

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

УДК 621.317.74

Теслин
Павел Андреевич

Методики определения метрологических характеристик векторных
анализаторов цепей микроволнового диапазона

АВТОРЕФЕРАТ

на соискание степени магистра технических наук

специальности 1-38 80 01 Приборостроение, метрология и информационно-
измерительные приборы и системы

Научный руководитель
Белошицкий А. П.
кандидат технических наук,
доцент

Минск 2019

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время значительная часть сложных электронных систем при эксплуатации требует измерений многих параметров и характеристик электронных компонентов. Происходящее усложнение современных электронных систем приводит к увеличению требований как к качеству, так и количеству измерений, в том числе к точности измерений различных физических величин, диапазону измеряемых параметров, чувствительности и быстродействию средств измерений.

В связи с этим происходит интенсивная замена морально и физически устаревших измерительных приборов на вновь разработанные, отвечающие современным требованиям развития микроволновой техники.

Разработка, производство и эксплуатация промышленной продукции сопровождается большим числом всевозможных измерений, разнообразных по сложности, точности и количеству контролируемых параметров. Выбор контролируемых параметров, методика и порядок их измерений для каждого объекта очень важны – они определяют объективность оценки характеристик продукции и в значительной степени производительность труда на различных этапах ее создания и эксплуатации.

Измерительная техника сама по себе оказывает подчас существенное влияние на развитие отдельных областей науки. Это положение особенно характерно для физики и техники микроволнового диапазона. Например, единица напряжения (Вольт), единица времени (секунда) и единица частоты (Герц) воспроизводятся средствами техники СВЧ.

Виды измерений микроволнового диапазона и способы цифровой обработки данных весьма разнообразны. Существуют скалярные и векторные анализаторы цепей микроволнового диапазона, дающие информацию об измерениях и параметрах в частотной области. Импульсные рефлектометры позволяют наблюдать и обрабатывать временные отклики анализируемых устройств на весьма короткие импульсные сигналы. Такие приборы обеспечивают проведение измерений волновых параметров рассеяния в стандартных коаксиальных и волноводных каналах и в нестандартных волноведущих системах (например, в полосковых линиях передачи, зондовых держателях для анализа параметров активных и пассивных микроструктур).

Развитие устройств микроволнового диапазона потребовало от средств измерений новых качественных характеристик – сокращение времени измерения параметров устройств, особенно предназначенных для работы в широком

диапазоне частот. К таким средствам измерений относятся САЦ и ВАЦ. Эти приборы созданы на основе рефлектометров.

Измерители комплексных коэффициентов передачи применяются при разработке, исследованиях, производстве и обслуживании радио- и телевизионных передатчиков, связанных систем, систем спутниковой связи (проверка развязки полосовых фильтров, переключателей, направленных ответвителей, ослабление кабелей передачи мощности и их соединителей, аттенюаторов и др.).

Возможность измерения фазы коэффициента передачи, а также КСВН и фазы коэффициента отражения четырехполюсников и наблюдения всех характеристик в диапазоне частот делает их незаменимыми при разработке узлов радиоэлектронной аппаратуры микроволнового диапазона и увеличивает быстродействие их измерений при серийном производстве и эксплуатации радиоэлектронной аппаратуры.

Таким образом разработка и производство ВАЦ и их метрологическое обеспечение являются весьма важными и актуальными задачами.

Для осуществления целей, необходимо:

- провести анализ современных методов и средств измерений комплексных параметров устройств и цепей микроволнового диапазона;
- рассмотреть устройство и принцип действия векторного анализатора цепей микроволнового диапазона;
- разработать и обосновать методики калибровки и методика поверки векторного анализатора цепей;
- провести экспериментальные исследования метрологических характеристик ВАЦ с использованием разработанных методик.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Интенсивное освоение микроволнового диапазона открывает принципиально новые возможности создания и развития устройств и систем скоростной передачи информации, радиолокации и радионавигации, радиоразведки и радиопротиводействия, связи и телевидения, космических и радиоастрономических исследований. При создании и использовании систем и устройств микроволнового диапазона уделяется большое внимание требованиям контроля параметров и их характеристик.

К числу наиболее эффективных измерительных средств, предназначенных для анализа параметров СВЧ и КВЧ устройств и относятся скалярные (САЦ) и векторные (ВАЦ) анализаторы цепей, представляющие современные высокопроизводительные приборы, позволяющие провести необходимые измерения параметров устройств с гарантированной точностью в широких частотных диапазонах с соответствующей обработкой, представлением и хранением измеренной информации о параметрах и характеристиках испытываемых устройств.

Векторные анализаторы позволяют измерять как модули, так и аргументы (фазы) параметров отражения и передачи (S -параметров) исследуемых микроволновых устройств и цепей.

Использование векторных анализаторов совместно с компьютером, позволяет создавать ряд специализированных измерителей микроволнового диапазона. Например, системы тестирования параметров антенн в ближней зоне; системы тестирования радарных приемопередающих модулей; измерительные системы для исследования диэлектрических свойств материалов.

Поддержание высоких метрологических характеристик таких сложных приборов и систем невозможно без их метрологического обеспечения и, соответственно, выполнения таких видов метрологических работ – метрологическая аттестация (при выпуске из производства), периодическая поверка или калибровка (при дальнейшей эксплуатации).

Для их проведения требуются специально разработанные и научно обоснованные методики, учитывающие специфику проведения измерений в микроволновом диапазоне, конструктивные и эксплуатационные характеристики измерителей и требования нормативных документов в этой области.

Следовательно, разработка методик определения метрологических характеристик ВАЦ микроволнового диапазона является важной и актуальной задачей.

Целью данной магистерской диссертации является разработка методик определения метрологических характеристик векторных анализаторов цепей микроволнового диапазона.

Для достижения этой цели были поставлены и решены следующие задачи:

- проведен анализ современных методов и средств измерений комплексных параметров устройств и цепей микроволнового диапазона;
- рассмотрены устройство и принцип действия векторного анализатора цепей микроволнового диапазона;
- разработаны и обоснованы методики калибровки и методика поверки векторного анализатора цепей;
- проведены экспериментальные исследования метрологических характеристик ВАЦ с использованием разработанных методик.

Новизна работы определяется следующими результатами:

- разработаны и обоснованы методика калибровки и методика поверки ВАЦ миллиметрового диапазона длин волн;
- предложены и обоснованы алгоритмы обработки результатов экспериментальных исследований векторных анализаторов цепей при их калибровке и оценке неопределенности измерений.

Практическая ценность работы заключается в том, что разработанные и обоснованные методика калибровки и методика поверки являются основой для написания методик калибровки и поверки ВАЦ микроволнового диапазона конкретных типов и успешно применяются в работе 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 комплексных параметров устройств и цепей микроволнового 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
Гомодинный	<ul style="list-style-type: none">- перенос измерительных задач с высокочастотного уровня на уровень обработки данных- относительно простым КВЧ измерительным трактам	<ul style="list-style-type: none">- более сложные алгоритмы калибровки и обработки измерительной информации
Гетеродинный	<ul style="list-style-type: none">- широкий динамический диапазон измеряемых параметров (от 60 до 80 дБ)- простые алгоритмам калибровки и обработки измерительной информации	<ul style="list-style-type: none">- сложная техническая реализация широкополосных гетеродинов, двухканальных смесителей и систем ФАПЧ,- сложность алгоритмов калибровки и измерений- малые пределы измеряемых ослаблений (не более 40 дБ)- необходимость использования генератора с повышенным уровнем выходной мощности- высокая схемотехническая сложность КВЧ измерительного тракта- высокие требования к параметрам отдельных компонентов этого тракта

Во второй главе описывается устройства и принципа действия векторного анализатора цепей Р4- МВМ -118. Векторный анализатор цепей Р4-МВМ-118 предназначен для автоматизированного измерения комплексных коэффициентов передачи и отражения ($S_{11(22)}$ и $S_{21(12)}$) в диапазоне частот от 78,33 до 118,10 ГГц волноводных устройств, имеющих волноводный канал сечением $2,4 \times 1,2$ мм с цифровым отсчетом измеряемых величин и воспроизведением их частотных характеристик в декартовой системе координат на экране анализатора.

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:

- 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 $|S_{11(22)}| \pm (0,50 + 0,07|S_{11(22)}|)$ дБ;
- диапазон измерения модуля коэффициента передачи от 0 до минус 50 дБ;
- пределы допускаемой погрешности при измерении модуля коэффициента передачи $|S_{21(12)}|$ не более $\pm (0,30 + 0,05|S_{21(12)}|)$ дБ;
- диапазон измерения фазы коэффициента отражения и фазы коэффициента передачи от минус 180 до плюс 180 градусов;
- пределы допускаемой погрешности при измерении фазы коэффициента отражения не более ± 8 градусов;
- пределы допускаемой погрешности при измерении фазы коэффициента передачи не более ± 7 градусов;

Анализатор состоит из блока измерительного (БИ) и преобразователя выносного. Схема подключения объекта измерений к анализатору представлена на рисунке 1.



Рисунок 1 – Схема подключения объекта измерений к анализатору

Принцип действия анализатора основан на отдельном выделении падающей на объект измерения (ОИ), отраженной и прошедшей волн КВЧ сигнала. Напряжения, пропорциональные параметрам падающей, отраженной и прошедшей волн, полученные с использованием специального алгоритма вычисления, преобразуются в значения измеряемых параметров: модуль $|S_{11(22)}|$ и фазу $argS_{11(22)}$ коэффициента отражения (КО), коэффициента стоячей волны по напряжению (КСВН), модуль $|S_{21(12)}|$ и фазу $argS_{21(12)}$ коэффициента передачи. Измеряемая информация отображается в виде частотных зависимостей в декартовой системе координат. Отсчет значений измеряемых параметров производится с помощью маркера в любой частотной точке диапазона рабочих частот анализатора.

В третьей главе приводятся результаты разработки методики калибровки векторного анализатора цепей Р4-МВМ-118 в диапазоне 78,33 до 118,1 ГГц. В этой методике установлены методы и средства калибровки ВАЦ в этом диапазоне частот, описана процедура измерений при определении отклонения результатов измерений КСВН, отклонения результатов измерений ослабления, отклонения результатов измерений фазы коэффициентов передачи, отклонения результатов измерений фазы коэффициентов отражения.

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:

$$\Delta_{K_{CTU}} = K_{CTU_{и}} - K_{CTU_{эт}} + \Delta_{кв} + \Delta_{рас}, \quad (1)$$

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

$K_{CTU_{и}}$ – показание калибруемого анализатора;

$K_{CTU_{эт}}$ – 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:

$$\Delta_A = A_{\text{и}} - A_{\text{эт}} + \Delta_{\text{кв}} + \Delta_{\text{рас}}, \text{ дБ}, \quad (2)$$

где Δ_A – оцениваемое отклонение измерения ослабления, дБ;

$A_{\text{и}}$ – показание калибруемого анализатора, дБ;

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

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

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

Для оценки неопределенности определения отклонения результатов измерений фазы коэффициентов передачи выбрана следующая модель:

$$\Delta_{\varphi_{\text{КП}}} = \varphi_{\text{КПи}} - \varphi_{\text{КПэт}} + \Delta_{\text{кв}} + \Delta_{\text{рас}}, \text{ град.}, \quad (3)$$

где $\Delta_{\varphi_{\text{КП}}}$ – оцениваемое отклонение измерения фазы КП, град.;

$\varphi_{\text{КПи}}$ – показание калибруемого анализатора, град.;

$\varphi_{\text{КПэт}}$ – значение фазы аттенюатора, град.;

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

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

Для оценки неопределенности определения отклонения результатов измерений фазы коэффициентов отражения:

$$\Delta_{\varphi_{\text{КО}}} = \varphi_{\text{КОи}} - \varphi_{\text{КОэт}} + \Delta_{\text{кв}} + \Delta_{\text{рас}}, \text{ град.}, \quad (4)$$

где $\Delta_{\varphi_{\text{КО}}}$ – оцениваемая погрешность измерения фазы КО, град.;

$\varphi_{\text{КОи}}$ – показание калибруемого анализатора, град.;

$\varphi_{\text{КОэт}}$ – значение фазы эталонной нагрузки, град.;

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

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

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

В **четвертой главе** приводятся результаты разработки методики поверки векторного анализатора цепей P4-MVM-118 в диапазоне 78,33 до 118,1 ГГц. В

этой методике установлены методы и средства поверки ВАЦ в этом диапазоне частот, описана процедура проверки диапазона измерения модуля коэффициента отражения и определение погрешности при измерении модуля коэффициента отражения; процедура проверки диапазона измерения модуля коэффициента передачи (ослабления) и определение погрешности при измерении модуля коэффициента передачи; процедура проверки диапазона измерения фазы коэффициента отражения и определение погрешности при измерении фазы коэффициента отражения; процедура проверки диапазона измерения фазы коэффициента передачи и определение погрешности измерения фазы коэффициента передачи.

Для этих режимов поверки разработаны методики обработки результатов измерений и оценки погрешности поверяемых параметров.

Для определения погрешности при измерении модуля коэффициента отражения используется формула

$$\Delta_{|S_{11(22)}|} = |S_{11(22)}|_{и} - |S_{11(22)}|_{э}, \quad (5)$$

где $|S_{11(22)}|_{и}$ – результат измерения, полученный с помощью измерителя, дБ;
 $|S_{11(22)}|_{э}$ – эталонное значение $|S_{11(22)}|$, дБ.

Для определения погрешности при измерении модуля коэффициента передачи используется формула

$$\Delta_{|S_{21(12)}|} = |S_{21(12)}|_{и} - |S_{21(12)}|_{э}, \quad (6)$$

где $|S_{21(12)}|_{и}$ – результат измерения, полученный с помощью измерителя, дБ;
 $|S_{21(12)}|_{э}$ – эталонное значение $|S_{21(12)}|$, дБ.

Для определения погрешности при измерении фазы коэффициента отражения используется формула

$$\Delta_{argS_{11(22)}} = argS_{11(22)}_{и} - argS_{11(22)}_{э}, \quad (7)$$

где $argS_{11(22)}_{и}$ – измеренное с помощью измерителя значение фазового сдвига коэффициента отражения, градус;

$argS_{11(22)}_{э}$ – значение фазового сдвига, воспроизводимого мерами фаз из комплекта КМФС-3, градус.

Для определения погрешности при измерении фазы коэффициента передачи используется формула

$$\Delta_{argS_{21(12)}} = argS_{21(12)и} - argS_{21(12)э}, \quad (8)$$

где $argS_{21(12)и}$ – измеренное с помощью измерителя значение фазового сдвига коэффициента передачи, градус;

$argS_{21(12)э}$ – значение фазового сдвига, воспроизводимого мерами фаз из комплекта КМФС-3, градус

В пятой главе приведены результаты экспериментальных исследований методики калибровки и методики поверки векторного анализатора цепей Р4-МВМ-118. Приведены бюджеты неопределенностей всех измеряемых параметров при калибровке и значения погрешностей всех измеряемых параметров при поверке.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе проведен анализ современных методов и средств измерений комплексных параметров устройств и цепей микроволнового диапазона. Показано, что основными методами измерений в микроволновом диапазоне волн являются гомодинный и гетеродинный методы. Описаны основные параметры устройств микроволнового диапазона и требования к техническим средствам их измерения. Рассмотрены устройство и принцип действия векторного анализатора цепей микроволнового диапазона.

Разработана методика калибровки векторного анализатора цепей микроволнового диапазона. Представлены и обоснованы алгоритмы оценки неопределенностей калибруемых параметров.

Разработана методика поверки ВАЦ микроволнового диапазона. Представлены и обоснованы алгоритмы оценки погрешности поверяемых параметров.

Проведены экспериментальные исследования параметров ВАЦ с использованием разработанных методик, сделаны выводы по полученным данным.

Практическая ценность работы заключается в том, что разработанные и обоснованные методики калибровки и методика поверки являются основой для калибровки и поверки ВАЦ микроволнового диапазона конкретных типов, а так же при исследовании метрологических характеристик этого прибора.

Результаты работы внедрены в практическую деятельность Центра 1.9 НИЧ БГУИР, апробированы на 54-й Научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов. Инфокоммуникации: Тезисы докл. – Минск, БГУИР, 2018, и опубликованы в материалах конференции.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ

1 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.

2 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.