Министерство образования Республики Беларусь
Учреждение образования
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники

УДК 006.91:621.385.69

Маскей
Милена Шейла

Методики определения метрологических характеристик средств измерения параметров микроволновых инфокоммуникационных сетей и систем

Автореферат
на соискание степени магистра
по специальности 7-06-0611-06 Системы и сети инфокоммуникаций

_____

Научный руководитель
доцент, канд. техн. наук
Белошицкий Анатолий Павлович

_____

Минск 2026

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы наблюдается существенный прогресс в области промышленного освоения микроволнового диапазона (включающие в себя диапазоны сантиметровых и миллиметровых длин волн). Развитие микроволновой техники создаёт основу для построения современных систем скоростной передачи данных, радиолокации, радионавигации, телекоммуникаций, телевидения и различных информационно-измерительных комплексов.

Расширение номенклатуры компонентов и устройств, работающих в микроволновом диапазоне длин волн (МВДВ), приводит к необходимости точного экспериментального определения их параметров и характеристик. Это, в свою очередь, обусловливает решение большого числа измерительных задач с использованием специализированных средств измерений, предназначенных для работы на высоких и сверхвысоких частотах.

Для определения параметров и оценки эффективности использования различных компонентов микроволновых инфокоммуникационных сетей и систем используются различные средства измерения (СИ). Особое место среди таких средств занимают скалярные и векторные анализаторы цепей, измерительные аттенюаторы, средства измерения мощности и коэффициента отражения. Они широко применяются при контроле характеристик пассивных (кабели, соединители, линии передачи, ответвители, фильтры) и активных (усилители, смесители, умножители и делители частоты) СВЧ-компонентов, а также различных модулей микроволновых инфокоммуникационных систем. Одним из наиболее распространенных контролируемых их параметров в МВДВ является ослабление.

Современные средства измерения ослабления представляют собой высокоточные устройства, обеспечивающие проведение измерений в широком диапазоне частот с требуемой точностью и возможностью последующей обработки, представления и хранения результатов. Одновременно с расширением области их применения ведутся исследования, направленные на повышение точности измерений, учёт источников погрешностей, совершенствование калибровочных методик и повышение скорости обработки информации.

Ослабление электромагнитных колебаний наряду с мощностью и коэффициентом отражения является одним из важнейших параметров систем, приборов и СВЧ-компонентов. Вопросы обеспечения единства измерений и метрологической прослеживаемости при измерении ослабления имеют приоритетное значение для развития производств, использующих микроволновые компоненты и технологии.

До последнего времени в Республике Беларусь отсутствовало необходимое эталонное оборудование для метрологической оценки средств измерения ослабления в МВДВ. В связи с этим в Научно-производственно-образовательном инновационном центре СВЧ-технологий и их метрологического обеспечения (Центр 1.9) БГУИР были выполнены работы по созданию Национального эталона единицы ослабления электромагнитных колебаний в диапазоне частот от 37,5 до 178,4 ГГц. Эти работы выполнялись в рамках реализации подпрограммы «Эталоны Беларуси» государственной научно-технической программы «Национальные эталоны и высокотехнологичное исследовательское оборудование».

Задачи исследования и определения метрологических характеристик Национального эталона и входящих в его состав аппаратных средств являются важными и актуальными в обеспечении единства измерения МВДВ, в том числе микроволновых инфокоммуникационных систем и сетей.

Целью данной диссертационной работы является разработка методик определения метрологических характеристик эталонных средств измерения ослабления компонентов микроволновых инфокоммуникационных сетей и систем.

Объектом исследования магистерской диссертации является Национальный эталон единицы ослабления электромагнитных колебаний в диапазоне частот от 37,5 до 178,4 ГГц

Предметом исследования магистерской диссертации являются метрологические характеристики этого эталона.

Для достижения поставленной цели в диссертационной работе решены следующие задачи:

– проведен обзор и анализ современных методов и средств измерения ослабления компонентов микроволновых инфокоммуникационных сетей и систем;

– описаны устройство, принцип действия, метрологических характеристик (МХ), порядок работы Национального эталона единицы ослабления электромагнитных колебаний в диапазоне частот от 37,5 до 178,4 ГГц;

– разработаны и обоснованы методики определения МХ эталона и его составных частей в диапазоне частот 37,5-53,57 ГГц;

– проведены экспериментальные исследования МХ эталона и его составных частей с использованием разработанных методик.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с крупными научными программами

Тема диссертационной работы соответствует пункту *6* приоритетных направлений научной, научно-технической и инновационной деятельности Республики Беларусь на 2021–2025 гг., утвержденных Указом Президента Республики Беларусь №156 от 7 мая 2020 г. «*Обеспечение безопасности человека, общества, государства*». Работа выполнялась в учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» в рамках подпрограммы «Эталоны Беларуси» государственной научно-технической программы (ГНТП) «Национальные эталоны и высокотехнологичное исследовательское оборудование» на 2021–2025годы и НИОКР №22-1110Б «Создать Национальный эталон единицы ослабления электромагнитных колебаний в диапазоне частот от 37,5 до 178,4 ГГц».

Цель и задачи исследования

Целью данной диссертационной рабы является разработка методик определения метрологических характеристик эталонных средств измерения ослабления компонентов микроволновых инфокоммуникационных сетей и систем.

Объектом исследования магистерской диссертации является Национальный эталон единицы ослабления электромагнитных колебаний в диапазоне частот от 37,5 до 178,4 ГГц

Предметом исследования магистерской диссертации являются метрологические характеристики этого эталона.

Для достижения поставленной цели в диссертационной работе решены следующие задачи:

– проведен обзор и анализ современных методов и средств измерения ослабления компонентов микроволновых инфокоммуникационных сетей и систем;

– описаны устройство, принцип действия, метрологических характеристик (МХ), порядок работы Национального эталона единицы ослабления электромагнитных колебаний в диапазоне частот от 37,5 до 178,4 ГГц;

– разработаны и обоснованы методики определения МХ эталона и его составных частей в диапазоне частот 37,5-53,57 ГГц;

– проведены экспериментальные исследования МХ эталона и его составных частей с использованием разработанных методик.

Личный вклад соискателя ученой степени

Содержание диссертации отображает личный вклад автора. Непосредственно автором разработаны и научно обоснованы методики определения метрологических характеристик Национального эталона единицы ослабления электромагнитных колебаний для поддиапазона частот 37,5-53,57 ГГц и его составных частей – гетеродина, генератора СВЧ и СВЧ измерительного тракта. Сформулированы и реализованы алгоритмы обработки результатов измерений и оценки неопределенностей при определении метрологических характеристик эталона. Проведены экспериментальные исследования гетеродина, генератора СВЧ, измерительного тракта и эталона для поддиапазона частот 37,5-53,57 ГГц с использованием разработанных методик. Выполнена обработка и анализ полученных экспериментальных данных, в том числе оценка составляющих неопределённости, построение доверительных интервалов, формулировка выводов и практических рекомендаций по применению разработанных методик при метрологической оценке эталона и его составных частей.

Определение целей и задач исследований, интерпретация и обобщение полученных результатов проводились совместно с научным руководителем *кандидатом технических наук, доцентом А.П. Белошицким.*

Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов

Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на: 60-й научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР (22 − 26 апреля, 2024 г.) стр. 217-220; 61-й научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР (21 − 25 апреля, 2025 г.) стр.166-169.

Результаты диссертационной работы использованы в *Центре 1.9 «Научно-производственно-образовательном инновационном центре СВЧ технологий и их метрологического обеспечения» БГУИР.*

Опубликование результатов диссертации

По результатам исследований, представленных в диссертации, опубликованы 2 статьи в сборниках и материалах конференций общий объем 6,5 авторских листа.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из перечня условных обозначений и терминов, общей характеристики работы, введения, четырех разделов с выводами по каждому разделу, заключения, списка использованных источников, списка публикаций соискателя.

Общий объем диссертационной работы составляет 101 страниц, 24 рисунка, 44 таблицы, перечень условных обозначений и терминов (на 2

страницах), список использованных источников (10 наименований на 1 странице), список публикаций автора по теме диссертации (2 наименования).

Проверка на уникальность

Проведена экспертиза диссертации *Маскей Милены Шейлы* «*Методики определения метрологических характеристик средств измерения параметров микроволновых инфокоммуникационных сетей и систем*» на корректность использования заимствованных материалов с применением сетевого ресурса «Антиплагиат» (адрес доступа: https://antiplagiat.ru) в on-line режиме 18.01.2026 г. В результате проверки установлена корректность использования заимствованных материалов (оригинальность диссертационной работы составляет 70 %).

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследования, определены объект и предмет исследования, приведены научная новизна и практическая значимость полученных результатов.

В первой главе рассмотрены инфокоммуникационные системы и сети микроволнового диапазона, описаны их контролируемые параметры. Показано, что при построении и эксплуатации таких систем (радиоканалы высокой ёмкости, транспортные радиолинии, спутниковые и радиолокационные системы) измерение ослабления является одной из базовых задач контроля состояния трактов и оценки потерь при передаче сигнала.

Проведен обзор и анализ современных методов и средств измерения ослабления в микроволновом диапазоне: метод замещения, параллельный метод сравнения, а также варианты замещения с переносом сигнала на промежуточную и низкую частоты. Проведен сравнительный анализ этих методов и отмечены принципиальные особенности применения в миллиметровом диапазоне, связанные с ростом влияния нестабильности источников и приёмных трактов, паразитных отражений и шумовых составляющих.

Во второй главе рассмотрены устройство, принцип действия, состав и основные метрологические характеристики Национального эталона единицы ослабления электромагнитных колебаний в диапазоне частот 37,5-178,4 ГГц. Описаны назначение эталона, структура измерительного тракта и функции его составных частей. Структурная схема эталона приведена на рисунке 1.

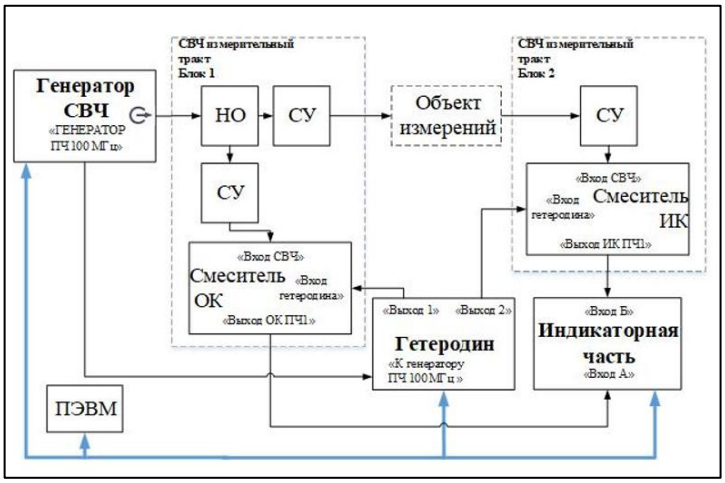

Рисунок 1 – Обобщенная структурная схема эталона единицы ослабления электромагнитных колебаний в диапазоне частот от 37,5 до 178,4 ГГц

В состав эталона входят гетеродин, четыре генератора СВЧ на поддиапазоны частот (37,5-53,57 ГГц, 53,57-78,33 ГГц, 78,33-118,1 ГГц, 118,1-178,4 ГГц), четыре СВЧ измерительных тракта на эти поддиапазоны, а также индикаторная часть (прибор для измерения ослабления ДК1-28), и ПВМ с программным обеспечением для управления измерениями и документирования результатов.

Основные технические и метрологические характеристики эталона приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Основные технические и метрологические характеристики эталона

Параметр	Значение
Диапазон частот, ГГц	от 37,5 до 178,4
Диапазон воспроизводимых значений ослабления, дБ	от 0 до 80
Пределы случайной погрешности воспроизведения ослабления, дБ	±(0,10…0,15)
Пределы неисключенной систематической погрешности, дБ	±(0,15…0,20)

В третьей главе приведены разработанные методики определения метрологических характеристик эталона и его составных частей (гетеродина, генератора СВЧ и СВЧ измерительного тракта) для поддиапазона 37,5-53,57 ГГц, а также методики определения составляющих погрешности измерения ослабления и оценивания неопределенности измерений. В каждой методике приведены: требования к условиям проведения исследований, состав применяемых средств измерений, порядок подготовки оборудования, порядок выполнения измерений, алгоритмы обработки результатов и составления бюджетов неопределенности.

Методика исследования МХ гетеродина включает в себя определение: рабочего диапазона частот, нестабильности частоты, погрешности установки и нестабильности уровня выходной мощности, КСВН выхода гетеродина.

Методика исследования МХ генератора СВЧ включает в себя определение: рабочего диапазона частот, погрешности установки частоты и ее нестабильности; динамического диапазона, погрешности установки и нестабильности уровня выходной мощности генератора; КСВН выхода генератора.

Методика определения МХ СВЧ измерительного тракта включает в себя определение характеристик направленных ответвителей, согласованных нагрузок, смесителей, аттенюаторов, вентилей.

Методика исследования МХ эталона в диапазоне частот 37,5-53,57 ГГц целом включает в себя определение: составляющих погрешности измерения ослабления на промежуточной частоте 20 кГц, из-за нелинейности входных цепей, из-за собственных шумов и недостаточности развязки, а также вычисление суммарной погрешности и соответствующей неопределенности.

Для оценки точностных характеристик эталона были разработаны методики оценивания неопределенностей для каждой составляющей погрешности, которые включают в себя составления математической модели измерения, анализ входных величин, составление бюджета неопределенности, расчет суммарной стандартной и расширенной неопределенности.

В четвертой главе представлены результаты экспериментальных исследований метрологических характеристик эталона и его составных частей (гетеродина, генератора СВЧ, СВЧ-измерительного тракта) для поддиапазона частот от 37,5–53,57 ГГц.

При экспериментальных исследованиях гетеродина получены следующие результаты (таблица 2):

Таблица 2 – Результаты экспериментальных исследований МХ гетеродина

Параметр	Значение
Максимальная относительная погрешность установки частоты δ_f, отн.ед.	$5{,}2\cdot10^{-8}$
Нестабильность частоты на выходе 1, относительно 1	$\pm\, 2{,}4\cdot10^{-8}$
Нестабильность частоты на выходе 2, относительно 1	$\pm\, 2{,}3\cdot10^{-8}$
Абсолютная погрешность установки мощности выходе1, мВт	0,019
Абсолютная погрешность установки мощности выходе 2, мВт	0,017
Нестабильность уровня мощности на выходах 1 и 2, отн.ед.	0,002
КСВН выхода 1, отн.ед.	1,21
КСВН выхода 2, отн.ед.	1,23

При экспериментальных исследованиях генератора СВЧ получены следующие результаты (таблица 3):

Таблица 3 – Результаты экспериментальных исследований МХ СВЧ генератора

Параметр	Значение
Максимальная относительная погрешность установки частоты δ_f, отн.ед.	не более $5{,}3 \cdot 10^{-7}$
КСВН выхода генератора	от 1,1 до 1,3

При экспериментальных исследованиях компонентов СВЧ измерительного тракта получены следующие результаты (таблица 4):

Таблица 4 – Результаты экспериментальных исследований МХ компонентов СВЧ измерительного тракта

Параметр	Значение
КСВН согласованных нагрузок, отн. ед.	1,05-1,10
Вносимые потери направленных ответвителей, дБ	не более 2,0
Развязка направленных ответвителей, дБ	не менее 30
Переходное ослабление направленных ответвителей, дБ	10 ± 2
Коэффициент преобразования смесителя ОК, дБ	7,94-13,97
Коэффициент преобразования смесителя ИК, дБ	6,06-13,09
Потери вентилей: прямые/обратные, дБ	не более 0,7/не менее 17

При экспериментальных исследованиях МХ эталона в диапазоне частот 37,5-53,57 ГГц, получены следующие результаты:

– суммарная стандартная неопределенность погрешности измерения ослабления на промежуточной частоте 20кГц: 0,0026 дБ;

– суммарная стандартная неопределенность погрешности измерения ослабления из-за нелинейности входных цепей при значении частоты 45 ГГц составляет 0,0030 дБ;

– стандартная неопределенность измерения ослабления из-за собственных шумов и недостаточной развязки при значении частоты 45 ГГц составляет0,0038 дБ;

– расширенная неопределенность при определении суммарной погрешности измерения ослабления при значении частоты 45 ГГц и уровни ослабления -20 дБ составляет 0,0080 дБ;

Экспериментально подтверждены работоспособность разработанных методик, воспроизводимость результатов и соответствие получаемых характеристик заявленным требованиям.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе выполнен обзор и анализ инфокоммуникационных систем и сетей микроволнового диапазона. Описаны основные контролируемые параметры их компонентов. Показано, что ослабление является одним из базовых параметров контроля состояния СВЧ-трактов и оценки потерь при передаче сигнала. Проведен сравнительный анализ современных методов и средств измерения ослабления в микроволновом диапазоне.

Рассмотрены назначения, состав, устройство, принцип действия и метрологические характеристики Национального эталона единицы ослабления электромагнитных колебаний в диапазоне частот от 37,5 до 178,4 ГГц. Приведен порядок работы с эталоном. Эталон представляет собой модульный программно-аппаратный комплекс, включающий генераторы СВЧ-сигналов для четырех поддиапазонов, гетеродин, СВЧ-измерительные тракты и индикаторную часть, а также персональную ЭВМ с программным обеспечением. Такая конфигурация обеспечивает не только воспроизведение и передачу эталонных значений ослабления, но и высокую стабильность, точность и воспроизводимость получаемых результатов.

Приведены разработанные методики определения метрологических характеристик эталона единицы ослабления и его составных частей (гетеродина, генератора СВЧ и измерительного тракта) для поддиапазона частот от 37,5 до 53,57 ГГц. В каждой методике рассмотрены требования к условиям проведения испытаний, перечень применяемых средств измерений, последовательность подготовки оборудования и порядок выполнения измерений, а также методики обработки результатов измерений.

Предложенные методики обеспечивают необходимую точность и воспроизводимость результатов при исследовании гетеродина, генератора СВЧ, направленных ответвителей, смесителей, аттенюаторов и вентилей, входящих в состав СВЧ-измерительного тракта. Применение данных методик позволяет комплексно оценивать технические и метрологические характеристики как самого эталона так и его составных частей.

Приведены результаты экспериментальных исследований метрологических характеристик Национального эталона и его составных частей (гетеродина, генератора СВЧ, СВЧ-измерительного тракта) для поддиапазона частот от 37,5 до 53,57 ГГц. Исследования проводились с использованием разработанных и описанных в настоящей диссертационной работы методик.

Результаты экспериментальных исследований показали высокую повторяемость измерений, стабильность, воспроизводимость и соответствие метрологических характеристик эталона заявленным значениям. Получены результаты метрологических характеристик эталона подтверждают его пригодность для практического использования в системе обеспечения единства измерений Республики Беларусь.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ

Тезисы конференций

1−А. Маскей, М. Ш. Методика оценивания неопределенности результатов измерений, выполненных с помощью эталона единицы ослабления электромагнитных колебаний / Маскей, М. Ш. // Инфокоммуникационные системы и сети: материалы 60-й научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов (Минск, 22-26 апреля 2024 г.). – Минск : БГУИР, 2024. – С. 217–220.

2−А. Маскей, М. Ш. Методика исследований метрологических характеристик гетеродина из состава Национального эталона единицы ослабления / Маскей, М. Ш. // Инфокоммуникационные системы и сети: материалы 61-й научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов (Минск, 21-25 апреля 2025 г.). – Минск : БГУИР, 2025. – С. 166–169.