

## **ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА**

на диссертационную работу Суровцева Романа Сергеевича

### **«Модальное разложение в полосковых меандровых линиях для защиты радиоэлектронных средств от кондуктивных импульсных помех субнаносекундной длительности»**,

представленную на соискание учёной степени доктора технических наук по специальности 2.2.13 – Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения

### **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

Диссертационная работа Суровцева Р.С. посвящена решению актуальной проблемы защиты радиоэлектронных средств (РЭС) от сверхкоротких импульсов (СКИ). Для её решения автором предложен и исследован метод защиты от СКИ, основанный на модальном разложении импульсных воздействий в полосковых меандровых линиях (МЛ), а также разработаны ряд методик проектирования соответствующих устройств и сами устройства. Работа выполнена на высоком научном уровне, основана на глубоком анализе теоретических основ предметной области и обширном экспериментальном материале. Автором проведён комплекс исследований, охватывающий теоретические аспекты модального разложения, разработку вычислительных алгоритмов и моделей для анализа, создание методик оптимизации и проектирования устройств, а также экспериментальную апробацию полученных результатов.

### **АКТУАЛЬНОСТЬ ТЕМЫ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ**

В современном мире РЭС стали неотъемлемой частью практически всех сфер жизнедеятельности, играя ключевую роль в функционировании элементов критически важной инфраструктуры: от систем связи и навигации, до энергетики и транспорта. Активное развитие и повсеместное использование РЭС привело к стремительному росту их быстродействия и миниатюризации, что в свою очередь, привело к росту восприимчивости РЭС к электромагнитным воздействиям (ЭМВ), в особенности, СКИ. Такие воздействия представляют собой импульсные сигналы с субнаносекундным временем нарастания и наносекундной длительностью. Они обладают широким частотным спектром, вплоть до 10 ГГц. СКИ могут возникать, в том числе, в результате преднамеренного воздействия специализированными электромагнитными системами высокой мощности.

Опасность СКИ для РЭС обусловлена следующими факторами:

- широкий частотный спектр позволяет СКИ проникать внутрь РЭС через апертуры экранов, минуя традиционные средства защиты;
- высокая амплитуда индуцирует в цепях РЭС токи высокой плотности, способные привести к перегреву и разрушению чувствительных элементов;
- кратковременность воздействия затрудняет своевременное срабатывание традиционных защитных устройств, таких как газоразрядники.

В связи с этим, проблема защиты РЭС от СКИ приобретает все большую актуальность по ряду причин:

- повышение уязвимости критически важной инфраструктуры, нарушение работы РЭС, контролирующей работу объектов энергетики, транспорта, связи и других жизненно важных систем, может иметь катастрофические последствия;
- разработка новых и совершенствование существующих систем, способных генерировать мощные направленные воздействия, делает угрозу преднамеренного ЭМВ реальной и ведёт к риску нарушения национальной безопасности страны;
- классические решения, такие как экранирование, заземление и фильтрация не всегда обеспечивают должный уровень защиты от СКИ.

В сложившихся условиях поиск новых и эффективных методов защиты РЭС от СКИ становится критически важной проблемой, имеющей не только научно-техническое, но и социально-экономическое значение.

## АНАЛИЗ СОДЕРЖАНИЯ ДИССЕРТАЦИИ

Диссертационная работа Суровцева Р.С. представляет собой комплексное исследование, посвященное новому методу защиты РЭС от СКИ, основанному на модальном разложении импульсных воздействий в полосковых МЛ. Диссертация хорошо структурирована и представлена в 6 разделах, логично связанных между собой и последовательно раскрывающих тему исследования.

В состав диссертации входят введение, 6 разделов, заключение, список сокращений и условных обозначений, список источников и два приложения с копиями актов о внедрении результатов работы и охранных документов на РИД. Объем диссертации с приложениями составляет 366 страниц. Текст диссертации соответствует рекомендациям ВАК и действующих нормативных документов.

**Раздел 1** посвящен обзору состояния проблемы и постановке задачи. Автор подробно анализирует актуальность защиты РЭС от ЭМВ, классифицирует источники и виды воздействий, рассматривает существующие методы защиты и их ограничения. Особое внимание уделяется анализу многопроводных линий передачи и явлению модального разложения. На основе анализа существующих решений сформулированы цель и задачи диссертационной работы.

**Раздел 2** является подготовительным этапом к основным исследованиям. Автором выполнен предварительный анализ межсоединений реальных печатных плат (ПП), оценивает влияние покрытий и температуры на характеристики линий передачи. Особое внимание уделяется анализу многопроводных межсоединений и поиску способов минимизации перекрестных помех и импеданса цепи питания соединителей РЭС.

**Раздел 3** содержит описание предлагаемого автором нового метода защиты РЭС, основанного на модальном разложении СКИ в витке МЛ. Автор детально исследует закономерности разложения в витках с различными конфигурациями (с боковой и лицевой связью, в однородном и неоднородном диэлектрическом заполнении), оценивает влияние потерь на разложение. Также автор предлагает различные модификации витка МЛ, позволяющие увеличить ослабление СКИ в нём. Немаловажно, что представлены результаты экспериментальной апробации метода, подтвердившие его реализуемость и эффективность.

**Раздел 4** посвящен разработке алгоритмов и моделей для анализа устройств на основе связанных полосковых линий с модальным разложением. Автором предложены новые алгоритмы вычисления ряда ёмкостных матрицы с помощью

блочной версии LU-разложения для решения систем линейных алгебраических уравнений (СЛАУ), что существенно ускоряет анализ. Разработаны аналитические модели временного отклика для разных конфигураций витков МЛ и модальных фильтров (МФ), позволяющие выполнять быстрый предварительный анализ без численного расчёта временного отклика. Кроме того, получены универсальные условия разложения СКИ в многокаскадных устройствах на основе витка. Наконец, на основе разработанных моделей и условий автором разработаны программные модули для анализа полосковых устройств.

**Раздел 5** посвящен созданию методик оптимизации и проектирования полосковых устройств защиты с модальным разложением. Автором разработаны критерии оптимизации, не требующие расчёта временного отклика, что ускоряет процесс синтеза. В качестве критериев автором предложены условия равенства составляющих отклика на выходе устройств. Создана методика проектирования полосковых устройств, основанная на комплексе аналитических и численных методов (в том числе методики оптимизации), позволяющая создавать устройства с оптимальными параметрами.

**Раздел 6** представляет собой экспериментальное подтверждение методики проектирования. Автором выполнено прототипирование различных устройств на основе витка МЛ и МФ, измерение их характеристики во временной и частотной областях, оценки целостности цифрового сигнала. Выполнен сравнительный анализ результатов моделирования и измерений, показавший их согласованность.

**В заключении** сформулированы основные выводы работы и рекомендации по дальнейшему развитию темы исследования.

## НАУЧНАЯ НОВИЗНА РАБОТЫ

Диссертация содержит новые научные результаты, имеющие теоретическую и практическую значимость. К наиболее важным из них относятся:

– предложение новых полосковых устройств, основанных на разложении импульсного воздействия в витке МЛ и выравнивании амплитуд составляющих. Это позволило достичь ослабления СКИ в 1,6–6,3 раза;

– разработка комплекса алгоритмов и моделей для анализа полосковых устройств с модальным разложением. В частности, автор применил блочное LU-разложение для ускорения многократного вычисления ёмкостной матрицы, что значительно сократило время анализа;

– аналитическое доказательство инвариантности равенства амплитуд доминирующих составляющих временного отклика асимметричного 2-проводного МФ к сопротивлениям на концах активного проводника. Это упрощает анализ и проектирование таких устройств;

– разработка критериев параметрической оптимизации, которые не требуют вычисления временного отклика для ряда полосковых устройств. Это позволяет значительно ускорить процесс оптимизации;

– создание методик параметрической оптимизации и проектирования полосковых устройств с модальным разложением. Эти методики позволяют синтезировать устройства с оптимальными параметрами, обеспечивающими эффективное ослабление СКИ.

Таким образом, оригинальные результаты соответствуют п. 7 паспорта научной специальности 2.2.13 – Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения, в части разработки и исследования методов обеспечения электромагнитной совместимости радиотехнических систем и устройств, методов обеспечения их стойкости к электромагнитному излучению и методов защиты информации в этих системах

### ПРАКТИЧЕСКАЯ ЗНАЧИМОСТЬ

Практическая значимость диссертации подтверждается актами внедрения результатов в организациях, занимающихся разработкой РЭС и инструментов для их проектирования (АО «НПЦ «Полус», АО «РЕШЕТНЁВ», ООО «Эремекс»), а также использованием в учебном процессе и научной деятельности университета.

К практически значимым результатам можно отнести:

- методику квазистатического анализа многопроводных межсоединений печатных плат, позволяющую оценивать взаимовлияния в них;
- возможность минимизации перекрестных помех в многопроводных межсоединениях реальных ПП;
- возможность минимизации импеданса цепи питания соединителей РЭС;
- разработку усовершенствованных вычислительных алгоритмов для системы компьютерного моделирования TALGAT, сокращающих время анализа.

### СТЕПЕНЬ ОБОСНОВАННОСТИ И ДОСТОВЕРНОСТЬ НАУЧНЫХ ПОЛОЖЕНИЙ, ВЫВОДОВ И РЕКОМЕНДАЦИЙ

Научные результаты, положения, выводы и рекомендации, представленные в диссертации Суровцева Р.С., обладают высокой степенью обоснованности и достоверности. Это подтверждается использованием строгой теоретической базы, применением широкого спектра методов исследования, включая аналитический расчет, моделирование и натурный эксперимент, обширным экспериментальным материалом, полученным на современном оборудовании, а также валидацией результатов с помощью стандартизированного IEEE метода FSV. Достоверность результатов подтверждается хорошей согласованностью данных, полученных разными методами, а также практическим внедрением результатов исследования и получением 21 патента на изобретение.

### ПОЛНОТА ОПУБЛИКОВАНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ, СООТВЕТСТВИЕ АВТОРЕФЕРАТА СОДЕРЖАНИЮ ДИССЕРТАЦИИ

Результаты диссертации Суровцева Р.С. отражены в 160 публикациях, включая журналы из перечня ВАК и индексируемые Scopus (в т.ч. из Q1), доклады на международных конференциях, 3 монографии, 21 патент на изобретения и 20 свидетельств о регистрации программ. **Автореферат** диссертации точно и лаконично излагает основное содержание работы, ее цели, задачи, методы исследования, научную новизну, теоретическую и практическую значимость, а также основные выводы и рекомендации. Содержание автореферата полностью соответствует содержанию диссертации.

## ЗАМЕЧАНИЯ ПО ДИССЕРТАЦИИ И АВТОРЕФЕРАТУ

Несмотря на высокий уровень диссертационной работы, можно отметить следующие замечания:

– недостаточно подробно рассмотрены вопросы влияния технологических допусков на характеристики разработанных устройств (целесообразно провести анализ чувствительности параметров к технологическим отклонениям);

– не рассмотрены возможности интеграции разработанных устройств в системы защиты от других видов ЭМВ (интересна оценка перспектив создания комплексных систем защиты);

– автор ограничивается анализом воздействия импульсов простой формы, а именно трапецией и гауссовым импульсом (целесообразно рассмотрение СКИ реальных генераторов, имеющих более сложную форму);

– в явном виде отсутствует сравнительный анализ предложенного метода защиты с другими известными методами (это позволило бы более объективно оценить преимущества и недостатки разработанных устройств);

– недостаточно подробно рассмотрены вопросы практической реализации разработанных устройств, в том числе технологические аспекты.

Тем не менее, в работе получены значимые результаты, на основе которых выполнено комплексное исследование предложенного автором метода защиты от СКИ и устройств на его основе. Поэтому перечисленные замечания не влияют на общую научную и практическую ценность диссертационной работы.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основываясь на вышеизложенном, можно сделать вывод, что диссертация Суровцева Романа Сергеевича является научно-квалификационной работой, в которой предложен метод, направленный на решение важной научной проблемы защиты РЭС от СКИ, имеющей важное народно-хозяйственное значение.


Считаю, что диссертационная работа полностью удовлетворяет требованиям п. 9 «Положения о присуждении учёных степеней», а её автор, Суровцев Р.С., заслуживает присуждения ему ученой степени доктора технических наук по специальности 2.2.13 – «Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения».

ОФИЦИАЛЬНЫЙ ОППОНЕНТ,  
доктор технических наук, профессор,  
профессор кафедры систем автоматизированного  
проектирования Казанского национального  
исследовательского технического  
университета им. А.Н. Туполева-КАИ

 Гизатуллин З.М.

03.06.2024

ФГБОУ ВО Казанский национальный исследовательский  
технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ  
420111, Россия, г. Казань, ул. К. Маркса, 10.  
Телефоны: +7 (843) 231-00-81  
E-mail: zmgizatullin@kai.ru

Подпись   
заверяю. Начальник управления  
делопроизводства и контроля

