

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию

Савенкова Глеба Георгиевича «Многоканальные широкополосные СВЧ нагрузки и аттенуаторы на пленочных микрополосковых резисторах», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.12.07 – «Антенны, СВЧ устройства и их технологии».

В настоящее время для настройки и контроля параметров радиопередающих трактов систем связи, радиовещания, телевидения и радиотехнических систем применяются сверхвысокочастотные устройства следующего типа: фильтры, направленные ответвители, коммутаторы, аттенуаторы и оконечные согласованные нагрузки. Нагрузки и аттенуаторы, используемые в качестве эквивалента антенны для передатчиков, должны быть хорошо согласованными в широкой полосе частот и обеспечивать в течение длительного времени рассеивание мощности СВЧ порядка нескольких киловатт в дециметровом диапазоне и сотен ватт в сантиметровом диапазоне. Следует отметить, что многие отечественные и зарубежные компании («Микран», «Кварц», «Радиал», Bird, Barry Industries, EMC Technology, RF Labs, IMS Resistors) выпускают широкополосные нагрузки для диапазона частот 0–10 ГГц. Однако допустимый уровень входной мощности обычно не превышает 20–30 Вт. Такая мощность явно недостаточна для работы со многими современными передатчиками. Поэтому тема диссертационной работы Г.Г. Савенкова, посвящённая разработке многоканальных сверхширокополосных СВЧ нагрузок и аттенуаторов высокого уровня мощности для диапазона частот 0–10 ГГц, несомненно, является актуальной как в научном, так и в практическом отношении.

В диссертационной работе Г.Г. Савенкова обоснован и развит принцип многоканального построения СВЧ тракта применительно к мощным сверхширокополосным СВЧ нагрузкам и аттенуаторам дециметрового и сантиметрового диапазона, выполненным на основе частотно-разделительных устройств. С помощью частотно-разделительных устройств предложено объединить полосы низкочастотных каналов с нагрузочными элементами в виде планарных пленочных резисторов и высокочастотных каналов с распределёнными нагрузками, представляющими собой микрополосковые линии с большими диссипативными потерями. В этом случае полоса рабочих частот нагрузки с качественным согласованием по входу определяется результирующей полосой частот всех каналов.

Во введении диссертационной работы автор обосновывает актуальность темы выполненного исследования, описывает предлагаемый подход к расширению полосы частот нагрузок и аттенуаторов, раскрывает цели и задачи диссертационной работы, их практическую значимость, приводит основные положения, выносимые на защиту.

В первом разделе автором проведен обзор существующих широкополосных СВЧ нагрузок и аттенуаторов высокого уровня мощности на основе дендритного и многокаскадного методов построения. Сделан обоснованный вывод о перспективности реализации диссипативных элементов по микрополосковой технологии в виде сосредоточенных и распределённых пленочных резисторов. Также автором была рассмотрена и модифицирована декомпозиционная модель плёночного резистора, которая позволяет проводить анализ его частотных свойств с учетом неравномерного распределения высокочастотного тока в поперечном сечении резистивной пленки квадратной и прямоугольной формы, а также в форме сектора круга. Было исследовано частотные свойства нескольких вариантов топологий плёночных резисторов одинаковой площади и теоретически обосновано применение квадратных пленочных резисторов, обладающих минимальной паразитной емкостью за счет меньшего значения результирующей краевой емкости.

Во втором разделе автором разработан оригинальный декомпозиционный метод построения многоэлементных широкополосных СВЧ нагрузок, позволяющий расширить полосу рабочих частот за счет разбиения исходного пленочного резистора на более мелкие фрагменты и применения внутренних индуктивных элементов согласования между фрагментами, а также внешних согласующих цепей в виде чебышёвских LC фильтров нижних частот. В общем виде получено аналитическое выражение для расчёта индуктивности внутренних согласующих

элементов. Для предложенного подхода с использованием теории согласования и фильтров сделана оценка полосы рабочих частот для различного числа декомпозиционных фрагментов. На основе составленной эквивалентной схемы многоэлементной нагрузки в сосредоточенном элементном базисе автором диссертации разработана топология нагрузки, содержащая плёночные резисторы и отрезки микрополосковых линий передачи с различным волновым сопротивлением. Далее в этом разделе представлены результаты численного электродинамического моделирования в компьютерной САПР частотных свойств двухэлементной нагрузки на уровень мощности 100 Вт в микрополосковом исполнении. Нагрузка обеспечивает значение коэффициента стоячей волны не хуже 1,2 в полосе частот 0–3,6 ГГц. Высокозначимым научным и техническим результатом, представленным во втором разделе, является обобщение структуры многоэлементной нагрузки до симметричной структуры аттенуатора с затуханием более 10 дБ. В этом случае сохраняется эффект расширения полосы рабочих частот и появляется возможность измерения параметров выходного сигнала передатчика с помощью обычных измерительных приборов, рассчитанных на малый уровень входного сигнала.

Третий раздел посвящен теоретическому анализу и исследованию частотных свойств мощных широкополосных СВЧ нагрузок в виде последовательного включения отрезков микрополосковых линий передачи с возрастающим поверхностным сопротивлением. Для предлагаемых автором распределенных нагрузок в виде микрополосковых линий со значительными потерями приведено теоретическое обоснование получения режима качественного согласования в сантиметровом диапазоне волн. Сделанный вывод о режиме качественного согласования на основе использования теории длинных линий с потерями подтвержден результатами численного электродинамического моделирования. Большой интерес для специалистов представляют также полученные автором математические соотношения для расчета погонного и поверхностного сопротивления резистивного микрополоска каждого отрезка линии передачи, обеспечивающего равномерное распределение поглощаемой СВЧ мощности в каждом из них. Очевидно, что в этом случае увеличивается допустимый уровень мощности входного СВЧ сигнала. При этом автором диссертации установлен важный факт о возможности получения в данных распределенных нагрузках малой неравномерности коэффициента передачи по тестовому выходу после некоторой граничной частоты, являющейся началом полосы рабочих частот. Это позволяет с помощью описанной нагрузки-аттенуатора распределенного типа контролировать с высокой точностью не только параметры модуляции сигнала передатчика, но и его выходную мощность, что расширяет функциональные свойства нагрузки.

В четвёртом разделе подробно описан развитый автором многоканальный способ построения СВЧ нагрузок и аттенуаторов высокого уровня мощности для диапазона частот 0–10 ГГц на основе использования каскадного включения широкополосных диплексеров, выполненных на взаимно дополняющих баттервортовских фильтрах нижних и верхних частот первого и второго порядка. В качестве нагрузок диплексеров используются микрополосковые плёночные резисторы. Для обеспечения работоспособности на высоком уровне мощности в диапазоне частот 0–10 ГГц и выше автор предложил реализовать ФНЧ и ФВЧ на четвертьволновых микрополосковых и симметричных ленточных линиях. Далее в этом разделе представлено оригинальное схемотехническое решение для диплексера в распределённом элементном базисе с использованием частотно-независимой понижающей трансформации характеристического сопротивления, полученной на основе использования преобразований Куроды. За счет понижающей трансформации характеристического сопротивления в три раза в высокочастотном канале диплексера получено расширение полосы рабочих частот нагрузки такой же кратности. Большую ценность представляют результаты данного раздела по исследованию частотных свойств диплексера при работе на реальные нагрузки с конечной полосой пропускания. Это обусловлено тем, что все плёночные нагрузки сосредоточенного типа, в том числе многоэлементные, имеют ограничение по полосе частот сверху, а распределенные нагрузки в виде микрополосковых линий с большими потерями имеют ограничение по полосе частот снизу. В четвертом разделе также предложено использовать неотражающий фильтр нижних частот в качестве широкополосной нагрузки. Для данного схемотехнического решения приводятся результаты расчета и анализа

частотных свойств при использовании в качестве нагрузки и балластных резисторов пленочных диссипативных элементов с паразитными ёмкостями. В конце четвертого раздела диссертации автором показано, что трехканальная нагрузка при каскадном включении двух диплексеров обеспечивает полосу рабочих частот 0-15 ГГц. Рассеивание мощности в такой широкой полосе частот поддерживается тремя диссипативными элементами – одним сосредоточенным и двумя распределенными, при этом полосы рабочих частот смежных каналов перекрываются.

В пятом разделе представлены результаты экспериментального исследования основных узлов многоканальных нагрузок, выполненных как в сосредоточенном, так и распределенном элементном базисе. Описаны конструкции и приведены результаты исследования частотных свойств мощного планарного пленочного резистора размером 10x8 мм², широкополосной нагрузки в виде неотражающего фильтра нижних частот. Экспериментально исследован диплексер первого порядка на отрезках линий передачи с частотой стыковки 1 ГГц. Приведенные автором результаты экспериментов подтверждают хорошее качество согласования исследованных узлов для многоканальных нагрузок сосредоточенного и распределенного типа в заявленном диапазоне частот 0–10 ГГц. Полученные экспериментальные результаты по коэффициенту стоячей волны, полосе рабочих частот и уровню входной мощности соответствуют, а в ряде случаев превышают соответствующие параметры отечественных и зарубежных аналогов. В заключение пятого раздела приведены результаты экспериментального исследования возможности реальной работы одноступенчатой нагрузки в виде отрезка линии передачи с потерями на уровне входной СВЧ мощности 50 Вт при использовании внешнего радиатора воздушного охлаждения, прикрепленного к медной пластине, на которую установлен распределенный диссипативный элемент. При последовательном включении двух или трех ступеней в распределенной нагрузке с внешним радиатором допустимая входная мощность составляет 100 Вт.

Научная новизна полученных автором результатов заключается в следующем.

1. В диссертации предложен и разработан оригинальный декомпозиционный подход к построению широкополосных СВЧ нагрузок и аттенуаторов, позволяющий при сохранении допустимого уровня входной СВЧ мощности расширить полосу рабочих частот пропорционально числу декомпозиционных элементов при использовании внешней согласующей цепи и внутренних индуктивных элементов согласования.

2. Для работы в сантиметровом диапазоне частот автором диссертации предложены многоступенчатые нагрузки на микрополосковых линиях передачи с большими потерями и равномерным распределением рассеиваемой мощности по всей длине, обусловленным скачкообразным возрастанием погонного сопротивления резистивного микрополоска. Предложенные распределённые нагрузки имеют хорошее качество согласования на частотах более 3 ГГц.

3. В диссертации обоснован и развит принцип многоканального построения сверхширокополосных нагрузок и аттенуаторов с использованием широкополосных диплексеров, нагруженных на многоэлементные сосредоточенные и многоступенчатые распределенные диссипативные структуры. Предложены схемотехнические и конструктивные решения для широкополосных диплексеров с частотно-независимой трансформацией характеристического сопротивления.

Практическая значимость и полезность полученных результатов состоит в разработке конструкций и топологий многоканальных нагрузок на уровень входной СВЧ мощности 100 Вт в полосе рабочих частот 0–10 ГГц. Это подтверждается их внедрением на предприятии ООО «НПП Триада-ТВ», а также в учебном процессе на кафедре теоретических основ радиотехники ФГОБУ ВО «Новосибирский государственный технический университет».

Достоверность результатов обусловлена корректным использованием математического аппарата, компьютерным моделированием в апробированных САПР, а также результатами экспериментальных исследований с использованием сертифицированного оборудования.

Апробация результатов. По материалам диссертации опубликовано три статьи в журналах, включенных в перечень ведущих научных журналов, рекомендованных ВАК, и 10 докладов на Российских и международных научно-технических конференциях.

Вместе с тем, по работе имеются **замечания**.

1. В первой главе, в разделе 1.3 (стр. 35) непонятно описан алгоритм формирования Z -матрицы для m блоков поперечной полосы декомпозиционной модели планарного пленочного резистора.

2. Во второй главе диссертации, в разделе 2.2 (стр. 47) не сформулированы ограничения на предельно реализуемое число декомпозиционных фрагментов многоэлементной нагрузки.

3. В третьей главе, где описаны результаты оптимизации частотной зависимости КСВН по входу для двухкаскадной нагрузки-аттенюатора (рис. 3.22), не указан вид целевой функции, что для оптимизационной задачи очень важно.

4. В тексте четвертой главы диссертации не приводятся соотношения, по которым проводится расчёт параметров ленточных линий диплексера, таких, как ширина проводников и расстояние между ними. Также нет описания диплексеров с трансформацией характеристического сопротивления, выполненных на конденсаторах и катушках индуктивности.

Указанные замечания не снижают положительную оценку диссертации, её научной новизны, значимости и достоверности результатов.

Диссертационная работа Савенкова Глеба Георгиевича выполнена на высоком научно-техническом уровне и представляет собой законченную самостоятельную научно-квалификационную исследовательскую работу, которая обладает научной новизной и практической ценностью в части совершенствования сверхвысокочастотных устройств на пленочных микрополосковых резисторах с улучшенными характеристиками по комплексу параметров. Считаю, что диссертационная работа соответствует требованиям п. 9 Положения ВАК РФ о присуждении учёных степеней, а её автор заслуживает присуждения ему степени кандидата технических наук по специальности 05.12.07 – «Антенны, СВЧ устройства и их технологии».

Официальный оппонент

Стукач Олег Владимирович
20.11.18

доктор технических наук, профессор инженерной
школы информационных технологий и робототехники
ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский
Томский политехнический университет»,
пр. Ленина, 30, г. Томск, 634050.
Т./ф.: 3822-701777, e-mail: tpu@tpu.ru

Подпись О.В. Стукача заверяю:
Учёный секретарь ТПУ



О.А. Ананьева