

На правах рукописи



Ладур Александр Анатольевич

**ЭЛЕКТРОННЫЙ КАЛИБРАТОР
ВЕКТОРНОГО АНАЛИЗАТОРА ЦЕПЕЙ**

Специальность 05.12.07 – Антенны, СВЧ-устройства и их технологии

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск – 2013

Работа выполнена в ЗАО «Научно-производственная фирма «Микран» и в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» (ТУСУР)

НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ:

Малютин Николай Дмитриевич,
доктор технических наук, профессор,
начальник научного управления ТУСУРа

ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ:

Бабак Леонид Иванович,
доктор технических наук, профессор кафедры компьютерных систем
в управлении и проектировании ТУСУРа

Сержантов Алексей Михайлович,
кандидат технических наук, старший научный сотрудник
ФГБУН «Институт физики им. Л.В. Киренского» СО РАН, г. Красноярск

ВЕДУЩАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ:

ФГБОУ ВПО «Новосибирский государственный технический университет»,
г. Новосибирск

Защита состоится 24 декабря 2013 г. в 9 часов на заседании диссертационного совета Д212.268.01 при Томском государственном университете систем управления и радиоэлектроники по адресу:

634050, г. Томск, пр. Ленина, 40, ауд. 201.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники по адресу:

634050, г. Томск, ул. Вершинина, 74.

Автореферат разослан «___» _____ 2013 г.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, подписанные составителем и заверенные гербовой печатью организации, просим высылать по адресу: ученому секретарю диссертационного совета Д 212.268.01 Филатову А.В., 634050, г. Томск, проспект Ленина, 40.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д212.268.01
доктор технических наук, профессор

А.В. Филатов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

В настоящее время наблюдается стремительное развитие радиоэлектронных средств в диапазоне сверхвысоких частот (СВЧ). Прогресс в современной радиоэлектронной технике невозможен без опережающего развития радиоизмерительной техники. Анализаторы цепей относятся к важнейшим средствам измерения параметров электрических цепей и устройств СВЧ-диапазона. Наиболее сложными являются векторные анализаторы цепей (ВАЦ), которые позволяют за одно присоединение измерить амплитудные и фазовые параметры в частотной и временной области исследуемых устройств (ИУ) в коаксиальных и волноводных СВЧ-трактах или монолитных интегральных схем на пластине при работе в комплексе с зондовыми станциями.

Теоретический аппарат измерений на СВЧ и описание современных аппаратных средств анализа цепей в системном виде представлены в монографии Андропова Е.В. и Глазова Г.Н. Наиболее полно рассмотрена теория преобразования сигналов, спектрального анализа СВЧ-цепей, принципы построения векторных анализаторов цепей в монографии и работах Гусинского А.А., Шарова Г.А. и Кострикина А.М. Фундаментальные основы и практические реализации векторных анализаторов цепей подробно изложены в работах *Beatty R.W.*, Хибеля М., *Ballo D.*, Пивака А.В., Румянцева А., Чупрова И.И., *Adam S.F.* и др. Существенный вклад в развитие векторных импульсных анализаторов цепей внесли Семенов Э.В., Малютин Н.Д., Лощилов А.Г.

Для обеспечения точных измерений цепей необходимо провести калибровку векторного анализатора и коррекцию измеряемых данных. Наиболее широко используемыми в настоящее время являются семейства калибровок векторных анализаторов цепей *SOLT* (*Short* (англ.) – короткозамкнутая нагрузка (КЗ), *Open* – нагрузка холостого хода (ХХ), *Load* – согласованная нагрузка (СН), *Thru* – перемычка между портами) и *TRL* (*Thru* – перемычка между портами, *Reflect* – мера отражения, *Line* – линия передачи между портами), основанные на 10- и 8- параметрических моделях векторного анализатора цепей соответственно.

В работах Губы В.Г., Савина А.А. представлены классификация и анализ методов калибровки, рассматриваются погрешности измерений, модели ошибок и калибровка ВАЦ. Различные семейства калибровок, их особенности и применение, модели ВАЦ рассмотрены в работах Хибеля М., *Rytting D.*, *Rumiantsev A.*, *Ridler N.*, *Ballo D.*, *Ostwald O.*, *Fitzpatrick J.* и др.

Для определения ошибок калибровки проводится процедура верификации. Вопросы верификации рассмотрены в работах *Beatty R.W.*, *Maury M.A.*, *Simpson G.R.*, Хибеля М., *Ballo D.* Методики факторной верификации описаны Губой В.Г., Савиным А.А.

Для калибровки векторных анализаторов цепей традиционно используются наборы калибровочных механических мер. Типовой набор калибровочных механических мер может комплектоваться в зависимости от потребностей пользователя, типа проводимой калибровки или класса обеспечиваемой калибровки. Информацию о составе и особенностях калибровочных наборов, описание мер

представляют производители в каталогах, технической документации и публикациях. Общая информация рассматривается в работах многих вышеперечисленных авторов, так как калибровка неразрывно связана с применением ВАЦ. Требования к механическим нагрузкам определены и закреплены в государственных и международных стандартах. Использование механических мер обеспечивает высокую точность калибровки, но имеет ряд недостатков: высокая трудоемкость и длительность процесса калибровки; требование к высокой квалификации персонала; большая вероятность ошибки оператора; повышенный износ калибровочных мер, соединителей кабеля и портов анализатора.

Недостатки калибровочных механических мер отсутствуют у электронного калибратора (ЭК), позволяющего проводить калибровку в течение нескольких минут при минимальном количестве действий оператора. Таким образом, ЭК представляет собой наиболее перспективный инструмент калибровки векторного анализатора цепей. Его создание требует решения обширного спектра вопросов калибровки, разработки и технологии производства. Вопросы электронной калибровки рассматриваются в технической документации, описаниях, патентах и публикациях производителей электронных калибраторов. Из отечественных устройств можно отметить электронные калибраторы компании ООО «Планар» АСМ6000Т и АСМ8000Т, но их рабочий диапазон ограничен частотой 6 и 8 ГГц соответственно.

Принцип работы калибратора состоит в последовательном подключении к измерительным портам нагрузок с импедансами, соответствующими определенным калибровочным нагрузкам (далее нагрузка). Применяемые методы электронной калибровки подобны методам, используемым при калибровке механическими мерами. Дополнительным способом повышения точности автоматической калибровки может быть использование нескольких нагрузок в каждом диапазоне частот, что обеспечивает избыточную информацию для определения значений погрешности.

Цель работы

Исследование и оптимизация схемы и конструкции СВЧ-блока калибратора, разработка серийного электронного калибратора, определение максимальной погрешности векторного анализатора цепей с учетом влияния точности характеристики и температурной нестабильности нагрузок калибратора.

Задачи исследования

Для достижения поставленной цели решались следующие основные задачи.

1. Экспериментальное исследование нагрузок калибратора в частотной области при воздействии линейного частотно-модулированного сигнала с дискретной перестройкой по частоте и во временной области в режиме импульсного воздействия.

2. Разработка моделей электронного калибратора в режиме четырехполюсника и двухполюсника на основе расчетно-экспериментального метода при моделировании нагрузок калибратора с использованием полученных частотных и импульсных характеристик.

3. Экспериментальное исследование температурной зависимости характе-

ристик нагрузок электронного калибратора.

4. Оптимизация схемы и конструкции СВЧ-блока на основе расчетно-экспериментального метода и результатов экспериментальных исследований; определение минимального времени выхода на режим.

5. Подтверждение соответствия требуемой точности измерения векторным анализатором цепей, калиброванным с использованием разработанного калибратора, путем проведения поверки согласно методике, утвержденной ГЦИ СИ ФГУП «СНИИМ».

6. Разработка метода определения максимальной погрешности измерения коэффициента отражения векторным анализатором цепей с учетом влияния точности характеристики и температурной нестабильности частотных характеристик нагрузок электронного калибратора.

Методы исследования

Для решения перечисленных выше задач применялись методы математического моделирования, моделирования на основе современных САПР, экспериментальные исследования с использованием аттестованных средств измерений, импульсный метод измерения. При создании моделей нагрузок электронного калибратора использовался расчетно-экспериментальный метод экстракции параметров элементов устройств. Проверка основных теоретических положений осуществлялась на основе экспериментальных исследований макетов и опытных образцов.

Научная новизна

1. Предложен метод и алгоритм экстракции эквивалентных параметров элементов электронного калибратора, основанный на комбинировании частотных измерений, сверхширокополосной рефлектометрии и моделировании. Показано, что экстракция параметров из экспериментальных данных и вариация их значений при моделировании позволяют существенно уменьшить рассогласование результатов эксперимента и моделирования.

2. Проведены оригинальные исследования температурных зависимостей частотных характеристик нагрузок электронного калибратора, позволившие выявить причины и устранить нестабильность частотной характеристики нагрузки короткого замыкания путем схемно-конструктивной оптимизации, а также количественно определить температурную зависимость характеристик нагрузок калибратора.

3. Предложен метод определения максимальной погрешности измерения коэффициента отражения векторным анализатором цепей после калибровки с использованием электронного калибратора, учитывающий влияние погрешности характеристики и температурную зависимость частотных характеристик нагрузок калибратора.

Практическая ценность

1. Разработан и внедрен в серийное производство электронный калибратор векторного анализатора цепей. В результате исследований определено время выхода на режим, при котором отклонение частотных характеристик нагрузок не превышает минус 50 дБ с течением времени. Разработанный электронный калибратор защищен патентом на полезную модель №126845.

2. Предложенный метод экстракции параметров электронного калибратора реализован при построении моделей электронного калибратора в режиме четырехполосника и двухполосника, которые позволяют определить влияние каждого элемента схемы и конструкции СВЧ-блока на частотные характеристики нагрузок электронного калибратора, отслеживать влияние технологических и конструктивных отклонений при отработке конструкции и в серийном производстве.

3. Применение метода определения максимальной погрешности векторного анализатора цепей после калибровки с использованием электронного калибратора, учитывающего влияние погрешности характеристики и температурной нестабильности частотных характеристик нагрузок, позволяет сформулировать требования к калибровочным нагрузкам для обеспечения необходимой точности измерений.

Реализация и внедрение результатов исследования

Работа выполнена в научно-производственной фирме «Микран» (департамент информационно-измерительных систем) и в Томском государственном университете систем управления и радиоэлектроники на кафедре радиоэлектронных технологий и экологического мониторинга (РЭТЭМ). Материалы работы обсуждались на кафедре РЭТЭМ и в СКБ «Смена» ТУСУРа.

Результаты диссертационной работы использовались при разработке электронного калибратора ЭК2-20, внедренного в серийное производство, для векторного анализатора цепей Р4М-18 производства «НПФ «Микран».

Апробация результатов

Основные положения и результаты докладывались:

- на всероссийской научно-технической конференции «Методы и средства измерений электрических величин», г. Туапсе, 2007;
- международной научно-практической конференции «Электронные средства и системы управления», г. Томск, 2011;
- международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо), г. Севастополь, 2012, 2013.

Научные положения, выносимые на защиту

1. Реализация метода экстракции эквивалентных параметров элементов электронного калибратора на основе комбинирования частотных измерений, сверхширокополосной рефлектометрии и моделирования позволяет уточнить структуру и параметры элементов эквивалентной схемы и уменьшить рассогласование модуля коэффициента отражения, измеренного экспериментально и полученного при моделировании, в режиме «на проход» до 0,5 дБ.

2. Экспериментальные исследования режимов работы электронного калибратора при изменении температуры и вариации параметров элементов в режиме короткого замыкания позволяют выделить элементы, обладающие наибольшим влиянием на стабильность режимов калибратора, и путем схемно-конструктивной оптимизации снизить нестабильность частотной характеристики калибратора в режиме короткого замыкания с минус 28 дБ до минус 47 дБ в рабочем диапазоне температур от 15 до 35 °С.

3. Разработанный метод определения максимальной погрешности измерения коэффициента отражения векторным анализатором цепей, калиброванным с использованием электронного калибратора, основанный на методиках факторной верификации после выполнения калибровки и определения уровня неисключенной систематической погрешности, учитывающий экспериментально полученные данные о погрешностях и температурной нестабильности частотных характеристик нагрузок калибратора, позволяет определить максимальную погрешность измерений векторным анализатором.

Личный вклад соискателя

Все приведенные в диссертации материалы получены соискателем или при его непосредственном участии.

Публикации

По результатам выполненных исследований опубликовано 8 работ, в том числе в 2 журналах, включенных в перечень ВАК.

Получен патент на полезную модель «Электронный калибратор векторного анализатора цепей» № 126845. Подана заявка на изобретение «Определение ориентации подключения электронного калибратора к векторному анализатору цепей» № 2012141918.

Структура диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, 4 разделов, заключения, 7 приложений, списка литературы, включающего 166 источников, изложена на 151 странице и поясняется 112 рисунками и 4 таблицами.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, определены цель и задачи исследования, показана научная новизна и практическая ценность работы, изложены научные положения, выносимые на защиту.

В **первом разделе** проведен анализ развития векторных анализаторов цепей, рассмотрены погрешности измерения, основные модели векторных анализаторов цепей, наиболее распространенные семейства калибровок, методы верификации. Рассмотрены механический и автоматический способы калибровки, структура и состав электронного калибратора. На основе материалов раздела сформулированы задачи исследования.

Принцип работы электронного калибратора заключается в следующем. Программный комплекс ВАЦ управляет подключением нагрузок к измерительным портам анализатора, обрабатывает измеренные данные, сравнивает их с эталонным описанием этих нагрузок, затем находит факторы систематической погрешности, которые используются для проведения коррекции последующих измерений.

В калибраторе реализуется калибровка семейства SOLT в частотном диапазоне до 20 ГГц и используется четыре нагрузки для каждого порта (холостой ход (XX), короткое замыкание (КЗ), согласованная (СН), рассогласованная (РН)), а также известный адаптер в виде режима «на проход» (рисунок 1).

В качестве калибровочного описания ЭК используется табличное описание нагрузок, предотвращающее потери точности, по сравнению с полиномиальным способом описания калибровочных мер. Для контроля калибровки используется режим аттенюатора (АТТ, см. рисунок 1), который включается после окончания процедуры автоматической калибровки.

Электронный калибратор (рисунок 2) состоит из СВЧ-блока (1), плат управления (2), соединителей (3) и корпуса (4). Основой электронного калибратора является СВЧ-блок.

Во **втором разделе** решается задача построения моделей СВЧ-блока калибратора в режимах четырехполюсника и двухполюсника, имитирующих соответственно двухпортовый режим (режим «на проход») и однопортовые нагрузки (XX, КЗ, СН).

В основе проведенных исследований данного раздела лежит расчетно-экспериментальный метод, впервые предложенный Мещановым В.П., развитие которого позволило сформулировать и реализовать метод экстракции параметров с использованием экспериментальных данных, полученных посредством измерений векторным анализатором цепей и импульсным векторным анализатором при сверхширокополосном импульсном воздействии.

В процессе разработки метода экстракции эквивалентных параметров элементов калибратора оказалось невозможным применить процедуру математического исключения параметров цепей (англ. *de-embedding*), которая позволяет устранить влияние других элементов на результат измерений параметров объекта исследований. В этом состоит специфика решаемой задачи. В метаматематическом смысле анализ эквивалентной схемы с целью определения недостающих параметров элементов приводит к неоднозначности решения, а с точки зрения физики – к потере адекватности волновых процессов, получаемых на модели и в реальной конструкции ЭК.

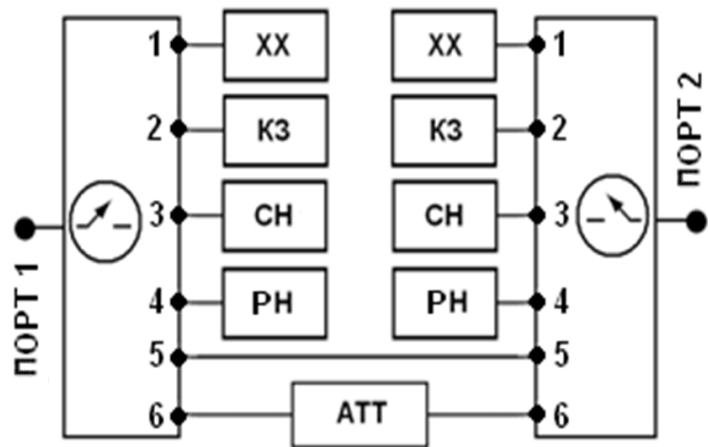


Рисунок 1 – Схема СВЧ-блока калибратора

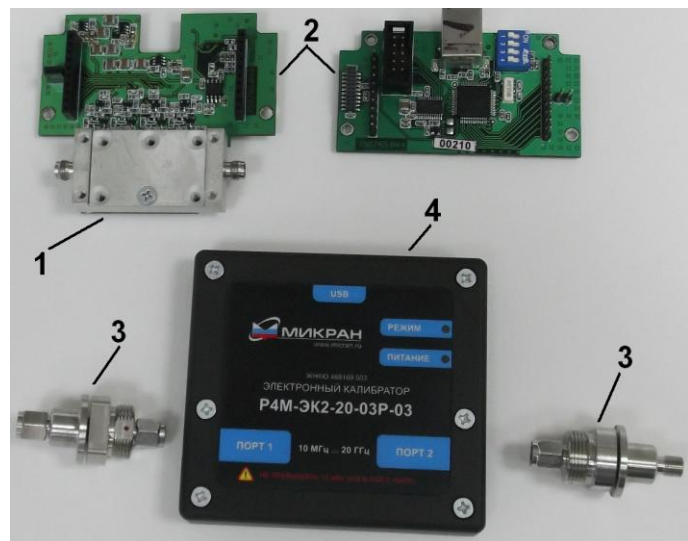


Рисунок 2 – Электронный калибратор:
1 – СВЧ-блок, 2 – платы управления,
3 – коаксиальные переходы, 4 – корпус

Общий алгоритм метода включает следующие этапы его реализации после проектирования и изготовления прототипа калибратора.

1. Накопление экспериментальных данных о частотных характеристиках ЭК в режиме «на проход» и «на отражение» (режим четырехполюсника и режимы двухполюсника), полученных с помощью векторного анализатора цепей, калиброванного с использованием механического набора мер.

2. Получение экспериментальных данных о характеристиках ЭК при сверхширокополосном импульсном воздействии: отклика в режиме «на проход» и отклика в виде рефлектограмм в режимах двухполюсника (XX, КЗ, СН).

3. Построение модели электронного калибратора первого приближения в виде эквивалентных схем для указанных выше режимов его работы, расчет частотных характеристик устройства.

4. Анализ расчетных и экспериментальных частотных характеристик и отклика на воздействие сверхширокополосным импульсом с целью выявления максимального расхождения и определение параметров, в наибольшей степени влияющих на ошибки в расчетах, путем варьирования значений параметров элементов эквивалентной схемы. При этом предпочтение отдается варьированию параметров, определяющих потери в схеме «на проход».

5. Решение задачи экстракции параметров, изменение которых характеризуется наибольшим изменением потерь в схеме «на проход».

6. Анализ рефлектограмм с целью определения координат точек существенного отражения и определения характера импеданса элементов, представляющих неоднородности в тракте передачи сигналов в ЭК.

7. Повторение процедуры экстракции параметров элементов, существенно влияющих на отражения в режиме работы ЭК «на проход».

8. Повторное выполнение алгоритма для определения значений параметров элементов электронного калибратора в режимах двухполюсника (XX, КЗ, СН) с учетом значений, полученных при построении модели ЭК в режиме четырехполюсника.

9. Анализ частотных характеристик электронного калибратора по результатам экстракции эквивалентных параметров элементов. Определение влияния конструктивных и технологических допусков или отклонений на частотные характеристики нагрузок электронного калибратора, при необходимости доработка конструкции и требований к сборке СВЧ-блока электронного калибратора.

Рассмотрим результаты основных этапов реализации предложенного метода.

Измерения частотных характеристик нагрузок электронного калибратора проводились с помощью векторного анализатора цепей *Agilent E8364B*, калиброванного с использованием набора механических мер *Agilent 85052C*, обеспечивающего высокоточную калибровку семейства *TRL*. Для ЭК в режиме «на проход» частотные зависимости модуля коэффициента отражения (КО) и модуля коэффициента передачи (КП) приведены на рисунке 3. КО и КП определялись по формулам

$$KO = 20 \cdot \log(|S_{11}|),$$

$$KP = 20 \cdot \log(|S_{21}|),$$

где S_{11} и S_{21} – элементы матрицы рассеяния.

Измерения во временной области выполнялись на установке, включающей (рисунок 4): персональный компьютер; генератор видеоимпульсов на базе задающего генератора *GZ1105DLP2* и формирователя отрицательного импульса *GZ1117DN-35* производства *Geozondas*; резистивный согласованный тройник *PSPL 5372*; аттенюаторы (АТТ1 и АТТ2) *Mini-Circuits BW-S20-2W263+*; стробоскопический осциллограф *Tektronix DSA 8300* со стробоскопическим смесителем *80E04*. Исследуемое устройство включается между аттенюатором АТТ2 и выходом тройника. При такой схеме можно наблюдать импульсные отраженные сигналы (рефлектограммы) и сигнал по схеме «на проход». Рефлектограммы содержат дополнительную информацию о неоднородностях в тракте СВЧ-блока электронного калибратора. Верификация путем искусственного внесения неоднородности позволяет идентифицировать причины и точку рассогласования. Точная информация о точках локализации и характере проявления отражения дает преимущество при уточнении эквивалентной модели. Результаты исследования с помощью сверхширокополосного импульсного воздействия представлены на рисунке 5, где отмечены зондирующий (1), отраженный (2) и прошедший (3) сигналы, а также отражения от неоднородностей в тракте (4) и (5), обусловленные переходами между микрополосковыми линиями в виде перемычек.

Результаты исследования с помощью сверхширокополосного импульсного воздействия представлены на рисунке 5, где отмечены зондирующий (1), отраженный (2) и прошедший (3) сигналы, а также отражения от неоднородностей в тракте (4) и (5), обусловленные переходами между микрополосковыми линиями в виде перемычек.

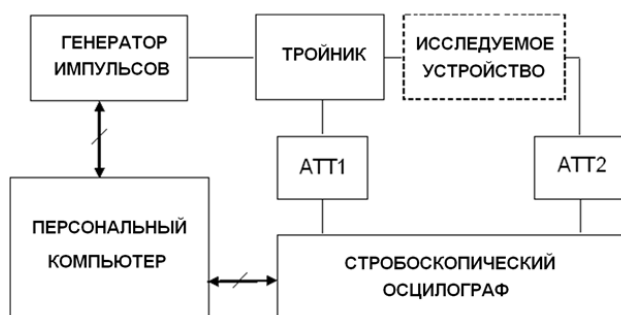


Рисунок 4 – Структурная схема экспериментальной установки импульсных измерений

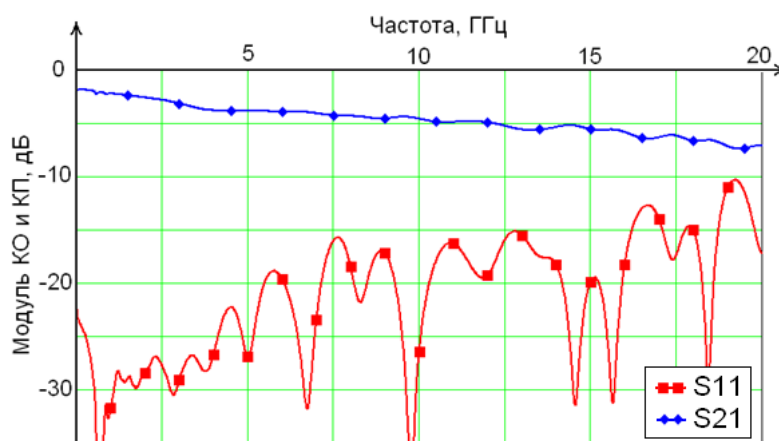


Рисунок 3 – Частотные зависимости модуля коэффициента отражения и передачи, измеренные с помощью векторного анализатора цепей

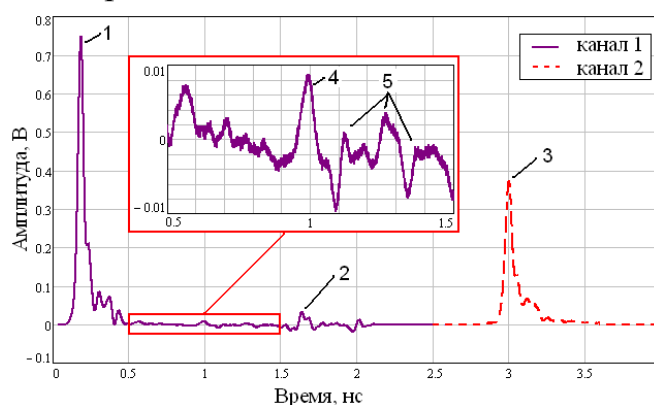


Рисунок 5 – Импульсные характеристики калибратора в режиме «на проход»

Принципиальная схема СВЧ-блока не учитывает топологические и конструктивные особенности СВЧ-тракта электронного калибратора, поэтому возникает проблема точного моделирования. Результаты моделирования электронного калибратора в режиме «на проход» по принципиальной схеме с учетом мик-

рополосковых линий и идеального коаксиально-микророскового перехода имеют значительные расхождения с экспериментальными данными. Так, разница между расчетными и экспериментальными значениями модуля КП увеличивается с ростом частоты и достигает 3 дБ (рисунок 6), а разница между максимальными уровнями коэффициентов отражения составляет 9 дБ.

В результате анализа экспериментально полученных частотных и импульсных характеристик, а также модели первого приближения разработана модель в виде эквивалентной схемы электронного калибратора в режиме «на проход», учитывающая основные факторы, влияющие на частотные зависимости коэффициентов отражения и передачи (рисунок 7).

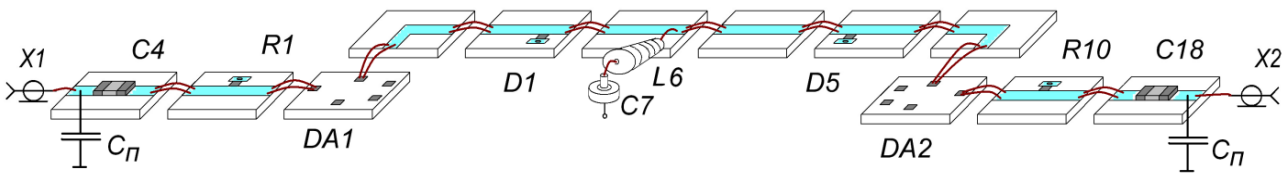


Рисунок 7 – Эквивалентная схема режима «на проход» электронного калибратора

Поэтапная реализация метода по разработанному алгоритму экстракции позволила определить количественные значения параметров элементов схемы: частотно-зависимые погонные сопротивления и проводимости микроросковых линий, параметры перемычек, паразитные емкости неоднородностей на входе и выходе ЭК.

Результаты моделирования эквивалентной схемы, учитывающей основные влияющие факторы, имеют качественное и количественное совпадение с экспериментальными данными (рисунок 8). Максимальная разница модулей

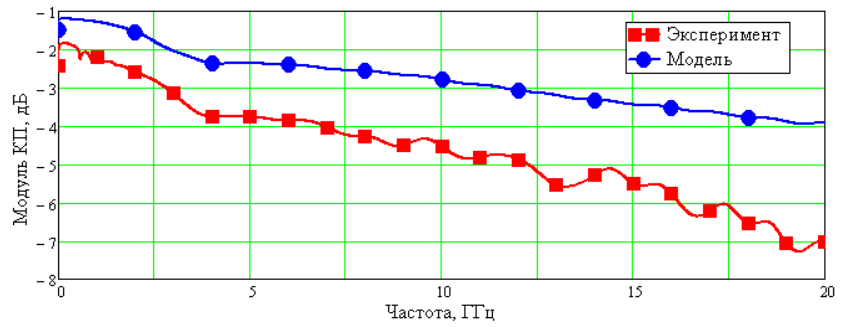


Рисунок 6 – Расчетная и экспериментальная частотная зависимость модуля коэффициента передачи электронного калибратора в режиме «на проход»

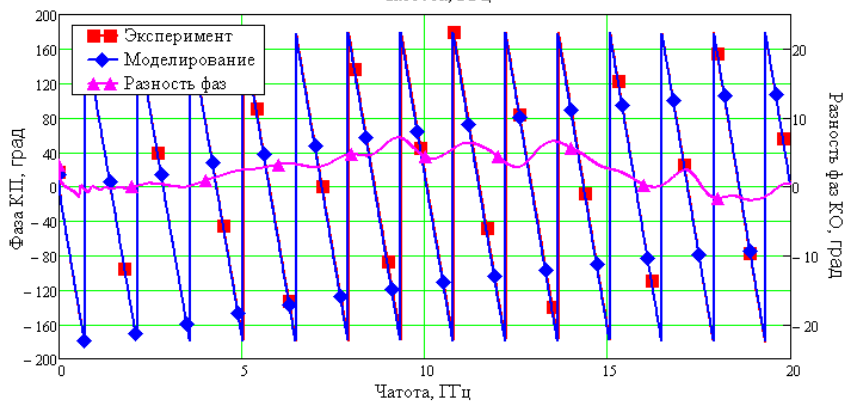
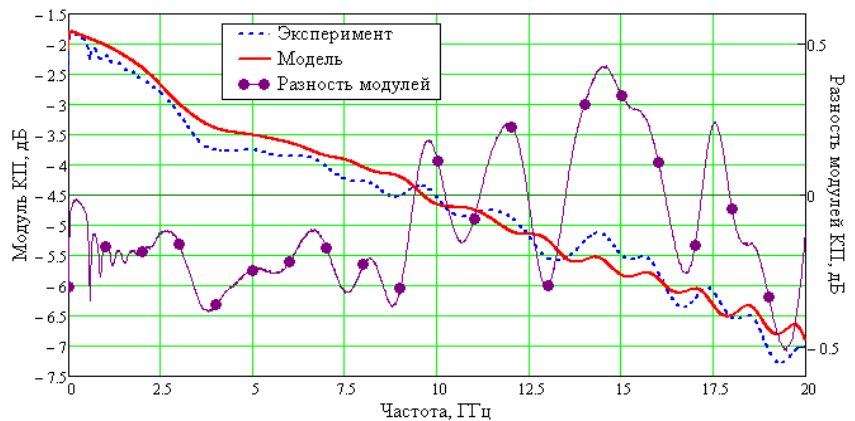


Рисунок 8 – Частотные зависимости модуля и фазы коэффициента передачи калибратора в режиме «на проход» после экстракции основных параметров

передачи составляет не более 0,5 дБ, а разница фаз КП не превышает 7°, при этом максимальные уровни коэффициента отражения практически совпадают по величине, а локальные минимумы отражения совпадают по частоте.

По такому же алгоритму с учетом значений параметров, полученных при построении модели ЭК в режиме четырехполюсника, определены значения параметров его элементов в режимах двухполюсника (ХХ, КЗ, СН). Полученные частотные характеристики также имеют хорошее качественное и количественное совпадение.

Таким образом, построена модель электронного калибратора для всех режимов работы и показано, что реализация метода экстракции эквивалентных параметров элементов электронного калибратора на основе комбинирования частотных измерений, сверхширокополосной рефлектометрии и моделирования позволяет существенно уменьшить рассогласование данных эксперимента и расчета.

Третий раздел посвящен исследованию температурной нестабильности нагрузок электронного калибратора и схемно-конструктивной оптимизации параметров нагрузок для обеспечения требуемой точности калибровки, определению времени выхода на режим и проведению поверки векторного анализатора цепей, калиброванного с использованием электронного калибратора, для подтверждения его соответствия техническим условиям.

При испытаниях макета электронного калибратора была выявлена существенная зависимость точности измерения векторным анализатором цепей от температуры окружающей среды и времени с момента включения электронного калибратора. Вследствие этого возникла необходимость исследования электронного калибратора и обеспечения требований к калибровке в диапазоне рабочих температур согласно техническим условиям на ВАЦ, т.е. от 15 до 35 °С.

Путем экспериментальных исследований определена температурная нестабильность однопортовых и двухпортовых нагрузок электронного калибратора. Отклонение КО и КП рассчитывалось по формуле

$$\Delta(T) = 20 \cdot \log |S^{(1)} - S^{(2)}|,$$

где $\Delta(T)$ – отклонение КО (КП) при изменении температуры;

S^1 и S^2 – значение комплексных КО (КП) при температуре 1 и 2.

Исследование калибратора в режиме «на проход» показало, что $\Delta(T)$ КО и КП имеет максимальное значение минус 46 и минус 43 дБ соответственно, что является невысоким показателем стабильности, но не оказывает существенного влияния на калибровку, так как возможно применение алгоритмов калибровки с «неизвестным адаптером». Отклонение КО и КП в режиме «аттенюатор» показывает высокую стабильность меньше минус 50 дБ в диапазонах температур 15 – 25 °С и 25 – 35 °С. Исследование однопортовых нагрузок показало, что нагрузка холостого хода и согласованная нагрузка имеют отклонение КО не хуже минус 50 дБ в обоих диапазонах изменения температуры.

Нагрузка короткого замыкания имеет отклонение, достигающее значения минус 28 дБ на частоте 1,8 ГГц при изменении температуры от 25 до 35 °С (рисунок 9, а). Из рисунка 9, б видно, что изменение модуля коэффициента отра-

жения в диапазоне температур от 10 до 50 °С достигает 1 дБ на частотах 1,3 – 2,5 ГГц. Это существенно влияет на калибровку с использованием ЭК. В диссертации решена задача уменьшения $\Delta(T)$ КО в режиме КЗ.

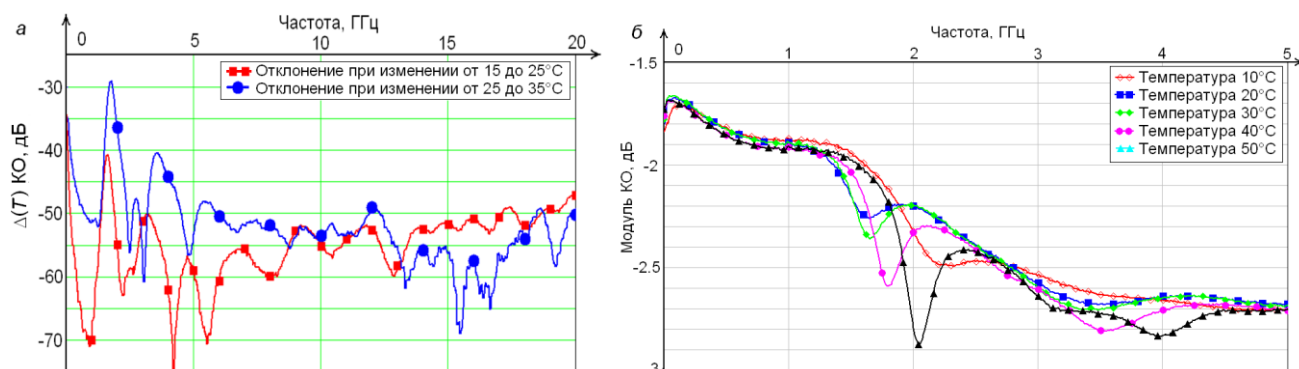


Рисунок 9 – Частотная зависимость отклонения коэффициента отражения (а) и модуля коэффициента (б) нагрузки короткого замыкания при изменении температуры

Путем анализа конструкции и измеренных характеристик установлено, что резонанс образован контуром емкости конденсатора и паразитной индуктивности соединительных перемычек в цепи короткого замыкания по СВЧ, а смещение центральной частоты резонанса с изменением температуры обусловлено изменением емкости. В целях исключения или снижения температурной зависимости частотных характеристик нагрузок калибратора предложены схемные и конструктивные варианты решения задачи повышения температурной стабильности.

Вследствие отсутствия данных о температурных зависимостях значений параметров элементов проведена схемно-конструктивная оптимизация на основе расчетно-экспериментального метода. Исследовано несколько макетов. При этом достигнуто улучшение температурной стабильности частотной характеристики нагрузки КЗ. Отклонение составило не хуже минус 47 дБ при изменении температуры на 10 °С (рисунок. 10, а), а изменение самой частотной характеристики не превысило 0,2 дБ при изменении температуры на 10 °С (рисунок 10,б).

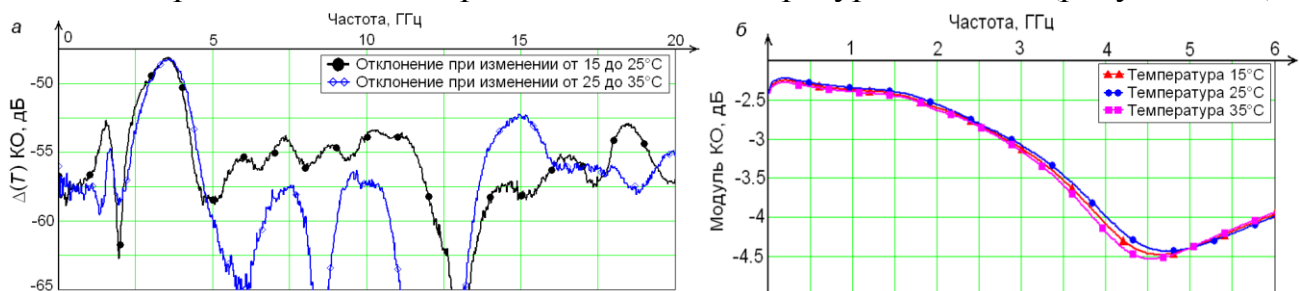


Рисунок 10 – Частотная зависимость отклонения коэффициента отражения (а) и модуля коэффициента отражения (б) нагрузки короткого замыкания при изменении температуры после оптимизации

Для работы в режиме температурного баланса, при котором частотные характеристики калибровочных нагрузок не изменяются или изменяются незначительно со временем, проведены исследования по определению времени выхода на режим. Исследования выполнялись с использованием нагрузки, частотная характеристика которой наиболее зависима от изменения температуры, т.е. нагрузки короткого замыкания. Измерялись характеристики

нагрузки КЗ в нормальных условиях сразу после подключения (0 мин) и через 5, 10, 20, 30, 45, 60, 75, 90, 120 мин. Отклонение частотной характеристики с течением времени представлено на рисунке 11, *а*. Максимальное отклонение в интервале от 30 до 60 мин и от 30 до 120 мин составляет менее минус 50 дБ, что говорит о высокой частотной стабильности КО нагрузки КЗ уже после 30 мин с момента включения электронного калибратора (рисунок 11, *б*).

Для обеспечения выхода на режим достаточно 30 минут с момента включения калибратора в нормальных условиях, что является удобным временем, так как рекомендованное время прогрева векторного анализатора цепей Р4М-18 согласно техническим условиям составляет также 30 мин.

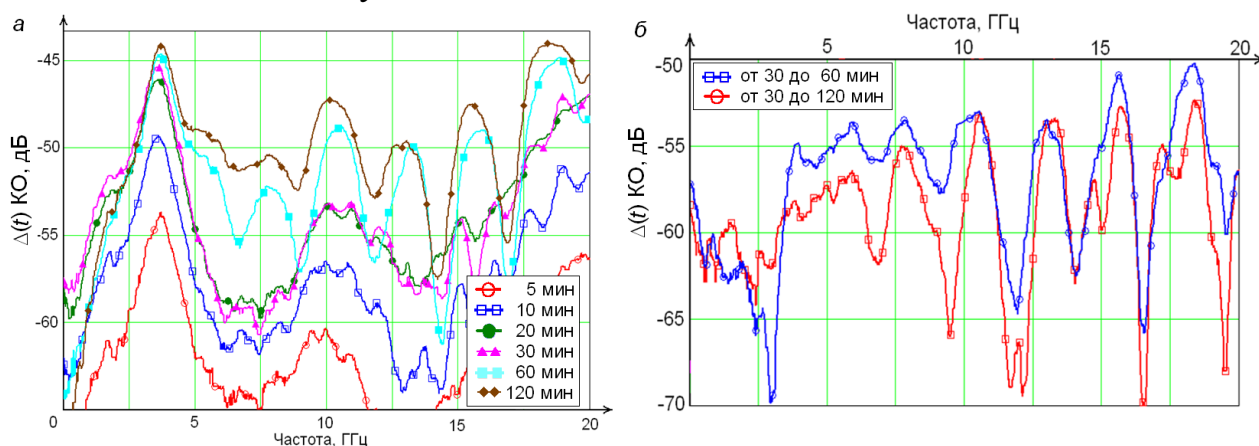


Рисунок 11 – Отклонение частотной зависимости коэффициента отражения нагрузки короткого замыкания с течением времени (*а*) и в интервалах 30–60 и 30–120 минут (*б*)

Проведены испытания на соответствие требуемой точности измерений сертифицированного векторного анализатора цепей Р4М-18, калиброванного с использованием электронного калибратора Р4М-ЭК2-20-13Р-13, путем проведения поверки анализатора согласно методике, утвержденной ГЦИ СИ ФГУП «СНИИМ» 08.03.2011, что зарегистрировано протоколом.

Таким образом, в результате проведенных исследований и схемно-конструктивной оптимизации разработан электронный калибратор, обеспечивающий калибровку, соответствующую требованиям технических условий на ВАЦ, и определено время выхода на режим, по прошествии которого поддерживается более высокая стабильность частотных характеристик ЭК.

В четвертом разделе предложен метод определения максимальной погрешности измерения коэффициента отражения векторным анализатором цепей с учетом влияния точности характеристики нагрузок калибратора и температурной нестабильности нагрузок. Метод основан на факторной верификации и определении уровня неисключенной систематической погрешности измерений комплексного коэффициента отражения, описанных в работе Савина А.А. и Губы В.Г., а также на исследовании влияния точности характеристики мер калибровочного набора на погрешность измерений однопортового векторного анализатора цепей, изложенном в работе Губы В.Г. Новизна метода заключается в учете температурной нестабильности каждой нагрузки, а также комбинировании и использовании наиболее точных способов определения количественных параметров на каждом этапе.

Метод реализуется по следующему алгоритму:

1. Проведение калибровки векторного анализатора цепей *Agilent E8364B* с использованием набора калибровочных мер *Agilent 85052C*, обеспечивающего высокоточную калибровку семейства *TRL*.
2. Проведение факторной верификация ВАЦ после *TRL*-калибровки с использованием воздушной линии 50 Ом из верификационного набора мер *Agilent 85053B*.
3. Характеризация нагрузок электронного калибратора Р4М-ЭК2-20 с помощью векторного анализатора цепей *Agilent* после *TRL*-калибровки.
4. Измерение исследуемой рассогласованной нагрузки из сертифицированного набора мер Н/М-18-3,5 мм векторным анализатором цепей после *TRL*- и электронной калибровки.
5. Определение дополнительных факторов, влияющих на частотные характеристики нагрузок калибратора, в данном случае температурной нестабильности, которая количественно была определена в третьем разделе.
6. Расчет максимальных эффективных факторов систематической погрешности измерения ВАЦ, калиброванного с использованием нагрузок ЭК, охарактеризованных в п. 3 данного алгоритма, с учетом погрешности описания (п. 2) и температурной зависимости частотных характеристик нагрузок (п. 5).
7. Расчет максимальной погрешности КО рассогласованной нагрузки, сравнение с экспериментально полученными данными и пределами погрешности измерения ВАЦ.

В результате реализации метода получены эффективные факторы систематической погрешности ВАЦ после *TRL*- и электронной калибровки (таблица 1), а также рассчитаны максимальные значения эффективных факторов систематической погрешности после электронной калибровки (рисунок 12).

Таблица 1 – Эффективные факторы систематической погрешности

Эффективный фактор погрешности	<i>TRL</i> -калибровка		Электронная калибровка	
	до 2 ГГц	свыше 2 ГГц	до 2 ГГц	свыше 2 ГГц
$E_D^{\text{ост}}$	56	52	48	49
$E_S^{\text{ост}}$	51	55	51	45
$E_R^{\text{ост}}$	0,06	0,005	0,06	0,07

Из рисунка 12 видно, что наихудшие значения рассчитанных максимальных эффективных факторов соответствуют частоте 14 ГГц. Воздействие температуры также оказывает значительное влияние на эффективную направленность и рассогласование. Анализ полученных данных показал, что наиболее значимым фактором ухудшения параметров ВАЦ в диапазоне 12,5 – 15 ГГц является разность фаз калибровочных нагрузок ХХ и КЗ, которая достигает 0° на частоте 14,5 ГГц, когда фазы КЗ и ХХ совпадают (рисунок 13).

На рисунке 14 представлены измеренные частотные зависимости модуля КО произвольной нагрузки после *TRL*- и электронной калибровки, рассчитанная максимальная погрешность КО этой нагрузки после электронной калибровки с учетом температурной нестабильности. Рассчитанная максимальная по-

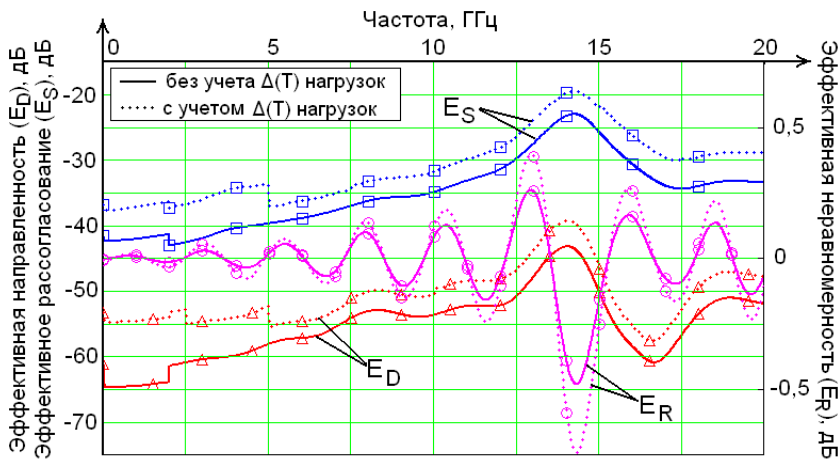


Рисунок 12 – Рассчитанные частотные зависимости максимальных эффективных факторов систематической погрешности векторного анализатора цепей после электронной калибровки

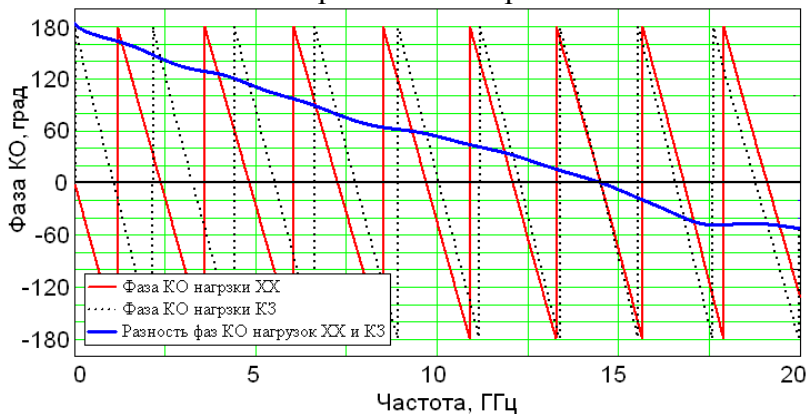


Рисунок 13 – Частотные зависимости фазы коэффициента отражения нагрузок холостого хода и короткого замыкания

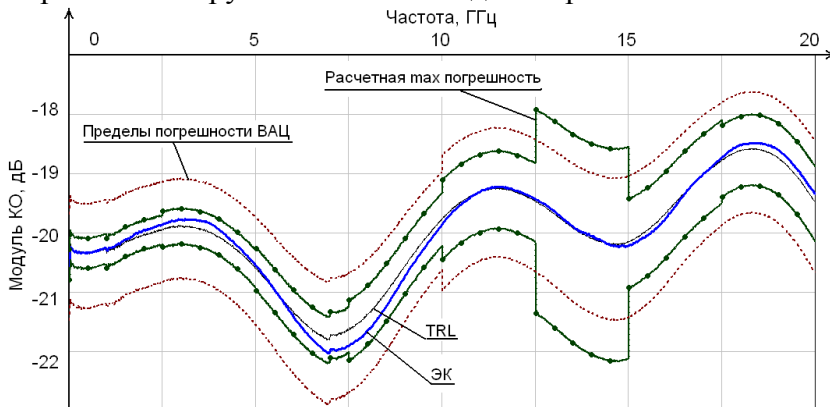


Рисунок 14 – Частотные зависимости модуля коэффициента отражения рассогласованной нагрузки РН, рассчитанной максимальной погрешности и пределов допустимой погрешности измерения коэффициента отражения векторного анализатора

нагрузок, не имеющих пересечения фазовых характеристик в данном диапазоне частот, а также снижением температурной зависимости нагрузок ЭК.

Таким образом, реализация метода позволяет оценить влияние уровня модуля коэффициента отражения, соотношения фаз КО нагрузок ХХ и КЗ, погрешности описания и температурной зависимости частотных характеристик

грешность с учетом температурной нестабильности превышает допустимые пределы погрешности измерения ВАЦ в диапазоне 12–15 ГГц, но на практике приближение к максимальной рассчитанной погрешности – маловероятное событие вследствие невозможности синфазного сложения всех векторов погрешностей. Измеренная частотная характеристика нагрузки после электронной калибровки не имеет значительного отклонения от характеристики, измеренной после *TRL* калибровки (рисунок 14).

Превышение или приближение максимальной рассчитанной погрешности к пределам погрешности измерения ВАЦ показывает, что необходимо повысить точность калибровки. Повышение точности может быть достигнуто исключением или уменьшением зависимости от факторов, значительно влияющих на погрешность, в данном случае путем коррекции фазовых частотных характеристик нагрузок ХХ и КЗ или использованием другой комбинации на-

модуля КО на эффективные факторы систематической погрешности и максимальную погрешность измерения коэффициента отражения векторным анализатором цепей. Искусственная вариация частотных зависимостей модуля и фазы коэффициента отражения позволяет определить требования к проектируемым нагрузкам электронного калибратора.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе получены следующие научные и практические результаты.

1. Предложен метод экстракции параметров элементов электронного калибратора, основанный на расчетно-экспериментальном методе и комбинировании измерений в частотной и временной области.

2. Разработаны модели электронного калибратора в режиме двухполосника и четырехполосника, учитывающие схемные и конструктивные особенности СВЧ-блока калибратора.

3. Показано, что экстракция параметров из экспериментальных данных и вариация их значений при моделировании позволяют существенно уменьшить рассогласование данных эксперимента и моделирования.

4. На основе реализации расчетно-экспериментального метода и экспериментальных исследований температурной зависимости однопортовых и двухпортовых нагрузок электронного калибратора выявлена существенная температурная зависимость частотной характеристики калибратора в режиме короткого замыкания. Проведен комплексный анализ причин температурной нестабильности нагрузки короткого замыкания.

5. Экспериментально определено время выхода на режим, при котором отклонение частотных характеристик нагрузок с течением времени составляет не более минус 50 дБ.

6. Проведена схемно-конструктивная оптимизация электронного калибратора, в результате которой достигнута температурная нестабильность нагрузок не хуже минус 47 дБ.

7. Предложен и экспериментально подтвержден метод определения максимальной погрешности измерений векторного анализатора цепей, калиброванного с использованием электронного калибратора, учитывающий точность описания и температурную нестабильность нагрузок. Путем вариации параметров нагрузок можно определить требования к нагрузкам электронного калибратора для обеспечения требуемой точности измерений векторным анализатором цепей. Предложенный метод распространяется на последующие разработки электронных калибраторов и ВАЦ.

8. Разработан и внедрен в серийное производство электронный калибратор векторного анализатора цепей. Разработанный электронный калибратор защищен патентом на полезную модель №126845.

9. Подтверждено соответствие требуемой точности измерений сертифицированного векторного анализатора цепей Р4М-18, калиброванного с использованием электронного калибратора Р4М-ЭК2-20-13Р-13, путем проведения проверки анализатора согласно методике, утвержденной ГЦИ СИ ФГУП «СНИИМ» 08.03.2011.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Губа В.Г., Ладур А.А., Савин А.А. Классификация и анализ методов калибровки векторных анализаторов цепей // Доклады ТУСУР. – 2011. – № 2 (24). – С. 149–155.
2. Бомбизов А.А., Ладур А.А., Лоцилов А.Г., Малютин Н.Д., Мисюнас А.О., Семенов Э.В., Фатеев А.В., Усубалиев Н.А. Векторный импульсный измеритель характеристик цепей и проводных систем // Приборы. – 2007. – № 9. – С. 28–31.
3. Пат. на полезную модель 126845 Российская Федерация, МПК G01R 35/00. Электронный калибратор векторного анализатора цепей / Губа В.Г., Дроботун Н.Б., Ладур А.А., Савин А.А., Синогин М.В., Ульянов В.Н.; заявитель и патентообладатель Закрытое акционерное общество «Научно-производственная фирма «Микран». – № 2012136060; заявл. 21.08.2012; опубл. 10.04.2013, Бюл. №10.
4. Ладур А.А., Бибиков Т.Х., Малютин Н.Д., Лоцилов А.Г. Метод экстракции параметров электронных калибраторов для векторных анализаторов цепей СВЧ-диапазона, основанный на комбинировании сверхширокополосной рефлектометрии и моделирования // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии (КрыМиКо '2013): материалы 23-й междунаро. конф., Севастополь, Украина, сентябрь 2013 г. – Севастополь: Вебер, 2013. ISBN 978-966-335-395-1. – С. 944–946.
5. Ладур А.А. Электронный калибратор векторного анализатора цепей // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии (КрыМиКо '2012): материалы 22-й междунаро. конф., Севастополь, Украина, сентябрь 2012 г. – Севастополь: Вебер, 2012. ISBN 978-1-4673-1199-1. – С. 839–840.
6. Разработка и внедрение технологических основ системного проектирования и производства аналогово-цифровой СВЧ-аппаратуры для телекоммуникаций, радиолокации и приборостроения на основе собственной GaAs элементной базы. Пояснительная записка по договору №74/10 в рамках договора от 07.09.2010 г. № 13.G25.31.0011 с Минобрнауки России в рамках Постановления Правительства РФ № 218. – Томск: ТУСУР, 2010. – 657 с.
7. Разработка основ синтеза методом «выращивания» 2D- и 3D-топологий, нерегулярных микрополосковых структур, управляемых интегральных устройств ВЧ- и СВЧ-диапазонов и их экспериментальное исследование: научно-технический отчет о выполнении 3-го этапа гос. контракта от 12.08.2009 № П 690. Г.р. 01200961363. – Томск: ТУСУР, 2011. – 149 с.
8. Разработка основ синтеза методом «выращивания» 2D и 3D топологий, нерегулярных микрополосковых структур, управляемых интегральных устройств ВЧ- и СВЧ-диапазонов и их экспериментальное исследование: научно-технический отчет о выполнении 2-го этапа гос. контракта от 12.08.2009 № П 690. Г.р. 01200961363. – Томск: ТУСУР, 2010. – 181 с.