

УТВЕРЖДАЮ

Ректор СГУГиТ

Д.т.н., профессор Карпик Александр Петрович

«    »    20    г.  
МП

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

### федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Сибирский государственный университет геосистем и технологий» (СГУГиТ)

Диссертация «Совершенствование методов и средств имитационного моделирования усилителей и автогенераторов СВЧ и измерения S-параметров их активного компонента» выполнена на кафедре специальных устройств, инноватики и метрологии федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Сибирский государственный университет геосистем и технологий» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

В период подготовки диссертации соискатель Литовченко Владимир Анатольевич работал в должности старшего преподавателя кафедры специальных устройств, инноватики и метрологии федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Сибирский государственный университет геосистем и технологий» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

В 2009 году окончил государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московское высшее военное командное училище (военный институт)» Министерства обороны Российской Федерации 56.05.04 - «Управление персоналом».

Справка об обучении и сдаче кандидатских экзаменов выдана в 2019 году федеральным государственным бюджетным образовательным учреждением высшего образования «Томским государственным университетом систем управления и радиоэлектроники» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

С 01 сентября 2014 г. по 05 июля 2019 г. являлся аспирантом заочной формы обучения аспирантуры по специальности 27.06.01 - «Управление в технических системах» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Сибирский государственный университет геосистем и технологий» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

Тема диссертации утверждена Ученым советом оптического факультета Сибирского государственного университета геосистем и технологий (протокол заседания совета факультета № 1 от 17.01.2019 г.).

Научный руководитель (консультант) – доктор технических наук, профессор, Савелькаев Сергей Викторович работает профессором кафедры специальных устройств, инноватики и метрологии федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Сибирский государственный университет геосистем и технологий» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

По результатам рассмотрения диссертации «Совершенствование методов и средств имитационного моделирования усилителей и автогенераторов СВЧ и измерения S-параметров их активного компонента» принято следующее заключение:

Оценка выполненной соискателем работы.

Диссертация Литовченко В. А. является научно-квалификационной работой, в которой разработаны методы и прецизионные средства имитационного моделирования усилителей и автогенераторов (СВЧ), а также адекватное и точное измерение S-параметров их активного компонента (АК).

Актуальность темы и направленность исследования.

Диссертационная работа посвящена проектированию микрополосковых усилителей и автогенераторов СВЧ, которые повсеместно применяются в наземных и спутниковых системах телевидения и связи, системах радиолокации и радионавигации, осуществляют в пространстве рассчитанных S-параметров АК этих устройств, например, полоскового транзистора. Низкая точность расчета S-параметров АК, вызванная физическими ограничениями их математического моделирования, приводит к снижению эффективности систем автоматизированного проектирования (САПР) и, следовательно, к снижению экономической эффективности производства усилителей и автогенераторов, поскольку удлиняет цикл опытно-конструкторских работ (ОКР) этих устройств за счет необходимости многократной технологической коррекции их опытного образца. Классический подход к повышению эффективности САПР таких устройств является переход от расчета к измерению S-параметров их АК.

В настоящее время в диапазоне СВЧ для измерения S-параметров АК широко используют методы: переменной нагрузки, «горячих  $S_{22}$ », X-параметров, а также метод Cardiff Lite, который разработан британской компанией Mesuro. Большое разнообразие этих методов обусловлено их несовершенством, сочетающимся со сложностью их реализации. Так, например, метод переменной нагрузки не обеспечивает разделение измеряемых  $S_{12}S_{21}$ -параметров, что недопустимо применительно к невзаимным приборам, таким как АК. Метод «горячих  $S_{22}$ » имеет ограниченную сферу применения из-за отсутствия возможности измерения  $S_{12}$ -параметра, а метод X-параметров дорогостоящ и сложен в освоении и практике.

Для устранения указанных недостатков в работе был предложен метод пространственно-удаленной переменной нагрузки, который обеспечивает измерение  $S$ -параметров АК в режиме усиления.

Однако с помощью этого метода нельзя измерять  $S$ -параметры АК в режиме генерации и анализировать устойчивость таких приборов.

Общим недостатком перечисленных методов является то, что они не обеспечивают адекватного и точного измерения  $S$ -параметров АК.

Проблема адекватного измерения связана с тем, что  $S$ -параметры АК, который в общем случае является активным нелинейным прибором, зависят от его эксплуатационных характеристик. К ним относятся комплексные коэффициенты отражения (ККО)  $\Gamma_{Hj}$  нагрузок АК (нагрузочные ККО  $\Gamma_{Hj}$ ) и его напряжения питания  $U_{Pi}$ , задающие его режим усиления или генерации, а также мощность  $P_{\text{вых}}$  входного сигнала АК в режиме усиления, дискретные частоты  $f$  в заданной полосе пропускания  $\Delta f$  в режиме усиления и частота  $f$  автоколебаний в режиме генерации. Множеству возможных значений эксплуатационных характеристик АК соответствует множество значений его  $S$ -параметров в режиме усиления или генерации. Поэтому для адекватного измерения  $S$ -параметров АК его эксплуатационные характеристики необходимо выбрать так, чтобы они обеспечивали реальные условия эксплуатации этого прибора в имитируемом усилителе или автогенераторе. При этом полагается, что в отличие от умножителей частоты в имитируемом усилителе или автогенераторе АК работает в линейном (одномодовом) режиме.

Выбор эксплуатационных характеристик можно осуществить исходя из того, чтобы технические характеристики имитируемого усилителя или автогенератора, такие как их выходная мощность  $P_{\text{вых}}$ , дискретные частоты  $f$  усиления в заданной полосе пропускания  $\Delta f$  и частота генерации  $f$ , коэффициент усиления по мощности  $K_{\text{ум}}$  и коэффициент шума  $K_{\text{ш}}$ , фазовые шумы и др. удовлетворяли техническому заданию (ТЗ) на проектирование таких устройств.

Таким образом, под термином «адекватное» измерение  $S$ -параметров АК следует понимать их измерение при заданных эксплуатационных характеристиках этого прибора.

Проблема точного измерения  $S = f(\Gamma_i, \Gamma_{Hj}, T_{ij})$ -параметров АК вызвана тем, что исходные измеряемые ККО  $\Gamma_i$ ,  $\Gamma_{Hj}$  и ККП  $T_{ij}$  изменяются в широком динамическом и частотном диапазонах. Поэтому необходима разработка методики, обеспечивающей выбор оптимальных метрологических характеристик ИА при которых предельная погрешность измерения ККО  $\Gamma_i$ ,  $\Gamma_{Hj}$  и ККП  $T_{ij}$  не превышает предела допуска  $\Delta_{\Gamma, T} \leq [\Delta_{\Gamma, T}]$ , тем самым способствуя повышению точности измерения  $S = f(\Gamma_i, \Gamma_{Hj}, T_{ij})$ -параметров.

Кроме того, для обеспечения возможности передачи результатов измерения ККО  $\Gamma_i$ ,  $\Gamma_{nj}$ , ККП  $T_{ij}$  АК и  $S = f(\Gamma_i, \Gamma_{nj}, T_{ij})$ -параметров АК из коаксиального измерительного тракта ИА в микрополосковый тракт, для включения в который предназначен этот АК при его эксплуатации, необходима разработка способа калибровки коаксиального ИА расчетными микрополосковыми калибраторами [6, 7, 10 – 12, 14 – 16] (нормировка измеренных параметров АК относительно микрополоскового тракта). Также необходима разработка оптимальной конструкции коаксиального контактного устройства (ККУ) [18, 19], обеспечивающего подключение к коаксиальному измерительному тракту ИА как полосковых АК, так и коаксиальных мер, включая расчетные полосковые и микрополосковые калибраторы с высокой повторяемостью подключения. Это снижает погрешность измерения  $S = f(\Gamma_i, \Gamma_{nj}, T_{ij})$ -параметров АК при имитационном моделировании усилителей и автогенераторов СВЧ.

Таким образом, диссертационная работа посвященная разработке и исследованию методов и прецизионных средств измерения, обеспечивающих имитационное моделирование усилителей и автогенераторов СВЧ, а также адекватное и точное измерение ККО  $\Gamma_i$ ,  $\Gamma_{nj}$ , ККП  $T_{ij}$  и  $S = f(\Gamma_i, \Gamma_{nj}, T_{ij})$ -параметров их АК актуальна.

Личное участие автора в получении результатов, изложенных в диссертации.

Изложенные в диссертационной работе результаты исследований получены лично автором. Экспериментальные исследования проведены совместно с коллективом кафедры СУИиМ СГУГиТ, результаты получены и обработаны лично автором. На основании обсуждения с соавторами конструктивных и схмотехнических решений автор лично получил основные научные результаты, расчетные соотношения и выводы. Постановка задач исследований осуществлялась совместно с научным руководителем.

Степень достоверности результатов проведенных исследований.

Достоверность результатов, выводов и положений диссертационной работы основывается на результатах экспериментальных исследований, полученных на тестировании реальных наземных и спутниковых систем телевидения и связи, систем радиолокации и радионавигации, а также, в частных случаях с экспериментальными результатами других авторов.

Новизна результатов проведенных исследований.

Литовченко В. А. предложена и реализована на ИА процедура имитационного моделирования усилителей и автогенераторов СВЧ с оптимизацией этих имитируемых устройств на соответствие их технических характеристик ТЗ; предложен и реализован метод адекватного измерения  $S = f(\Gamma_i, \Gamma_{nj}, T_{ij})$ -параметров АК имитируемых усилителей и автогенераторов СВЧ, а также представлен тест опорного  $a_i$  и зондирующего  $a_i^0$  сигналов, обеспечивающий измерение  $S$ -параметров АК в его режимах

усиления и генерации; предложен и реализован способ калибровки ИА, обеспечивающий передачу результатов измерения  $S$ -параметров АК из коаксиального тракта ИА в микрополосковый тракт, что распространяет действие ГСИ на микрополосковый тракт; применены вариационная методика оценки предельной суммарной погрешности  $\Delta_{Г,Т}$  измерения ККО  $\Gamma_i, \Gamma_{нj}$  и ККП  $T_{ij}$  АК и анализ обусловленности системы измерительных уравнений для выбора оптимальных метрологических характеристик ИА при которых предельная погрешность измерения этих параметров не превышает предела допуска  $\Delta_{Г,Т} \leq [\Delta_{Г,Т}]$ , тем самым способствуя повышению точности измерения  $S$ -параметров АК; а также предложены новые конструктивные решения по построению ИА, обеспечивающие снижение погрешности измерения  $S = f(\Gamma_i, \Gamma_{нj}, T_{ij})$ -параметров АК при имитационном моделировании усилителей и автогенераторов СВЧ.

Практическая значимость диссертации и использование полученных результатов.

Адекватное и точное измерение  $S$ -параметров АК способствует повышению экономической эффективности САПР и производства усилителей и автогенераторов СВЧ за счет исключения необходимости многократной технологической коррекции их опытного образца.

Возможность передачи результатов измерения  $S$ -параметров АК из коаксиального тракта ИА в микрополосковый тракт, что исключает необходимость разработки дорогостоящей ГСИ в микрополосковом тракте.

Полнота изложения материалов диссертации в опубликованных работах.

По материалам диссертации опубликовано 15 научных работ: 8 статей соответствуют перечню периодических изданий, рекомендуемых ВАК; 1 статья опубликованная в журнале, индексируемом Scopus/Web of Science; 5 статей опубликованы в сборниках материалов Международных научных конгрессов и конференций и один препринт.

Статьи в журналах из перечня ВАК.

1. Литовченко, В. А. Методы анализа устойчивости активных СВЧ - цепей и измерения их  $S$ -параметров / В. А. Литовченко // Новосибирск : Вестник СГУГиТ. – 2015. – Вып. 1 (29). – С. 90–100.

2. Савелькаев, С. В. Трехсекционная дрейфово-диффузионная математическая модель полевого транзистора с барьером шоттки / С. В. Савелькаев, В. С. Айрапетян, В. А. Литовченко // Новосибирск : Вестник НГУ. Серия: Физика твердого тела, полупроводников наноструктур. – 2015. – Том 10, № 1. – С. 57–62.

3. Савелькаев, С. В. Теоретические основы построения имитаторов-анализаторов активных СВЧ цепей [Текст] / С. В. Савелькаев, В. А. Литовченко, С. В. Ромасько, Н. В. Заржецкая // Новосибирск: Вестник СГУГиТ. – 2016. – Вып. 1 (33). – С. 175 - 178.

4. Савелькаев, С. В. Методика расчета автогенератора СВЧ, в пространстве S-параметров / С. В. Савелькаев, В. А. Литовченко // М.: Изд. Радиотехника. Успехи современной радиотехники. – 2016. – № 8. – С. 36–46.

5. Савелькаев, С. В. Теоретические основы построения имитатора-анализатора активных СВЧ-цепей / С. В. Савелькаев, С. В. Ромасько, В. А. Литовченко, Н. В. Заржецкая // М.: Изд. Радиотехника. Успехи современной радиотехники. – 2017. – № 2. – С. 50 – 61.

6. Савелькаев, С. В. Теоретические основы построения имитатора-анализатора усилителей и автогенераторов СВЧ / С. В. Савелькаев, С. В. Ромасько, В. А. Литовченко, Н. В. Заржецкая // Л.: Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. – 2017. – Вып. 1. – С. 63 – 73.

7. Савелькаев, С.В. Анализ и синтез методов измерения S-параметров сверхвысокочастотных транзисторов [Текст] / С. В. Савелькаев, В. А. Литовченко // Метрология. – 2018. - №4. – С. 51 – 63.

8. Савелькаев, С. В. Отсчетный N-шлейфный перестраиваемый согласующий трансформатор для имитаторов-анализаторов усилителей и автогенераторов СВЧ [Текст] / С. В. Савелькаев, В. А. Литовченко // Новосибирск: Вестник СГУГиТ. – 2018. – Т. 23. - № 1. – С. 200 – 210.

Статьи в журналах, индексируемых Scopus/Web of Science:

1. Savel'kaev, S. V. Analysis and Synthesis of Methods for Measuring the S-Parameters of Microwave Transistors / S. V. Savel'kaev , V. A. Litovchenko // Measurement Techniques. – 2019. – V.61. No – 12. – PP. 1222-1227.

Публикации в иных сборниках и журналах.

1. Савелькаев, С. В. Методика расчета автогенератора СВЧ в пространстве S-параметров / С. В. Савелькаев, В. С. Айрапетян, В. А. Литовченко // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2014. X Междунар. научн. конгр. : Междунар. научн. конф. «СибОптика-2014» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 8–18 апреля 2014 г.). – Новосибирск: СГГА, 2014. Т. 2. – С. 164–171.

2. Савелькаев, С. В. Способ калибровки полоскового контактного устройства / С. В. Савелькаев, В. А. Литовченко // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2015. XI Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «СибОптика-2015» : сб. материалов в 3 т. (Новосибирск, 13–25 апреля 2015 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2015. Т. 3 – С. 37–41.

3. Савелькаев, С. В. Метод анализа устойчивости активных СВЧ-цепей / С. В. Савелькаев, В. А. Литовченко, С. В. Ромасько, Н. В. Заржецкая // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2016. XI Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «СибОптика-2016»: сб. материалов в 5 т. (Новосибирск, 13–25 апреля 2016 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2016. Т. 5 – С. 224–228.

4. Савелькаев, С. В. Математическая модель имитатора-анализатора усилителей и автогенераторов СВЧ / С. В. Савелькаев, С. В. Ромасько, В. А. Литовченко // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2017. XIII Междунар. науч. конгр. : Национ. научн. конф. «Наука. Оборона. Безопасность-2017»: сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 17–21 апреля 2017 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2017. Т. 2. – С.131–137.

5. Савелькаев, С. В. Вариационная методика оценки суммарной погрешности измерения имитаторов-анализаторов усилителей и автогенераторов СВЧ / С.В. Савелькаев, В. А. Литовченко // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2018. XIV Междунар. науч. конгр. : «Наука. Оборона. Безопасность-2018»: сб. материалов (Новосибирск, 23–27 апреля 2018 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2018. Т. 1. – С. 3–12. 210.

Препринты.

1. Теоретические основы построения имитаторов-анализаторов для систем автоматизированного проектирования усилителей и автогенераторов СВЧ : препринт / С. В. Савелькаев, В. А. Литовченко, Н. В. Заржецкая, С. В. Ромасько; под общ. ред. С. В. Савелькаева. – Новосибирск : СГУГиТ, 2018. – 94 с.

Соответствие диссертации избранной специальности.

Предмет исследования и материалы диссертационной работы соответствуют специальности 05.12.07 – «Антенны, СВЧ устройства и их технологии» в области исследования:

- Исследование и разработка метрологического обеспечения проектирования, производства и эксплуатации антенных систем и СВЧ устройств.

Соавторы работ не возражают против использования материалов совместных исследований в диссертации соискателя.

Диссертация соответствует п. 9 и 14 «Положение о присуждении ученых степеней» ВАК Минобрнауки РФ, утвержденного постановлением Правительства РФ № 842 от 24.09.2013 года.

Диссертация Литовченко Владимира Анатольевича «Совершенствование методов и средств имитационного моделирования усилителей и автогенераторов СВЧ и измерения S-параметров их активного компонента» рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.12.07 – «Антенны, СВЧ устройства и их технологии».

Заключение принято на заседании кафедры специальных устройств, инноватики и метрологии федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Сибирский государственный университет геосистем и технологий» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

Присутствовало на заседании 25 чел. Результаты голосования: за - 23 чел., против - 0 чел., воздержалось - 2 чел., протокол № 8 от «29» ноября 2019г.

Директор института оптики и  
оптических технологий, д.э.н.



Шабурова Аэлита Владимировна

Заведующий кафедрой специальных  
устройств, инноватики и метрологии  
СГУГиТ, д. т. н., доцент,



Айрапетян Валерик Сергеевич