

ОТЗЫВ

официального оппонента

на диссертационную работу **Столяренко Алексея Андреевича** «Широкополосные СВЧ аттенюаторы на основе фильтровых структур с диссипативными потерями», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.12.07 – Антенны, СВЧ устройства и их технологии.

Актуальность темы работы. При разработке, производстве и диагностике передатчиков мощных цифровых и аналоговых трансляционных станций и радиолокационных систем неизбежно возникает необходимость измерения выходных параметров передатчиков, для чего необходимы аттенюаторы нагрузки, способные ослаблять СВЧ мощность в несколько киловатт. Такие аттенюаторы производятся всего несколькими фирмами в мире, это громоздкие устройства с естественным или принудительным охлаждением, в том числе водяным и масляным. Для ряда применений необходимы более компактные мощные аттенюаторы, которые могли бы применяться в расширенном температурном диапазоне, а также в аэрокосмической технике.

Известны волноводные и коаксиальные конструкции мощных аттенюаторов, однако для наиболее распространенного диапазона частот 0-6 ГГц более компактными и технологичными являются устройства в микрополосковом исполнении. В связи с внедрением новых видов модуляции и использованием сверхширокополосных сигналов необходимо создание компактных широкополосных аттенюаторов.

Поставленная в диссертационной работе А. А. Столяренко задача разработки методики расчета и проектирования мощных аттенюаторов на основе микрополосковых RLC-фильтров является безусловно актуальной и открывает перспективы создания новых аттенюаторов и конечных нагрузок большой мощности с улучшенными массогабаритными параметрами и расширенной полосой частот.

Общая характеристика работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы из 115 наименований и приложения, в котором представлены акты внедрения результатов диссертационной работы А. А. Столяренко. Основной текст диссертации изложен на 155 страницах и содержит 103 рисунка и 4 таблицы.

Во введении определена цель исследования, сформулированы научные положения, отмечены новизна, научная ценность, практическая значимость проведенных исследований, отражены вопросы достоверности и апробации полученных результатов, их внедрение.

В первой главе проведен обзор существующих типов аттенюаторов и обоснован выбор пленочной технологии. Рассмотрены варианты схемотехнических решений с учетом свойств диэлектрических подложек и технологических ограничений на изготовление пленочных элементов.

Во второй главе предложена методика проектирования аттенюаторов и определен математический аппарат, лежащий в основе разработанной методики. Предложен оригинальный подход, основанный на инверсии представления об аттенюаторе: паразитные емкости и индуктивности в П- или Т-схемах включения пленочных резисторов рассматриваются как элементы LC-фильтра в первом приближении, а с введением потерь – как элементы RLC-фильтра с привлечением хорошо развитых методов теории фильтров. Также во второй главе предложена конструкция сверхширокополосного СВЧ аттенюатора в виде микрополосковой линии на подложке из слаболегированного полупроводника, проводимостью которого можно управлять на этапе производства. Таким образом, для увеличения теплопередачи предлагается выделять тепловую энергию не на локальных пленочных резисторах, а в объеме материала подложки.

В третьей главе для расширения полосы пропускания аттенюаторов предложено использовать квазиполиномиальные фильтры с потерями в виде пленочных резисторов. Предложены варианты топологии и приведены результаты численного моделирования многозвенных аттенюаторов.

Четвертая глава посвящена проектированию звеньев с малым, менее 1 дБ, затуханием для первых каскадов аттенюатора с целью равномерно

распределить выделяемую тепловую мощность по длине многозвенного аттенюатора. Основой для синтеза структуры аттенюатора предложено использовать фильтры гармоник, в которых к низкоомным участкам микрополосковой линии присоединены параллельные резисторы.

В пятой главе представлены результаты измерений частотных характеристик образцов разработанных аттенюаторов, а также распределений температуры при воздействии большой входной мощности.

Степень обоснованности научных положений, выводов и результатов. Научные положения, выводы и результаты, представленные в работе, основаны на использовании классической теории фильтров, а также корректным применением аппарата анализа многополюсных цепей СВЧ с распределенными параметрами. Достоверность полученных результатов подкреплена согласованностью результатов аналитических расчетов, компьютерного моделирования и экспериментальных исследований.

Научная новизна работы А. А. Столяренко заключается в разработанной методике проектирования аттенюаторов в виде RLC-фильтров, использованы структуры в виде фильтров нижних частот, квазиполиномиальных фильтров с внешними индуктивными связями и микрополосковых ступенчатых фильтров гармоник. Данный подход позволил расширить полосу рабочих частот СВЧ аттенюаторов, и увеличить уровень допустимой входной мощности при использовании многокаскадных структур вплоть до 2 кВт.

Теоретическая значимость работы. Предложенный в диссертационной работе подход, основанный на представлении об аттенюаторе как RLC-фильтре, позволяет использовать паразитные емкости и индуктивности наравне со специально внесенными для управления АЧХ аттенюатора с привлечением хорошо развитых методов теории фильтров.

Практическая значимость работы. Несомненным достоинством является предложенная методика проектирования аттенюаторов, основанная на теории фильтров, которая легко может быть автоматизирована в современных САПР и будет полезной для инженеров, проектирующих аттенюаторы большой мощности и оконечные нагрузки.

Работа выполнена на высоком научно-техническом уровне, научные положения и выводы достаточно обоснованы. Полученные оригинальные результаты имеют научную и практическую значимость в области проектирования СВЧ аттенюаторов большой мощности. Материал диссертации изложен грамотно, автореферат отражает существо диссертации. Содержание, основные выводы и практические рекомендации представленной работы соответствуют паспорту специальности 05.12.07 – «Антенны, СВЧ устройства и их технологии».

Замечания по работе

1. Обычно подразумевается, что аттенюатор как СВЧ-четырёхполюсник должен вносить минимальные искажения сигнала, что по критерию неискаженной передачи требует равномерности АЧХ и линейности ФЧХ в полосе частот, занимаемых спектром сигнала. Однако в диссертационной работе при анализе аттенюаторов учитывается только неравномерность АЧХ и не уделено внимания фазовым искажениям.

2. Слабо обоснован выбор именно чебышевской характеристики RLC-фильтра в качестве основы аттенюатора, ведь этот тип фильтра имеет большую неравномерность АЧХ и ФЧХ.

3. Для аттенюатора с неискажающей микрополосковой линией на полупроводниковой подложке не проведен анализ нелинейных свойств, проявления которых можно ожидать как при больших уровнях входной СВЧ мощности, так и при значительных постоянных смещениях.

4. Отсутствует оценка электрической прочности аттенюатора, ведь, например, для указанной в работе желаемой входной мощности 2 кВт амплитуда напряжения в 50-омном тракте превышает 400 В. Известно, что поле в поперечном сечении микрополосковой линии неравномерное, с локальным усилением на краях, что дает предпосылки для явлений электрического пробоя.

5. В автореферате нет ссылок на приведенные там же рисунки 3 и 5.

Тем не менее, отмеченные недостатки не снижают ценности диссертационного исследования А. А. Столяренко и не снижают общего положительного впечатления о диссертационной работе.

Заключение

Диссертационная работа А. А. Столяренко «Широкополосные СВЧ аттенюаторы на основе фильтровых структур с диссипативными потерями» является законченной научно-квалификационной работой, в которой предложена методика проектирования аттенюаторов на основе многозвенных RLC-фильтров, предложены конструктивные решения и созданы экспериментальные образцы аттенюаторов большой мощности.

Считаю, что диссертационная работа А. А. Столяренко полностью соответствует пп. 9-11, 13, 14 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного Постановлением № 842 от 24.09.2013 Правительства Российской Федерации, а её автор, Столяренко Алексей Андреевич, заслуживает присуждения степени кандидата технических наук по специальности 05.12.07 – Антенны, СВЧ устройства и их технологии.

Официальный оппонент,
кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник лаборатории высокочастотной
электроники Федерального государственного
бюджетного учреждения науки Институт сильноточной
электроники Сибирского отделения
Российской академии наук (ИСЭ СО РАН),

2 декабря 2019 г.



Балзовский Евгений Владимирович

634055, г. Томск, пр. Академический, д. 2/3, ИСЭ СО РАН
тел. (3822) 49-19-00, +79069486174, e-mail: tduty5@mail.ru

Подпись Балзовского Е.В. удостоверяю,
ученый секретарь ИСЭ СО РАН, д.ф.-м.н.



Пегель Игорь Валериевич