

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

УДК 621.317.74

Кузюков
Антон Николаевич

Методики определения метрологических характеристик скалярных
анализаторов цепей миллиметрового диапазона длин волн

АВТОРЕФЕРАТ

на соискание степени магистра технических наук
по специальности 1-38 80 01 «Приборостроение, метрология и информационно-
измерительные приборы и системы»

Научный руководитель
Белошицкий Анатолий Павлович
кандидат технических наук, доцент

Минск 2019

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время происходит интенсивная замена морально и физически устаревших измерительных приборов на вновь разработанные, отвечающие современным требованиям развития техники миллиметрового диапазона длин волн. Современные средства измерений СВЧ и КВЧ диапазона должны не только обеспечивать возможность измерения в очень широкой полосе частот, но и обладать высокими эксплуатационными и метрологическими характеристиками (высокая точность измерений, высокое быстродействие, возможности автоматизации измерительных, калибровочных и поверочных процедур, наличие развитого и надежного программного обеспечения).

Одними из широко используемых приборов для исследования характеристик и параметров цепей миллиметрового диапазона являются векторные (ВАЦ) и скалярные (САЦ) анализаторы цепей. Данные средства измерения представляют собой современные высокопроизводительные информационно-измерительные системы, позволяющие провести необходимые измерения параметров устройств с гарантированной точностью в широких диапазонах с соответствующей обработкой, представлением и хранением измеренной информации о параметрах и характеристиках испытываемых устройств.

Для определения метрологических характеристик таких средств измерений и определения их пригодности к применению необходимо провести их метрологические исследования с использованием специально разработанных методик. Для разработки таких методик необходимо провести анализ принципов построения и особенностей работы анализаторов, выбор эталонных средств и способов обработки результатов измерений.

Целью данной магистерской диссертации является определение метрологических характеристик скалярных анализаторов цепей миллиметрового диапазона длин волн.

Для достижения этой цели в работе поставлены и решены следующие задачи:

- анализ современных методов и средств измерений модулей коэффициентов отражения и передачи устройств и цепей миллиметрового диапазона длин волн;
- разработка программы и методики метрологической аттестации (ПМА) САЦ миллиметрового диапазона длин волн;
- разработка методики калибровки САЦ;
- разработка методов обработки результатов экспериментальных исследований метрологических (МХ) САЦ;

- проведение экспериментальных исследований САЦ с использованием разработанных методик;
- сделаны итоговые выводы о проделанной работе и подготовлено заключение.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Основные направления развития радиотехники в настоящее время определяются прежде всего теми требованиями, которые предъявляются к перспективным сверхвысокочастотным радиоэлектронным системам и их элементам. Эти системы должны обеспечивать существенное увеличение скорости передачи и обработки информации, стабильности и надежности радиоэлектронных средств при одновременном уменьшении их массы, габаритов и трудоемкости изготовления. Необходимо увеличить энергетический потенциал КВЧ-установок, используемых для ускорения заряженных частиц и в технологических целях.

Для решения указанных задач требуется освоение миллиметрового, субмиллиметрового и оптического диапазонов, переход на новую элементную базу, увеличение уровня интеграции аппаратуры, создание новых принципов построения радиоэлектронных устройств и систем. Однако, это влечет за собой необходимость исследования и контроля параметров таких устройств и систем.

Одними из широко используемых приборов для исследования характеристик и параметров цепей миллиметрового диапазона являются векторные (ВАЦ) и скалярные (САЦ) анализаторы цепей. Данные средства измерения представляют собой современные высокопроизводительные приборы, позволяющие провести необходимые измерения параметров устройств с гарантированной точностью в широких диапазонах с соответствующей обработкой, представлением и хранением измеренной информации о параметрах и характеристиках испытываемых устройств.

Для определения метрологических характеристик таких средств измерений и определения их пригодности к применению необходимо провести их метрологические исследования с использованием специально разработанных методик. Для разработки таких методик необходимо провести анализ принципов построения и особенностей работы анализаторов, выбор эталонных средств и способов обработки результатов измерений.

Целью данной магистерской диссертации является определение метрологических характеристик скалярных анализаторов цепей миллиметрового диапазона длин волн. Следовательно, разработка методик определения метрологических характеристик скалярных анализаторов цепей миллиметрового диапазона длин волн является важной и актуальной задачей

Для достижения этой цели в работе поставлены и решены следующие задачи:

- провести анализ современных методов и средств измерений модулей коэффициентов отражения и передачи устройств и цепей миллиметрового диапазона длин волн;
- разработать программу и методику метрологической аттестации (ПМА) САЦ миллиметрового диапазона длин волн;
- разработать методику калибровки САЦ;
- разработать методы обработки результатов экспериментальных исследований метрологических характеристик (МХ) САЦ;
- провести экспериментальные исследования САЦ с использованием разработанных методик;

Новизна работы определяется следующими результатами:

- разработаны и обоснованы программа и методика метрологической аттестации и методика калибровки анализатора цепей миллиметрового диапазона длин волн;
- предложены и обоснованы алгоритмы обработки результатов экспериментальных исследований скалярного анализатора цепей и оценки неопределенностей измерений;

Практическая ценность заключается в том, что разработанные и исследованные методики определения метрологических характеристик скалярных анализаторов цепей миллиметрового диапазона длин волн являются основой для написания методик метрологической аттестации конкретных типов анализаторов и используются в практической деятельности Центра 1.9 НИЧ БГУИР.

Результаты работы апробированы на 54-й Научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов. Инфокоммуникации, Минск, БГУИР, 2018, и опубликованы в материалах конференции.

Все основные результаты работы получены самостоятельно и внедрены в Центре 1.9 НИЧ БГУИР.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе приводится анализ современных методов и средств измерений параметров устройств и цепей миллиметрового диапазона. Существующие в настоящее время методы и средства позволяют измерять S -параметры радиоэлектронных средств в СВЧ и КВЧ диапазоне с достаточной для измерительной практики точностью. Каждый из использованных методов измерения мощности имеет свои преимущества, особенности применения и недостатки. Результаты сравнительной характеристики методов измерения S -параметров приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Сравнение методов измерений S -параметров

Метод	Достоинства	Недостатки
Метод измерения параметров цепей с помощью измерительной линии	- перенос измерительных задач с высоко-частотного уровня на уровень обработки данных	- невозможность проведения одновременных измерений в полосе частот - отсутствие автоматизации - большая трудоемкость и длительность измерений вручную - отсутствие панорамной картины результатов измерений
Метод двенадцатиполюсника	- простота используемой аппаратуры - невысокая стоимость - высокая точность измерения - одновременное измерение всех элементов S -матрицы	- невысокая чувствительность измерений - сложность алгоритмов калибровки и измерений
Рефлектометрические методы	- измерения в широкой полосе частот - автоматизированное проведение измерений - наличие панорамной картины результатов измерений	- ограниченная направленность и остаточное отражение направленных ответвителей - неквадратичность характеристик детекторов

Во **второй главе** описывается устройства и принципа действия скалярного анализатора цепей P2-MBM-118. Скалярный анализатор цепей P2-MBM-118 предназначен для автоматизированного исследования волноводных КВЧ устройств, работающих в частотном диапазоне от 78,33 до 118,1 ГГц и автоматизированного измерения коэффициентов передачи и отражения ($|S_{11}|$ и $|S_{21}|$) волноводных устройств с цифровым отсчетом измеряемых величин и воспроизведением их частотных характеристик в декартовой системе координат на экране анализатора. Объектами измерения (ОИ) могут быть устройства оконечного типа – двухполюсники (ДП) и проходного типа – четырехполюсники (ЧП)

Область применения – измерение параметров волноводных трактов сечением $2,4 \times 1,2$ мм и устройств на базе этих трактов для проведения настройки, технического обслуживания, ремонта и контроля качества КВЧ оборудования.

Технические характеристики:

- рабочий диапазон частот анализатора от 78,33 до 118,1 ГГц. Запас по краям диапазона не менее 1 % от значений номинальных граничных частот;
- анализатор имеет волноводный КВЧ измерительный тракт сечением $2,4 \times 1,2$ мм;
- максимальная полоса качания частоты анализатора в диапазоне от 78,33 до 118,1 ГГц: не менее 39,77 ГГц;
- пределы допускаемой относительной погрешности установки частоты не более $\pm 0,2$ % от установленной частоты;
- нестабильность частоты выходного сигнала генератора (за 15 мин) не более $\pm 1 \cdot 10^{-4}$;
- диапазон измерения модулей коэффициентов отражения от 0 до минус 26 дБ;
- диапазон индикации КСВН от 1,1 до 5;
- пределы допускаемой погрешности при измерении модуля коэффициента отражения не более $|S_{11}| \pm (0,50 + 0,07|S_{11}|)$ дБ;
- диапазон измерения модуля коэффициента передачи от 0 до минус 50 дБ;
- пределы допускаемой погрешности при измерении модуля коэффициента передачи $|S_{21}|$ не более $\pm (0,30 + 0,05|S_{21}|)$ дБ;
- анализатор обеспечивает свои технические характеристики в пределах норм по истечении времени установления рабочего режима, равного 60 мин.

Анализатор состоит из блока измерительного (БИ) и преобразователя выносного

Принцип действия исследуемого средства измерений основан на измерении параметров, полученных в результате раздельного выделения падающей на объект измерения (ОИ), отраженной от него и прошедшей через него волн КВЧ сигнала. Напряжения, пропорциональные амплитудам

падающей, отраженной и прошедшей волн, после усиления и обработки по специальным алгоритмам, записанным в программном обеспечении (ПО) анализатора, преобразуются в значения измеряемых параметров: модуль коэффициента отражения $|S_{11}|$, КСВН и модуль коэффициента передачи $|S_{21}|$. Информация об измеряемом параметре отображается в виде частотных зависимостей в декартовой системе координат с отсчетом значений измеряемых параметров в любой частотной точке диапазона рабочих частот анализатора, выбранной с помощью маркера.

В третьей главе приводятся результаты разработки методики метрологической аттестации скалярного анализатора цепей P2-MVM-118 в диапазоне 78,33 до 118,1 ГГц. В данной методике установлен порядок экспертизы технической документации, предоставляемой на анализатор; установлены операции и действия, проводимые при метрологической аттестации, а так же их последовательность; представлены условия проведения исследований и перечень вспомогательных эталонов и средств измерений, необходимых для проведения метрологической аттестации, описан порядок обработки полученных результатов измерений.

Для оценки относительной систематической составляющей погрешности установки и отсчета частоты $\tilde{\delta}_{sfj}$, %, в j -й точке частотного диапазона использована формула

$$\tilde{\delta}_{sfj} = \frac{\sum_{i=1}^{10} (f_j - f_{ij})}{10 \cdot f_j} \cdot 100\%, \quad (1)$$

где f_{ij} – установленное значение частоты для каждой контролируемой точки.

Для определения относительного значения нестабильности частоты $\tilde{\delta}_{nff}$, отн. ед., использована формула

$$\tilde{\delta}_{nff} = \frac{\Delta_{nff}}{f_j}, \quad (2)$$

где f_j – установленное на экране анализатора значение частоты.

Для оценки систематической составляющей погрешности измерения модуля коэффициента отражения $\tilde{\Delta}_{11j}$ использована формула

$$\tilde{\Delta}_{11j} = \left| \bar{S}_{11} \right|_j - \left| S_{11} \right|_{\partial j}, \quad (3)$$

где $\left| \bar{S}_{11} \right|_j$ – среднее значение модуля коэффициента отражения, дБ;

$|S_{11}|_{\omega_j}$ – действительное значение модуля коэффициента отражения в j -й точке частотного диапазона эталонных нагрузок, используемых при измерениях.

Для оценки систематической составляющей погрешности измерения модуля коэффициента передачи $\tilde{\Delta}_{21j}$ использована формула

$$\tilde{\Delta}_{21j} = |\bar{S}_{21}|_j - |S_{21}|_{\omega_j}, \quad (4)$$

где $|\bar{S}_{21}|_j$ – среднее значение модуля коэффициента передачи, дБ;

$|S_{21}|_{\omega_j}$ – действительное значение модуля коэффициента передачи в j -й точке частотного диапазона эталонных аттенуаторов, используемых при измерениях, дБ.

В четвертой главе приводятся результаты разработки методики калибровки скалярного анализатора цепей P2-MBM-118 в диапазоне 78,33 до 118,1 ГГц. В данной методике установлены методы и средства калибровки САЦ в этом диапазоне частот, описана процедура измерений при определении отклонения установки и отсчета частоты, отклонения результатов измерений КСВН, отклонения результатов измерений ослабления.

Для этих режимов калибровки разработаны методики обработки результатов измерений и оценки неопределенности калибруемых параметров.

Для оценки неопределенности определения отклонения результатов измерений КСВН выбрана следующая модель:

$$\Delta_{КСВН} = K_{КСВНн} - K_{КСВНэт} + \Delta_{кв} + \Delta_{рас}, \quad (5)$$

где $\Delta_{КСВН}$ – оцениваемое отклонение измерения КСВН;

$K_{КСВНн}$ – показание калибруемого анализатора;

$K_{КСВНэт}$ – значение КСВН эталонной нагрузки;

$\Delta_{кв}$ – поправка из-за конечного разрешения калибруемого анализатора;

$\Delta_{рас}$ – поправка, обусловленная рассогласованием в измерительном тракте.

Для оценки неопределенности определения отклонения результатов измерений ослабления выбрана следующая модель:

$$\Delta_A = A_n - A_{эт} + \Delta_{кв} + \Delta_{рас}, \quad (6)$$

где Δ_A – оцениваемое отклонение измерения ослабления, дБ;

A_n – показание калибруемого анализатора, дБ;

$A_{эт}$ – значение ослабления эталонного аттенюатора, дБ;

$\Delta_{кв}$ – поправка из-за конечного разрешения калибруемого анализатора, дБ;

$\Delta_{рас}$ – поправка, обусловленная рассогласованием в измерительном тракте, дБ.

Для этих параметров составлены бюджеты неопределенности и приведены выражения стандартной и расширенной неопределенности измерения калибруемых параметров.

В **пятой главе** приведены результаты экспериментальных исследований методики метрологической аттестации и методики калибровки скалярного анализатора цепей P2-MBM-118. Приведены значения погрешностей всех измеряемых параметров при метрологической аттестации и бюджеты неопределенностей всех измеряемых параметров при калибровке.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе проведен анализ методов и технических средств измерений параметров устройств и цепей миллиметрового диапазона. Анализ показал, что для измерения параметров устройств и цепей в скалярных анализаторах наиболее используемыми являются рефлектометрические методы с использованием ГКЧ и системы АРМ. Проведен обзор современных моделей скалярных анализаторов цепей и их технических характеристик.

Разработаны методики определения метрологических характеристик скалярного анализатора цепей P2-MBM-118. Предложены и обоснованы алгоритмы обработки результатов экспериментальных исследований и оценки неопределенности измерений. Проведены экспериментальные исследования метрологических характеристик САЦ с использованием разработанных методик, сделаны выводы по полученным данным.

Практическая ценность работы заключается в том, что разработанные программа и методика метрологической аттестации и методика калибровки используются при исследовании метрологических характеристик скалярных анализаторов КВЧ диапазона, изготовленных в Центре 1.9 НИЧ БГУИР.

Результаты работы апробированы на 54-й Научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов. Инфокоммуникации. – Минск, БГУИР, 2018, и опубликованы в материалах конференции.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ

1 А Кузюков, А.Н. Методика определения метрологических характеристик скалярных анализаторов цепей миллиметрового диапазона длин волн / А.Н. Кузюков, П.А. Теслин, А.П. Белошицкий // Инфокоммуникации: Тезисы докл. к 54-й Научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов. – Минск, БГУИР, 2018 – с.141-142.

2 А Теслин, П.А. Методика определения метрологических характеристик векторных анализаторов цепей микроволнового диапазона / П.А. Теслин, А.Н. Кузюков, А.П. Белошицкий. // Инфокоммуникации: Тезисы докл. к 54-й Научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов. – Минск, БГУИР, 2018 – с.139-140.