_{ВХ}(f)| \leq 0,03$ преобразователя мощности конечного типа. В качестве примера (см. рисунок 50) приведены результаты настройки $|\Gamma_{ВХ}(f)|$ на фиксированных рабочих частотах волноводного тракта $11 \times 5,5$ мм, соответствующего частотному диапазону от 16,70 до 25,86 ГГц.

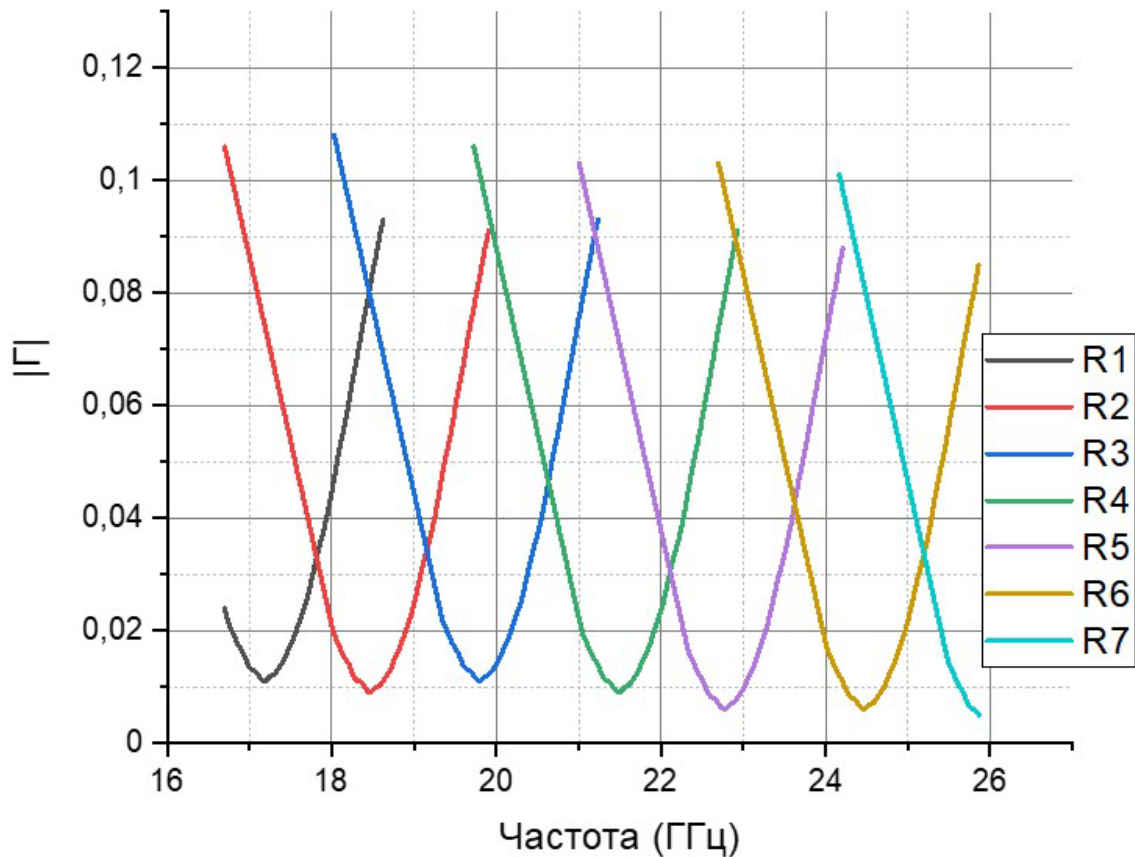


Рисунок 50 — Результаты измерений коэффициентов отражения
многозондовой системы термисторов:

R_1 — набор сопротивлений № 1; R_2 — набор сопротивлений № 2;

R_3 — набор сопротивлений № 3; R_4 — набор сопротивлений № 4;

R_5 — набор сопротивлений № 5; R_6 — набор сопротивлений № 6;

R_7 — набор сопротивлений № 7

Траектории координатного спуска при поиске минимального значения $|\Gamma_{\text{ВХ}}(f)|$ преобразователя мощности окончного типа разработанным методом на фиксированных частотах изображены на рисунке 51 для фиксированных частот 16,70; 22,00; 25,86 ГГц.

В результате настройки $|\Gamma_{\text{ВХ}}(f)|$ получена матрица $R_{i_1}(f)$, $R_{i_2}(f)$, $R_{i_3}(f)$, $R_{i_4}(f)$. Использование матрицы $R_{i_i}(f)$, где i — номер датчика СВЧ термисторного, необходимо для определения частотного коэффициента преобразователя мощности окончного типа (K_K).

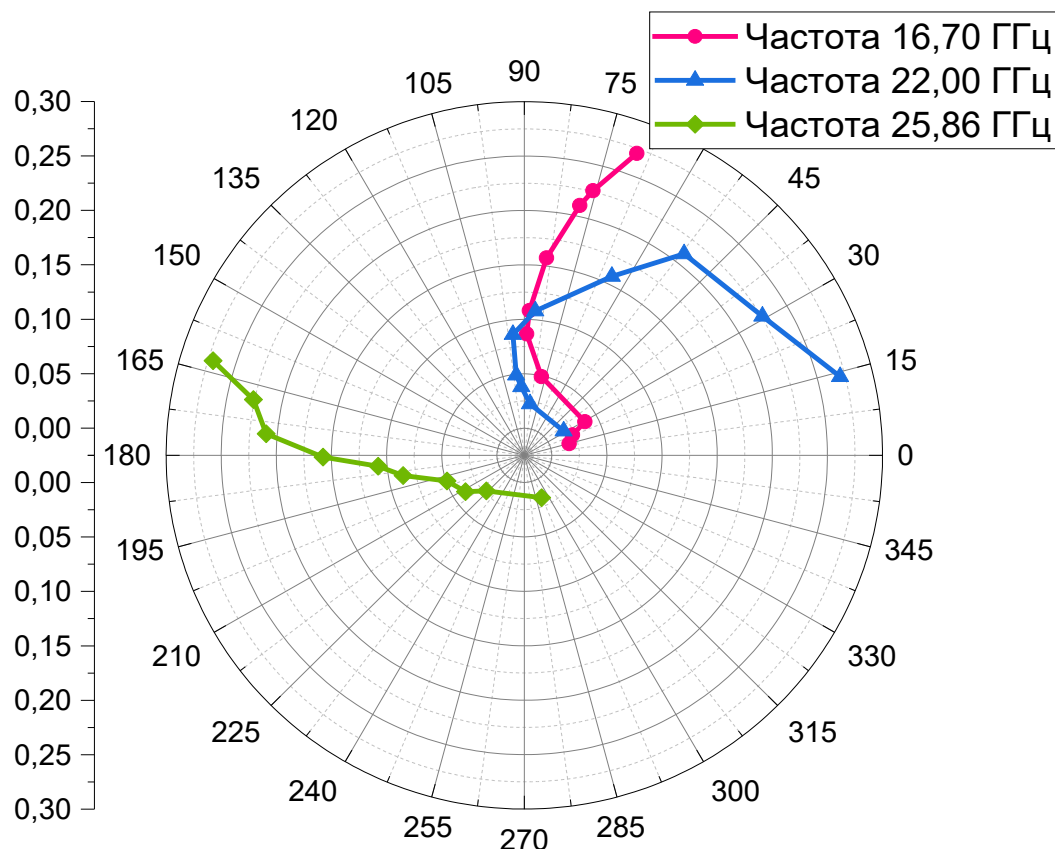


Рисунок 51 — Ход координатного спуска при поиске минимального значения модуля коэффициента отражения входа многоэлементного преобразователя мощности оконечного типа

Разработанный алгоритм успешно интегрирован с измерительным оборудованием (векторным анализатором цепей и термисторным измерителем МЗ-121), что подтверждает его применимость в реальных условиях.

3.5. Определение метрологических характеристик разработанного преобразователя мощности оконечного типа

Преобразователи мощности оконечного типа предназначены для измерений мощности СВЧ непрерывных синусоидальных сигналов и средней мощности импульсно-модулированных сигналов в диапазоне частот от 16,7 до 37,5 ГГц.

К основным метрологическим характеристикам [67] ваттметров оконечного типа относят:

- диапазон рабочих частот;
- диапазон измерений мощности;
- модуль коэффициента отражения входа;
- частотный коэффициент;
- доверительные границы частотного коэффициента.

Подаваемая мощность СВЧ на вход преобразователя мощности рассеивается чувствительными элементами [68], а также не вся приложенная мощность к чувствительному элементу преобразуется в полезный сигнал, отображающий измеряемую мощность. Часть мощности теряется в конструкции преобразователя мощности. Также стоит отметить, что мощность СВЧ и мощность постоянного тока неэквивалентны. Для учета этих факторов, влияющих на результат измерений, введен коэффициент эффективности.

Для термисторного преобразователя коэффициент эффективности будет равен:

$$K_{\text{э}} = \frac{P_{\text{зам}}}{P_{\text{СВЧ}}}, \quad (33)$$

где $K_{\text{э}}$ — коэффициент эффективности; $P_{\text{зам}}$ — значение мощности замещения на постоянном токе; $P_{\text{СВЧ}}$ — значение измеренной мощности на СВЧ.

Для оценки падающей мощности пользуются калибровочным коэффициентом (калибровочный фактор) [69], который равен отношению мощности замещения на постоянном токе к мощности СВЧ, падающей на преобразователь. Калибровочный коэффициент ($K_{\text{к}}$) связан с $K_{\text{э}}$ уравнением:

$$K_{\text{к}} = K_{\text{э}} \cdot (1 - |\Gamma_{\text{вх}}|^2). \quad (34)$$

Таким образом, падающая мощность СВЧ на преобразователь равна:

$$P_{\text{СВЧпад}} = \frac{P_{\text{зам}}}{K_{\text{э}} \cdot (1 - |\Gamma_{\text{вх}}|^2)}. \quad (35)$$

Значения калибровочного коэффициента приведены на рисунке 52.

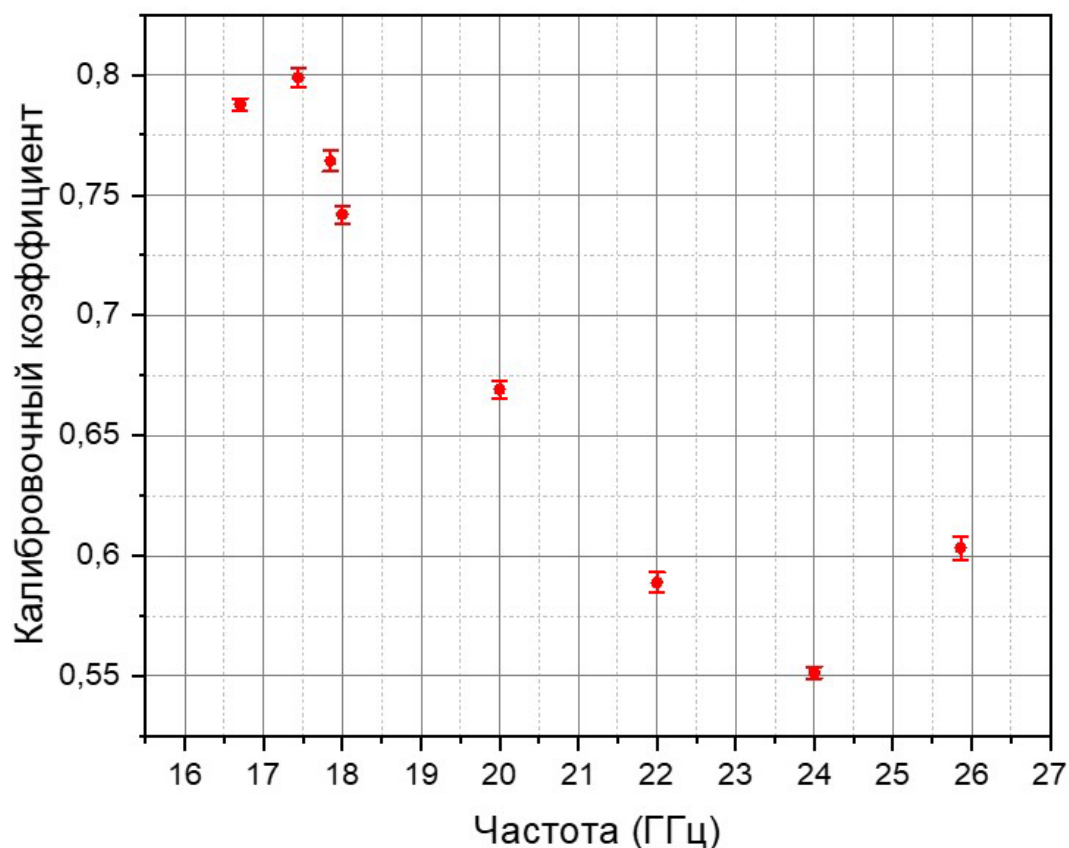


Рисунок 52 — Значения калибровочного коэффициента на фиксированных частотах

Таким образом, данный коэффициент применяется как частная поправка и используется при измерениях мощности СВЧ. Значения частотных поправок записываются в измерительный блок и в дальнейшем применяются автоматически.

В результате исследования функционального макета многозондового преобразователя мощности СВЧ окончного типа проведен расчет доверительных границ погрешности значений калибровочного коэффициента, выполненный по формулам 36–44.

Определение калибровочного коэффициента с учетом погрешности рассогласования определяется по формуле:

$$K_K = 2 \cdot \frac{N_{BO}}{P_{\Sigma}} \cdot |\Gamma_{\Sigma}| \cdot |\Gamma_{BO}|; \quad (36)$$

где $N_{\text{ВО}}$ — показания ваттметра оконечного типа волноводного термисторного;
 $P_{\text{Э}}$ — значения мощности эталонного калибратора мощности; $|\Gamma_{\text{ВО}}|$ — модуль коэффициента отражения ваттметра оконечного типа волноводного термисторного;
 $|\Gamma_{\text{Э}}|$ — модуль эффективного коэффициента отражения выхода ваттметра проходного типа волноводного термисторного.

Среднеквадратическое отклонение погрешности из-за рассогласования $S_{\text{Р}}$ и граница неисключенной систематической погрешности из-за рассогласования $\Theta_{\text{Р}}$, в процентах, рассчитаны для каждой частоты по формулам:

$$S_{\text{Р}} = \sqrt{2} \cdot |\Gamma_{\text{Э}}| \cdot |\Gamma_{\text{ВО}}| \cdot 100\%; \quad (37)$$

$$\Theta_{\text{Р}} = 2 \cdot |\Gamma_{\text{Э}}| \cdot |\Gamma_{\text{ВО}}| \cdot 100\%. \quad (38)$$

Определение калибровочного коэффициента $K_{\text{К}}$ выполнено как среднее значение отношения показаний мощности эталонного калибратора мощности и показания ваттметра оконечного типа волноводного термисторного:

$$K_{\text{К}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{N_{\text{ВО}}}{P_{\text{Э}}} \right)_i, \quad (39)$$

где n — число подключений ваттметра оконечного типа волноводного термисторного.

Среднее квадратическое отклонение $[S]_{\text{КК}}$ и границы неисключенной систематической погрешности $[\Theta]_{\text{КК}}$ определены для каждой частоты по формулам:

$$[S]_{\text{КК}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n ((K_{\text{К}})_i - K_{\text{К}})^2}{n \cdot (n-1)}} \cdot 100\%; \quad (40)$$

$$[\Theta]_{\text{КК}} = \Theta_{\text{Э}} + \Theta_{\text{Р}}, \quad (41)$$

где $\Theta_{\text{Р}}$ — граница неисключенной систематической погрешности эталонного калибратора мощности.

СКО суммы неисключенных систематических погрешностей определено по формуле:

$$[S_{\Theta}]_{K_K} = \sqrt{\frac{1}{3} \cdot \Theta_{\Theta}^2 + \frac{1}{2} \Theta_P^2}. \quad (42)$$

СКО суммы неисключенных систематических и случайных погрешностей определено по формуле:

$$[S_{\Sigma}]_{K_K} = \sqrt{[S]_{K_K}^2 + [S_{\Theta}]_{K_K}^2}. \quad (43)$$

Доверительные границы погрешности значений калибровочного коэффициента K_K рассчитаны по формуле:

$$[t_{\Sigma} S_{\Sigma}]_{K_K} = \frac{[\Theta]_{K_K} + t \cdot [S]_{K_K}}{[S]_{K_K} + [S_{\Theta}]_{K_K}} \cdot [S_{\Sigma}]_{K_K}, \quad (44)$$

где $t = 2,262157$ — коэффициент Стьюдента (при доверительной вероятности 0,95 и 8 измерениях).

Доверительные границы относительной погрешности значений частотного коэффициента ваттметра оконечного и проходного типа волноводного термисторного составляют не более 0,8 % в диапазоне частот от 16,7 до 25,86 ГГц.

3.6. Выводы по главе 3

В главе 3 представлена разработка многозондового преобразователя мощности оконечного типа, основанного на системе из четырех термисторов. Данная конструкция позволила добиться значительного снижения модуля коэффициента отражения входа $|\Gamma_{ВХ}(f)|$ до значений, не превышающих 0,03, что соответствует требованиям, предъявляемым к вторичным эталонам. Для обеспечения точной настройки коэффициента отражения разработан алгоритм поиска минимального значения коэффициента отражения входа, основанного на методе координатного спуска, включающий грубую и точную регулировку сопротивлений термисторов. Этот метод обеспечивает минимизацию $|\Gamma_{ВХ}(f)|$ на произвольных частотах рабочего диапазона волноводного тракта.

Экспериментальные исследования подтвердили эффективность предложенного подхода, продемонстрировав стабильность и высокую точность преобразователя мощности. Доверительные границы погрешности калибровочного коэффициента не превышают $\pm 0,8 \%$, что удовлетворяет требованиям вторичных эталонов. Долговременная стабильность характеристик устройства проверена в ходе многократных испытаний.

Практическая значимость работы заключается в возможности использования разработанного преобразователя мощности в качестве вторичного эталона для передачи единицы мощности электромагнитных колебаний, а также в высокоточных измерительных системах. Таким образом, результаты главы 3 подтверждают успешное решение задачи снижения $|\Gamma_{\text{вх}}(f)|$ входа преобразователей мощности оконечного типа в волноводных трактах.

Глава 4. Экспериментальная апробация передачи единицы мощности ЭМК ваттметром комбинированным

4.1. Метод и средства повышения точности измерений модуля эффективного коэффициента отражения выхода аттестуемого ваттметра проходного типа

При разработке волноводных ваттметров проходного типа на основе делителей и направленных ответвителей для контроля $|\Gamma_{\text{э}}|$ целесообразно использовать метод на основе измерения параметров матрицы рассеивания с применением векторного анализатора цепей. С применением ВАЦ процесс измерений стал менее трудоемким, более быстрым, но такой метод подходит только на этапе разработки и изготовления направленных ответвителей, входящих в состав ваттметров проходного типа [70]. В процессе эксплуатации ваттметров проходного типа векторным анализатором цепей невозможно измерить $|\Gamma_{\text{э}}|$. Контроль модуля $|\Gamma_{\text{э}}|$ осуществляется на различных этапах — от разработки ваттметра до его периодической проверки. Это обусловлено тем, что модуль $|\Gamma_{\text{э}}|$ существенно влияет на погрешность передачи единицы мощности ЭМК. В соответствии с уравнением (1), контроль $|\Gamma_{\text{э}}|$ необходим при передаче единицы мощности ЭМК, а также важной составляющей является точность его ($|\Gamma_{\text{э}}|$) измерений.

Средства измерений для реализации контроля $|\Gamma_{\text{э}}|$, предусмотренные по ГОСТ 8.392-80, сняты с производства и в настоящее время устарели. Из-за этого измерения становятся трудно реализуемыми, а процесс их проведения — трудоемким и затратным по времени. Пример установки приведен на рисунке 53.

Для измерения модуля эффективного коэффициента отражения выхода ваттметров проходящей (падающей) мощности ГОСТ 8.392-80 предусматривает два равноправных метода измерений.

Метод 1. Для измерения $|\Gamma_{\text{э}}|$ выход ВП подключается к генератору. Между выходом ВП и генератором подключают измерительную линию [71] так, как показано на рисунке 54.

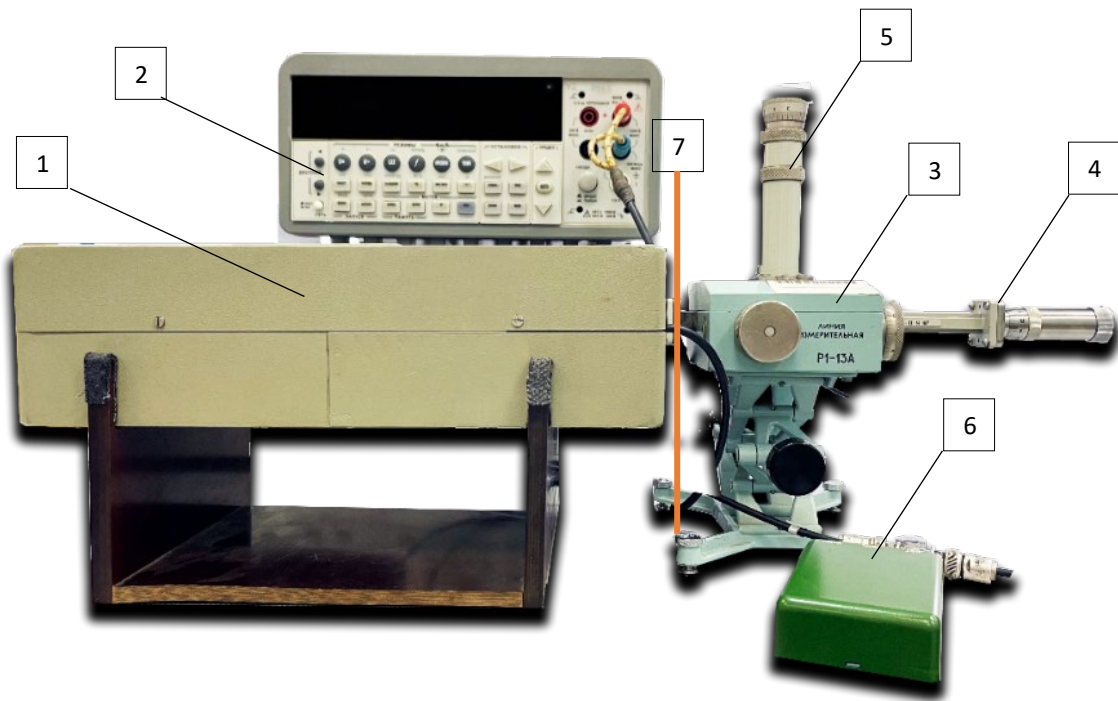


Рисунок 53 — Установка для измерения модуля эффективного коэффициента отражения выхода ваттметров проходного типа:

*1 — аттестуемый ваттметр проходного типа; 2 — вольтметр универсальный;
3 — измерительная линия; 4 — подвижный короткозамыкатель (ПКЗ);
5 — органы подстройки измерительной линии; 6 — источник питания
измерительной линии; 7 — плоскость измерений $|\Gamma_{\Sigma}|$*

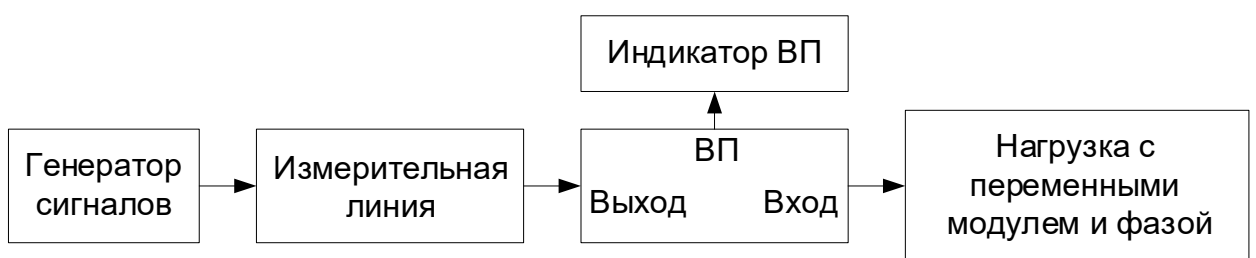


Рисунок 54 — Схема измерения модуля эффективного коэффициента по ГОСТ 8.392-80, метод 1

Ко входу ВП подключают ПКЗ с переменной фазой. Для реализации используют комбинацию ПКЗ (изменяет фазу коэффициента отражения нагрузки) и переменного аттенюатора (изменяет модуль коэффициента отражения нагрузки). Изменяя коэффициент отражения нагрузки, добиваются минимальных показаний ВП.

Измеряется коэффициент отражения входа, который равен $|\Gamma_{\text{Э}}|$ ВП. Измерительная линия позволяет использовать генератор с большей мощностью для наиболее точной компенсации отражения со стороны входа ВП в боковое плечо.

Измерение $|\Gamma_{\text{Э}}|$ этим методом проводится последовательно на каждой выбранной частоте, т. е. для каждой частоты подбираются ослабление аттенюатора и положение КЗ поршня. Сложность в оценке погрешности результата измерения вносит установка нулевых показаний ВП.

Метод 2. Другой метод измерения $|\Gamma_{\text{Э}}|$ основан на использовании связки измерительной линии — ПКЗ в качестве нагрузки на выходе ВП, как показано на рисунке 55.

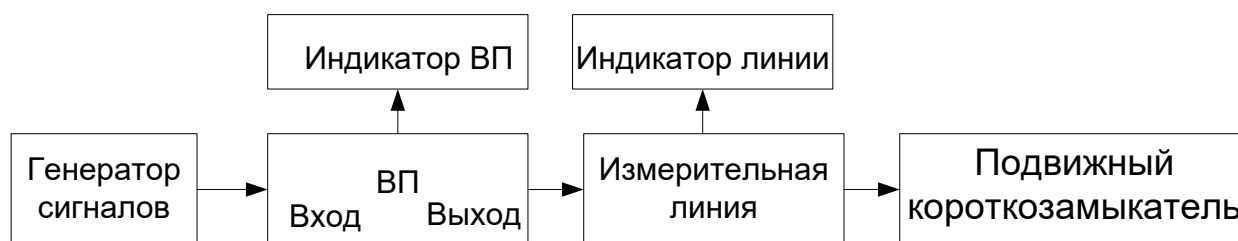


Рисунок 55 — Схема измерения модуля эффективного коэффициента по ГОСТ 8.392-80, метод 2

Изменяя положение ПКЗ, изменяют фазу коэффициента отражения нагрузки, при этом регулировкой мощности генератора [72] добиваются постоянства показаний измерительной линии в максимуме поля (для исключения погрешностей, связанных с нелинейностью диодной секции линии) при каждом положении поршня. Модуль $|\Gamma_{\text{Э}}|$ при $\Gamma = 1$ ПКЗ определяется по формуле:

$$|\Gamma_{\text{Э}}| = \frac{1}{2} \cdot \frac{P_{\text{max}} - P_{\text{min}}}{P_{\text{max}} + P_{\text{min}}}, \quad (45)$$

где P_{max} , P_{min} — максимальное и минимальное показания калибратора.

Реализация данных методов измерений требует разработки целого ряда СИ:

- измерительной линии;
- индикатора измерительной линии;

- развязывающего аттенюатора;
- короткозамыкателя со стабильным модулем коэффициента отражения при перемещении;
- вспомогательного переменного волноводного аттенюатора 0–30 дБ [73].

Оба метода, в силу механических перемещений измерительной линии, подвижного короткозамыкателя и аттенюатора, не автоматизируются.

В соответствии с «Государственной поверочной схемой для средств измерений мощности электромагнитных колебаний в диапазоне частот от 9 кГц до 37,5 ГГц», эффективный коэффициент отражения выхода ваттметра проходящей мощности представляет собой число, определяющее максимальное изменение отношения показаний ВП к мощности, поглощенной нагрузкой на его выходе, при произвольном изменении фазы коэффициента отражения нагрузки в интервале $\pm 180^\circ$.

Исходя из данного определения, для измерения модуля эффективного коэффициента отражения необходимо разработать ваттметр с переменной фазой коэффициента отражения.

Рассмотрено три варианта исполнения такого ваттметра:

- ко входу ваттметра подключен отрезок регулярного волновода [74];
- чувствительный элемент ваттметра перемещается вдоль волновода (внутри корпуса преобразователя), тем самым изменяя фазу коэффициента отражения ваттметра;
- ваттметр состоит из направленного ответвителя, ваттметра поглощаемой мощности и нагрузки с переменной фазой.

Длинный отрезок $(25\text{--}30)\lambda$ регулярного волновода, включенный на входе ваттметра поглощаемой мощности, позволяет при небольшом изменении частоты ($\pm 1\%$) изменить фазу коэффициента отражения ваттметра в интервале $\pm 180^\circ$. Однако для волноводного тракта с сечением 35×15 мм длина такого отрезка должна составлять порядка 2 м, что практически ограничивает его применение на низких частотах, а на высоких частотах $\pm 1\%$ от частоты уже принимает значения

$\pm 0,5$ ГГц, т. е. измерения будут проходить не на произвольных фиксированных частотах, а в широком диапазоне частот с предположением, что модуль эффективного коэффициента отражения выхода калибратора не изменяется. Сложность изготовления мер длиной $(25-30) \lambda$, связанная со сложностью механической обработки, не позволяет выдерживать сечение волновода на всей его длине, вследствие чего линия передачи становится несогласованной. Это, в свою очередь, приводит к значительному завышению погрешности измерений модуля эффективного коэффициента отражения. Массогабаритные параметры такого набора мер, особенно на сечении волновода 35×15 мм, создают сложности как при работе (размещение приборов на столе поверителя, подключение к поверяемым эталонным приборам), так и при транспортировке. Такие меры легко подвергаются деформации при неаккуратном применении и хранении. Длинная труба просто провисает под собственным весом. Такой вариант имеет перспективы применения только в единичном исполнении, например в составе первичного эталона.

Другой вариант конструкции возможен на основе направленного ответвителя, прямой канал которого нагружен на несогласованную подвижную нагрузку, а в боковой канал помещен измеритель мощности. Перемещение нагрузки обеспечит изменение фазы коэффициента отражения ваттметра. Определено, что такой вариант имеет существенный недостаток из-за конечной направленности направленного ответвителя. При изменении фазы коэффициента отражения нагрузки изменяются показания ваттметра, расположенного в боковом плече направленного ответвителя. Это изменение приводит к погрешности, сравнимой со значением измеряемой величины 0,03.

Выбран вариант СИ модуля эффективного коэффициента отражения на основе подвижного чувствительного элемента ваттметра. Предложена следующая конструкция преобразователя мощности с изменяемой фазой коэффициента отражения. В волноводе размещается прямоугольный параллелепипед — рассогласованная нагрузка, изготовленная из ферроэпоксида, одна сторона которого имеет размеры, равные сечению волновода. Его длина выбирается такой, чтобы обеспечить затухание СВЧ-сигнала, прошедшего в материал. Экспериментально получено, что

на частотах от 5,64 до 37,5 ГГц такая нагрузка длиной 20 мм обеспечивает затухание сигнала порядка 20–30 дБ. Следовательно, достаточно 30 мм, чтобы исключить пролезание СВЧ-сигнала к отсчетной части устройства на уровне –60 дБ [75]. В передней части полученной нагрузки, перпендикулярно длинной стенке на жесткой конструкции, выполненной из металла, размещается терморезистор на расстоянии 3 мм от стенки нагрузки. Выводы термистора припаиваются к креплениям, которые с другой стороны нагрузки подключаются посредством проводов к термисторному измерителю мощности. Соединительные провода, идущие к термисторному измерителю мощности, выводятся через продольный разрез волновода в середине широкой стенки волновода. К полученной нагрузке подключается микрометрический винт. При перемещении чувствительного элемента обеспечивается постоянство модуля коэффициент отражения входа за счет жесткого крепления терморезистора к рассогласованной нагрузке при помощи коротких выводов из металла стали и отсутствия пролезания СВЧ-сигнала за нагрузку. Специфика измерений позволяет применять подходящие по размерам терморезисторы, длина которых после остекловки составляет 1 мм.

Конструкция датчика мощности рассогласованного должна обеспечивать:

- стабильность калибровочного коэффициента за время проведения измерений;
- стабильность модуля коэффициента отражения входа при перемещении ($\pm 0,008$);
- нахождение значений модуля коэффициента отражения входа в пределах от 0,15 до 0,6.

Важно, чтобы чувствительный элемент обеспечивал регистрацию мощности электромагнитного излучения СВЧ с разрешающей способностью $\pm 0,1$ %, что подразумевает возможность детектирования измеряемой величины в диапазоне мощностей от 1 до 10 мВт.

Простота конструкции обеспечивает ее надежность. Разработан опытный образец ДМР в волноводном тракте с сечением $11 \times 5,5$ мм. На рисунке 56 приведена фотография образца в разобранном виде.

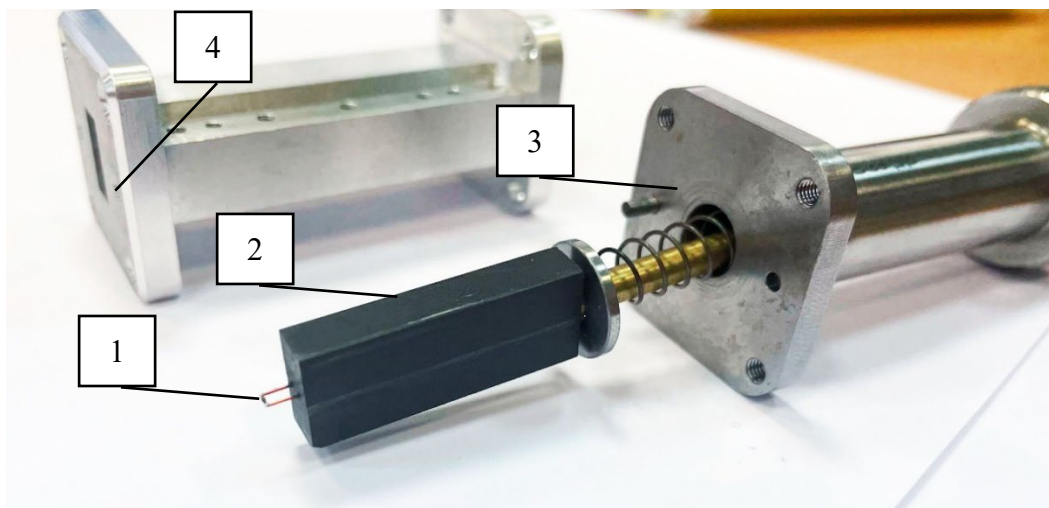


Рисунок 56 — Опытный образец ДМР в разобранном виде, применяемый в преобразователе мощности для измерения модуля $|\Gamma_{\text{Э}}|$:

1 — термисторный зонд; 2 — рассогласованная нагрузка;
3 — механизм перемещения; 4 — волноводный отрезок линии

Модуль коэффициента отражения входа полученного образца ДМР составляет от 0,28 до 0,44 в диапазоне частот волновода. Полученные значения приведены на рисунке 57.

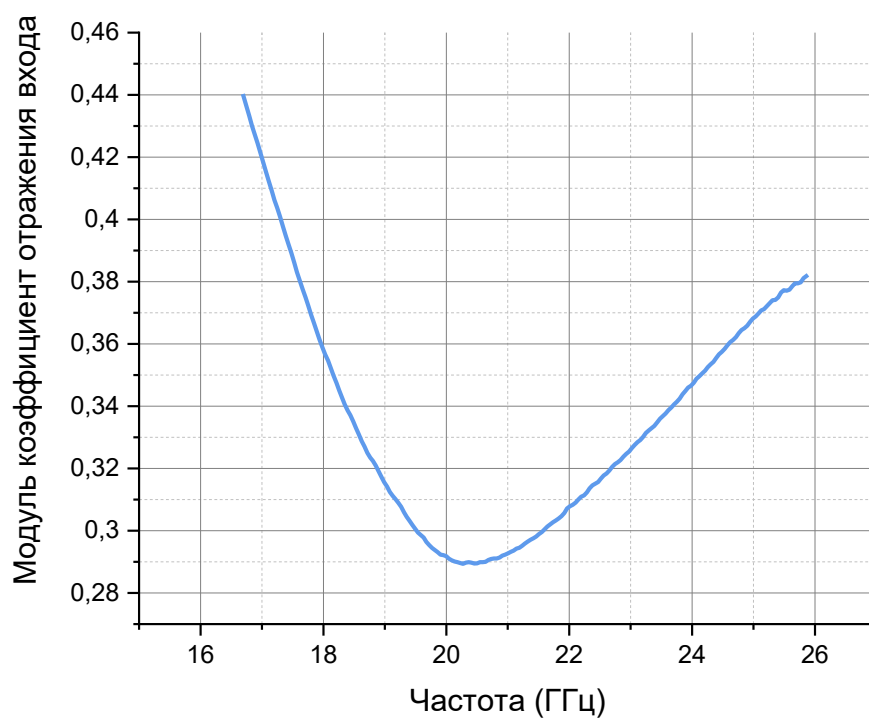


Рисунок 57 — Значения модуля коэффициента отражения входа опытного образца ДМР

Результаты измерений модуля коэффициента отражения при разных положениях нагрузки подтвердили его стабильность в пределах $\pm 0,01$. Такие изменения модуля коэффициента отражения при перемещении могут быть связаны как с погрешностью самих измерений, так и с нестабильностью нагрузки. Опробовано измерение модуля эффективного коэффициента отражения выхода калибратора мощности М1-10 [76] из состава ГЭТ 26-2010. Полученные результаты позволили подтвердить справедливость теоретических выводов. Калибровочный коэффициент полученного преобразователя в диапазоне частот изменяется от 0,35 до 0,17, что обеспечивает достаточную чувствительность для индикации мощности.

Таким образом, актуальной задачей является разработка новых средств контроля $|\Gamma_{\Sigma}|$ при эксплуатации волноводных многозондовых ваттметров проходного типа.

Для решения задачи разработана конструкция, основанная на принципе метода измерений по ГОСТ 8.392-80. Она представлена на рисунке 58.

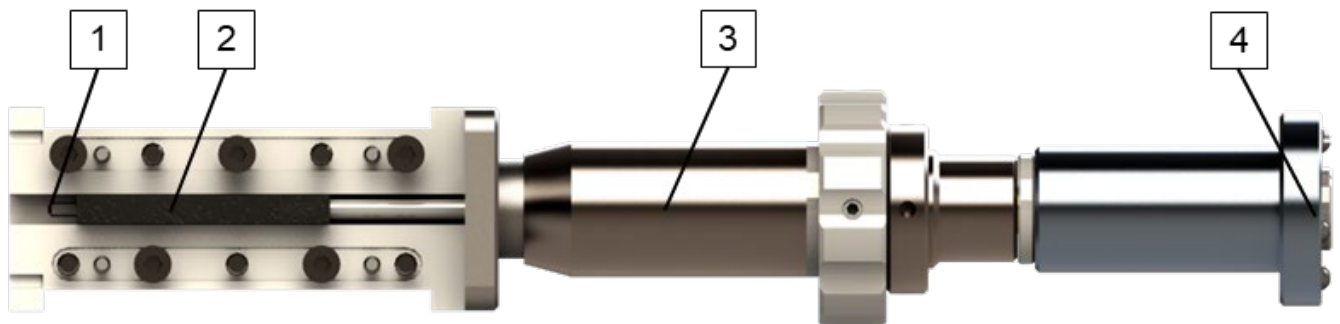


Рисунок 58 — Внешний вид конструкции ДМР:

1 — термисторный зонд; 2 — рассогласованная нагрузка;

3 — механизм перемещения; 4 — разъем подключения к измерительному блоку

Характеристиками, влияющими на погрешность измерений $|\Gamma_{\Sigma}|$, являются непостоянство модуля коэффициента отражения при перемещении нагрузки, величина модуля коэффициента отражения, чувствительность термисторного зонда, характеризующаяся калибровочным коэффициентом (K_K), и уровень собственных шумов.

Вычисление $|\Gamma_{\Theta}|$ при проведении измерений выполняется по формуле (46):

$$|\Gamma_{\Theta}| = \frac{1}{2 \cdot |\Gamma_H|_{\text{cp}}} \cdot \frac{\left(\frac{P_H}{P_K}\right)_{\text{max}} - \left(\frac{P_H}{P_K}\right)_{\text{min}}}{\left(\frac{P_H}{P_K}\right)_{\text{max}} + \left(\frac{P_H}{P_K}\right)_{\text{min}}}, \quad (46)$$

где P_H — измеренное значение мощности рассогласованным преобразователем;
 P_K — измеренное значение мощности многозондовым ваттметром проходного типа; $|\Gamma_H|$ — измеренное значение модуля коэффициента отражения нагрузки.

Одной из составляющих погрешности является погрешность из-за непостоянства модуля коэффициента отражения при перемещении нагрузки в волноводном канале. Измеренные значения максимума и минимума модуля коэффициента отражения нагрузки при перемещении представлены на рисунке 59. Непостоянство коэффициента отражения нагрузки при перемещении достигает $\pm 0,008$.

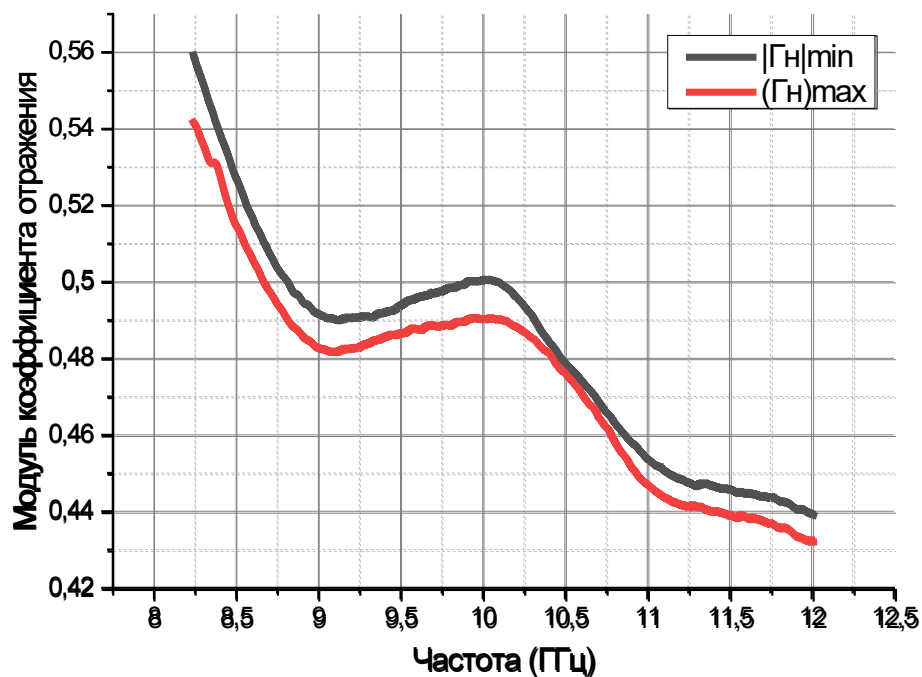


Рисунок 59 — Непостоянство модуля коэффициента отражения нагрузки при перемещении

Продифференцировав уравнение (46) по $|\Gamma_H|$, получим выражение (47) для оценки погрешности измерения $|\Gamma_{\Sigma}|$, зависящей от непостоянства при перемещении поглощающей нагрузки. Погрешность составила не более 0,002.

$$\Delta_{|\Gamma_H|} = \Delta_{\Gamma} \cdot \frac{|\Gamma_{\Sigma}|}{|\Gamma_H|_{\text{ср}}}, \quad (47)$$

$$\text{где } \Delta_{\Gamma} = \frac{|\Gamma_{\text{max}}| - |\Gamma_{\text{min}}|}{2}. \quad (48)$$

Продифференцировав формулу (46) по максимальному и минимальному отношениям, получим уравнения (49) и (50):

$$\Delta_{CJ\text{max}} = \frac{\left(\frac{P_H}{P_K}\right)_{\text{max}}}{|\Gamma_H| \cdot \left(\left(\frac{P_H}{P_K}\right)_{\text{max}} + \left(\frac{P_H}{P_K}\right)_{\text{min}} \right)^2} \cdot \Delta_{\left(\frac{P_H}{P_K}\right)_{\text{max}}}, \quad (49)$$

$$\Delta_{CJ\text{min}} = \frac{\left(\frac{P_H}{P_K}\right)_{\text{min}}}{|\Gamma_H| \cdot \left(\left(\frac{P_H}{P_K}\right)_{\text{max}} + \left(\frac{P_H}{P_K}\right)_{\text{min}} \right)^2} \cdot \Delta_{\left(\frac{P_H}{P_K}\right)_{\text{min}}}. \quad (50)$$

СКО собственного шума термисторного зонда в рассогласованном преобразователе поглощаемой мощности составляет 0,05 мкВт, при измеряемом сигнале в 90 мкВт. По формуле (51) определена погрешность:

$$\Delta_{\frac{P_H}{P_K}} = \frac{S_{\text{шум}}}{P_K}. \quad (51)$$

Определение K_K выполнено с применением ваттметров проходного типа из состава ГЭТ 26-2010 при нулевом положении рассогласованного преобразователя мощности. Определение K_K необходимо, поскольку этот коэффициент связан погрешностью отношения мощностей. Результаты измерений K_K приведены на рисунке 60.

Калибровочный коэффициент связан со случайной погрешностью отношения мощностей по формуле (52):

$$K_K = \frac{P_H}{P_K \cdot \alpha}, \quad (52)$$

где α — калибровочный коэффициент многозондового ваттметра проходного типа.

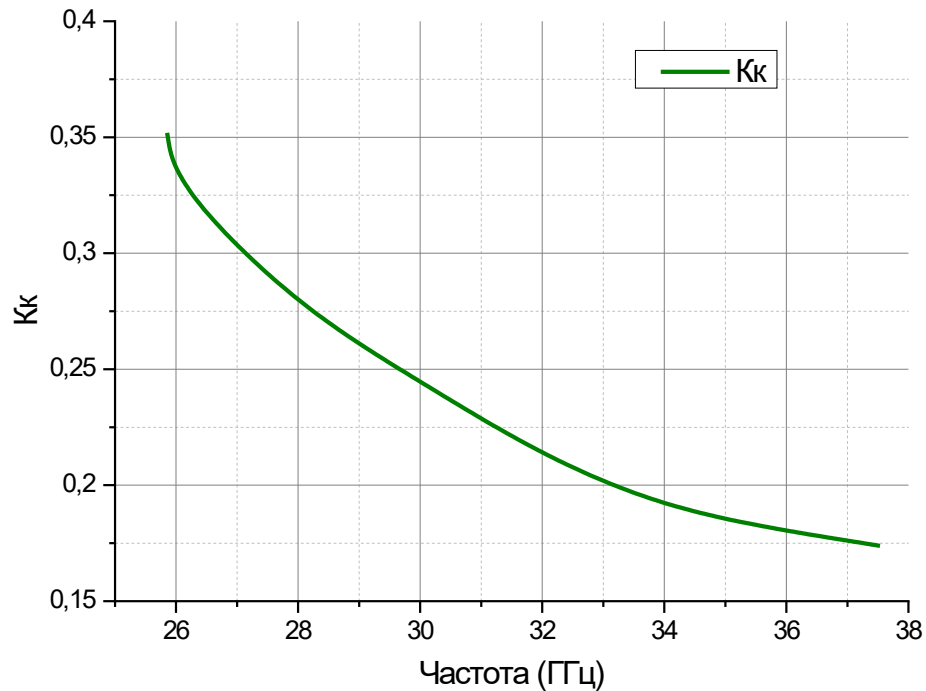


Рисунок 60 — Измеренные значения K_K

Так, для упрощения уравнения допустим, что значения $\Delta_{\text{СЛmin}}$ и $\Delta_{\text{СЛmax}}$ равны. Получим формулу (53):

$$\Delta_{\text{СЛmin}} = \Delta_{\text{СЛmax}} = \frac{S_{\text{сл}}}{4 \cdot |\Gamma_{\text{H}}| \cdot K_K \cdot \alpha}. \quad (53)$$

Из формулы (53) следует, что чем меньше значение K_K , тем больше будет внесён вклад в погрешность.

По формуле (54) выполнен расчет погрешности измерения $|\Gamma_{\text{Э}}|$:

$$\Delta_{|\Gamma_{\text{Э}}|} = \sqrt{\Delta_{|\Gamma_{\text{H}}|}^2 + \Delta_{\text{СЛmax}}^2 + \Delta_{\text{СЛmin}}^2}. \quad (54)$$

В ходе выполнения поставленной задачи был выбран метод измерения $|\Gamma_{\text{Э}}|$, разработана конструкция рассогласованного преобразователя мощности. Определены характеристики ДМР, влияющие на погрешность измерений $|\Gamma_{\text{Э}}|$. Проведена оценка погрешности измерений $|\Gamma_{\text{Э}}|$. Погрешность измерения $|\Gamma_{\text{Э}}|$ составила не более 0,008.

Таким образом, разработанные преобразователи мощности имеют специфическую, ограниченную область применения. Для прямых измерений мощности они

применяться не могут из-за большого коэффициента отражения. Поэтому целесообразнее их называть датчиками мощности рассогласованными.

Важными метрологическими характеристиками таких ДМР являются:

- модуль коэффициента отражения входа;
- постоянство модуля коэффициента отражения входа при перемещении.

В качестве усовершенствования конструкции ДМР может рассматриваться применение шаговых двигателей для автоматизации процедуры измерений модуля эффективного коэффициента отражения.

Следующим этапом является разработка проекта методики измерений модуля эффективного коэффициента отражения выхода ваттметров проходящей (падающей) мощности, в которой будут уточнены требования к техническим характеристикам преобразователей мощности и погрешности измерения модуля эффективного коэффициента отражения, которая не нормирована в нормативных документах.

4.2. Методика измерений модуля эффективного коэффициента отражения выхода волноводных ваттметров проходного типа

Разработанная методика предназначена для определения модуля эффективного коэффициента отражения $|\Gamma_{\text{Э}}|$ выхода волноводных ваттметров СВЧ проходного типа, имеющих соединители по ГОСТ 13317-89, и устанавливает совокупность операций и правил [77], выполнение которых обеспечивает получение результатов измерения $|\Gamma_{\text{Э}}|$ в диапазоне частот от 5,64 до 37,5 ГГц с установленными показателями точности автоматизированного рабочего места.

Измеряемой величиной является модуль эффективного коэффициента отражения выхода ваттметров проходящей мощности — модуль комплексного числа $|\Gamma_{\text{Э}}| \cdot e^{j\phi_{\text{Э}}}$, характеризующий выход ваттметра проходного типа на данной частоте и определяющий зависимость его показаний от фазы коэффициента отражения ваттметра оконечного типа, подключенного к этому выходу. При этом измеренное ваттметром проходного типа значение мощности P определяется по формуле:

$$P = N \cdot \alpha / \left(1 + (\Gamma \cdot \Gamma_{\text{Э}})^2 - 2 \cdot |\Gamma| \cdot |\Gamma_{\text{Э}}| \cdot \cos(\varphi + \varphi_{\text{Э}}) \right), \quad (55)$$

где N — показания индикаторного блока; α — калибровочный коэффициент ваттметра проходного типа; $|\Gamma|$ и φ — модуль и фаза коэффициента отражения входа ваттметра оконечного типа; $|\Gamma_{\text{Э}}|$ и $\varphi_{\text{Э}}$ — модуль и фаза эффективного коэффициента отражения выхода ваттметра проходного типа.

Методика применяется для определения $|\Gamma_{\text{Э}}|$ при поверке, аттестации и испытаниях ваттметров СВЧ на соответствие требованиям на частотах, определяемых используемым волноводным сечением.

Характеристики объекта измерения — ваттметра проходного типа, влияющие на погрешность измерений:

- соединитель должен соответствовать ГОСТ 13317-89;
- диапазон значений $|\Gamma_{\text{Э}}|$: $0,01 \leq |\Gamma_{\text{Э}}| \leq 0,10$;
- СКО ряда измерений мощности СВЧ должно быть менее 0,1 %.

Границы допускаемой погрешности измерений $|\Gamma_{\text{Э}}|$ при доверительной вероятности 0,95 не превышают значений, указанных в таблице 5.

Таблица 5 — Границы допускаемой погрешности измерений $|\Gamma_{\text{Э}}|$

Значения измеряемой величины	от 0,01 до 0,05	от 0,05 до 0,10
Граница погрешности	$\pm 0,01$	$\pm 0,02$

При выполнении измерений применяется автоматизированное рабочее место. Метрологические характеристики автоматизированного рабочего места, влияющие на точность измерений $|\Gamma_{\text{Э}}|$, приведены в таблице 6.

Основой данного метода служит теоретическая зависимость фазового сдвига $\Delta\varphi$ электромагнитной волны с частотой f (ГГц) от перемещения l (см) чувствительного элемента преобразователя мощности рассогласованного в волноводном тракте:

$$\Delta\varphi = 2 \cdot \pi \cdot l \cdot \frac{f}{30} \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{30}{f} \cdot \frac{1}{2 \cdot a} \right)^2}, \quad (56)$$

где a — ширина длинной стенки волновода, в см.

*Таблица 6 — Метрологические характеристики
автоматизированного рабочего места*

Наименование характеристики	Значение
Диапазон рабочих частот, ГГц	от 5,64 до 78,33
Диапазон частот прямоугольных волноводных трактов сечением, ГГц: — 35×15 мм — $28,5 \times 12,6$ мм — 23×10 мм — 17×8 мм — 16×8 мм — $11,0 \times 5,5$ мм — $7,2 \times 3,4$ мм	от 5,64 до 8,24 от 6,85 до 9,93 от 8,24 до 12,05 от 11,1 до 16,70 от 11,95 до 17,44 от 16,70 до 25,86 от 25,86 до 37,50
Диапазон измерений мощности, мВт	от 1 до 10
Модуль коэффициента отражения входа, не менее	0,15
Пределы допускаемой относительной погрешности	0,01

Измерение $|\Gamma_{\Sigma}|$ производится в соответствии с определением по формуле (46) методом совокупных измерений: измеряются отношения показаний ваттметра проходного типа и ДМР, подключенного к его выходу, при различных сочетаниях суммы фаз эффективного модуля коэффициента отражения выхода (φ_{Σ}) и модуля коэффициента отражения входа (φ_{Π}), при неизменных остальных параметрах системы.

Метод измерений реализуется измерительной установкой по схеме на рисунке 61.

Объект измерений — ваттметр проходного типа, к выходу которого подключается индикатор мощности рассогласованный. Подается мощность СВЧ, отсчитыва-

ваются показания ваттметра $P_{\text{ВП}}$ и датчика мощности $P_{\text{ДМР}}$. Измерения повторяются после перемещения подвижной части датчика мощности рассогласованного не менее 7 раз.

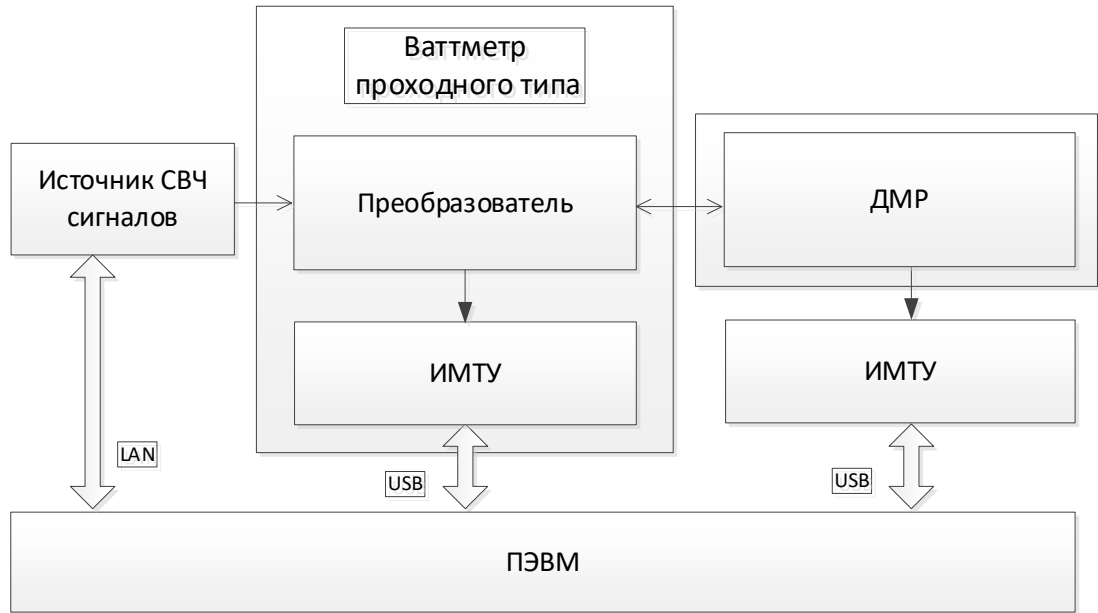


Рисунок 61 — Схема измерений $|\Gamma_{\text{Э}}|$

Для получения численного значения $|\Gamma_{\text{Э}}|$ решается уравнение:

$$\left(\frac{P_{\text{ВП}}}{N_{\text{ДМР}}} \right)_i = \frac{1}{a \cdot A_i} (1 + b^2 - 2 \cdot b \cdot \cos(\varphi_0 + \Delta\varphi_i)), \quad (57)$$

где i — номер измерения; A_i — коэффициент передачи волновода ДМР от входа до нагрузки, используемой в i -м измерении; $\Delta\varphi_i$ — сдвиг фазы в i -м измерении; $a = K_{\text{К}} \cdot \alpha$, где α и $K_{\text{К}}$ — калибровочные коэффициенты ваттметра и ДМР; $b = |\Gamma_{\text{Э}}| \cdot |\Gamma|$, $\varphi_0 = \varphi + \varphi_{\text{Э}}$.

Если считать неизвестными константами a , b и φ_0 , система из 4 уравнений решается методом наименьших квадратов. Избыточность числа уравнений по отношению к количеству неизвестных позволяет повысить точность измерений за счет статистической обработки результатов с применением нелинейного регрессионного анализа.

$|\Gamma_{\text{Э}}|$ определяется по формуле:

$$|\Gamma_{\text{Э}}| = \frac{b}{|\Gamma_{\text{Н}}|}. \quad (58)$$

Таким образом, измерение относительной величины $|\Gamma_{\text{Э}}|$ сводится к измерениям отношений показаний и измерению модуля коэффициента отражения ДМР.

При выполнении измерений необходимо соблюдать условия измерений в соответствии с требованиями и условиями, изложенными в руководствах по эксплуатации применяемых серийных СИ.

Рабочие условия применения:

- температура окружающего воздуха, °C от 15 до 25;
- относительная влажность воздуха при 25 °C, % не более 95;
- атмосферное давление, кПа (мм рт. ст.) от 84 до 106,7.

В ходе подготовки к измерениям необходимо:

1. Выбрать частоты (f_i) в соответствии с руководством по эксплуатации для измеряемого волноводного тракта.
2. Определить значение модуля коэффициента отражения $|\Gamma|$ ДМР из формулы или, в случае его отсутствия, выполнить измерения.
3. Собрать схему в соответствии с рисунком 61. Привести приборы в рабочее состояние в соответствии с руководствами эксплуатации на них.
4. Выполнить измерения и обработать результаты измерений.
5. Установить нулевые показания ваттметра проходного типа и индикатора мощности рассогласованного.
6. Установить на выходе источника СВЧ-сигнала от 1 до 10 мВт.
7. Отсчитать показания ваттметра проходного типа $P_{\text{ВП}}$ и индикатора мощности рассогласованного $N_{\text{ДМР}}$.
8. Выключить мощность на выходе источника СВЧ-сигналов.
9. Рассчитать отношения показаний $\left(\frac{P_{\text{ВП}}}{N_{\text{ДМР}}} \right)_i$.

10. Переместить подвижную часть преобразователя мощности рассогласованного к следующему положению, обеспечив изменение фазы его коэффициента отражения.

11. Повторить операции измерений по п. 8.1–8.5.

12. Повторить операции для всех положений подвижной части преобразователя мощности рассогласованного.

13. Подставить полученные значения отношений показаний $\left(\frac{P_{\text{ВП}}}{N_{\text{ДМР}}} \right)_i$ в равенство (3) и определить коэффициент b .

Рассчитать $|\Gamma_{\text{Э}}|$ по формуле (46) с использованием значения модуля коэффициента отражения $|\Gamma|$ индикатора мощности, приведенного в формуляре.

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 разработанным ДМР. Сравнение результатов измерений приведено на рисунке 62.

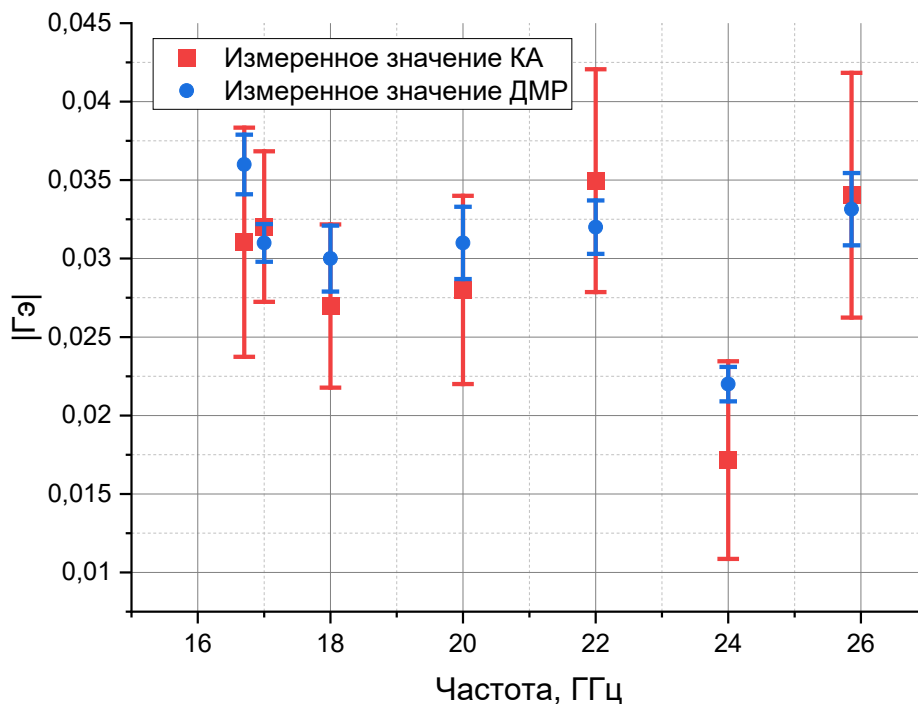


Рисунок 62 — Сравнение результатов измерений $|\Gamma_{\text{Э}}|$

Таким образом, разработана конструкция ДМР, позволяющая 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 ДМР при перемещении вдоль волноводного тракта в конструкции разработанного ДМР. 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 $\pm 0,006$.

4.3. Определение долговременной стабильности метрологических характеристик преобразователя мощности оконечного типа

Исследование стабильности модуля коэффициента отражения и калибровочного коэффициента выполнено многократными измерениями на равных временных интервалах [78]. В результате исследования получены данные модуля коэффициента отражения на 20 равных временных интервалах, равных 1 месяцу. Результаты исследований приведены на рисунке 63.

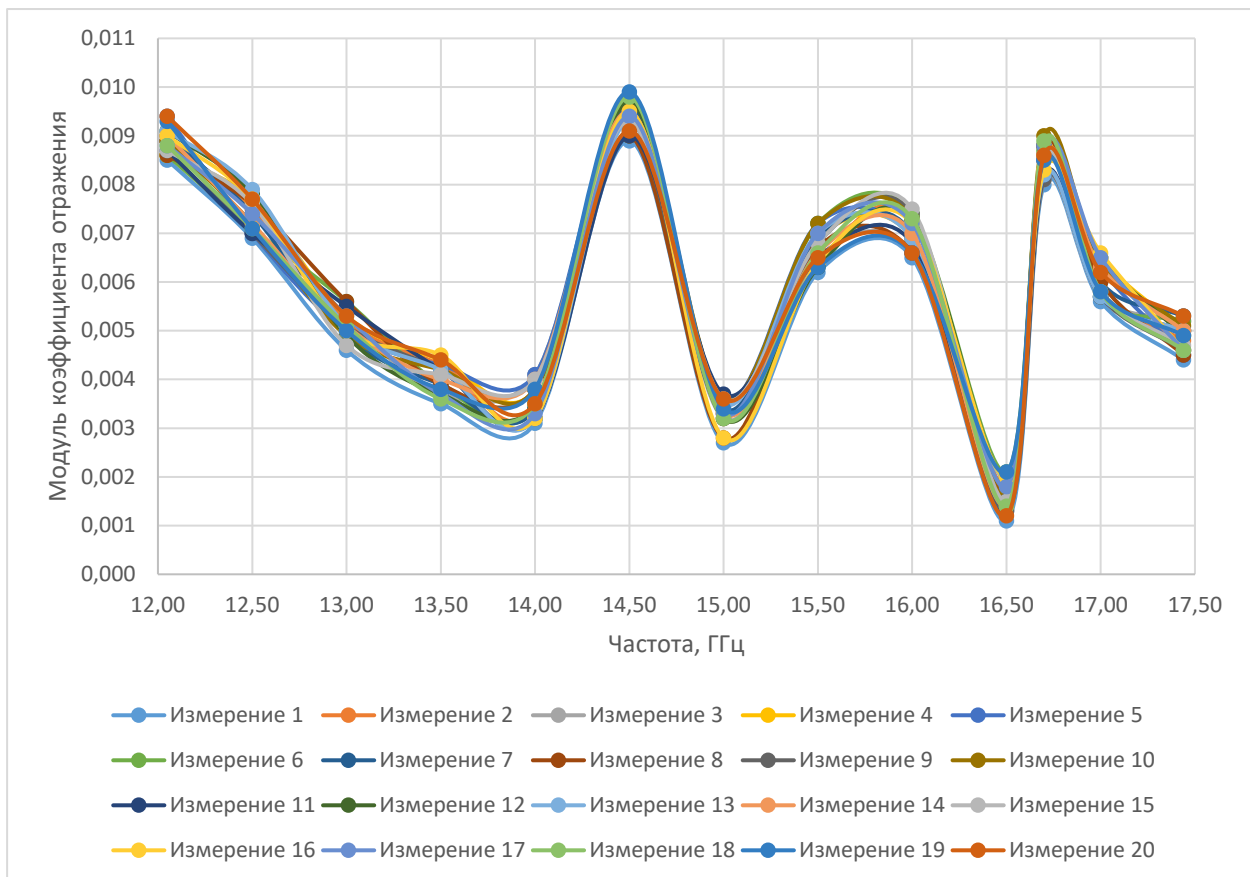


Рисунок 63 — Значения модуля коэффициента отражения входа ваттметра

Установлено, что на протяжении 20 месяцев значения модуля коэффициента отражения входа ваттметра не изменились. Перед каждым измерением настраивался векторный анализатор цепей путем калибровки в измеримой плоскости. Неидеальное соединение калибровочных мер и измерительных портов ВАЦ приводит к увеличению вектора ошибки. В результате происходит отклонение от действительного значения в пределах $\pm 0,002$.

Частотный коэффициент многозондового преобразователя мощности оконечного типа определен по методике измерений МИ 3611-2018.

В результате измерений калибровочного коэффициента преобразователя мощности оконечного типа на 20 равных временных интервалах (1 месяц) калибровочный коэффициент показал долговременную стабильность. Полученные значения калибровочного коэффициента приведены на рисунке 64, а его отклонение не превышает $\pm 0,4$ %. Значения при каждом измерении приведены на рисунке 65.

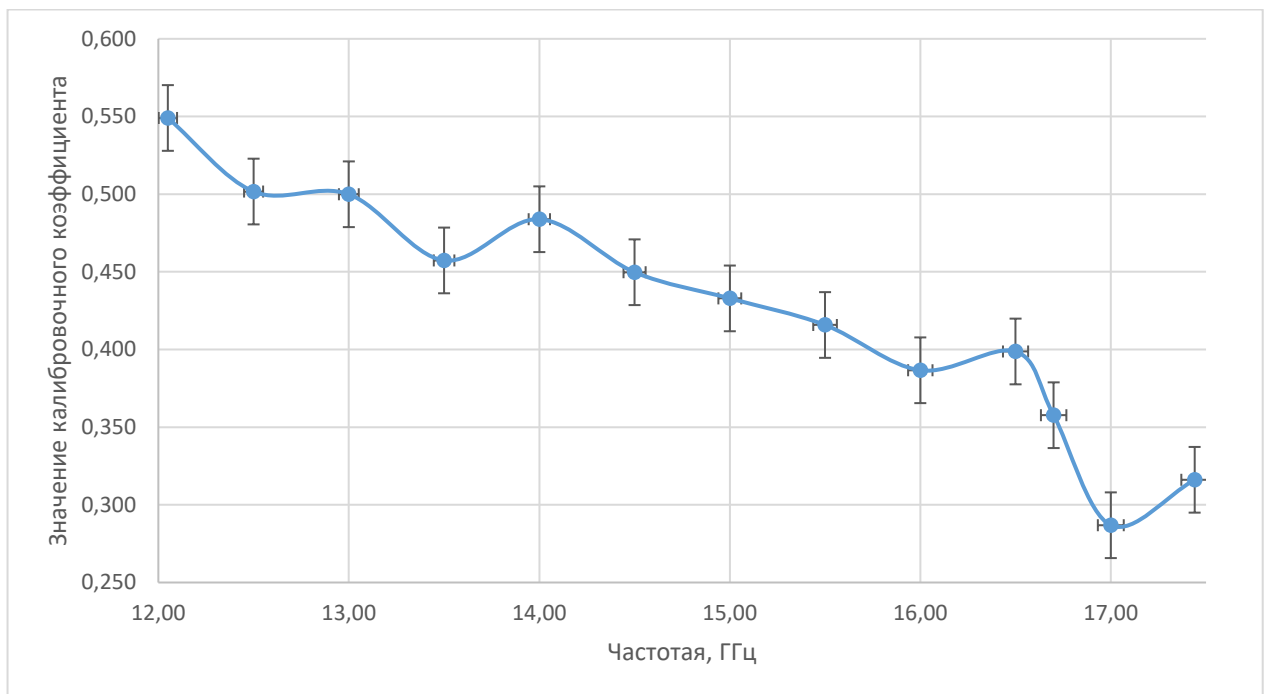


Рисунок 64 — Значения частотного коэффициента, полученные при многократных измерениях

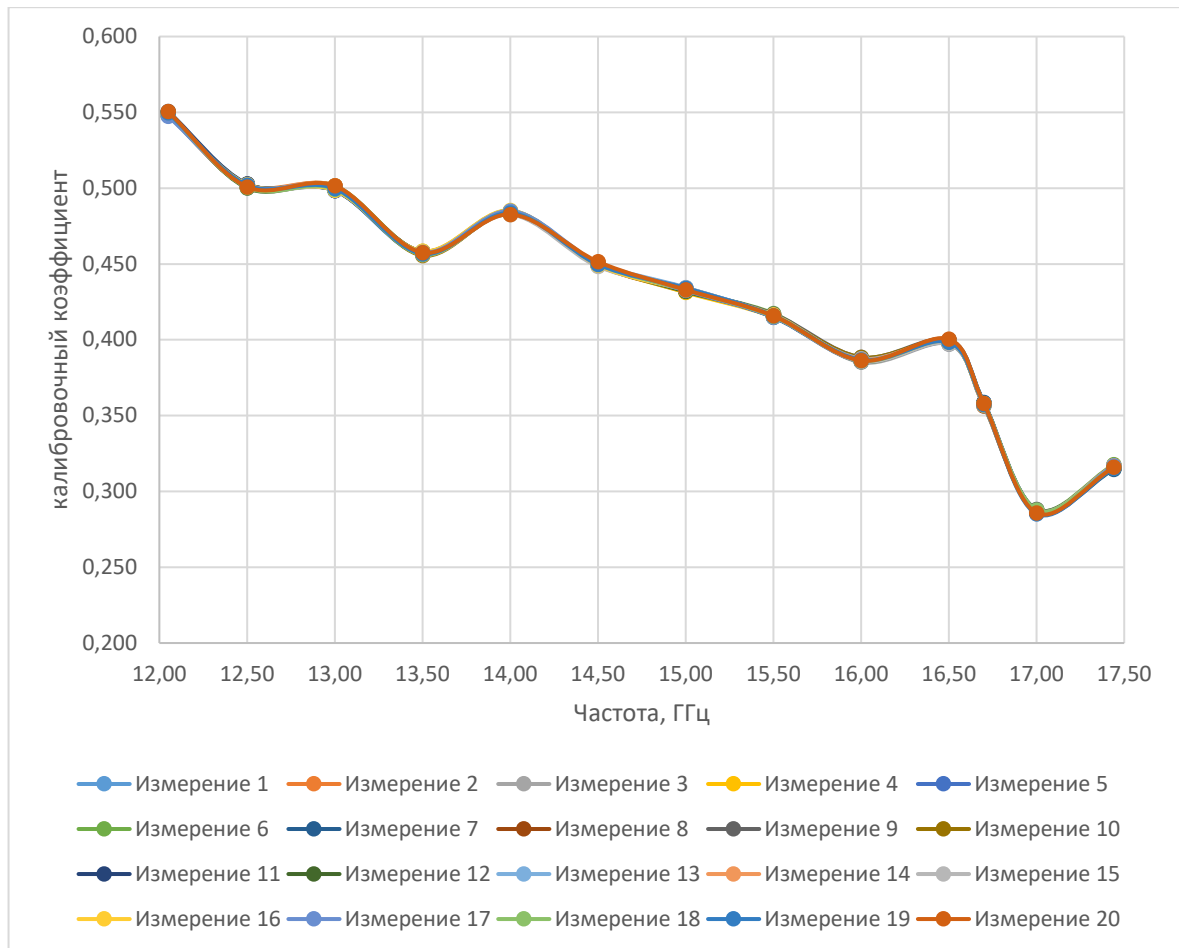


Рисунок 65 — Значения частотного коэффициента для каждого измерения

Проведено экспериментальное исследование прототипа многозондового ваттметра оконечного типа в волноводных трактах. В ходе выполнения исследования определен калибровочный коэффициент многозондового преобразователя мощности оконечного типа. Проведен расчет доверительных границ калибровочного коэффициента многозондовым преобразователем мощности оконечного типа. Выполнено исследование стабильности на равных временных интервалах во времени модуля коэффициента отражения и частотного коэффициента многозондового преобразователя мощности оконечного типа. Установлено, что на равных временных интервалах отклонение модуля коэффициента отражения входа находится на уровне измерительной погрешности измерений ВАЦ и не превышает $\pm 0,001$. Частотный коэффициент многозондового преобразователя мощности оконечного типа сохраняет стабильность во времени на равных временных интервалах, и его отклонение от среднего значения находится в пределах $\pm 0,4 \%$.

4.4. Опробование метода передачи размера единицы мощности ЭМК с использованием комбинированного ваттметра

Экспериментальное опробование метода передачи единицы мощности ЭМК [79] с использованием комбинированного ваттметра, в состав которого входит многозондовый преобразователь мощности оконечного типа и ДМР с переменной фазой, эталону первого 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 вторичного эталона (разработанного комбинированного ваттметра) эталону первого разряда, при этом погрешность передачи единицы мощности ЭМК не превышает $\pm 0,8\%$. На рисунке 66 представлены типовые зависимости поправочного множителя ваттметра проходного типа и доверительные границы относительной погрешности этого множителя. В таблицах 7 и 8 приведены результаты измерений.

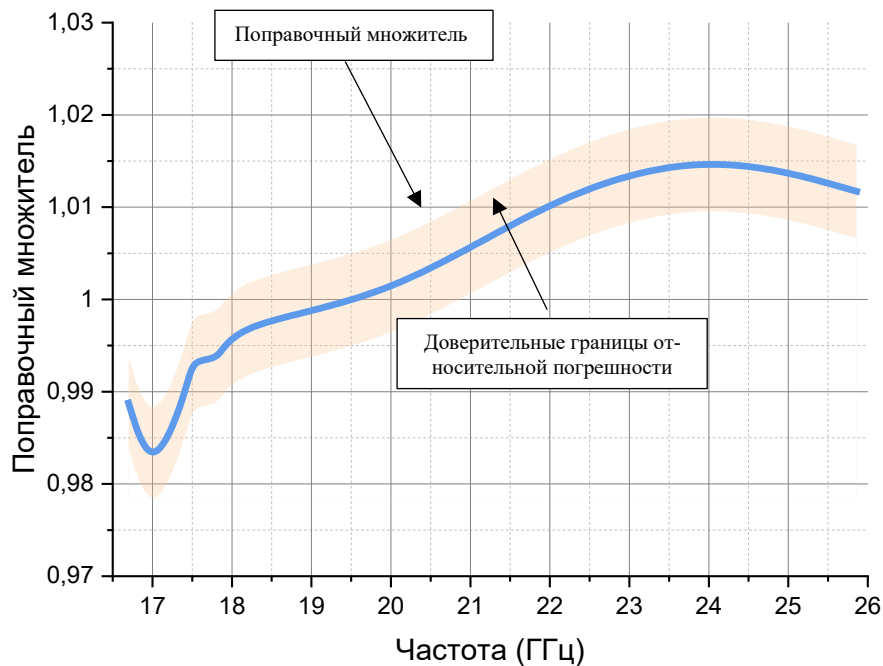


Рисунок 66 — Зависимость частотного коэффициента аттестуемого эталона 1-го разряда от частоты и погрешность передачи единицы мощности ЭМК разработанным ваттметром комбинированным

Таблица 7 — Результаты измерений значений $|\Gamma_{\Sigma}|$ калибратора мощности М1-11 с применением ДМР

Тракт 11 × 5,5: f , ГГц	16,70	17,00	17,44	17,50	17,85	18,00	20,00	22,00	24,00	25,86
$ \Gamma_{\Sigma} $	0,006	0,005	0,008	0,006	0,006	0,005	0,005	0,007	0,006	0,006
Допустимое значение $ \Gamma_{\Sigma} $, не более	0,03									
Соответствие	Соотв.	Соотв.	Соотв.	Соотв.	Соотв.	Соотв.	Соотв.	Соотв.	Соотв.	Соотв.

Результаты измерений и расчетные данные доверительных границ $[t_{\Sigma}S_{\Sigma}]_{\Pi}$ погрешности значений коэффициента передачи α ваттметра проходящей (падающей) мощности, в процентах, для каждого значения измеряемой мощности 5 мВт и каждой частоты f рассчитаны по формулам:

$$[t_{\Sigma}S_{\Sigma}]_{\Pi} = \frac{[t_{\Sigma}S_{\Sigma}]_O + \Theta_P + t \cdot S_{\Sigma}}{S_{\Sigma} + \sqrt{S_P^2 + [S_{\Sigma}]_O^2}} \cdot \sqrt{S_{\Sigma}^2 + S_P^2 + [S_{\Sigma}]_O^2}, \quad (59)$$

где $[t_{\Sigma}S_{\Sigma}]_O$ — доверительные границы относительной погрешности измерений калибровочного коэффициента K_K ваттметра поглощаемой мощности при доверительной вероятности 0,95; $[S_{\Sigma}]_O$ — СКО случайных и систематических погрешностей измерений калибровочного коэффициента K_K ваттметра поглощаемой мощности при доверительной вероятности 0,95; $t = 2,365$ — коэффициент Стьюдента (при доверительной вероятности 0,95 и 8 измерениях); Θ_P — граница НСП из-за рассогласования, рассчитанная по формуле:

$$\Theta_P = 2 \cdot \frac{K_{CBH_{\Pi}} - 1}{K_{CBH_{\Pi}} + 1} \cdot |\Gamma_{\Sigma}| \cdot 100\%; \quad (60)$$

S_P — СКО неисключенной систематической погрешности из-за рассогласования, рассчитанное по формуле:

$$S_P = \sqrt{2} \cdot \frac{K_{CBH_{\Pi}} - 1}{K_{CBH_{\Pi}} + 1} \cdot |\Gamma_{\Sigma}| \cdot 100\%, \quad (61)$$

где $K_{CBH_{\Pi}}$ — КСВН преобразователя поглощаемой мощности; $|\Gamma_{\Sigma}|$ — модуль эффективного коэффициента отражения выхода эталонного ваттметра; S_{Σ} — СКО

случайной погрешности определения среднего значения отношения показаний испытуемого преобразователя и эталонного ваттметра для значения измеряемой мощности 5 мВт и каждой частоты f , рассчитанное по формуле:

$$S_{\varepsilon} = \sqrt{\frac{1}{n \cdot (n-1)} \cdot \sum_{i=1}^n \left(\frac{\left(\frac{P_O}{P_{\Pi}} \right)_i}{\left(\frac{P_O}{P_{\Pi}} \right)_{\text{ср}}} - 1 \right)^2} \cdot 100\%, \quad (62)$$

где $n = 8$.

Среднее значение отношения показаний для каждого значения измеряемой мощности (2; 5; 9 мВт) и каждой частоты f рассчитано по формуле:

$$\left(\frac{P_O}{P_{\Pi}} \right)_{\text{ср}} = \frac{1}{8} \cdot \sum_{i=1}^8 \left(\frac{P_O}{P_{\Pi}} \right)_i, \quad (63)$$

где P_O — результаты измерений мощности ваттметром из состава транспортируемого комплекта; P_{Π} — результаты измерений мощности ваттметром из состава стационарного комплекта.

Результаты измерений и расчетные данные доверительных границ $[t_{\Sigma} S_{\Sigma}]_{\Pi}$ приведены в таблице 8.

Таким образом, разработан и экспериментально опробован метод измерений $|\Gamma_{\Sigma}(f)|$. 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.

№ изм.	Обо- значе- ние	Частота, ГГц									
		16,7	17,0	17,44	17,5	17,85	18,0	20,	22,0	24,0	25,86
1	P_O , мВт	5,272	4,908	5,333	4,982	4,694	4,854	4,745	4,662	4,661	5,164
	P_{II} , мВт	5,283	4,912	5,343	4,961	4,703	4,875	4,769	4,643	4,647	5,155
	P_O/P_{II}	0,998	0,999	0,998	1,004	0,998	0,996	0,995	1,004	1,003	1,002
2	P_O , мВт	5,178	5,066	5,266	4,903	5,041	4,779	5,038	5,008	5,347	4,994
	P_{II} , мВт	5,182	5,088	5,267	4,908	5,047	4,794	5,047	5,013	5,328	5,003
	P_O/P_{II}	0,999	0,996	1,000	0,999	0,999	0,997	0,998	0,999	1,004	0,998
3	P_O , мВт	4,843	4,694	4,965	4,952	5,158	4,755	5,287	4,892	4,766	5,129
	P_{II} , мВт	4,845	4,683	4,966	4,945	5,179	4,762	5,263	4,886	4,772	5,119
	P_O/P_{II}	1,000	1,002	1,000	1,001	0,996	0,999	1,005	1,001	0,999	1,002
4	P_O , мВт	5,057	4,940	4,956	5,145	4,740	5,211	4,803	4,741	4,998	5,337
	P_{II} , мВт	5,040	4,931	4,932	5,124	4,741	5,195	4,807	4,753	5,023	5,337
	P_O/P_{II}	1,003	1,002	1,005	1,004	1,000	1,003	0,999	0,997	0,995	1,000
5	P_O , мВт	5,347	5,144	4,945	5,319	4,789	4,894	5,095	4,855	4,843	4,845
	P_{II} , мВт	5,331	5,145	4,963	5,304	4,799	4,900	5,118	4,866	4,847	4,847
	P_O/P_{II}	1,003	1,000	0,996	1,003	0,998	0,999	0,996	0,998	0,999	1,000
6	P_O , мВт	4,791	4,792	5,182	4,695	5,238	5,208	5,127	4,889	5,349	4,996
	P_{II} , мВт	4,793	4,778	5,181	4,706	5,258	5,227	5,148	4,892	5,358	4,976
	P_O/P_{II}	1,000	1,003	1,000	0,998	0,996	0,996	0,996	0,999	0,998	1,004
7	P_O , мВт	5,215	5,182	4,943	5,341	4,669	5,236	4,804	5,149	5,211	4,663
	P_{II} , мВт	5,239	5,198	4,952	5,328	4,673	5,232	4,790	5,137	5,204	4,678
	P_O/P_{II}	0,995	0,997	0,998	1,002	0,999	1,001	1,003	1,002	1,001	0,997
8	P_O , мВт	4,857	4,745	5,242	4,855	4,663	5,134	4,855	4,909	5,271	5,252
	P_{II} , мВт	4,869	4,740	5,242	4,861	4,653	5,148	4,858	4,894	5,254	5,274
	P_O/P_{II}	0,998	1,001	1,000	0,999	1,002	0,997	0,999	1,003	1,003	0,996
Ср	$(P_O/P_{II})_{Cp}$	0,999	1,000	1,000	1,001	0,999	0,998	0,999	1,001	1,000	1,000
	S_{ϵ} , %	0,09	0,09	0,09	0,09	0,07	0,09	0,12	0,09	0,11	0,10
	КСВН _{II}	1,03	1,04	1,02	1,03	1,03	1,02	1,04	1,04	1,03	1,03
	Γ_{Σ}	0,006	0,005	0,008	0,006	0,006	0,005	0,005	0,007	0,006	0,006
	S_p , %	0,04	0,03	0,01	0,06	0,06	0,04	0,03	0,06	0,02	0,01
	Θ_p , %	0,05	0,05	0,02	0,08	0,08	0,06	0,05	0,08	0,02	0,02
	$[S_{\Sigma}]_o$, %	0,12	0,13	0,07	0,17	0,17	0,15	0,13	0,42	0,17	0,12
	$[t_{\Sigma}S_{\Sigma}]_o$, %	0,45	0,47	0,45	0,52	0,52	0,50	0,47	0,79	0,52	0,47
$[t_{\Sigma}S_{\Sigma}]_{II}$, %	Итог	0,52	0,53	0,48	0,61	0,59	0,56	0,58	0,71	0,58	0,51
	Допуск	1,6 %									
	Соответствие	Соответствует									

4.5. Применение преобразователя мощности оконечного типа в качестве эталона-переносчика

Прослеживаемость единицы мощности электромагнитных колебаний от рабочих СИ мощности (ваттметров СВЧ) к государственному первичному эталону единицы мощности СВЧ регламентируется соответствующей поверочной схемой ФАТРИМ № 3461 от 2019 г. Современные ваттметры СВЧ характеризуются низкой основной погрешностью [80], [81], что приводит к относительно небольшому запасу по точности между разрядами поверочной схемы. В связи с этим повышаются требования к погрешности методов передачи размера единицы мощности СВЧ. Основной вклад в погрешность метода передачи вносит погрешность рассогласования, обусловленная отличием полного сопротивления входа и выхода ваттметров СВЧ, сличаемых в процессе передачи единицы, от волнового сопротивления волноводного тракта. Это отличие характеризуется величиной КСВН входа для ваттметров оконечного типа и величиной эквивалентного коэффициента отражения выхода для ваттметров проходного типа.

Для передачи единицы мощности СВЧ между эталонами (первичным, вторичными и рабочими) часто применяются эталоны-переносчики, в качестве которых обычно используются ваттметры и преобразователи мощности оконечного типа. Основными характеристиками эталонов-переносчиков, определяемыми их назначением, являются стабильность частотных коэффициентов и КСВН входа. В конце 1980-х гг. во ФГУП «ВНИИФТРИ» были разработаны волноводные эталоны-переносчики с КСВН входа не более 1,05. Была выпущена ограниченная партия таких эталонов под названием «Меры возимые МВ-35...МВ-7,2» для волноводов с поперечными размерами от 35×15 до $7,2 \times 3,4$ мм. Мерами были оснащены крупные метрологические центры, где эти эталоны эксплуатируются до настоящего времени. Каждая из возимых мер представляет собой термоэлектрический преобразователь мощности СВЧ, на входе которого установлен развязывающий аттенюатор в виде направленного ответвителя с переходным ослаблением 10 дБ. Для индикации мощности СВЧ совместно с мерами применяется измерительный блок Я2М-66.

Основными недостатками таких мер являются значительные масса и габариты, обусловленные использованием волноводных направленных ответвителей.

Поскольку в настоящее время сохраняется потребность в хорошо согласованных эталонах-переносчиках мощности СВЧ, были предприняты усилия по разработке альтернативного решения с лучшими массогабаритными характеристиками по сравнению с возимыми мерами МВ-35...МВ-7,2. С этой целью был использован опыт разработки и применения многозондовых проходных преобразователей мощности [82]. Длительная эксплуатация таких преобразователей продемонстрировала высокую стабильность частотных коэффициентов зондов как по модулю, так и по фазе на временных интервалах более 10 лет. Это дает основание надеяться, что при использовании аналогичных зондов в конструкции преобразователя окончательного типа будет обеспечиваться стабильность.

Волновод стандартизованного типа с фланцем с помощью ступенчатого перехода соединяется с волноводом пониженной высоты, в котором размещаются термисторные зонды. Выводы термисторов пропускаются в отверстия в широких стенках волновода и припаиваются к металлическим пластинам, образующим с волноводом конструктивные емкости. За термисторными зондами располагается поглощающая нагрузка. Зонды расположены вдоль средней линии широкой стенки. Расстояния между зондами рассчитывались исходя из минимизации коэффициента отражения преобразователя в полосе частот волновода путем аппроксимации коэффициента отражения решетки зондов полиномом Чебышева 2-го порядка. Каждый из термисторов включается в свой автобалансный термисторный мост, поддерживающий заданное значение сопротивления термистора постоянному току. Мощность СВЧ, поглощенная каждым зондом, измеряется методом замещения мощностью постоянного тока путем измерения напряжения на каждом из мостов с последующим расчетом мощности замещения с учетом рабочего сопротивления термистора и резисторов моста.

Преобразователь настраивается на минимальное значение КСВН на произвольных фиксированных частотах путем подбора значений сопротивления термисторов. Дополнительным элементом настройки является поглощающая нагрузка,

которая при настройке перемещается вдоль волновода и затем фиксируется. Найденные при настройке значения сопротивлений термисторов сохраняются и используются в дальнейшем при работе на данной частоте.

Все необходимые операции при настройке и работе эталона-переносчика реализуются с помощью многоканального измерительного блока и соответствующего программного обеспечения, работающего на внешнем персональном компьютере с операционной системой Windows. Измерительный блок содержит четыре самобалансирующихся термисторных моста с дистанционно управляемым сопротивлением, четырехканальный АЦП и контроллер интерфейса USB. Блок обеспечивает установку соответствующих выбранной частоте сопротивлений термисторов в диапазоне от 100 до 1500 Ом, разбитом на 256 уровней. С помощью АЦП одновременно измеряется напряжение на четырех мостах. Измеренные значения напряжений передаются в компьютер, после чего выполняется расчет суммарной мощности замещения в четырех термисторах преобразователя.

Разработанный и изготовленный образец эталона-переносчика для волноводных трактов от 35×15 до $7,2 \times 3,4$ мм обеспечивает КСВН входа преобразователей менее 1,05. Масса и размеры преобразователей существенно меньше массы и размеров преобразователей из комплекта возимых мер МВ-35...МВ-7. Блоки измерительные имеют сравнимые массогабаритные показатели, но блок разработанного эталона-переносчика лучше приспособлен к использованию в современных автоматизированных измерительных системах. Внешний вид эталона-переносчика на диапазон частот 5,64–37,50 ГГц с комплектом преобразователей и блоком измерительным приведен на рисунке 67.



Рисунок 67 — Эталон переносчик с комплектом преобразователей мощности оконечного типа и блоком измерительным

4.6. Выводы по главе 4

Исследования и экспериментальные работы, отраженные в главе 4, позволили достичь существенных результатов в области метрологического обеспечения измерений мощности электромагнитных колебаний.

Разработанный метод передачи единицы мощности с использованием комбинированного ваттметра, включающего многозондовый преобразователь мощности оконечного типа и датчик мощности рассогласованный, доказал свою высокую эффективность. Экспериментальное опробование подтвердило возможность передачи единицы мощности ЭМК с двухкратным запасом по точности благодаря шестикратному уменьшению погрешности рассогласования измерительных трактов.

Важным достижением стало снижение погрешности передачи единицы мощности ЭМК до значения не более $\pm 0,8 \%$, что полностью соответствует современным требованиям метрологии. Существенный вклад в повышение точности измерений внесло применение датчика мощности рассогласованного, позволившего уменьшить погрешность измерений $|\Gamma_{\Sigma}(f)|$ с $\pm 0,016$ до $\pm 0,006$.

Разработанный эталон-переносчик с КСВН входа менее 1,05 продемонстрировал значительные преимущества перед существующими аналогами: существенно меньшие массогабаритные показатели и лучшую адаптацию к современным автоматизированным измерительным системам.

Проведенные исследования долговременной стабильности метрологических характеристик подтвердили высокую надежность и воспроизводимость результатов измерений. Внедрение предложенных технических решений позволяет существенно повысить качество передачи единицы мощности в СВЧ-диапазоне, что имеет важное значение для развития современной метрологической практики.

Заключение

В диссертационной работе решены научные задачи, имеющие важное значение для развития эталонной базы страны 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 от $1 \cdot 10^{-3}$ 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 средств измерений для аттестации эталонов;
- серийных ваттметров оконечного типа МЗ-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, которая заключалась в уменьшении погрешности передачи единицы мощности электромагнитных колебаний в волноводных трактах СВЧ-диапазона, достигнута.

Список сокращений

АЦП	— аналого-цифровой преобразователь
ВАК	— высшая аттестационная комиссия
ВАЦ	— векторный анализатор цепей
ВАХ	— вольтамперная характеристика
ВВП	— волноводно-волноводный переход
ВО	— ваттметр оконечного типа
ВЭ	— вторичный эталон
ВП	— ваттметр проходного типа
ГПЭ	— Государственный первичный эталон
ДМР	— датчик мощности рассогласованный
ИМТУ	— измеритель мощности термисторный унифицированный
ИУ	— исследуемое устройство
КСВН	— коэффициент стоячей волны по напряжению
КВП	— коаксиально-волноводный переход
МЭМС	— микроэлектромеханические системы
НО	— направленный ответвитель
НСП	— неисключенная систематическая погрешность
ПКЗ	— подвижный короткозамыкатель
ПЭВМ	— персональная электронная вычислительная машина
РЭ	— рабочий эталон
САПР	— система автоматизированного проектирования
СВЧ	— сверхвысокие частоты
СИ	— средство измерений
СКО	— среднее квадратическое отклонение
ФАТРИМ	— Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии
ЦСМ	— центр стандартизации метрологии
ЭВМ	— электронная вычислительная машина
ЭМК	— электромагнитные колебания

TRL — метод калибровки векторного анализатора цепей thru-reflect-line

Список литературы

1. Малай И.М., Матвеев А.И., Чирков И.П. Развитие системы обеспечения единства измерений мощности электромагнитных колебаний в области миллиметровых длин волн // Измерительная техника. — 2024. — Т. 73. — № 12. — С. 30–38. — <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2024-12-30-38>.
2. Перепелкин В.А., Семенов В.А., Чирков И.П., Чуйко В.Г. Государственный первичный эталон единицы мощности электромагнитных колебаний в волноводных и коаксиальных трактах в диапазоне частот 0,03–37,5 Гц // Измерительная техника. — 2012. — № 1. — С. 7–9.
3. ГОСТ 13317-89. ГСИ. Элементы соединения СВЧ-трактов радиоизмерительных приборов. Присоединительные размеры. — М.: Государственный комитет СССР по стандартам, 1989. — 46 с.
4. РМГ 29-2013 ГСИ. Метрология. Основные термины и определения. Рекомендации по межгосударственной стандартизации от 05.12.2013 № 29-2013.
5. ГОСТ 8.381-2009. ГСИ. Эталоны. Способы выражения точности. — М.: Стандарт форм, 2011. — 22 с.
6. Механиков А.И., Перепелкин В.А. Долговременная нестабильность многозондовых преобразователей проходящей мощности диапазона СВЧ // Измерительная техника. — 1997. — № 5. — С. 39–40.
7. Проненко В.И., Фрумкин В.Д. Единство и правильность измерений мощности при высоких и сверхвысоких частотах // Измерительная техника. — 1994. — №4. — С. 51–54.
8. 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». — Менделеево: ФГУП «ВНИИФТРИ», 2023. — С. 313.
9. Матвеев А.И., Чирков И.П. Установка компарирующая ОО КА ИМЭК. Тип: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. Номер

свидетельства: RU 2019664257. Номер заявки: 2019663421. Дата регистрации: 28.10.2019. Дата публикации: 01.11.2019. Язык программирования: C++. Объем: 1470 Кб.

10. Семенов В.А., Чуйко В.Г. Измерение коэффициента эффективности термоэлектрических преобразователей СВЧ-ваттметров в микрокалориметре // Научно-техническая конференция «Метрология в радиоэлектронике». — Менделеево: ФГУП «ВНИИФТРИ», 2006. — С. 40–42.

11. Дойников А.С. Лекции по метрологии. — 2-е изд., перераб. и доп. — Менделеево: ФГУП «ВНИИФТРИ», 2021.

12. Приказ Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии (Росстандарт) от 30 декабря 2019 г. «Об утверждении государственной поверочной схемы для средств измерений мощности электромагнитных колебаний в диапазоне частот от 9 кГц до 37,5 ГГц».

13. Чирков И.П. Разработка методов и средств воспроизведения и передачи единицы мощности электромагнитных колебаний в коаксиальных трактах в диапазоне частот от 0,03 до 67 ГГц: дис. ... канд. техн. наук. — ФГУП «ВНИИФТРИ», 2016.

14. Clague F.R. A Calibration Service for Coaxial Reference Standards for Microwave Power // NIST Technical Note 1374. — 1995. — May. — 108 p.

15. Шаров Г.А. Волноводные устройства сантиметровых и миллиметровых волн. — М.: Горячая линия — Телеком, 2016. — 640 с.

16. NRP-Z51 Thermal power sensor. — URL: https://www.rohde-schwarz.com/product/nrp-z51var03-productstartpage_63493-40128.html (дата обращения: 03.07.2021).

17. Перепелкин В.А. Микроволновый мультиметр на основе четырехзондового преобразователя проходящей мощности СВЧ // Измерительная техника. — 1994. — № 3. — С. 57–61.

18. Ваттметры образцовые проходные М1. Технические условия 11М1.400.062 ТУ.

19. Комплект возимых мер СВЧ-мощности волноводный. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. ПИИ.400.061 ТО.
20. Механиков А.И. Расчет погрешности при некоторых измерениях на СВЧ // Измерительная техника. — 1968. — № 3. — С. 36–38.
21. 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.
22. Федеральный информационный фонд по обеспечению единства измерений. Утвержденные типы СИ. — <https://fgis.gost.ru/fundmetrology/cm/mits> (дата обращения: 15.12.2024).
23. IEC 601 54-2. International standard, Flanges for waveguides — Part 2: Relevant specifications for flanges for ordinary rectangular waveguides. — 2016.
24. ГОСТ РВ 51914-2002. ГСИ. Элементы соединения СВЧ-трактов электронных измерительных приборов. Присоединительные размеры. — М.: Госстандарт России, 2002.
25. Ваттметры поглощаемой мощности М1-25/08. Руководство по эксплуатации. ИРВМ.411151.105 РЭ. — ООО НПП «Элмика», 2020.
26. U8480 Series USB Thermocouple Power Sensors. Data Sheet. — Keysight Technologies, USA, 2024.
27. Чирков И.П., Матвеев А.И., Пивак А.В. Экспериментальная проверка оценки точности измерений мощности СВЧ в коаксиальном тракте 2,92/1,26 мм // Всероссийская научно-техническая конференция «Метрология в радиоэлектронике». Тезисы докладов. — Менделеево: ФГУП «ВНИИФТРИ», 2016. — С. 116–118.
28. Переходы коаксиально-волноводные // Элементы СВЧ-тракта. — ООО НФП «МИКРАН». — URL: <https://www.micran.ru/upload/iblock/4d5/lw4117y0oltp82yc33d09skvtl7jasol/Переходы%20коаксиально-волноводные.pdf> (дата обращения: 15.12.2024).

29. Билько М.И., Томашевский А.К., Шаров П.П., Баймуратов Е.А. Измерение мощности на СВЧ. — 2-е изд., перераб. доп. — М.: Радио и связь, 1986. — 168 с.
30. Перепелкин В.А., Пивак А.В., Чуйко В.Г. Исследование линейности эталонных термисторных ваттметров и оценка минимально достижимых погрешностей измерений отношения СВЧ-мощностей // Измерительная техника. — 2003. — № 10. — С. 45–51.
31. Keysight Technologies. Как минимизировать погрешности измерений и оценить погрешность, вызванную рассогласованием. Рекомендации по применению. — Keysight Technologies, USA, 2014. 5991-0673RURU.
32. ГОСТ 8.392-80. ГСИ. Ваттметры СВЧ малой мощности и их первичные измерительные преобразователи диапазона частот 0,03–78,33 ГГц. — М.: Государственный комитет СССР по стандартам, 1982.
33. Боровков А.С., Чирков И.П., Семенов В.А. Определение погрешности измерений модуля эффективного коэффициента отражения выхода ваттметра проходного типа. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2022663096, 11.07.2022. Заявка № 2022662558 от 29.06.2022.
34. European Co-operation for Accreditation: Guidelines on the Evaluation of Vector Network Analyzers (VNA). Publication Reference EA-10/12, May 2000.
35. Матвеев А.И., Перепелкин В.А., Семенов В.А., Чирков И.П. Многозондовый преобразователь мощности оконечного типа. Патент на полезную модель № 191197, заявка № 2019114754, дата регистрации в Государственном реестре полезных моделей Российской Федерации 29.07.2019.
36. DIN 44070-1975. Thermistors. NTC, directly heated, technical terms and tests. 01.09.1975. — 12 p.
37. Чирков И.П. Разработка методов исследования характеристик СВЧ-термисторов // Всероссийская научно-техническая конференция «Метрология в радиоэлектронике». Тезисы докладов. — Менделеево: ФГУП «ВНИИФТРИ», 2016. — С. 130–134.

38. Прядка А.А. Исследование характеристик СВЧ-термисторов, производимых ФГУП «ВНИИФТРИ» // Альманах современной метрологии. — 2022. — № 3 (31). — С. 71–76.
39. Виглеб Г. Датчики. Устройство и применение / пер. с нем. канд. физ.-мат. наук М.А. Хацернова. — М.: Мир, 1989. — 196 с.
40. Wollensack M. et al. VNA Tools II: *S*-parameter uncertainty calculation // 79th ARFTG Microwave Measurement Conference. — IEEE, 2012. — P. 1–5.
41. Hiebel M. Основы векторного анализа цепей. — 2-е изд., испр. и доп. — М.: МЭИ, 2018.
42. Усорис Аницетас-Витолис Наполеонович. Способ проверки самобалансирующихся термисторных мостов, 3917216, 1985.06.24, 1987.
43. Boylestad R.L., Nashelsky L. Electronic devices and circuit theory, 1982.
44. Чуйко В.Г. Радиоизмерения: учеб. пособие. Ч. 1. — М.: МИЭТ, 2001. — 99 с.
45. Вечканова Р.А., Калашик Н.С., Чекина А.С. Расчет и конструирование элементов фидерного тракта сверхвысоких частот: учеб. пособие по курсу «Конструирование и техника сверхвысоких частот». — Куйбышев, 1970.
46. Механиков А.И. Синтез неэквидистантных волноводных согласующих устройств с равномерным амплитудным распределением: автореферат дис. на соискание уч. степ. канд. техн. наук / Всесоюз. науч.-исслед. ин-т физ.-техн. и радиотехн. измерений. — М.: [б. и.], 1972. — 15 с.
47. Курушин А.А., Пластиков А.Н. Проектирование СВЧ-устройств в среде CST Microwave Studio. — М.: Издательство МЭИ, 2011. — 155 с.
48. Бондаренко А.С., Боровков А.С., Малай И.М., Семёнов В.А. Государственный первичный эталон единиц комплексного коэффициента отражения и комплексного коэффициента передачи в волноводных трактах в диапазоне частот от 2,14 до 178,4 ГГц ГЭТ 219-2024 // Измерительная техника. — 2024. — Т. 73. — № 7. — С. 4–13. — <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2024-7-4-13>.
49. Дансмор Д.П. Настольная книга инженера. Измерения параметров СВЧ-устройств с использованием передовых методик векторного анализа цепей /

пер. с англ. и науч. ред. В.Н. Ульянова, Е.Ю. Харитонов, Е.В. Андропова. — 2-е изд. — М.: Техносфера, 2023. — 736 с.

50. Guidelines on the Evaluation of Vector Network Analysers (VNA). Version 3.0. // EURAMET Calibration Guide. — 2018. — № 12.

51. Engen G.F., Hoer C.A. Thru-reflect-line: An improved technique for calibrating the dual six-port automatic network analyzer // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. — 1979. — V. 27. — № 12. — P. 987–993.

52. Бондаренко А.С., Боровков А.С., Закутин А.А., Михайлов П.Д., Семенов В.А. Разработка методики определения S -параметров калибровочных мер в волноводных трактах по результатам измерений их геометрических размеров // XIII Всероссийская научно-техническая конференция «Метрология в радиоэлектронике». Материалы. — Менделеево: ФГУП «ВНИИФТРИ», 2023. — С. 327–331.

53. PNA Family Microwave Network Analyser (N522x/3x/4xA). Keysight Technologies, USA, 2018. 5990-7745EN.

54. Specifying Calibration Standards and Kits for Agilent Vector Network Analysers. Application Note 1287-11.

55. Преобразователи измерительные первичные М5-40÷М5-45 ГВ4.681.016. Техническое описание.

56. N432A Thermistor Power Meter. K. Technologies. — URL: <http://literature.cdn.keysight.com/litweb/pdf/5990-5740EN.pdf?id=1891411> (дата обращения: 15.12.2014).

57. Клейменов Ю.А., Закутин А.А. Контроль эффективного коэффициента отражения ваттметров проходящей мощности на основе априорной информации о стабильности модуля коэффициента отражения рассогласованного ваттметра // Воздушно-космические силы. Теория и практика. — 2020. — № 16. — С. 203–211.

58. Dinh D.D. Millimetre-Wave Power Sensor Design. A thesis submitted to the University of Birmingham for the degree of doctor of philosophy, School of Electronic, Electrical and Systems Engineering College of Engineering and Physical Sciences University of Birmingham, June 2017.

59. Чирков И.П. Учет модуля коэффициента передачи отрезков коаксиальной линии при передаче размера единицы мощности СВЧ с исключением погрешности рассогласования // Научно-техническая конференция молодых ученых, аспирантов и специалистов «Метрология в XXI веке». Доклады. — Менделеево: ФГУП «ВНИИФТРИ», 2014. — С. 10–17.
60. Федосеева Е.В., Тарасов А.А. Исследование метода синтеза неэкви-дистантной равноамплитудной антенной решетки // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. — 2011. — № 3. — С. 4–8.
61. Механиков А.И. Синтез многоэлементных преобразователей проходящей мощности // Метрология. — 1973. — № 4. — С. 27-32.
62. Матвеев А.И., Чирков И.П. Расчет КСВН и потерь в многозондовых преобразователях мощности СВЧ. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. Номер свидетельства: 2024688823. Номер заявки: 2024688092. Дата регистрации: 19.11.2024. Дата публикации: 02.12.2024.
63. Перепелкин В.А. Исследование и разработка прецизионной аппаратуры для измерения мощности СВЧ среднего и большого уровня в волноводных трактах: дис. ... канд. тех. наук. — М., 1981.
64. Данилин А.И. Методы оптимизации: электр. уч. пособие. — Самара: Минобрнауки России, Самар. гос. аэрокосм. у-т имени С.П. Королева (нац. исслед. у-т)», 2011. — 66 с.
65. Keysight Technologies. 11644A R, Q, U, V, and W. Waveguide Calibration Kits, User's and Service Guide. Edition 2. July 2021.
66. Описание типа. Измерители мощности термисторные унифицированные МЗ-121. Регистрационный № 91678-24. — 4 с.
67. Clague F. A Calibration Service for Reference Standards for Microwave Power. NIST Technical Note 1374. — 1995 — 109 p. — URL: <https://nvl-pubs.nist.gov/nistpubs/Legacy/TN/nbstechnicalnote1374.pdf> (дата обращения: 14.12.2021).

68. Xiaohai Cui, Yu Song Meng, Wenze Yuan, Yong Li. Theoretical Analysis and Determination of the Correction Factor for a Waveguide Microcalorimeter // Theoretical Analysis and Determination of the Correction Factor for a Waveguide Microcalorimeter. — December 2019.
69. Yuan W., Ma S., Ding S., Ding J., Cui X. A new calculation method of correction factor for microcalorimeters // IEEE MTT-S International Wireless Symposium (IWS). — 2021. — 1–3. — <https://doi.org/10.1109/IWS52775.2021.9499479>.
70. Чирков И.П. Исследование методов измерения модуля коэффициента передачи переходов для расширения диапазона частот ГЭТ 26-2010 в коаксиальных трактах до 50 ГГц // IX Всероссийская научно-техническая конференция «Метрология в радиоэлектронике». Тезисы докладов. — Менделеево: ФГУП «ВНИИФТРИ», 2014. — С. 76–79.
71. Линии измерительные волноводные P1-12A, P1-13A, P1-19, P1-19/1, P1-20, P1-21. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. ГВ2.744.000 ТО, 1986.
72. Furrer J. Traceable Source Match Calibration of RF & MW Generators // 32nd ANAMET Meeting. October 2009. Teddington, UK. — URL: http://resource.npl.co.uk/docs/networks/anamet/members_only/meetings/32/20091016_anamet32_furrer.pdf (дата обращения: 14.12.2021).
73. Аттенюатор поляризационный ДЗ-37, ДЗ-38. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. ГВ2.243.147 ТО.
74. Исхаков Ш.Х. Совершенствование эталонов и образцовых средств измерений мощности СВЧ: дис. ... канд. тех. наук. — М., 1990.
75. Неганов В.А., Яровой Г.П. Теория и применение устройств СВЧ: учеб. пос. для вузов / под ред. В.А. Неганова. — М.: Радио и связь, 2006. — 720 с.
76. Калибраторы мощности серии М1. Техническое описание и руководство по эксплуатации.

77. 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.

78. МИ 3057. Методика выполнения измерений модуля эффективного коэффициента отражения выхода ваттметров проходящей мощности СВЧ-методом совокупных измерений.

79. Чирков И.П. Методы уменьшения погрешности передачи единицы мощности СВЧ в коаксиальных трактах // Измерительная техника. — 2012. — № 1. — С. 56–60.

80. Ваттметры проходного типа волноводные термисторные М1-37. Описание типа. Регистрационный № 91456-24. — 5 с.

81. Система измерительная К6-19. Описание типа. Регистрационный № 73236-18. — 14 с.

82. Механников А.И., Чуйко В.Г., Коудельный А.В., Александров Б.А. Преобразователь проходящей мощности СВЧ. Авторское свидетельство SU 1231471 А1, 15.05.1986. Заявка № 3534016 от 03.01.1983.

Публикации автора:

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

II. 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.

III. 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.

IV. Matveev A., Chirkov I., Malay I. Investigation of using reflective power sensor for equivalent source reflection measurements // URSI GASS 2020. Warsaw University of Technology Baltic, October 2020. — 113–115 p.

V. 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. — С. 122–126.

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

VII. Матвеев А.И. Волноводные термисторные ваттметры оконечного типа в диапазоне частот 16,7–37,5 ГГц // Измерительная техника. — 2022. — № 1. — С. 58–61.

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

IX. 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.

X. 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.

XI. Матвеев А.И., Шпагин Д.А., Жогун М.В. Преобразователь мощности проходного типа на основе применения матрицы термисторных СВЧ-датчиков. Патент на полезную модель RU213532U1, 15.09.2022. Заявка № 2022113403 от 19.05.2022.

Приложение А
Акты внедрения диссертационной работы