

## ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

Дмитренко Анатолия Григорьевича на диссертационную работу Жечева Евгения «Анализ и экспериментальное исследование частотных и временных характеристик полосковых структур с модальной фильтрацией» на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.2.13 – Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения

### Актуальность темы диссертации

Для обеспечения функциональной безопасности радиоэлектронных устройств (РЭУ) необходимо соблюдать требования электромагнитной совместимости (ЭМС). Их невыполнение приводит к функциональным сбоям и повреждениям, как отдельных элементов, так и систем в целом. Из-за роста быстродействия приемо-передающих устройств и повышения плотности монтажа их элементов современные РЭУ становятся более восприимчивыми к воздействию внешних и внутренних электромагнитных помех. Они распространяются по цепям питания, линиям передачи данных и системам заземления. Особо опасными являются кондуктивные сверхширокополосные (СШП) помехи, которые имеют высокое напряжение, малую длительность и широкий спектр. Данная диссертационная работа является продолжением выполненных ранее исследований, связанных с полосковыми структурами с модальной фильтрацией, предназначенными для защиты РЭУ от СШП помех. Поскольку применение таких структур может способствовать обеспечению ЭМС и повышению функциональной безопасности РЭУ, тема диссертационной работы является актуальной.

### Анализ содержания диссертации

Диссертация Жечева Е. состоит из введения, четырех разделов, заключения, списка используемых источников из 240 наименований и одного приложения.

**Во введении** дана характеристика работы, обоснована ее актуальность, сформулированы цель и задачи исследования, представлена научная новизна, положения, выносимые на защиту, теоретическая и практическая значимости полученных результатов.

**В первом разделе** представлен обзор методов защиты РЭУ от мощных СШП помех на основе модальной фильтрации, приведены описание и применение  $N$ -норм.

**Во втором разделе** представлены результаты комплексного исследования частотных и временных характеристик модальных фильтров (МФ), выполненных на основе зеркально-симметричных структур.

**В третьем разделе** представлены результаты исследования полосковых структур с однократным и многократным модальным резервированием (МР), представлена экспериментально-расчетная методика анализа частотных и временных характеристик структур с модальной фильтрацией на основе  $N$ -норм.

**В четвертом разделе** представлены результаты экспериментального исследования устройств защиты электрических цепей от СШП помех. На

основе результатов, полученных в данном разделе, а также разделах 2 и 3, разработаны практические рекомендации по проектированию межсоединений печатных плат для защиты электрических цепей от СШП помех.

**В заключении** представлены основные результаты, даны рекомендации и приведены перспективы дальнейшей разработки темы.

**В приложении** приведены копии актов внедрения, патента на изобретение, свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ, дипломов и сертификатов.

### **Научная новизна работы**

Предложена экспериментально-расчетная методика анализа структур с модальной фильтрацией, включающая в себя измерения  $S$ -параметров в частотном диапазоне, переход во временную область для вычисления откликов на воздействие сверхширокополосных помех и оценку уменьшения их опасности на основе  $N$ -норм.

Предложен подход к улучшению характеристик модальных фильтров, отличающийся соединением опорных проводников между собой только на концах и использованием четвертьволновых резонаторов и широкополосных радиопоглощающих материалов.

Предложен способ компоновки проводников на четырехслойной печатной плате для цепей с модальным резервированием, отличающийся тем, что опорный проводник выполнен в виде двух проложенных друг под другом проводников внутри диэлектрической подложки и закороченных между собой только на концах, так что проводники резервируемой и резервной цепей вместе с дополнительным опорным проводником образуют пятипроводную связанную линию передачи, а радиоэлектронные компоненты размещаются на внешних сторонах печатной платы.

Предложен способ трассировки двух микрополосковых линий передачи, отличающийся контролируемым увеличением электромагнитной связи между ними до допустимого уровня перекрестных наводок от полезного сигнала и использованием модальных искажений для защиты от сверхширокополосных помех.

### **Теоретическая и практическая значимость работы**

Теоретическая значимость:

- Изучены особенности влияния параметров поперечного сечения на временные отклики зеркально-симметричных структур со скрытыми металлизированными отверстиями и различными оконечными нагрузками на ближнем и дальнем концах.

- Изучены температурные зависимости характеристик зеркально-симметричного модального фильтра.

- Проведены оценка ослабления сверхширокополосных помех в структурах с однократным и трехкратным модальным резервированием и систематизация способов многократного модального резервирования на основе симметричных структур.

- Изучено влияние характеристик и параметров ряда симметричных структур с модальной фильтрацией на целостность полезного сигнала.

#### Практическая значимость:

- Разработан прототип модального фильтра с широкополосным радиопоглощающим материалом для экспериментальных исследований модального разложения импульса сверхширокополосной помехи.

- Представлены рекомендации по проектированию межсоединений печатных плат для защиты электрических цепей от сверхширокополосных помех.

- Результаты исследования зеркально-симметричного модального фильтра использованы в модуле фильтра Ф100-М1 космического аппарата в АО «ИСС», г. Железногорск (акт использования РИД).

- Экспериментально-расчетная методика анализа частотных и временных характеристик помехоподавляющего фильтра для защиты силовой шины электропитания космического аппарата и результаты моделирования эффективности экранирования корпуса внедрены в АО «ИСС», г. Железногорск (акт внедрения).

- Комплекс технических решений для обеспечения электромагнитной совместимости, основанный на использовании пассивных помехозащитных устройств, внедрен в ООО «ТРЭМ Инновации», г. Томск (акт внедрения).

- Результаты электродинамического анализа структур с однократным и трехкратным модальным резервированием внедрены в учебный процесс бакалавриата по направлению подготовки «Инфокоммуникационные технологии и системы связи» ТУСУР, г. Томск (акт внедрения).

#### **Степень обоснованности и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций диссертации**

Обоснованность и достоверность результатов работы подтверждается согласованностью результатов, полученных с использованием разных численных методов, в разных программных продуктах, с результатами экспериментальных исследований. Реализуемость предложенных полосковых устройств на практике подтверждена изготовленными прототипами, а также результатами измерений.

#### **Соответствие содержания автореферата содержанию диссертации**

Автореферат диссертации правильно отражает её основные положения и результаты.

#### **Общая характеристика работы**

В работе выполнен ряд новых исследований, касающихся полосковых структур с модальной фильтрацией, наиболее существенными из которых являются следующие: предложена экспериментально-расчетная методика анализа структур с модальной фильтрацией на основе  $N$ -норм, предложен подход к улучшению характеристик модальных фильтров за счет применения широкополосных радиопоглощающих материалов и четвертьволновых резонаторов, предложен способ компоновки печатных проводников для цепей с модальным резервированием. Несомненным достоинством представленной работы является большое количество изготовленных прототипов модальных

фильтров и выполненных на них экспериментальных исследований, подтвердивших как теоретические результаты автора, так и теоретические результаты предыдущих исследований.

### Замечания

При рассмотрении работы возникли следующие замечания.

1. В разделе 2.2.1 отсутствует описание принципа работы предлагаемого модального фильтра с четвертьволновыми резонаторами.

2. В разделах 2.2.2 и 4.4, посвящённых применению в модальных фильтрах радиопоглощающих материалов для повышения эффективности подавления сверхширокополосных помех, отсутствуют исследования влияния этих материалов на целостность полезного сигнала.

3. В работе не объяснено, зачем нужно модальное резервирование с кратностью три и выше.

4. В работе присутствуют некорректные выражения, например, «выполнение измерений устройств в частотной области» или «это приводит к появлению плотности распределения вероятности отклонения фазы и амплитуды полезного сигнала».

### Заключение

Отмеченные недостатки не влияют на общую положительную оценку диссертационной работы. Как следует из вышеизложенного, в целом, диссертационная работа Жечева Евгения «Анализ и экспериментальное исследование частотных и временных характеристик полосковых структур с модальной фильтрацией» является научно-квалификационной работой, в которой содержится решение задачи защиты радиоэлектронной аппаратуры от сверхширокополосных помех с помощью полосковых структур, имеющей существенное значение для радиотехники. Диссертационная работа удовлетворяет п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней» утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, а её автор, Жечев Евгений, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.2.13 – «Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения».

Официальный оппонент,  
доктор физико-математических наук, профессор,  
профессор Национального исследовательского  
Томского государственного университета

 А.Г. Дмитренко  
05.12.2022 г.

ФГАОУ ВО Национальный исследовательский Томский государственный университет»

634050, г. Томск, пр. Ленина, 36

Тел. 3822 52-94-85

E-mail: dmitr.tsu.202@mail.ru



ПОДПИСЬ УДОСТОВЕРЯЮ  
ВЕДУЩИЙ ДОКУМЕНТОВЕД  
УПРАВЛЕНИЕ С ТАМИ

 И.В. Андриенко