

ОТЗЫВ

оппонента Разинкина Владимира Павловича, доктора технических наук, профессора ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет» (НГТУ) на диссертационную работу Литовченко Владимира Анатольевича на тему «Совершенствование методов и средств имитационного моделирования усилителей и автогенераторов СВЧ и измерения S -параметров их активного компонента», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.12.07 – «Антенны, СВЧ устройства и их технологии»

Общая характеристика работы

Работа посвящена усовершенствованию методов и средств имитационного моделирования усилителей мощности и автогенераторов сверхвысоких частот (СВЧ), в которых используется экспериментальное измерение повышенной точности S -параметров активного компонента (АК) в выбранной рабочей точке при заданном уровне входного СВЧ сигнала и допустимых температурных режимах.

Высокоточное измерение S -параметров АК, работающих в режиме большого сигнала повышает эффективность систем автоматизированного проектирования (САПР) усилителей и автогенераторов и, следовательно, экономическую эффективность их производства за счет многократного сокращения цикла опытно-конструкторских работ (ОКР).

Актуальность темы

В настоящее время усилители мощности и автогенераторы СВЧ широко применяются в наземных и спутниковых системах связи, цифрового телевидения и радиовещания, а также в радиолокационных и радионавигационных системах. Проектирование данных устройств осуществляют в пространстве рассчитанных S -параметров АК этих устройств. Однако недостаточно высокая точность расчета S -параметров АК, работающего в режиме большого сигнала, обусловлена определенными ограничениями его математического моделирования. Это приводит к необходимости многократной технологической коррекции опытного образца.

Попытки применения современных векторных анализаторов СВЧ-цепей (ВАЦ) для измерения S -параметров АК, например, мощных СВЧ транзисторов, в том числе полоскового типа, оказались неэффективными. Это обусловлено тем, что существующие измерительные приборы и системы, предназначенные для работы с линейными СВЧ цепями и устройствами, не обеспечивают адекватное измерение параметров АК, работающих в сугубо нелинейных режимах. Это существенно снижает эффективность схемотехнических и электродинамических САПР при проведении имитационного моделирования, в алгоритмах которого используются S -параметры.

В диссертационной работе предложен оригинальный лабораторный ИА для имитационного моделирования усилителей мощности и автогенераторов СВЧ, функционирующий на основе высокоточного измерения S -параметров

ров их АК. ИА построен на базе отечественных широко распространенных измерительных приборов.

Для обеспечения работоспособности ИА (имитационного анализатора) был усовершенствован метод адекватного косвенного измерения $S = f(\Gamma_i, \Gamma_{nj}, T_{ij})$ -параметров АК, где Γ_i и T_{ij} – непосредственно измеряемые комплексные коэффициенты отражения и передачи (ККО и ККП) АК и Γ_{nj} – его непосредственно измеряемые нагрузочные ККО.

Автором диссертации также разработана вариационная методика, обеспечивающая выбор оптимальных метрологических характеристик ИА при которых предельная погрешность измерения ККО Γ_i , Γ_{nj} и ККП T_{ij} не превышает предела допуска $\Delta_{\Gamma, T} \leq [\Delta_{\Gamma, T}]$, что способствует повышению точности измерения $S = f(\Gamma_i, \Gamma_{nj}, T_{ij})$ -параметров.

Кроме того, в работе предложено усовершенствованное коаксиальное контактное устройство (ККУ), которое посредством дополнительной калибровки ИА расчетным согласованным микрополосковым калибратором обеспечивает передачу результатов измерения $S = f(\Gamma_i, \Gamma_{nj}, T_{ij})$ -параметров АК из коаксиального измерительного тракта ИА в микрополосковый тракт. Конструктивные решения по усовершенствованию ККУ позволяют дополнительно повысить точность и расширить частотный диапазон измерения $S = f(\Gamma_i, \Gamma_{nj}, T_{ij})$ -параметров АК полоскового типа.

Для обеспечения автоматизации процедуры имитационного моделирования усилителей и автогенераторов автором диссертации предложен способ калибровки перестраиваемых согласующих трансформаторов (ПСТ), определяющих нагрузочные ККО Γ_{nj} АК при имитационном моделировании усилителей мощности и автогенераторов, а также методика анализа устойчивости их АК. Это существенно облегчает выбор его нагрузочных ККО Γ_{nj} при имитационном моделировании усилителей и автогенераторов.

Таким образом, диссертационная работа посвященная усовершенствованию методов и прецизионных средств, обеспечивающих имитационное моделирование усилителей и автогенераторов СВЧ, а также адекватному и точному измерению $S = f(\Gamma_i, \Gamma_{nj}, T_{ij})$ -параметров их АК, несомненно, является актуальной. Данная работа может быть также полезной при составлении price моделей ранее известных и новых активных компонентов.

Новизна научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации

1. Впервые предложена и реализована на ИА процедура имитационного моделирования усилителей и автогенераторов СВЧ с оптимизацией этих имитируемых устройств на соответствие их технических характеристик ТЗ, а также предложены новые конструктивные решения по построению ИА, обеспечивающие снижение погрешности измерения $S = f(\Gamma_i, \Gamma_{nj}, T_{ij})$ -

параметров АК при имитационном моделировании усилителей и автогенераторов СВЧ.

2. Предложен и реализован усовершенствованный метод адекватного измерения S -параметров, который впервые в аналитическом виде устанавливает связь вида $S = f(\Gamma_j, \Gamma_{нj}, \Gamma_{ij})$.

3. Впервые предложен и реализован способ калибровки ИА, обеспечивающий передачу результатов измерения S -параметров АК из коаксиального тракта ИА в микрополосковый тракт, что распространяет действие Государственной системы обеспечения единства измерений (ГСИ) на микрополосковый тракт.

Степень обоснованности и достоверности научных положений, выводов, заключений

Достоверность научных положений, выносимых на защиту, подтверждена тем, что усовершенствованные методы и средства имитационного моделирования усилителей и автогенераторов СВЧ на основе измерения S -параметров их АК соответствуют теории косвенного измерения параметров и не противоречат результатам, полученным другими авторами. Кроме того, полученные в диссертации результаты в полном объеме опубликованы в рецензируемых журналах и прошли апробацию на международных научно-технических конференциях.

Значимость результатов для науки и практики

1. Адекватное и точное измерение S -параметров АК способствует повышению экономической эффективности применения САПР при разработке и производстве усилителей и автогенераторов СВЧ за счет исключения необходимости многократной технологической коррекции их опытного образца.

2. Предложенная методика передачи результатов измерения S -параметров АК из коаксиального тракта ИА в микрополосковый тракт исключает необходимость разработки дорогостоящей ГСИ в микрополосковом тракте.

Оценка содержания

Структура диссертации является общепринятой, отдельные ее части логически связаны. Диссертация оформлена в соответствии с требованиями ВАК Минобрнауки РФ. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения с основными результатами и выводами по работе и библиографического списка, а также приложения

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, поставлена цель и сформулированы задачи исследований, определена научная новизна, практическая ценность и значимость полученных результатов, выделены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе рассмотрен принцип построения различных классов скалярных анализаторов СВЧ-цепей (САЦ). Рассмотрены их преимущества в сравнении с векторными АЦ. Для амплитудных АЦ приведено уравнение преобразования мощностей $P_k; k = 1, 2, 3$ стоячей волны в измеренные ККО $\Gamma = f(P_k; k = 1, 2, 3)$ в пространстве D -матриц. Показано, что оптимальную

структуру имеет двухсигнальный ИА, выбранный за прототип для построения ИА.

Во второй главе рассмотрена упрощенная структурная схема ИА и усовершенствованная конструкция его измерительного преобразователя (ИП). Установлена аналитическая связь $\Gamma_i, \Gamma_{nj}, T_{ij} = f(P_k; k=1, 2, 3)$ регистрируемых мощностей $P_k; k=1, 2, 3$ с измеряемыми ККО Γ_i, Γ_{nj} и ККП T_{ij} в гомодинном и двухсигнальном режимах работы ИА. Рассмотрены метод анализа устойчивости АК и усовершенствованный метод адекватного измерения $S = f(\Gamma_i, \Gamma_{nj}, T_{ij})$ -параметров этого прибора. Предложен способ калибровки ИА стандартными коаксиальными мерами и его дополнительной калибровки расчетным микрополосковым согласованным калибратором, обеспечивающих передачу результатов измерения ККО Γ_i, Γ_{nj} и $S = f(\Gamma_i, \Gamma_{nj}, T_{ij})$ -параметров АК из коаксиальных измерительных каналов ИА в микрополосковый тракт. Кроме того, предложен способ калибровки ПСТ, обеспечивающий автоматизацию имитационного моделирования усилителей и автогенераторов СВЧ, а также рассмотрены различные режимы работы ИА.

В третьей главе рассмотрены методы амплитудной и фазовой адаптации ИА к измеряемым ККО Γ_i, Γ_{nj} и ККП T_{ij} в широком динамическом и частотном диапазонах их измерения. Также разработана вариационная методика, обеспечивающая выбор оптимальных метрологических характеристик ИА при которых предельная погрешность измерения ККО Γ_i, Γ_{nj} и ККП T_{ij} не превышает предела допуска $\Delta_{\Gamma, T} \leq [\Delta_{\Gamma, T}]$, тем самым способствуя повышению точности измерения $S = f(\Gamma_i, \Gamma_{nj}, T_{ij})$ -параметров. В частности динамический диапазон $0 \leq \Delta \leq \infty$ измерения ККО Γ_i, Γ_{nj} и ККП T_{ij} был разбит на $N = 5$ поддиапазонов с $\Delta_{\min} \leq \Delta \leq \Delta_{\max}$ и определен оптимальный сдвиг $\theta_0 = 2\pi/3$ стоячей волны где $\Delta_{\min, \max} = 6; 14$ дБ – предельно допустимые значения при которых $\Delta_{\Gamma, T} \leq [\Delta_{\Gamma, T}]$, где $|\Delta_{\Gamma, T}| \leq 0,07 |\Gamma, T|$ и $\varphi_{\Gamma, T} \leq 5^\circ$.

В четвертой главе рассмотрена техническая реализация ИА и его отдельных узлов: ИП, ККУ и стандартных контрольно-измерительных приборов (КИП) с их техническими характеристиками. Также приведены конструкции и технические характеристики усилителей и автогенераторов СВЧ, которые были разработаны САПР, содержащей ИА.

В заключении перечислены основные выводы работы, которые являются новыми и имеют высокую научную и практическую ценность. Приведенные выводы подтверждаются текстом диссертации, а их практическое применение актами внедрения.

Степень завершенности диссертации

Все поставленные в диссертации Литовченко В.А. цели и задачи выполнены в полном объеме. Диссертация представляет собой завершенную

научно-исследовательскую работу, содержащую новые теоретические и экспериментальные результаты, имеющие важное практическое значение.

Использование результатов диссертационной работы

Результаты диссертационной работы подтверждены тремя актами внедрения:

– в предприятии ООО «Альфа инструментс» в виде ККУ сечения 3,5/1,5 мм и способа его калибровки;

– в учебный процесс организации «Сибирский государственный университет геосистем и технологий» по дисциплинам «Автоматизированное проектирование средств поражения», специальность 17.05.01 – Боеприпасы и взрыватели и «Основы радиотехники», специальность 12.03.01 – Информационная безопасность в виде библиотеки математических моделей усилителей и автогенераторов СВЧ и их компонентов для пакета САПР MWO;

– на предприятии ФГКВОУ ВО «Новосибирское высшее военное командное училище» лабораторного ИА для поверки и настройки усилителей и автогенераторов СВЧ для технических средств различного назначения, включая технические средства для учебного процесса.

Соответствие автореферата основным идеям и выводам диссертации

В автореферате правильно отражено содержание диссертации, кратко изложены все основные результаты диссертационной работы. Выводы, представленные в автореферате, без расхождения согласуются с выводами в диссертации.

Публикация основных результатов

По материалам диссертации опубликовано 19 работ, из них 10 статей в журналах, входящих в перечень ВАК, и 2 статьи, индексированных в базах Web of Science и Scopus, а также 1 препринт.

Замечания по диссертационной работе

1. В первой главе диссертации не определено, что автор понимает под точным измерением и адекватным измерением S - параметров в режиме большого сигнала.

2. Во второй главе недостаточно подробно описано, как рассчитываются первоначальные приближения для значений нагрузочных ККО в САПР MWO на основе математических моделей усилителей и автогенераторов СВЧ. Следует отметить, что не для всех активных компонентов, особенно отечественных, имеются spice модели.

3. В третьей главе предложено использовать двухсигнальный метод для повышения точности измерения S - параметров, однако физического обоснования этого подхода не представлено.

4. В четвертой главе приведены результаты проектирования СВЧ усилителей для спутниковых радиоэлектронных систем. Эти данные целесообразно было бы дополнить результатами имитационного моделирования на ос-

нове проведенных измерений и рассчитанными в среде MWO частотными характеристиками.

Указанные выше замечания не являются принципиальными, не снижают научной и практической значимости диссертационной работы, не затрагивают научных положений и не влияют на достоверность полученных результатов.

Заключение

Ознакомившись с диссертацией, авторефератом и публикациями автора, считаю, что тема диссертации Литовченко В.А. и ее содержание соответствуют специальности 05.12.07 – «Антенны, СВЧ устройства и их технологии». Область выполненного диссертационного исследования находится в рамках пунктов 3 и 7, указанных в качестве областей исследований в паспорте выбранной научной специальности.

В целом, диссертационная работа Литовченко В. А. «Совершенствование методов и средств имитационного моделирования усилителей и автогенераторов СВЧ и измерения S-параметров их активного компонента» по актуальности, научной новизне, уровню и значимости полученных теоретических и практических результатов, их достоверности, обоснованности выводов полностью соответствует требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 № 842 (ред. от 30.07.2014 г.). В выполненной научно-квалификационной работе изложены новые научно обоснованные технические решения, внедрение которых вносит значительный вклад в развитие страны (критерий пункта 9 «Положения»). Автор диссертации, Литовченко Владимир Анатольевич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.12.07 – «Антенны, СВЧ устройства и их технологии».

Доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный
технический университет» (НГТУ)



Разинкин В. П.

630073, г. Новосибирск,
пр. К. Маркса, 20

Рабочий телефон: 8(383)346-08-34

Мобильный телефон: 8-953-780-54974

E mail: razinkin@corp.nstu.ru

Подпись заверяю:
начальник ОК НГТУ



Пустовалова О.К.