


«УТВЕРЖДАЮ»



Проректор по науке и инновациям,  
ФГБОУ ВО «Воронежский  
государственный университет»,  
д.х.н.  О.А. Козадеров  
«                    »                      2020 г.

### ОТЗЫВ

ведущей организации – федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Воронежский государственный университет» на диссертационную работу Белоусова Антона Олеговича «Анализ и оптимизация многопроводных структур с модальным разложением для обработки импульсных сигналов», представленную на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.12.04 – Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения

#### Актуальность работы

Обеспечение электромагнитной совместимости (ЭМС) современных радиоэлектронных средств (РЭС) является актуальной проблематикой для радиотехнических и инфокоммуникационных систем. Решение задач ЭМС РЭС позволяет повысить помехозащищенность устройств, работающих в сложной и интенсивной помеховой обстановке. Показательным примером является бортовая радиоэлектронная аппаратура, в которой неуклонно растет плотность трассировки и монтажа печатных плат. Этот рост и увеличение верхней граничной частоты спектра используемых сигналов приводят к необходимости уделять существенное внимание ЭМС. Весьма актуальной задачей является защита от преднамеренных силовых электромагнитных воздействий. В частности, серьёзное внимание уделяют мощным импульсам наносекундного и субнаносекундного диапазонов, так называемых сверхкоротких импульсов из-за высокой проникающей способности во входные цепи приемников различных РЭС. Предварительное моделирование и оптимизация устройств защиты от таких импульсов являются также актуальными задачами. Не менее важной проблемой является проведение натурного эксперимента по результатам предварительного моделирования и оптимизации для подтверждения возможного использования разложений сверхкоротких импульсов в многопроводных модальных фильтрах (МФ). Целого ряда проблем, связанных с обеспечением ЭМС, можно избежать на этапе проектирования печатных плат и узлов РЭС за счёт применения новых подходов в построении фильтрующе-заградительных цепей. Поэтому тема данной диссертационной работы, посвященной системно-техническим аспектам обеспечения ЭМС РЭС, является актуальной.

### Соответствие темы диссертации научной специальности

Диссертационная работа является законченным научным исследованием на актуальную тему, поскольку моделирование и оптимизация устройств защиты в рамках эскизного проектирования радиотехнической системы является необходимым этапом на пути их совершенствования. В диссертационной работе Белоусова А.О. описаны этапы предварительного моделирования многопроводных защитных устройств для защиты от сверхкоротких импульсов, их разработка в виде макетов многопроводных микрополосковых МФ, сформулированы основные критерии для их оптимизации как в аналитическом виде, так и в виде целевых функций со штрафными ограничениями. Показаны возможности такой оптимизации по одному и/или нескольким критериям. Таким образом, в соответствии с «Положением о присуждении ученых степеней» ВАК, в диссертационной работе Белоусова А.О., решена актуальная задача, имеющая значение для разработки научных и технических основ проектирования и конструирования радиотехнических устройств, что соответствует п.9 «Разработка научных и технических основ проектирования, конструирования, технологии производства, испытания и сертификации радиотехнических устройств» паспорта специальности 05.12.04 – «Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения».

### Общая характеристика работы

В состав диссертационной работы входят введение, 6 разделов, заключение, список литературы из 259 наименований, приложение из 30 с. Объём с приложением – 247 с., в т.ч. 85 рисунков и 46 таблиц.

Во введении автором приведена общая характеристика работы, обоснована актуальность выбранной темы, сформулированы цель и задачи диссертационной работы.

В первом разделе соискателем выполнен аналитический обзор методик и результатов моделирования фильтрующе-защитных устройств на основе полосковых линий и методов их оптимизации, а также рассмотрены подходы к генерации сверхвысокочастотных импульсов.

Во втором разделе представлены результаты поисковой работы по многовариантному анализу и оптимизации многопроводных микрополосковых модальных фильтров посредством эвристического поиска и генетического алгоритма.

В третьем разделе рассмотрены особенности разработки макетов многопроводных микрополосковых модальных фильтров и приведены результаты их натурных исследований.

В четвертом разделе обоснована стратегия основных методов оптимизации и поиска требуемых параметров многопроводных модальных фильтров для защиты от сверхкоротких импульсов по разным критериям посредством эвристического поиска, а также исследованы зеркально-симметричные структуры и представлены результаты натурных и вычислительных экспериментов.

**В пятом разделе** предложены многокритериальные целевые функции с амплитудными и временными критериями, критерием согласования, а также массогабаритным критерием и, с их помощью, выполнена многокритериальная оптимизация многопроводных модальных фильтров посредством генетического алгоритма. Кроме того, исследовано влияние покрывающего слоя на характеристики модальной фильтрации в многопроводных модальных фильтрах.

**В шестом разделе** представляется использование модальной фильтрации в многопроводных полосковых линиях в задачах формирования цуга биполярных и униполярных импульсов.

**В заключении** подведены итоги работы и сформулированы основные результаты, полученные соискателем.

**В приложении** приведены копии актов внедрения, свидетельств, грамот и дипломов.

### **Научная новизна полученных автором результатов, выводов и рекомендаций**

В диссертационной работе получены следующие новые научные результаты:

1. Предложена защита радиотехнических устройств от сверхкоротких импульсов на основе использования многопроводных модальных фильтров: микрополосковых; зеркально-симметричных; с круговой симметрией;

2. Доказана возможность максимизации длительности полностью разлагаемого на последовательность импульсов в многопроводных полосковых модальных фильтрах сверхкороткого импульса, достигающаяся за счет максимизации разности задержек между первым и последним импульсами разложения и выравнивания – между соседними;

3. Введены целевые функции, компоненты которых зависят от амплитуды выходных импульсов, их разностей задержек, временных интервалов между ними, согласования с трактом, массы и объема, и доказана перспективность совместного использования этих компонент при многокритериальной оптимизации структур с модальным разложением;

### **Значимость результатов работы для науки и практики**

**Теоретическая значимость работы** заключается в следующем:

1. Раскрыты особенности влияния параметров зеркально-симметричного и многопроводных микрополосковых модальных фильтров на погонные задержки мод и отклик на воздействие сверхкороткого импульса.

2. Проведена модернизация: целевых функций для оптимизации модальных фильтров; выражений для вычисления погонных задержек мод зеркально-симметричного модального фильтра.

3. Изложен сравнительный анализ четырехпроводного микрополоскового модального фильтра и зеркально-симметричного модального фильтра.

4. Изучены причинно-следственные связи между асимметрией матриц погонных параметров многопроводных линий передачи и формой напряжения в конце линии.

**Практическая значимость работы** характеризуется тем, что:

1. Разработаны и внедрены результаты: моделирования шины печатной платы радиоприемного устройства системы автономной навигации космического аппарата, выявления уровня перекрестных наводок и оценки коэффициента передачи в межсоединениях печатной платы, позволившие выявить критичные места трассировки; создания методологии для синтеза оптимальной сети высоковольтного электропитания перспективных космических аппаратов (2 акта внедрения в АО «ИСС», г. Железногорск); моделирования, экспериментальных исследований и оптимизации многопроводных микрополосковых модальных фильтров для защиты радиоэлектронной аппаратуры от сверхкоротких импульсов, позволившие улучшить подготовку магистрантов двух университетов (2 акта внедрения: НИ ТГУ и ТУСУР, г. Томск).

2. Создана система практических рекомендаций по моделированию, оптимизации и использованию многопроводных модальных фильтров, позволяющая улучшить их характеристики.

3. Представлены предложения по дальнейшему совершенствованию: оптимизации за счет последовательного использования эвристического поиска и генетического алгоритма с уменьшенными вычислительными затратами; генерации высоковольтных импульсов за счет использования многопроводных структур с модальным разложением при формировании цуга колебаний без использования дорогостоящих компонентов.

4. Определена степень влияния потерь в проводниках и диэлектриках многопроводных модальных фильтров при использовании реальных оцифрованных сигналов с разными длительностями.

5. Определены пределы изменения характеристик многопроводных модальных фильтров после нанесения влагозащитного покрытия.

### **Обоснованность и достоверность результатов и выводов работы**

Достоверность изложенных в диссертационной работе результатов основана на сравнении результатов моделирования с результатами других программных продуктов и натурального эксперимента, а также на корректном использовании теории линий передачи и согласованности результатов квазистатического анализа, электродинамического анализа и измерений. Реализуемость предложенных устройств на практике подтверждена моделированием и экспериментально.

### **Апробация результатов работы и публикации**

Основные положения и результаты работы докладывались и обсуждались в материалах конференций: всерос. научно-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых учёных «Научная сессия ТУСУР», Томск, 2015, 2017, 2018 гг.; межд. научно-практ. конф. «Электронные средства и

системы управления», Томск, 2015, 2017, 2018 гг.; Int. Conf. of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices, Эрлагол (Алтай), 2016, 2017, 2019 гг.; Int. Siberian conf. on control and communications, Москва, 2016, Астана, 2017, Томск, 2019; 2017 Sib. Symp. on Data Science and Eng., Новосибирск, 2017 г.; 2017 Int. Multi-Conf. on Engineering, Computer and Information Sciences, Новосибирск, 2017, 2019 гг.; XI Int. IEEE Scientific and Technical Conf. "Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines", Омск, 2017 г.; 23-я межд. научно-практ. конф. «Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири», Томск, 2017, 2019 гг.; межд. научно-метод. конф. «Современное образование: проблемы взаимосвязи образовательных и профессиональных стандартов», Томск, 2017 г.; научно-техн. конф. молодых специалистов «Электронные и электромеханические системы и устройства», АО НПЦ «Полус», Томск, 2018 г.; Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies, Москва, 2018 г.

Основные результаты исследований отражены в 56 публикациях (5 без соавторов): 4 статьи в журналах из перечня ВАК; 2 статьи в журналах, входящих в Q1 WoS или Scopus; 7 статей в журналах, индексируемых в WoS и Scopus; 16 докладов в трудах конференций, индексируемых в WoS и Scopus; 15 докладов в трудах других конференций; 12 свидетельств о регистрации программы для ЭВМ.

#### **Рекомендации по использованию результатов работы**

Результаты диссертационной работы могут быть использованы и внедрены в таких изделиях, как бытовая и офисная техника, специализированное электронное оборудование, бортовая аппаратура и тому подобное. Также они могут быть рекомендованы для использования в различных узко- и широкопрофильных предприятиях и акционерных обществах, например АО «ИСС имени академика М.Ф. Решетнева», в АО «ИСС», г. Железногорск, в НИ ТГУ и ТУСУР, г. Томск. Кроме того, сформулированные критерии и многокритериальные целевые функции, ввиду своей универсальности, могут быть использованы при оптимизации различных МФ. Наконец, подходы к моделированию и оптимизации могут быть использованы в учебном процессе вузов.

#### **Замечания по диссертационной работе**

1. В пункте 5.2.3 выполняется оптимизация четырехпроводного МФ по пяти критериям, включая критерий согласования, однако в подразделе 4.1 (где впервые формулируются критерии) данный критерий отсутствует.

2. В разделе 3 в качестве воздействующего сверхкороткого импульса используется оцифрованный сигнал, однако в дальнейших подразделах 4.2, 4.3 используется идеальный сигнал с общей длительностью 150 пс, тогда как далее в подразделе 4.4 снова используются оцифрованные сигналы.

3. Не удалось увидеть в работе результаты оптимизации посредством генетического алгоритма как зеркально-симметричных МФ, так и МФ с круговой симметрией.

4. Результаты раздела 5 диссертации непосредственно не подтверждаются экспериментом.

Однако эти замечания носят локальный характер и не влияют на общую положительную оценку работы.

### Выводы

1. Диссертационная работа выполнена на актуальную тему, имеет научную новизну и значимость для науки и практики, является законченной научно-квалификационной работой, раскрывающей сформулированную соискателем цель и задачи.

2. Основные результаты, полученные в работе, опубликованы в достаточной степени и известны специалистам в области радиотехники.

3. Автореферат диссертации достаточно полно отражает ее основное содержание и оформлен в соответствии с требованиями ВАК Российской Федерации.

### Заключение

Считаем, что работа удовлетворяет требованиям п.9 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденным постановлением правительства РФ от 24.09.2013 №842 (ред. от 28.08.2017), а её автор, Белоусов Антон Олегович, заслуживает присуждения ему учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.12.04 – «Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения».

Отзыв на диссертационную работу обсужден и одобрен на заседании кафедры электроники ВГУ от 31 августа 2020 г., протокол № 6.

Доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой электроники Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Воронежский государственный университет»

Бобрешов Анатолий Михайлович

E-mail: [bobreshov@phys.vsu.ru](mailto:bobreshov@phys.vsu.ru)

394006, Россия, г. Воронеж, Университетская пл., 1, к. 234.

Телефоны: +7 (4732) 20-82-84 (раб.); 8-910-749-79-45 (сот.)

