

На правах рукописи



Газизов Руслан Рифатович

**Математическая модель, численный метод и комплекс программ
для выявления и локализации экстремумов сигнала
в многопроводных линиях передачи**

Специальность 05.13.18

Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Томск 2018

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» (ТУСУР).

Научный руководитель – доктор технических наук
Заболоцкий Александр Михайлович.

Официальные оппоненты: **Гизатуллин Зиннур Марселевич,**
доктор технических наук, доцент, профессор
кафедры систем автоматизированного
проектирования Казанского национального
исследовательского технического университета
им. А.Н. Туполева-КАИ;

Стукач Олег Владимирович,
доктор технических наук, доцент, профессор
инженерной школы информационных технологий
и робототехники Национального
исследовательского Томского политехнического
университета.

Ведущая организация – Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего
образования «Московский физико-технический
институт (государственный университет)»,
г. Долгопрудный.

Защита состоится 27 декабря 2018 года в 10:00 на заседании
диссертационного совета Д 212.268.02 Томского государственного
университета систем управления и радиоэлектроники по адресу: 634050,
г. Томск, ул. Ленина, 40, ауд. 201.

С диссертацией можно ознакомиться на официальном сайте ТУСУРа
<https://postgraduate.tusur.ru/urls/zefwk08n> и в библиотеке по адресу: 634045,
г. Томск, ул. Красноармейская, 146.

Автореферат разослан _____ 2018 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Зайченко Татьяна
Николаевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Возрастающая сложность разрабатываемых устройств и протекающих в них процессов делает всё более важным математическое моделирование, поскольку натуральный эксперимент часто становится очень затратным. В этой связи, показательна широко проникающая в жизнь общества радиоэлектронная аппаратура (РЭА), требующая особенно тщательного математического моделирования, в основе которого, чаще всего, лежит численный анализ с построением схемной математической модели РЭА и вычислением её отклика на заданное воздействие. Сложность этого во многом определяется электромагнитными взаимовлияниями, особенно сильно выраженными в проводниках печатной платы (ПП). Их довольно трудно контролировать, поскольку проводники, в общем случае, расположены произвольно. Однако отдельные элементы ПП (многопроводные шины, спиральные индуктивности, линии задержки) отличаются спецификой трассировки, позволяющей контроль взаимовлияний и даже их усиление для улучшения характеристик этих элементов. Тем не менее, из-за большого числа таких элементов на плате, большой площади отдельного элемента, а также сложной и протяженной формы, могут появиться их паразитные взаимовлияния с другими элементами. Результаты исследований по моделированию межсоединений ПП представлены в работах таких исследователей как Л.Н. Кечиев, Е.Д. Пожидаев, С.Ф. Чермошенцев, R. Achar, F. Canavero, A.R. Djordjevich, M.S. Nakhla, C.R. Paul, T.K Sarkar и др.

Помимо помех, создаваемых полезными сигналами, опасны мощные преднамеренные электромагнитные импульсы наносекундного и субнаносекундного диапазонов, поскольку они способны проникать в РЭА и выводить ее из строя. Распространение таких сигналов в многопроводных линиях передачи (МПЛП) хорошо исследовано. Однако особенности распространения сверхкоротких импульсов (СКИ) вдоль межсоединений ПП с высокой плотностью изучены недостаточно, что может приводить к их неконтролируемому распространению. Выявление и локализация экстремумов сигнала важны, поскольку их результаты могут быть полезны для определения мест возможных паразитных излучений, чтобы своевременно принять меры по их устранению, для обеспечения электромагнитной совместимости. Кроме того, это может быть полезно для выявления более точных мест установки датчиков контроля полезных и мониторинга помеховых сигналов, что также важно для повышения помехозащищенности и надежности РЭА. Для таких исследований целесообразно использовать не измерения, а компьютерное моделирование, так как необходимо получение форм сигнала в большом числе точек вдоль каждого проводника сложных структур. Помимо этого, искажение сигнала импедансом измерителя сказывается на точности определения амплитуд напряжений. Большинство исследований проведено в частотной области, тогда как временной уделено меньше внимания. Между тем изучение процессов во временной области позволит усовершенствовать защиту от СКИ. Поэтому при проектировании РЭА все более важным становится предварительное моделирование целостности сигнала.

Цель работы – разработка математической модели, модифицированного численного метода и комплекса программ для выявления и локализации экстремумов сигнала в МПЛП.

Объект и предмет исследования: распространение электрического сигнала в многопроводной линии передачи и разработка математической модели, численного метода, алгоритмов и комплекса программ для выявления и локализации экстремумов сигнала.

Для достижения поставленной цели необходимо решить такие задачи:

1. Разработать математическую модель для выявления и локализации экстремумов сигнала в МПЛП.
2. Модифицировать численный метод с целью создания возможности выявления и локализации экстремумов сигнала в МПЛП.
3. Разработать комплекс программ для выявления и локализации экстремумов сигнала в МПЛП.
4. Выполнить имитационное моделирование тестовых схем, одиночных отрезков связанных линий, а также конкретных элементов ПП с использованием разработанного комплекса программ.

Научная новизна работы состоит в результатах, полученных впервые

1. Разработана математическая модель для вычисления отклика линии передачи, отличающаяся добавлением нового параметра, отвечающего за число сегментов вдоль отрезка многопроводной линии передачи, а также объединением двух моделей с разными матрично-векторными уравнениями. (Область исследований 1. Разработка новых математических методов моделирования объектов и явлений.)

2. Модифицирован численный метод, отличающийся вычислением токов и напряжений в любой точке вдоль проводников многопроводных линий передачи, с помощью которого в различных полосковых структурах (меандровой линии, С-секции и шине печатной платы) выявляются и локализуются экстремумы сигнала. (Область исследований 5. Комплексные исследования научных и технических проблем с применением современной технологии математического моделирования и вычислительного эксперимента.)

3. Усовершенствован программный комплекс TALGAT с помощью изменения типов данных, передаваемых между модулями, и добавления нового модуля, отличающегося наличием интеграции с библиотекой Qt в сочетании с разработанной математической моделью, алгоритмами и интерактивным интерфейсом пользователя на языке QML. (Область исследований 8. Разработка систем компьютерного и имитационного моделирования.)

Теоретическая значимость

1. Предложена новая модификация существующего численного метода квазистатического анализа, обеспечивающая возможность получения форм сигнала в любой точке вдоль проводников многопроводных линий передачи произвольной сложности.

2. Использование модифицированного численного метода позволяет повысить точность моделирования отклика многопроводных линий передачи, в частности, получить экстремумы сигнала.

Практическая значимость

1. Разработана математическая модель, модифицирован численный метод и разработан комплекс программ для выявления и локализации экстремумов сигнала в многопроводных линиях передачи, результаты использования которого внедрены в учебные процессы двух университетов, а также в процессе выполнения научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ (НИР и ОКР). Имеются акты внедрения.

2. Разработанный комплекс программ, использующий модифицированный численный метод вычисления временного отклика произвольных схем из многопроводных линий передачи, позволяет моделировать (в рамках квазистатического подхода) временной отклик реальных фрагментов многопроводных межсоединений.

3. Разработанные алгоритмы позволяют их использование в системах компьютерного моделирования для анализа электромагнитной совместимости различных фрагментов печатных плат.

4. Выявлены новые особенности распространения напряжения вдоль проводников меандровых линий и шины печатной платы, при изменении различных параметров (нагрузок, местоположения источника воздействия, длительности сверхкороткого импульса), в том числе с применением оптимизации генетическим алгоритмом и эволюционной стратегией.

Методология и методы исследования

В работе применены компьютерное моделирование, квазистатический подход, электродинамический анализ, теория линий передачи, генетический алгоритм и эволюционная стратегия.

Положения, выносимые на защиту

1. Новая математическая модель для вычисления отклика линии передачи позволяет вычислить формы сигнала вдоль каждого проводника произвольной схемы из отрезков многопроводных линий передачи. (Область исследований 1. Разработка новых математических методов моделирования объектов и явлений.)

2. Модифицированный численный метод позволяет, в том числе с использованием оптимизации генетическим алгоритмом и эволюционной стратегией, выявить и локализовать экстремумы сигнала в различных полосковых структурах (меандровой линии из двух витков, С-секции и пятипроводной шине печатной платы). (Область исследований 5. Комплексные исследования научных и технических проблем с применением современной технологии математического моделирования и вычислительного эксперимента.)

3. Усовершенствованный программный комплекс TALGAT позволяет отображать анимированные графики токов и напряжений, а также выявлять и локализовать экстремумы сигнала. (Область исследований 8. Разработка систем компьютерного и имитационного моделирования.)

Соответствие паспорту специальности. Полученные результаты диссертационной работы являются оригинальными и соответствуют пп. 4, 5, 8 области исследований паспорта специальности 05.13.18 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

Достоверность результатов подтверждена их сравнением с результатами теоретическими и программных продуктов.

Использование результатов исследований

1. Получено 8 свидетельств о регистрации программ для ЭВМ.
2. Результаты квазистатического моделирования меандровых линий представлены в технических отчетах по ОКР «Разработка комплекса программных и технических средств для контроля информационных магистралей, обеспечения электромагнитной совместимости и исследования надёжности унифицированного ряда электронных модулей на основе технологии «система-на-кристалле» для систем управления и электропитания космических аппаратов связи, навигации и дистанционного зондирования Земли с длительным сроком активного существования», тема «УЭМ-ТУСУР», хоздоговор 95/10 от 24.11.2010 в рамках реализации Постановления 218 Правительства РФ.
3. Разработанное программное обеспечение и результаты исследований шины печатной платы системы автономной навигации использованы в ходе выполнения ОКР «Разработка принципов построения и элементов системы автономной навигации с применением отечественной специализированной элементной базы на основе наногетероструктурной технологии для космических аппаратов всех типов орбит», тема «САН», хоздоговор 96/12 от 16.11.2012 в рамках реализации Постановления 218 Правительства РФ. (Акт внедрения)
4. Оптимизация с помощью генетического алгоритма (ГА) использована в НИР «Разработка новых программных и аппаратных средств для моделирования и обеспечения электромагнитной совместимости радиоэлектронной аппаратуры» по проектной части государственного задания в сфере научной деятельности 8.1802.2014/К, 2014–2016 гг.
5. Исследования экстремумов сигнала в шине печатной платы и результаты ее оптимизации использованы в НИР «Выявление новых подходов к совершенствованию обеспечения электромагнитной совместимости радиоэлектронной аппаратуры и моделирования систем активного зрения роботов» по базовой части государственного задания Минобрнауки Российской Федерации №8.9562.2017/8.9, ТУСУР, Томск, 2017–2019 гг.
6. Разработанная математическая модель и модифицированный численный метод для выявления и локализации экстремумов сигнала в МПЛП и результаты их использования представлены в отчете о прикладных научных исследованиях «Теоретические и экспериментальные исследования по синтезу оптимальной сети высоковольтного электропитания для космических аппаратов» федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технического комплекса России на 2014–2020 годы», соглашение №14.574.21.0172 от 26.09.2017, 2017–2019 гг.
7. Разработанное программное обеспечение использовано в НИР «Разработка программного модуля для динамической визуализации токов и электромагнитного поля печатной платы» по программе УМНИК, грант №3914ГУ1/2014 от 13.11.2014 г. и №10033ГУ2/2015 от 05.04.2016 г.

8. Результаты работы в области выявления и локализации экстремумов сигнала использованы в учебном процессе НИ ТГУ: целевая подготовка магистрантов физико-технического факультета по программе «Проектирование и конструирование промышленных космических систем» для предприятия «Газпром космические системы» (г. Королев) в весеннем семестре 2017 г. (Акт внедрения.)

9. Результаты работы использованы в учебном процессе ТУСУР при подготовке магистрантов по программам «Электромагнитная совместимость бортовой радиоэлектронной аппаратуры», «Электромагнитная совместимость в топливно-энергетическом комплексе» и «Защита от электромагнитного терроризма» по дисциплине «Преднамеренные силовые электромагнитные воздействия» в 2016–2017 гг. (Акт внедрения.)

Апробация результатов

Результаты позволили подготовить заявки, победившие в конкурсах:

1. Разработка новых программных и аппаратных средств для моделирования и обеспечения электромагнитной совместимости радиоэлектронной аппаратуры – проектная часть государственного задания в сфере научной деятельности 8.1802.2014/К, 2014–2016 гг.

2. Выявление новых подходов к совершенствованию обеспечения электромагнитной совместимости радиоэлектронной аппаратуры и моделирования систем активного зрения роботов – конкурсный отбор 2016 г. по базовой части государственного задания Минобрнауки Российской Федерации №8.9562.2017/8.9, ТУСУР, Томск, 2017–2019 гг.

3. Теоретические и экспериментальные исследования по синтезу оптимальной сети высоковольтного электропитания для космических аппаратов – ФЦП ИР, соглашение №14.574.21.0172, 2017–2019 гг.

4. Разработка программного модуля для динамической визуализации токов и электромагнитного поля печатной платы по программе УМНИК, грант №3914ГУ1/2014 от 13.11.2014 г. и №10033ГУ2/2015 от 05.04.2016 г.

5. Разработка методологии создания помехозащитных устройств на основе модальной технологии – конкурс грантов Президента РФ №14.Z56.18.365-МД 2018–2019 гг.

6. Включение в состав научно-педагогического кадрового резерва ТУСУРа в 2016 г.

7. Назначение стипендий Правительства РФ студентам и аспирантам по приоритетным направлениям в 2015, 2016 и 2018 гг. и повышенной государственной академической стипендии 2014–2016 гг.

Результаты докладывались и представлялись в материалах симпозиумов и конференций:

1. Общероссийская молодежная научно-техническая конференция «Молодежь. Техника. Космос», г. Санкт-Петербург, 2013 г.

2. Научно-техническая конференция студентов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР», г. Томск, 2013, 2015, 2017, 2018 г.

3. Международная научная студенческая конференция МНСК-2013 «Студент и научно-технический прогресс», г. Новосибирск, 2013 г.

4. Международная научно-практическая конференция «Электронные средства и системы управления», г. Томск, 2014 г., 2017 г.

5. Международная научно-техническая и научно-методическая конференция «Современные технологии в науке и образовании», г. Рязань, 2016, 2017 г.

6. Всероссийская научно-техническая конференция «Современные проблемы радиоэлектроники», г. Красноярск, 2016, 2017 г.

7. Международная IEEE научно-техническая конференция «Динамика систем, механизмов и машин», г. Омск, 2016 г., 2017 г.

8. Международная научно-практическая конференция «Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири», г. Томск, 2017 г.

9. Международная конференция молодых специалистов по микро/нанотехнологиям и электронным приборам EDM, Эрлагол, Республика Алтай, 2017 г., 2018 г.

10. Международная IEEE сибирская конференция по управлению и связи SIBCON, Астана 2017 г., Москва 2018 г.

11. Сибирский симпозиум «Наука о данных и инженерия данных», г. Новосибирск, 2017 г.

12. Научно-техническая конференция с международным участием «Инновационные автоматические космические аппараты для фундаментальных и прикладных научных исследований. Актуальные вопросы создания служебных и научных систем», г. Анапа, 2017 г.

13. Международная мульти-конференция по инженерным, компьютерным и информационным наукам СИБИРКОН, г. Новосибирск, 2017 г.

Публикации. По результатам исследований опубликовано 38 работ: 6 статей в журналах из перечня ВАК; 2 статьи в рецензируемых журналах; 9 докладов в трудах конференций, индексируемых WoS и Scopus; 8 свидетельств о регистрации программы для ЭВМ; 12 докладов и 1 тезисы в материалах отечественных конференций. Без соавторов опубликовано 10 работ, в т.ч. 1 статья в журнале из перечня ВАК, 1 доклад в трудах конференции, индексируемой WoS и Scopus, 6 докладов и 1 тезисы в трудах отечественных конференций, 1 свидетельство о регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объём диссертации. В состав диссертации входят введение, 4 главы, заключение, список литературы из 109 наим. и приложение. Объём диссертации – 224 с., в т.ч. 114 рис. и 22 табл.

Личный вклад. Автору принадлежит определяющая роль в основных результатах, полученных в работе. Все результаты получены автором лично или при непосредственном его участии. Часть результатов получена совместно с соавторами публикаций: *Лежниным Е.В., Газизовым Т.Т. и Белоусовым А.О.*

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

1. Обзор проблемы моделирования электрических сигналов в многопроводных линиях передачи

В разделе 1.1 показана актуальность моделирования распространения электрических сигналов вдоль проводников МПЛП. В разделе 1.2 выполнен обзор программных средств для моделирования РЭА. В разделе 1.3 описаны

подходы к моделированию межсоединений. В разделе 1.4 представлены существующие модели для МПЛП. В разделе 1.5 рассмотрены методы оптимизации. В разделе 1.6 приведены выводы, цель и задачи работы.

2. Математическая модель и алгоритмы для выявления и локализации экстремумов сигнала

2.1. Описание математической модели

Новизна модели заключается в добавлении нового параметра n_{TLS} , отвечающего за число сегментов вдоль отрезка МПЛП, заданного пользователем. Для вычисления токов и напряжений вдоль отрезка МПЛП модифицированы выражения по модели Джорджевича, до вида

$$\mathbf{V}(x) = \mathbf{V}_i(x) + \mathbf{V}_r(x) = \mathbf{S}_V(\mathbf{E}\mathbf{0} \cdot \mathbf{C}_1 + \mathbf{E}\mathbf{D} \cdot \mathbf{C}_2), \quad (2.1)$$

$$\mathbf{I}(x) = \mathbf{I}_i(x) - \mathbf{I}_r(x) = \mathbf{S}_I(\mathbf{E}\mathbf{0} \cdot \mathbf{C}_1 - \mathbf{E}\mathbf{D} \cdot \mathbf{C}_2), \quad (2.2)$$

где $\mathbf{E}\mathbf{0} = \text{diag}(\exp(-\gamma_1 x), \dots, \exp(-\gamma_N x))$, $\mathbf{E}\mathbf{D} = \text{diag}(\exp(-\gamma_1 \cdot (l-x)), \dots, \exp(-\gamma_N \cdot (l-x)))$, \mathbf{S}_V и \mathbf{S}_I – матрицы модальных напряжений и токов, l – длина отрезка МПЛП, x – координата, вдоль отрезка, в которой необходимо вычислить значение тока или напряжения (количество значений x определяется параметром n_{TLS}), \mathbf{C}_1 и \mathbf{C}_2 – векторы, описывающие величины мод, γ_m – значение погонной задержки для m -й моды, N – количество сигнальных проводников.

Выражения (2.1) и (2.2) показывают, что напряжения и токи линии передачи в любой точке x можно записать как суммы падающей (i) и отраженной (r) волн. Чтобы их вычислить, необходимо знать векторы \mathbf{C}_1 и \mathbf{C}_2 , которые получаются из

$$\begin{bmatrix} \mathbf{C}_1 \\ \mathbf{C}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{S}_V & \mathbf{S}_V \mathbf{E}(l) \\ \mathbf{S}_I \mathbf{E}(l) & \mathbf{S}_I \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \mathbf{V}(0) \\ \mathbf{V}(l) \end{bmatrix}. \quad (2.3)$$

Для решения (2.3) необходимы значения матрицы распространения $\mathbf{E}(l)$

$$\mathbf{E}(l) = \text{diag}(\exp(-\gamma_1 l), \exp(-\gamma_2 l), \dots, \exp(-\gamma_N l)),$$

и напряжения на ближнем $\mathbf{V}(0)$ и дальнем $\mathbf{V}(l)$ концах МПЛП, определяющиеся после решения матрично-векторного уравнения из модели Накхлы

$$\left(s\mathbf{W} + \mathbf{H} + \sum_{k=1}^n \mathbf{D}_k \mathbf{Y}_k \mathbf{D}_k^t \right) \mathbf{V} = \mathbf{E},$$

где $s = j\omega$; \mathbf{W} , \mathbf{H} – матрицы размера $A \times A$, описывающие произвольные конечные и соединительные схемы из активных и реактивных элементов (A – количество параметров, вычисляемых в модифицированном методе узловых потенциалов); \mathbf{D}_k – матрица-селектор, отображающая токи, входящие в k -ю линию, с элементами $d_{i,j} \in \{0, 1\}$, где $i \in \{1, \dots, A\}$, $j \in \{1, \dots, m_k\}$ с одним ненулевым значением в каждом столбце, $m_k = 2N_k$ – количество токов, входящих в k -ю линию, где N_k – число проводников k -й линии; \mathbf{Y}_k – матрица проводимостей для k -й линии; \mathbf{V} – вектор узловых напряжений и токов; \mathbf{E} – вектор, состоящий из независимых источников напряжения или токов.

Таким образом, разработана математическая модель для вычисления отклика линии передачи, отличающаяся добавлением нового параметра, отвечающего за число сегментов вдоль отрезка МПЛП, а также объединением двух моделей с разными матрично-векторными уравнениями.

2.2. Разработанные алгоритмы

Для применения новой математической модели разработан алгоритм проведения вычислительного эксперимента, включающий в себя разработанные алгоритмы: определения допустимого пути распространения сигнала по проводникам цепи (суть которого в сохранении гальванической связи между отрезками МПЛП на пути распространения сигнала), визуализации распространения сигнала по цепи (в результате которого создаются необходимые команды, и выполняется динамическое отображение форм сигнала) и выявления и локализации экстремумов сигнала (который разделен на две части: алгоритм выявления экстремумов сигнала и сопоставление значения экстремума с координатой на проводнике).

3. Модифицированный численный метод для вычисления токов и напряжений в многопроводных линиях передачи

3.1. Описание численного метода

Модификация численного метода заключается в объединении двух доработанных (глава 2) моделей (Джорджевича и Накхлы), а также в сегментации отрезка МПЛП на сегменты. При этом отклик вычисляется на концах не отрезка МПЛП, а его сегментов. В работе представлен новый алгоритм вычисления токов и напряжений вдоль проводника отрезка МПЛП. В частности, в данном алгоритме шаги 1–4, 7 и 8 основаны на модели Накхлы, а шаги 5 и 6 взяты из модели Джорджевича. На основе модифицированного численного метода выполнено моделирование тестовой восьмипроводной линии передачи и вычислены спектры токов вдоль каждого её проводника.

3.2. Моделирование шины печатной платы системы автономной навигации космического аппарата

Моделировалась реальная шина ПП радиоприемного устройства системы автономной навигации космического аппарата (рисунок 3.1). Выявлены и локализованы максимумы напряжения, в 1,2 и 2,7 раза выше амплитуды сигнала на входе, при разных вариантах нагрузок и активных проводников.

3.2.1. Локализация пиковых значений напряжения в активном проводнике

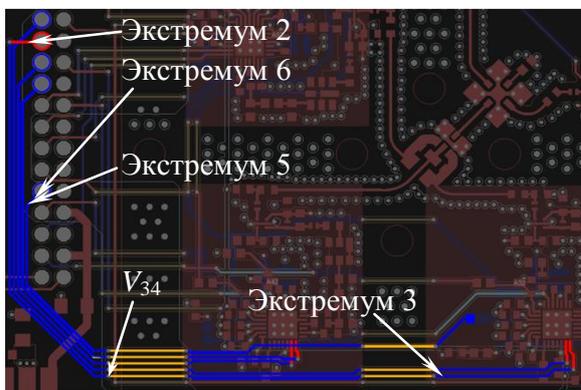


Рисунок 3.1 – Локализация экстремумов сигнала на ПП

Рассмотрены два случая, отличающихся количеством и расположением генераторов напряжений. В первом использован один генератор, подключенный к первому (верхнему на схеме) проводнику, а во втором – два к крайним проводникам. В каждом вычислены формы напряжений вдоль всех проводников при трех длительностях СКИ (в форме трапеции). Выявлены максимумы напряжения, на 18% (экстремум 2) и 20% (экстремум 3)

превышающие амплитуду СКИ на входе, а также минимумы: минус 36% (экстремум 5) и минус 40% (экстремум 6) от уровня 0,5 В.

3.2.2. Локализация пиковых значений перекрестных помех

Исследованы перекрестные помехи в пассивных проводниках шины ПП. Рассмотрены два случая, отличающихся количеством (2 и 4) генераторов напряжений. Для 2-х выявлен максимум перекрестной наводки в 29% (рисунок 3.2 а) от установившегося уровня 0,5 В, а также наибольший (по модулю) минимум в 33,4% от уровня 0,5 В. Для 4-х проводников выявленные максимумы локализованы в узлах, а наибольший минимум составляет 39,8% (рисунок 3.2 б) от уровня 0,5 В.

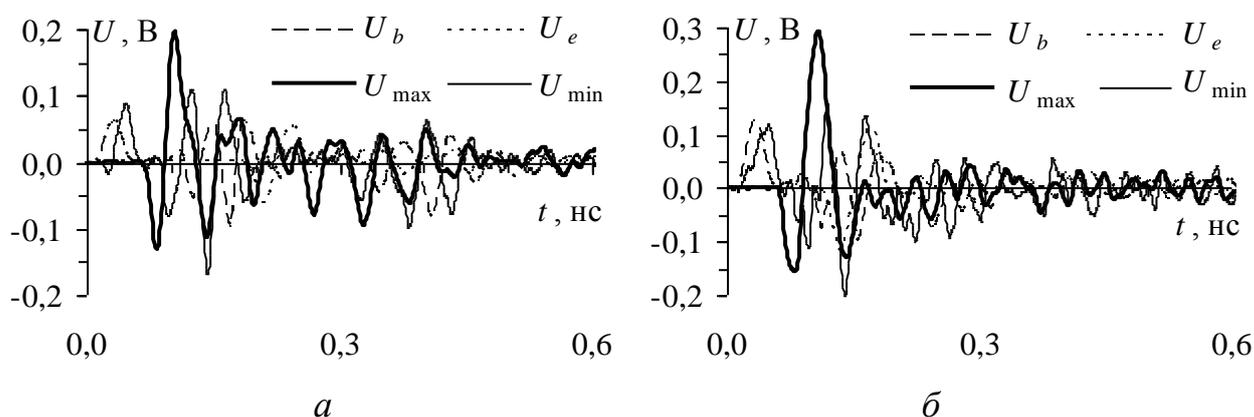


Рисунок 3.2 – Формы сигналов с экстремумами напряжения. Формы напряжений в начале (U_b) и конце (U_e) проводника, с максимумом (U_{\max}) и минимумом (U_{\min}) при воздействии 2 (а) и 4 (б) генераторов

3.2.3. Воздействие электростатического разряда

Выполнено моделирование воздействия ЭСР с формой тока по стандарту IEC 61000-4-2. В активном проводнике шины с окончаниями 50 Ом получено пиковое напряжение 471 В, а в пассивных – от 1 до 32 В (6,8% от сигнала в активном). Получено и значительное отрицательное напряжение (минус 14 В).

3.2.4. Оптимизация генетическим алгоритмом

Оптимизировалась (посредством ГА) длительность СКИ по критерию максимизации пикового значения напряжения. Сначала максимизировалось пиковое значение напряжения в заданном узле шины ПП, а затем – сумма пиковых значений напряжений на концах проводников шины ПП. Целевые функции (ЦФ) исследования:

$$V_{34} = f(t_{\Sigma}) \rightarrow \max, \text{ при } 30 \text{ пс} \leq t_{\Sigma} \leq 3 \text{ нс},$$

$$\sum_{i=1}^3 U_i = f(t_r, t_d, t_f) \rightarrow \max, \text{ при } 10 \text{ пс} \leq t_r, t_d, t_f \leq 1 \text{ нс},$$

где V_{34} – максимальное значение напряжения в узле 34, t_{Σ} – общая длительность СКИ, U_i – максимальное значение напряжения в узле i (в точке I, II или III), t_r , t_d , t_f – длительности фронта, плоской вершины и спада соответственно. Для каждой комбинации числа особей и количества поколений выполнено по 5 запусков ГА. На рисунке 3.3 представлены значения U_{\max} для 5-и запусков при разном количестве (n) вычислений ЦФ. Полученные во время запуска 2 с числом особей 5, а поколений – 75, параметры оптимума использованы при моделировании экстремумов. Выявлен и локализован максимум напряжения в активном проводнике, равный 0,68 В, что на 36% превышает установившийся

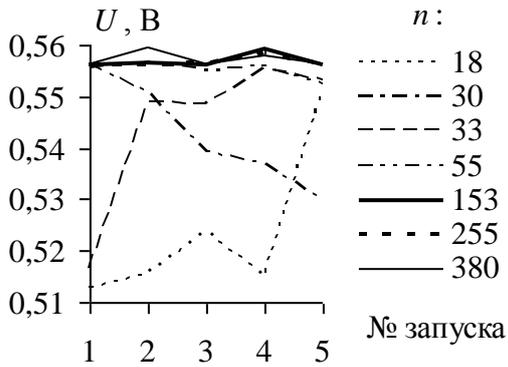


Рисунок 3.3 – Значения U_{\max} для 5-и запусков при разных n

уровень, причем он локализован в сегменте б, на отрезке МПЛП из другого слоя ПП.

Оптимизировались параметры 10 нагрузок шины ПП по критерию минимизации пикового значения напряжения. Амплитуда помехового сигнала в активном проводнике уменьшилась в 30 раз, при этом выявленные вдоль проводников максимумы не превышали значений до оптимизации.

Также исследовано влияние коэффициентов кроссовера и мутации на оптимизацию длительности СКИ по критерию

максимизации пикового значения напряжения в шине. При изменении коэффициента мутации сходимость замедлялась, и наблюдались графики, выбивающиеся из общей группы. Изменение коэффициентов кроссовера дало самую быструю сходимость (при $k_c=0,8$ на 70-м вычислении). Однако на выявленные пиковые уровни напряжения СКИ и перекрестных наводок изменения этих коэффициентов практически не повлияли.

3.2.5. Оптимизация эволюционной стратегией

Использовалась эволюционная стратегия (ЭС) с адаптацией ковариационной матрицы (СМА-2) для выявления наихудших случаев влияния СКИ. Оптимизировалась общая длительность СКИ с целью получения наибольшего пикового напряжения в узле V_{34} . ЭС запускалась по 10 раз для каждого начального решения (3 нс, 300 пс, 30 пс). ЦФ: $-V_{34} = f(t_{\Sigma}) \rightarrow \min$. Показано, что изменение начального решения в диапазоне, близком к наилучшему решению, не влияет на результат оптимизации. Выявлены максимальное значение напряжения, на 20% превышающее амплитуду сигнала на входе, а также максимум перекрестной наводки, составляющий 14% от установившегося уровня в активном проводнике.

Кроме того, с помощью ГА и ЭС исследованы наихудшие случаи перекрестной помехи. В результате выявлены и локализованы максимумы перекрестных наводок, составляющие 32% и 78% от установившегося уровня в активных проводниках. Показано, что ГА справляется с этой задачей лучше, чем ЭС.

Таким образом, модифицированный численный метод позволяет, в том числе с использованием оптимизации генетическим алгоритмом и эволюционной стратегией, выявить и локализовать экстремумы сигнала в различных полосковых структурах.

4. Комплекс программ для выявления и локализации экстремумов сигнала в многопроводных линиях передачи

Представлен усовершенствованный комплекс программ. Описаны структура и интерфейс комплекса программ и тестирование его возможностей.

4.1. Назначение и структура комплекса программ

На основе алгоритмов из главы 2 усовершенствован комплекс программ (система TALGAT) добавлением возможностей выявления и локализации экстремумов сигнала в МПЛП. На рисунке 4.1 представлена его структура. Добавлена библиотека сценариев, содержащая в себе готовые программы. Показано изменение типа передаваемых данных между модулями, а также новый модуль комплекса. Для вычисления токов и напряжений вдоль проводников отрезков МПЛП разработан модуль RESPONSEX.tlm, включенный в вычислительное ядро. Для графического интерфейса использован кроссплатформенный инструментарий Qt, разработаны специальные классы. Взаимодействие объектов внутри программного комплекса отображено на диаграмме последовательности UML. Описан интерфейс программного комплекса, протестированы его возможности.

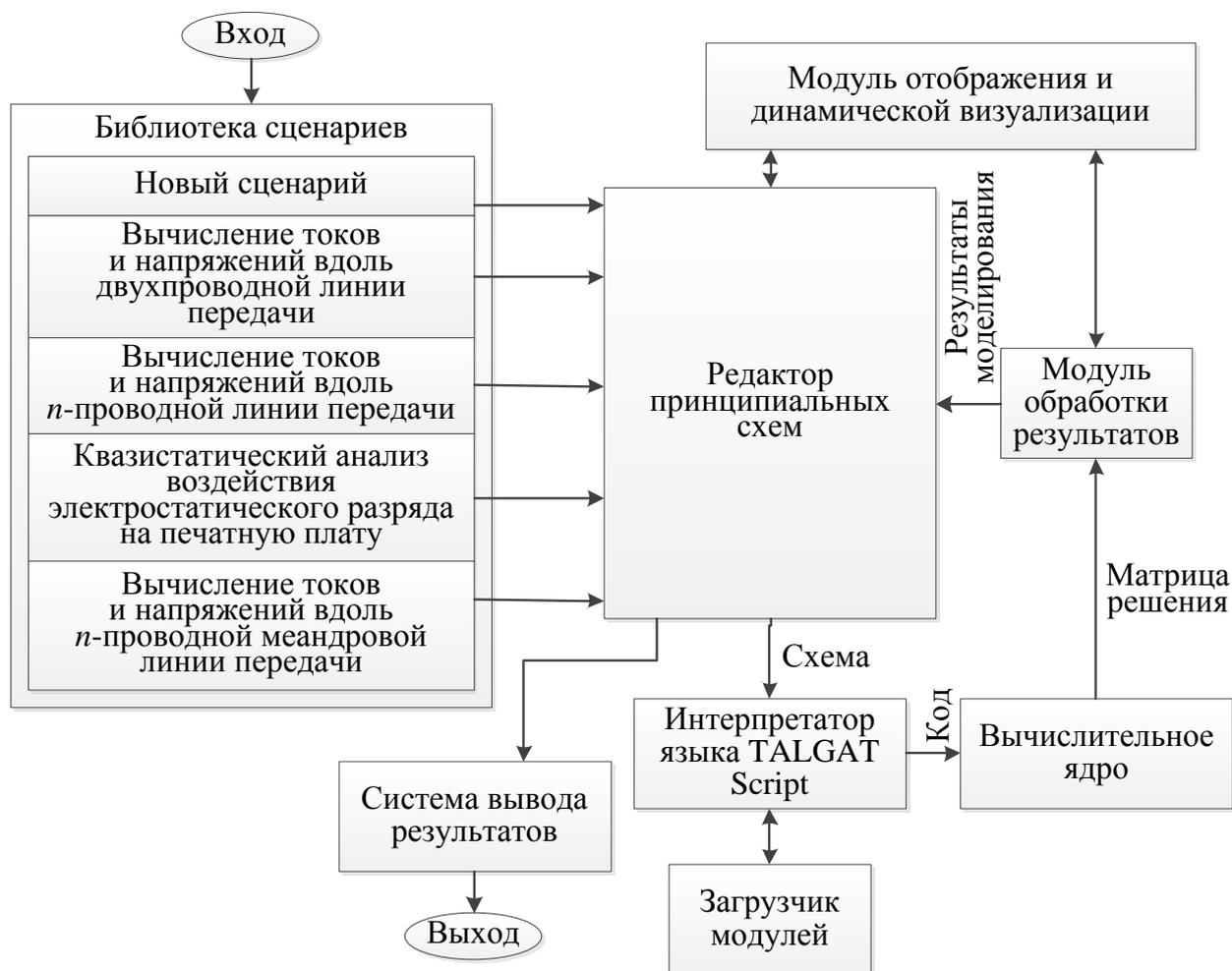


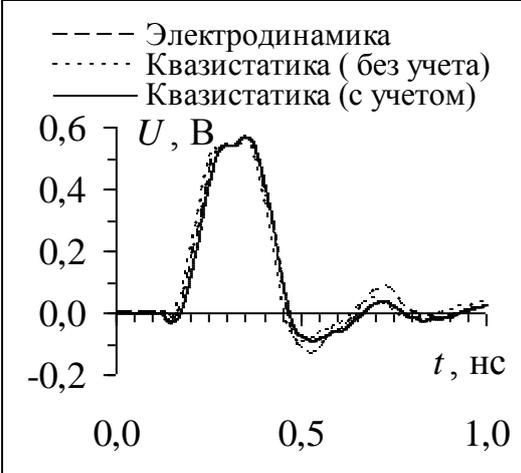
Рисунок 4.1 – Структура программного комплекса

4.2. Сравнение результатов квазистатического и электродинамического моделирования

Для верификации квазистатического моделирования выполнено электродинамическое моделирование при прочих равных условиях. Сравнение форм напряжений в точке локализованного максимума показывает хорошее согласование основной формы импульса. Для более точного учета реальной структуры проведено еще одно квазистатическое моделирование с учетом

перемычек. Вычисленные формы напряжений и их сравнение приведены в таблице 4.1. Основные формы импульса практически полностью совпадают. За эталонные принимались значения, полученные электродинамикой. Кроме того, рассчитано среднеквадратическое отклонение разности амплитуд.

Таблица 4.1 – Сравнение результатов для двухвитковой меандровой линии

	Анализ	Амплитуда, В	Отличие амплитуд, %	Задержка, нс	Отличие задержек, %	Время вычисления, с
	Электр-ка	0,562	0	0,145	0	1080
Кваз-ка (без учета)	0,570	1,42	0,128	11,72	0,556	
Кваз-ка (с учетом)	0,569	1,24	0,134	7,58	0,984	

Кроме того, для сравнения результатов вычислений применен критерий Пирсона. Полученное критическое значение равно 0,01. Значение «Хи квадрат»=0,00039. Для доказательства корректности вычислений необходимо условие, при котором «Хи квадрат» будет меньше критического значения. В примере это условие достигнуто, таким образом, вычисления корректны.

4.3. Использование результатов исследования

В разделе подробно описано использование результатов из пп.1–9 одноименного раздела Введения, подтвержденное актами внедрения, свидетельствами о регистрации программ для ЭВМ, а также представлением в отчетах о выполнении НИР и ОКР.

Таким образом, усовершенствован программный комплекс TALGAT с помощью изменения типов данных, передаваемых между модулями, и добавления нового модуля, отличающегося наличием интеграции с библиотекой Qt в сочетании с разработанной математической моделью, алгоритмами и интерактивным интерфейсом пользователя на языке QML.

Заключение

В заключении диссертации перечислены ее результаты, показавшие, что цель работы достигнута, а они имеют значение для технических наук в области исследований по п. 1, 5, 8 паспорта специальности 05.13.18 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

ПУБЛИКАЦИИ ПО МАТЕРИАЛАМ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в журналах из перечня ВАК

1. Газизов Р.Р. Локализация максимумов сигнала в многопроводных линиях передачи печатных плат с помощью системы TALGAT / Р.Р. Газизов, А.М. Заболоцкий, П.Е. Орлов // Докл. Том. гос. ун-та систем упр. и радиоэлектроники. – 2015. – 4(38) – С. 153–156.

2. Газизов Р.Р. Исследование распространения сверхкороткого импульса в микрополосковой С-секции при изменении зазора между связанными

проводниками / Р.Р. Газизов, А.М. Заболоцкий, Т.Т. Газизов // Докл. Том. гос. ун-та систем упр. и радиоэлектроники. – 2016. – Т. 19, № 1 – С. 79–82.

3. Газизов Р.Р. Исследование максимума напряжения сверхкороткого импульса в микрополосковой меандровой линии при изменении ее геометрических параметров / Р.Р. Газизов, А.М. Заболоцкий, Т.Т. Газизов // Технологии электромагнитной совместимости. – №3(58). – 2016. – С. 11–17.

4. Газизов Р.Р. Локализация максимумов напряжения в шине печатной платы системы автономной навигации космического аппарата / Р.Р. Газизов, А.М. Заболоцкий, А.О. Белоусов, Т.Т. Газизов // Труды МАИ. – Вып. 89: [Электронный ресурс] URL: https://www.mai.ru/upload/iblock/9db/gazizov_zabolotskiy_belousov_gazizov_rus.pdf (дата обращения: 29.08.2017).

5. Газизов Р.Р. Исследование локализации пиковых значений сигнала в печатной плате системы автономной навигации / Р.Р. Газизов, Т.Т. Газизов // Инфокоммуникационные технологии. – 2017. – №2. – С. 10–18.

6. Газизов Р.Р. Методика и алгоритмы для выявления и локализации экстремумов сигнала в многопроводных линиях передачи // Системы управления, связи и безопасности. – 2017. – № 4. – С. 1–14. URL: <http://sccs.intelgr.com/archive/2017-04/01-Gazizov.pdf>.

Доклады в трудах конференций, индексируемых WoS и Scopus

1. Gazizov R.R. Ultrashort pulse maximum localization in multiconductor structures / R.R. Gazizov, A.M. Zabolotsky, T.R. Gazizov // IEEE Conf. 2016 Dynamics of systems, mechanisms and machines. – Omsk, 14–16 November, 2016. – P. 1–5.

2. Gazizov R.R. Optimization of ultrashort pulse duration with usage of genetic algorithms by criteria of peak voltage maximization in PCB bus / R.R. Gazizov, T.T. Gazizov, A.O. Belousov, T.R. Gazizov // Proc. of IEEE 2017 Siberian symp. on data science and engineering. – Novosibirsk, 12–13 Apr. 2017. – P. 69–73.

3. Gazizov R.R. Influence of ultrashort pulse duration on its peak values localization in PCB of spacecraft autonomous navigation system / R.R. Gazizov, A.M. Zabolotsky, T.T. Gazizov, A.O. Belousov // 18th Int. conf. of young specialists on micro/nanotechnologies and electron devices. – Erlagol, Altai, 29 June – 3 July, 2017. – P. 69–74.

4. Gazizov R.R. Influence of ultrashort pulse duration on localization of crosstalk peak values in PCB of spacecraft autonomous navigation system / R.R. Gazizov, A.O. Belousov, T.R. Gazizov // Proc. of Int. Siberian conf. on control and communications (SIBCON–2017). – Astana, The Republic of Kazakhstan, 29–30 June, 2017. – P. 1–6.

5. Gazizov R.R. Influence of crossover and mutation coefficients on GA optimization of ultrashort pulse duration by criteria of peak voltage maximization in PCB bus / R.R. Gazizov, R.S. Ryabov, T.T. Gazizov // Proc. of IEEE 2017 International multi-conf. on engineering, computer and information sciences. – Novosibirsk, 18–24 Sep. 2017. – P. 14–18.

6. Gazizov R.R. Simulation of ESD effects on PCB bus of spacecraft autonomous navigation system // Proc. of IEEE 2017 International multi-conf. on

engineering, computer and information sciences. – Novosibirsk, 18–24 Sep. 2017. – P. 26–30.

7. Gazizov R.R. Optimization of PCB bus loads with usage of Genetic Algorithms by criteria of peak voltage minimization / R.R. Gazizov, M.N. Kuharenko, T.R. Gazizov // IEEE Conf. 2017 Dynamics of systems, mechanisms and machines. – Omsk, 14–16 November, 2017. – P. 13–17.

8. Gazizov R.R. Use of evolution strategy in identifying the worst case effects of ultrashort pulse propagation in PCB bus of spacecraft autonomous navigation system / Ruslan R. Gazizov, Alexander M. Zabolotsky, Rustam R. Gazizov // Int. Siberian Conf. on Control and Communications (SIBCON 2018). – Moscow, March 14–16, 2018. – P. 1–4.

9. Gazizov Ruslan R. Use of genetic algorithm and evolution strategy when revealing the worst case effects of crosstalk propagation in PCB bus of spacecraft autonomous navigation system / Ruslan R. Gazizov, A.M. Zabolotsky, Rustam R. Gazizov // 19th Int. conf. of young specialists on micro/nanotechnologies and electron devices (Erlagol, Altai, 29 June – 3 July). – Erlagol, 2018. – P. 93–97.

Публикации в рецензируемом журнале

1. Газизов Р.Р. Локализация максимумов сверхкороткого импульса вдоль многопроводных структур / Р.Р. Газизов, А.М. Заболоцкий, Т.Р. Газизов // Динамика систем, механизмов и машин. – 2016. – Т. 2, № 1. – С. 68–74.

2. Газизов Р.Р. Оптимизация параметров нагрузок шины печатной платы с помощью генетических алгоритмов по критерию минимизации пикового напряжения / Р.Р. Газизов, М.Н. Кухаренко, Т.Р. Газизов // Динамика систем, механизмов и машин. – 2017. – Т. 2, № 1. – С. 45–52.

Доклады в трудах отечественных конференций

1. Газизов Р.Р. Участие студентов младших курсов в НИОКР ТУСУРА по космической тематике как начало подготовки кадров для ракетно-космической отрасли // V Общеросс. молодежная науч.-техн. конф. «Молодежь. Техника. Космос» (20–22 марта 2013 г.). – Санкт-Петербург, 2013. – С. 254–256.

2. Газизов Р.Р. Результаты квазистатического анализа токов вдоль отрезка многопроводной шины печатной платы // Научная сессия ТУСУР – 2013: Материалы Всеросс. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых (15–17 мая 2013 г.). – Томск, 2013. – С. 103–105.

3. Газизов Р.Р. Программный модуль для динамической визуализации токов и электромагнитного поля печатной платы // Электронные средства и системы управления: Материалы докладов X Межд. науч.-практической конф. (12–14 ноября 2014 г.). – Томск, 2014. – С. 200–202.

4. Лежнин Ев.В. Анимированные графики для визуализации токов и напряжений в системе TALGAT / Ев.В. Лежнин, Р.Р. Газизов // Научная сессия ТУСУР – 2015: Материалы Всеросс. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых (13–15 мая 2015 г.). – Томск, 2015. – С. 109–111.

5. Газизов Р.Р. Функции локализации и визуализации токов и напряжений в системе TALGAT / Р.Р. Газизов, Ев.В. Лежнин // Межд. науч.-техн. и науч.-методическая конф. «Современные технологии в науке и образовании – СТНО-2016» (2–4 марта 2016 г.). – Рязань, 2016. – С. 100–103.

6. Газизов Р.Р. Исследование максимума напряжения сверхкороткого импульса в микрополосковой С-секции при изменении её длины / Р.Р. Газизов, А.М. Заболоцкий // XIX Всеросс. науч.-техн. конф. «Современные проблемы радиоэлектроники» (5–6 мая 2016 г.). – Красноярск, 2016. – С. 315–319.

7. Газизов Р.Р. Применение динамической визуализации в образовательном процессе // 22-я межд. науч.-практическая конф. «Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири (СИБРЕСУРС-22-2016)» (10–11 октября 2016 г.). – Томск, 2016. – С.60–63.

8. Газизов Р.Р. Исследование локализации максимумов сверхкоротких импульсов в витке меандровой линии при изменении ее параметров // Межд. науч.-техн. и науч.-методическая конф. «Современные технологии в науке и образовании – СТНО-2017» (1–3 марта 2017 г.). – Рязань, 2017. – С. 93–98.

9. Gazizov R.R. Investigation of ultrashort pulse maximums localization in turn of meander line with variation of its duration // Научная сессия ТУСУР –2017: Материалы межд. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, посвященной 55-летию ТУСУРа (10–12 мая 2017 г.). – Томск, 2017. – С. 166–169.

10. Газизов Р.Р. Выявление максимумов напряжения сверхкороткого импульса вдоль микрополосковой С-секции с помощью генетических алгоритмов / Р.Р. Газизов, Т.Т. Газизов // XX Всеросс. науч.-техн. конф. «Современные проблемы радиоэлектроники» (4–5 мая 2017 г.). – Красноярск, 2017. – С. 626–630.

11. Газизов Т.Р. Воздействие сверхкороткого импульса на шину печатной платы системы автономной навигации космического аппарата: моделирование и оптимизация генетическими алгоритмами / Т.Р. Газизов, Р.Р. Газизов, Т.Т. Газизов // II Науч.-техн. конф. «Инновационные автоматические космические аппараты для фундаментальных и прикладных научных исследований. Актуальные вопросы создания служебных и научных систем» (4–9 сентября 2017 г.). – Анапа, Краснодарский край, 2017. – С. 49–59.

12. Газизов Рустам Р. Выявление и локализация экстремумов сигнала в двухвитковой меандровой линии с учетом потерь / Рустам Р. Газизов, Руслан Р. Газизов // Сборник избранных статей научной сессии ТУСУР, Томск, 16–18 мая 2018 г.: в 3 частях. – Томск: В-Спектр, 2018 – Ч. 2. С. 246–248.

Тезисы в трудах отечественной конференции

1. Газизов Р.Р. Вычисление токов вдоль многопроводных межсоединений печатных плат // Межд. науч. студенческая конф. МНСК–2013 «Студент и научно-технический прогресс» (12–18 апреля 2013 г.). – Новосибирск, 2013. – С. 37.

Свидетельства о регистрации

1. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2013619615. TALGAT 2012. Авторы: Газизов Т.Р., Мелкозеров А.О., Газизов Т.Т., Куксенко С.П., Заболоцкий А.М., и др. Всего 13 чел. Заявка № 2013617773. Дата поступления 29 августа 2013 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 11 октября 2013 г.

2. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015614365. TALGAT 2013. Авторы: Газизов Т.Р., Мелкозеров А.О., Газизов Т.Т., Куксенко С.П., Заболоцкий А.М., и др. Всего 15 чел. Заявка № 2015611288. Дата поступления 3 марта 2015 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 16 апреля 2015 г.

3. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2015615880. Вычисление напряжений и токов вдоль двухпроводной линии передачи на основе квазистатического анализа. Авторы: Газизов Р.Р., Заболоцкий А.М. Заявка №2015612556. Дата поступления 2 апреля 2015 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 26 мая 2015 г.

4. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015617550. TALGAT 2014. Авторы: Газизов Т.Р., Мелкозеров А.О., Газизов Т.Т., Куксенко С.П., Заболоцкий А.М., и др. Всего 17 чел. Заявка № 2015614488. Дата поступления 27 мая 2015 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 17 июля 2015 г.

5. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 20156660487. TALGAT 2015. Авторы: Газизов Т.Р., Мелкозеров А.О., Газизов Т.Т., Куксенко С.П., Заболоцкий А.М., и др. Всего 17 чел. Заявка № 2015617580. Дата поступления 17 августа 2015 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 1 октября 2015 г.

6. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016662520. TALGAT 2016. Авторы: Газизов Т.Р., Мелкозеров А.О., Газизов Т.Т., Куксенко С.П., Заболоцкий А.М., и др. Всего 27 чел. Заявка № 20166619296. Дата поступления 01 сентября 2016 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 14 ноября 2016 г.

7. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2018611481. TALGAT 2017. Авторы: Газизов Т.Р., Мелкозеров А.О., Газизов Т.Т., Куксенко С.П., Заболоцкий А.М., и др. Всего 23 чел. Заявка №2017663209. Дата поступления 13 декабря 2017 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 02 февраля 2018 г.

8. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2018619671. Квазистатический анализ воздействия электростатического разряда на печатную плату. Автор: Газизов Руслан Р. Дата поступления 18 июня 2018 г. Заявка №2018616368. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 09 августа 2018 г.