

На правах рукописи



**Куксенко Сергей Петрович**

Методы оптимального проектирования  
линейных антенн и полосковых структур  
с учетом электромагнитной совместимости

Специальность 05.12.07  
Антенны, СВЧ-устройства и их технологии

Автореферат  
диссертации на соискание учёной степени  
доктора технических наук

Томск – 2019

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

**Научный консультант:** **Газизов Тальгат Рашитович**,  
доктор технических наук, доцент

**Официальные оппоненты:** **Григорьев Андрей Дмитриевич**, доктор технических наук, профессор, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)», г. Санкт-Петербург, профессор;

**Горбачёв Анатолий Петрович**, доктор технических наук, доцент, Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, профессор;

**Дмитренко Анатолий Григорьевич**, доктор физико-математических наук, профессор, Национальный исследовательский Томский государственный университет (НИ ТГУ), г. Томск, профессор.

**Ведущая организация:** Федеральное государственное унитарное предприятие Ордена Трудового Красного Знамени научно-исследовательский институт радио, г. Москва.

Защита состоится 24 декабря 2019 г. в 9 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 212.268.01, созданного на базе ТУСУР, по адресу: 634050, г. Томск, ул. Ленина, 40, ауд. 201.

С диссертацией можно ознакомиться на официальном сайте <https://postgraduate.tusur.ru/urls/0e0uix331> и в библиотеке ТУСУР по адресу: 634045, г. Томск, ул. Красноармейская, 146.

Автореферат разослан \_\_\_\_ сентября 2019 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 212.268.01  
доктор физико-математических наук



Мандель А.Е.

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **Актуальность темы исследования**

С конца XIX века началось продолжающееся до сих пор активное проникновение во все сферы современного общества различных радиоэлектронных средств (РЭС). Достижения в области радиотехники и электроники, а также в вычислительных, информационных, телекоммуникационных и других технологиях очень способствуют этому. Основными элементами РЭС являются антенны и сверхвысокочастотные (СВЧ) устройства. Так, например, линейные (проволочные) антенны служат основой сетей ведомственной дальней связи различных силовых структур и учреждений, а основу СВЧ-устройств составляют полосковые структуры. Однако общая тенденция развития РЭС обостряет проблему электромагнитной совместимости (ЭМС), появившуюся со времен первых радиопередатчиков. Современный рынок требует регулярного и быстрого появления с минимальными затратами всё более совершенных видов РЭС. При этом их конструктивное усложнение и ужесточение требований ЭМС в связи с ростом верхних частот полезных и помеховых сигналов, плотности монтажа, а также возможностей генераторов преднамеренных электромагнитных воздействий в совокупности с необходимостью учёта межэлементных, межблочных и межсистемных взаимовлияний обуславливает всё более тщательное проектирование РЭС. Такое проектирование невозможно без компьютерного моделирования, позволяющего экономить временные и финансовые ресурсы, а также оценивать правильность принятых технических решений. В ходе проектирования, как правило, выполняется многовариантный анализ или оптимизация изделия. При этом используются методы вычислительной электродинамики. Одним из таких методов является метод моментов (МоМ). В его основе лежит замена непрерывных функций их дискретными аналогами (построение сетки), что сводит задачу к решению системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ).

Учет требований ЭМС приводит к очень большому порядку (определяемому сложностью моделируемого объекта и окружающего его пространства) и количеству (определяемому верхней частотой помехового сигнала, числом и диапазоном оптимизируемых параметров) решаемых систем. Это резко увеличивает вычислительные затраты, что становится главной преградой для эффективного проектирования. Таким образом, уменьшение вычислительных затрат на анализ и оптимизацию элементов РЭС (в частности, линейных антенн и полосковых структур) при их проектировании с учётом ЭМС является актуальной научной проблемой.

### **Степень разработанности темы**

Разработке научных основ проектирования РЭС посвятили свои труды Баланис К., Воскресенский Д.И., Неганов В.А., Нефедов Е.И., Никольский В.В., Малютин Н.Д. и др. В решение задач ЭМС РЭС большой вклад внесли Кечиев Л.Н., Князев А.Д., Отт Г., Пауль К. и др., а в разработку теории метода моментов – Джорджевич А., Кравчук М.Ф., Крылов Н.М., Митра Р., Саркар Т., Харрингтон Р. и др.

Разработкой и применением методов решения СЛАУ занимались Аксельсон О., Бензи М., Воеводин В.В., Ван дер Ворст Х., Голуб Дж., Дафф И.С., Деммель Дж., Донгарра Дж., Ильин В.П., Колотилина Л.Ю., Марчук Г.И., Ван Лоун Ч., Саад Ю., Самарский А.А., Тихонов А.Н., Тума М., Тыртышников Е.Е., Фаддеев Д.К., Фаддеева В.Н., Хакбуш В., Хигхам Н. и др.

**Цель диссертационного исследования** – разработать методы уменьшения вычислительных затрат на проектирование полосковых структур и линейных антенн с учетом ЭМС.

Для её достижения необходимо решить следующие **задачи**: провести обзор существующих методов и подходов в области проектирования РЭС и уменьшения вычислительных затрат на проектирование; разработать методы уменьшения вычислительных затрат на одновариантный анализ; разработать методы ускорения многовариантного анализа; реализовать разработанные методы в программах для анализа РЭС; выполнить апробацию разработанных методов на конкретных задачах анализа и оптимизации.

### **Научная новизна**

1. Предложено совершенствование электродинамического анализа линейных антенн методом моментов, отличающееся использованием итерационного решения системы линейных алгебраических уравнений с вычислением предобусловливателя на основе алгебраической предфильтрации по евклидовой норме строк матрицы системы.

2. Разработаны два метода квазистатического анализа полосковых структур, отличающихся использованием модифицированного адаптивного итерационного выбора оптимальной сегментации и итерационного решения системы линейных алгебраических уравнений с неполным LU-разложением и модифицированным разреженным строчным форматом хранения предобусловливателя.

3. Предложено совершенствование квазистатического анализа полосковых структур в диапазоне параметров методом моментов, отличающееся адаптивным переформированием предобусловливателя по средним арифметическим значениям времени и сложности итерационного решения последовательности систем линейных алгебраических уравнений.

4. Доказано, что время квазистатического анализа полосковых структур в диапазоне параметров методом моментов может зависеть от выбора очередности (с начала, конца или середины диапазона) решения полученной последовательности систем линейных алгебраических уравнений.

5. Разработан метод квазистатического анализа полосковых и проводных структур в диапазоне параметров, отличающийся решением последовательности систем линейных алгебраических уравнений на основе блочного LU-разложения или его гибридизации с итерационным методом.

### **Теоретическая значимость**

1. Доказаны две теоремы об условиях существования минимума и убывания зависимости среднеарифметического времени решения последовательности систем линейных алгебраических уравнений от их числа при квазистатическом анализе полосковых структур в диапазоне параметров методом моментов.

2. Применительно к анализу методом моментов и оптимизации линейных и полосковых структур результативно использованы численные методы вычислительной линейной алгебры.

3. Изложены доказательства существования при электродинамическом анализе линейных антенн методом моментов с предложенными способами алгебраической предфильтрации оптимального значения допуска обнуления по критерию минимального времени решения системы линейных алгебраических уравнений, а также влияния при квазистатическом анализе полосковых структур в диапазоне параметров методом моментов выбора очередности итерационного решения системы линейных алгебраических уравнений на время анализа.

4. Изучены причинно-следственные связи, возникающие при анализе линейных антенн и полосковых и линейных структур методом моментов: установлено, как изменения параметров исследуемой структуры изменяют матрицу системы линейных алгебраических уравнений и как эти изменения можно использовать для ускорения анализа.

5. Проведена модернизация математических моделей, численных методов и алгоритмов для анализа полосковых структур и линейных антенн методом моментов, обеспечивающая уменьшение вычислительных затрат на их проектирование с учётом электромагнитной совместимости.

6. Получены аналитические оценки для квазистатического анализа полосковых структур: коэффициента сжатия форматов хранения разреженных матриц; арифметической сложности блочного LU-разложения; максимально возможного ускорения решения системы линейных алгебраических уравнений (относительно метода исключения Гаусса) за счёт использования итерационного метода с предобуславливанием и блочного LU-разложения.

### **Практическая значимость**

1. Разработаны и внедрены методы уменьшения вычислительных затрат на анализ и оптимизацию элементов РЭС в организациях: АО «ИСС» (создание космических аппаратов Экспресс-АТ1, Экспресс-АТ2, Экспресс-80, Экспресс-103, Экспресс-АМУ3, Экспресс-АМУ7 и Экспресс-АМ8); АО «НПЦ «Полус» (анализ печатных плат и кабелей); МЧС России по Томской области (моделирование сети ведомственной связи и защита сетевого оборудования Fast Ethernet); ООО «Эремекс» (разработка математических моделей для вычисления задержек в меандровых линиях задержки печатных плат); НИ ТГУ и ТУСУР (подготовка бакалавров, магистров и аспирантов).

2. Определены пределы и перспективы применения: в электродинамическом анализе линейных антенн методом моментов с изменением частоты сигнала и сегментации – оптимального (по критерию минимального времени анализа) значения порога/допуска обнуления при алгебраической предфильтрации; в квазистатическом анализе полосковых структур методом моментов – итерационного учащения сетки, модифицированного разреженного формата хранения матрицы при неполном LU-разложении, а также блочного LU-

разложения и его гибридизации с итерационным методом при многократном решении системы линейных алгебраических уравнений.

3. Создана система практических рекомендаций по уменьшению вычислительных затрат на электродинамический анализ линейных антенн и квазистатический анализ полосковых и проводных структур за счёт усовершенствования построения сетки, формирования матрицы и решения системы линейных алгебраических уравнений.

4. Созданы программы, позволяющие моделировать с уменьшенными вычислительными затратами новые радиоэлектронные средства и их элементы, включая печатные платы, соединители, модальные фильтры, одиночные и связанные микрополосковые линии передачи, линейные антенны и отводы силовой шины электропитания, за счёт использования при решении системы линейных алгебраических уравнений с плотной матрицей прямых и итерационных методов, трёх модификаций  $LU(0)$ -разложения, выбора очередности решения и матрицы для вычисления предобусловливателя и трёх критериев переформирования предобусловливателя.

**Методология и методы исследования.** В работе применялись квазистатический и электродинамический анализ, МоМ, теория линий передачи, теория антенн, теория матриц, прямые и итерационные методы решения СЛАУ, компьютерное моделирование, вычислительный эксперимент, оценка вычислительной сложности, объектно-ориентированное программирование.

#### **Положения, выносимые на защиту**

1. Электродинамический анализ линейных антенн методом моментов с ускорением итерационного решения системы линейных алгебраических уравнений за счёт использования предобусловливания и алгебраической предфильтрации на основе евклидовой нормы строк матрицы системы характеризуется стабильностью оптимального (по критерию минимального времени решения) значения допуска обнуления при изменении частоты сигнала.

2. При квазистатическом анализе полосковых структур методом моментов использование модифицированного адаптивного итерационного выбора оптимальной сегментации и неполного  $LU$ -разложения в сочетании с модифицированным разреженным строчным форматом хранения матрицы для вычисления предобусловливателя при итерационном решении системы линейных алгебраических уравнений уменьшает вычислительные затраты (памяти до двух раз, а времени до четырех раз при вычислении ёмкостной матрицы).

3. При квазистатическом анализе полосковых структур в диапазоне параметров методом моментов использование итерационного решения последовательности систем линейных алгебраических уравнений с переформированием предобусловливателя по средним арифметическим значениям времени и сложности решения позволяет адаптивно и без участия пользователя минимизировать время решения (ускорение до 1,6 раза при вычислении 100 ёмкостных матриц относительно случая без переформирования).

4. Квазистатический анализ полосковых структур в диапазоне параметров методом моментов ускоряется за счёт оптимального (по критерию минимально-

го времени анализа) выбора очередности итерационного решения полученной последовательности систем линейных алгебраических уравнений (до 2,2 раза для вычисления 100 ёмкостных матриц).

5. Квазистатический анализ методом моментов и оптимизация полосковых и проводных структур в диапазоне параметров ускоряются за счёт решения последовательности систем линейных алгебраических уравнений с использованием блочного LU-разложения или его гибридизации с итерационным методом (до 25 раз для вычисления ёмкостных матриц при точности 1%).

**Достоверность результатов** подтверждена: использованием проверенных математических моделей и численных методов; анализом практики решения разреженных СЛАУ, формируемых другими численными методами; совпадением полученных результатов с результатами теоретических оценок и вычислительного эксперимента; достижимостью технического результата, указанного в полученных патентах; использованием результатов на практике и другими авторами в своих научных работах; контролем сходимости итерационного процесса; использованием нескольких программных продуктов; согласованностью результатов, полученных несколькими методами.

**Использование результатов исследования** (*подтверждено 11 актами*)

1. Результаты интеллектуальной деятельности: получено 25 свидетельств о регистрации программы для ЭВМ, 16 патентов на изобретение и 4 патента на полезную модель.

2. Разработанные программы использованы при анализе печатных плат и кабелей в ОАО «НПЦ «Полус».

3. Разработанные программы использованы при анализе линейных антенн сети ведомственной связи, а полосковые модальные фильтры – для защиты оборудования сети Fast Ethernet МЧС России по Томской области.

4. Разработанные алгоритмы и программы использованы в проекте «Разработка системы компьютерного моделирования электромагнитной совместимости» (заключительный отчет ВТК-15 по мероприятию 3.1.3а Инновационной программы ТУСУРа, 2006 г., и свидетельство об отраслевой регистрации разработки № 8376).

5. Алгоритмы итерационного решения СЛАУ использованы в НИР «Исследование новых модальных явлений в структурах многопроводных линий передачи с неоднородным диэлектрическим заполнением», грант РФФИ 06-08-01242, 2006 г.

6. Обзор численных методов и программного обеспечения для моделирования РЭС, а также разработанная система компьютерного моделирования использованы в ОКР «Разработка и поставка аппаратно-программного комплекса для проведения анализа взаимовлияний электрических сигналов бортовой аппаратуры», хоздоговор 28/08 от 14.04.2008, шифр «АПК–ТУСУР», 2008–2009 гг.

7. Многовариантный анализ погонных параметров модальных фильтров использован в НИОКТР «Модальный фильтр», хоздоговор НИИЦ/НИР/10-01 от 15.01.2010 с ФГУП «ЦентрИнформ», г. Санкт-Петербург, 2010 г.

8. Разработанные модификации  $LU(0)$ -разложения и алгоритм вычисления ёмкостных матриц с помощью блочного  $LU$ -разложения использованы в ОКР «Разработка комплекса программных и технических средств для контроля информационных магистралей, обеспечения ЭМС и исследования надёжности унифицированного ряда электронных модулей на основе технологии «система-на-кристалле» для систем управления и электропитания КА 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, 2010–2012 гг.

9. Разработанное программное обеспечение использовано при моделировании электрических принципиальных схем и элементов печатных плат в 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, 2012–2015 гг.

10. Аналитический обзор использован в ОКР «Разработка цифрового управляющего и силовых модулей энергопреобразующего комплекса для высоковольтных систем электропитания космических аппаратов», тема «Модули ЭПК-100», договор № 18/15 от 29.07.2015 в рамках реализации Постановления 218 Правительства РФ, 2016–2018 гг.

11. Разработанное программное обеспечение использовано при моделировании меандровых линий задержки в НИР «Разработка математических моделей для трассировки меандровых линий задержки с оптимальными параметрами», шифр НИР «Змейки», договор № Р-20130122 от 18.01.2013.

12. Разработанные программы использованы для предварительного анализа ЭМС аппаратуры станции при разработке материалов эскизного проекта ОКР «Развитие наземного сегмента космического комплекса системы ГЛОНАСС» при создании составных частей сети наземных станций контроля и управления БАМИ (договор № 24/13 от 9.01.2013), 2013–2015 гг.

13. Исследование по уменьшению затрат времени на многократное решение СЛАУ прямыми и итерационными методами использовано в НИР «Выявление, исследование и реализация новых возможностей уменьшения времени многократного решения СЛАУ с частично изменяющейся матрицей в задачах вычисления ёмкостной матрицы произвольной системы проводников и диэлектриков», грант РФФИ 14-07-31267, 2014–2015 гг.

14. Разработанные алгоритмы для многократного решения СЛАУ с уменьшенными вычислительными затратами и программное обеспечение использованы в НИР «Разработка новых программных и аппаратных средств для моделирования и обеспечения электромагнитной совместимости радиоэлектронной аппаратуры» в рамках проектной части государственного задания в сфере научной деятельности 8.1802.2014/К, 2014–2016 гг.

15. Обзор и сравнительный анализ численных методов и способов сокращения затрат на моделирование, разработанные методы построения сетки и получен-



ные аналитические и вычислительные оценки применимости алгоритмов, основанных на блочном LU-разложении, использованы в НИР «Комплексные исследования по разработке алгоритмов, математического обеспечения и средств проектирования для создания новых элементов защиты и контроля вычислительных систем на основе модальных явлений», грант РФФИ 14-29-09254, 2014–2016 гг.

16. Разработанные программы использованы при моделировании новых помехозащитных устройств в НИР «Комплексное обоснование возможностей создания модальной технологии помехозащиты критичной радиоэлектронной аппаратуры и совершенствования существующих и разработки новых помехозащитных устройств на её основе», грант РФФИ 14-19-01232, 2014–2016 гг.

17. Разработанное математическое и программное обеспечение использовано в ПНИ «Теоретические и экспериментальные исследования по синтезу оптимальной сети высоковольтного электропитания для космических аппаратов» по проекту ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы», соглашение о предоставлении субсидии от 26.09.2017 № 14.574.21.0172, шифр RFMEFI57417X0172, 2017–2020 гг.

18. Разработанные алгоритм построения неравномерной сетки, гибридный метод решения СЛАУ, математические модели с дополнительными параметрами, а также их исследование использованы в НИР «Выявление новых подходов к совершенствованию обеспечения электромагнитной совместимости радиоэлектронной аппаратуры и моделирования систем активного зрения роботов» в рамках базовой части государственного задания в сфере научной деятельности 8.9562.2017/8.9, 2017–2019 гг.

19. Результаты диссертационного исследования использованы в учебном процессе ТУСУРа студентов бакалавриата, магистрантов и аспирантов.

20. Результаты диссертационного исследования использованы в учебном процессе магистрантов НИ ТГУ.

### **Апробация результатов исследования**

Результаты исследований автора позволили подготовить заявки, победившие в конкурсах: грантов РФФИ (06-08-01242, 2006 г.; 14-07-31267, 2014–2015 гг.; 14-29-09254, 2014–2016 гг.); грантов РФФИ (14-19-01232, 2014–2016 гг.; 19-19-00424, 2019–2021 гг.; 19-79-10162, 2019–2022 гг.); государственных заданий (проектная часть 8.1802.2014/К, 2014–2016 гг.; базовая часть 8.9562.2017/8.9, 2017–2019 гг.); ФЦП ИР (RFMEFI57417X0172, 2017–2020 гг.).

Результаты диссертационной работы представлялись и докладывались в материалах: всерос. науч.-техн. конф. «Научная сессия ТУСУР», 2004, 2007, 2008, 2011; междунар. науч. конф. «Туполевские чтения», 2004, 2007; всерос. науч.-практ. конф. «Проблемы информационной безопасности общества и личности», 2004, 2005; междунар. науч.-практ. конф. «Электронные средства и системы управления», 2005, 2007, 2015–2018; междунар. симп. по ЭМС и электромагнитной экологии, 2005, 2007, 2011; науч.-метод. конф. «Групповое проектное обучение», 2007; науч.-техн. конф. молодых специалистов «Электронные и электромеханические системы и устройства», 2008; 19th Int. Zurich symp. on electro-

magnetic compatibility, 2008; науч.-техн. конф. ОАО «Информационные спутниковые системы» имени академика М.Ф. Решетнева», 2011; Int. conf. on numerical electromagnetic modeling and optimization for RF, microwave, and terahertz applications, 2014; Int. conf. on applied physics, simulation and computers, 2015; Int. conf. on modeling, simulation and applied mathematics, 2015; междунар. конф. «Актуальные проблемы вычислительной и прикладной математики-2015», 2015; 13th Int. conf. of numerical analysis and applied mathematics, 2015; междунар. науч.-метод. конф. «Современное образование: проблемы взаимосвязи образовательных и профессиональных стандартов», 2016; Int. Siberian conf. on control and communications, 2016; регион. науч.-практ. конф. «Наука и практика: проектная деятельность от идеи до внедрения», 2016, 2018; XII Int. scient. and pract. conf. «Areas of scientific thought», 2015/2016; междунар. науч.-практ. конф. «Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири (СИБРЕСУРС)», 2016, 2017; всерос. науч.-техн. конф. «Современные проблемы радиоэлектроники», 2017; IEEE Int. multi-conf. on engineering, computer and information sciences, 2017; всерос. науч.-техн. конф. «Микроэлектроника и информатика», 2017; междунар. метод. конф. «Современное образование: повышение профессиональной компетентности преподавателей вуза – гарантия обеспечения качества образования», 2018.

**Публикации.** По результатам диссертационного исследования опубликовано 146 работ (14 без соавторов): 5 монографий; 1 учебное пособие; 23 статьи в журналах из перечня ВАК; 7 статей в журналах из перечня ВАК, индексируемых в Scopus и(или) Web of Science; 5 статей в зарубежных журналах не из перечня ВАК, индексируемых в Scopus и(или) Web of Science; 2 статьи в журналах, индексируемых в РИНЦ; 11 докладов в трудах конференций, индексируемых в Scopus и(или) Web of Science; 47 докладов (тезисов) в трудах других конференций (симпозиуме); получено 16 патентов на изобретение; 4 патента на полезную модель; 25 свидетельств о регистрации программы для ЭВМ.

**Личный вклад.** Результаты диссертационной работы, сформулированные в положениях, выносимых на защиту, и составляющие научную новизну, получены автором лично или при непосредственном участии. Автору принадлежит ключевая роль в создании основных результатов работы. Личный вклад автора в публикациях, выполненных в соавторстве [1–6, 38, 49, 52, 57–61], – разработка способов предфильтрации, алгоритмов методов предобусловливания и итерационных методов решения СЛАУ, а также их исследование, выявление оптимальных параметров, подтверждение их достоверности, анализ и обобщение полученных результатов; [7–9, 11, 14, 15, 18, 29, 80, 89, 91] – разработка и исследование методов и алгоритмов для многовариантного анализа с использованием блочного LU-разложения, получение аналитических и вычислительных оценок от их применения, подтверждение их достоверности, анализ и обобщение полученных результатов; [10, 13, 16, 24–28, 30, 31, 40, 41, 74, 82] – разработка и исследование методов и алгоритмов для многовариантного анализа с использованием итерационных методов с предобусловливанием, подтверждение их достоверности, анализ и обобщение полученных результатов; [12, 20, 45, 54, 56, 75, 81, 92–94] – постановка задачи, анализ и обобщение полученных

результатов; [17, 19, 39, 43, 44, 54, 63–70, 76, 84, 85, 87, 95, 141–146] – проведение обзора, систематизация данных и полученных результатов, описание особенностей разработки, анализ и обобщение полученных результатов; [32, 34, 36, 27, 42, 45, 46, 62, 79, 96–115] – использование разработанных методов при моделировании; [48, 77, 78] – разработка, программная реализация и исследование методов построения сетки, подтверждение их достоверности, анализ и обобщение полученных результатов; [71–73, 88, 90] – постановка задачи, программная реализация и исследование алгоритмов, анализ и обобщение полученных результатов; [116–140] – программная реализация и её тестирование.

**Структура и объём диссертации.** В состав диссертации входят введение, 7 разделов, заключение, список сокращений и условных обозначений, список литературы из 794 наименований и приложение. Диссертация иллюстрирована 120 рисунками и содержит 94 таблицы. Объём диссертации с приложением (акты, патенты, свидетельства) – 436 с.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** приведена общая характеристика работы.

**В разделе 1** выполнен обзор современного состояния проблемы уменьшения вычислительных затрат на проектирование РЭС. На основе обзора сформулированы цель и задачи работы. Показано, что для анализа полосковых структур и линейных антенн при их проектировании с учётом ЭМС наиболее предпочтительно использовать МоМ. При этом наибольшие вычислительные затраты приходятся на построение сетки, а также на формирование и решение СЛАУ (далее система  $\mathbf{Ax} = \mathbf{b}$ , где  $\mathbf{A}$  имеет порядок  $N$ ). Для апробации дальнейших разработок выбраны проверенные и универсальные базисные (кусочно-постоянные) и тестовые (дельта-функции Дирака) функции. При таком наборе функций матрица СЛАУ является плотной и несимметричной.

**В разделе 2** предложены методы уменьшения затрат на одновариантный анализ РЭС. Для ускорения анализа с использованием проверенной математической модели линейных (проволочных) антенн предложены два новых способа алгебраической предфильтрации и три модификации известных. Предфильтрация позволяет использовать предобусловливание (сведение исходной СЛАУ к эквивалентной  $\mathbf{MAx} = \mathbf{Mb}$ , где  $\mathbf{M}$  – предобусловливатель) в ходе итерационного решения. Первый из новых способов основан на евклидовых нормах строк и задаваемом допуске обнуления  $\tau$  (2.1), а второй – на евклидовой норме всей матрицы (2.2). При предфильтрации формируется разреженная матрица  $\mathbf{A}_s$ , из которой вычисляется предобусловливатель. Способы предфильтрации (нумерация соответствует нумерации в диссертации):

Известные способы	$a_{ij}^s = a_{ij}$ , если $ a_{ij}  > \varepsilon$ , $i, j = 1, 2, \dots, N$ или $i = j$ .	(1.46)
	$a_{ij}^s = a_{ij}$ , если $ a_{ij}/a^{\max}  > \varepsilon$ , $i, j = 1, 2, \dots, N$ или $i = j$ .	(1.47)
	$a_{ij}^s = a_{ij}$ , если $ a_{ij}  > \varepsilon = \ \mathbf{A}\ _{\infty} \cdot \tau / N$ , $i, j = 1, 2, \dots, N$ или $i = j$ .	(1.48)
	$a_{ij}^s = a_{ij}$ , если $ a_{ij}/a_i^{\max}  > \varepsilon$ , $i, j = 1, 2, \dots, N$ или $i = j$ .	(1.49)

Новые способы	$a_{ij}^s = a_{ij}$ , если $ a_{ij}  > \varepsilon_i = \ a_{i*}\ _2 \cdot \tau$ , $i, j = 1, 2, \dots, N$ , или $i = j$ .	(2.1)
	$a_{ij}^s = a_{ij}$ , если $ a_{ij}  > \varepsilon = \ \mathbf{A}\ _F \cdot \tau$ , $i, j = 1, 2, \dots, N$ , или $i = j$ .	(2.2)

Для совершенствования анализа полосковых структур использована проверенная математическая модель, основанная на квазистатическом подходе. Показано, что известный метод адаптивного итерационного выбора оптимальной сегментации (АИВОС) неэффективен при анализе сложных стеков многопроводных линий передачи (МПЛП). Далее разработаны 4 варианта его модификации (три основаны на равномерном учащении сетки, а четвертый – на неравномерном). Также разработан алгоритм вычисления элементов матрицы СЛАУ, основанный на использовании графических процессоров.

Получены аналитические оценки коэффициента сжатия трех форматов хранения разреженных матриц и выполнено их сравнение на тестовых задачах. Получены также выражения для оценки максимального коэффициента сжатия в зависимости от плотности  $q$  матрицы  $\mathbf{A}_S$ . Показано, что использование разреженного строчного формата является наиболее эффективным для экономии машинной памяти и последующей программной реализации. С учётом этого разработаны три последовательные модификации стандартного алгоритма  $ILU(0)$ -разложения, позволяющие уменьшить затраты времени и памяти по сравнению со стандартным  $LU$ -разложением. На основании этих модификаций разработана параллельная версия алгоритма  $ILU(0)$ -разложения.

**В разделе 3** разработаны методы ускорения многовариантного анализа РЭС. При анализе полосковых структур эти методы главным образом ориентированы на ускорение расчета наиболее вычислительно затратной ёмкостной матрицы структуры  $\underline{\mathbf{C}}$ . Для этого использована проверенная математическая модель. В случае многовариантного анализа или оптимизации требуется решать  $m$  СЛАУ. Тогда возможное ускорение  $\beta$  от применения итерационного метода равно отношению общего времени решения всех СЛАУ прямым методом  $T_D$  ко времени их итерационного решения с требуемой точностью  $tol$  (относительная норма

невязки):  $\beta = mT_D / \left( T_{PR} + \sum_{k=1}^m T_k \right)$ , где  $T_{PR}$  – время формирования предобусловли-

вателя;  $T_k$  – время решения  $k$ -й СЛАУ. Если время решения отдельно взятых СЛАУ варьируется несущественно и в среднем равно  $T_A$ , тогда получим усредненное ускорение, а при увеличении  $m$  получим  $\beta_A^{\max} = \lim_{m \rightarrow \infty} mT_D / (T_{PR} + mT_A) = T_D / T_A$ . Следовательно, при увеличении количества последовательно решаемых СЛАУ итоговое ускорение все меньше зависит от затрат времени на вычисление предобусловливателя. Также актуально уменьшение количества итераций, требуемых для решения отдельно взятой СЛАУ, и времени, затрачиваемого на одну итерацию. На основании этих предпосылок показано, что предпочтительно использовать решение предыдущей СЛАУ в качестве начального приближения при решении текущей.

Эффективность предобусловливателя, вычисленного из первой матрицы последовательности СЛАУ, снижается при увеличении различий в значениях эле-

ментов матрицы в ходе решения. Это ведет к росту общего количества итераций, что замедляет процесс решения. Поэтому предложены три условия для перестроения предобусловливателя в ходе многократного решения СЛАУ: по заданному порогу количества итераций  $Nit$ ; по увеличению среднего арифметического времени (доказана теорема о существовании минимума среднего арифметического времени решения последовательности СЛАУ) и средней арифметической сложности решения СЛАУ (получены оценки арифметической сложности методов BiCGStab и CGS, а также LU-разложения). С их использованием разработаны соответствующие алгоритмы. Далее выявлены еще два ресурса ускорения – выбор определенной очередности решения последовательности СЛАУ и выбор матрицы для вычисления предобусловливателя (используемого для решения всей последовательности).

При изменении параметров полосковой структуры рассмотрены три частных случая, приводящих к частичному изменению значений элементов матрицы СЛАУ (рисунок 1). Далее за счёт использования блочного LU-разложения и перенумерации интервалов структуры разработан общий алгоритм многократного вычисления матрицы  $\underline{C}$  при изменении параметров структуры, на основании которого предложен гибридный метод. В результате предложены три математические модели для многократного вычисления матриц  $\underline{C}$  и  $\underline{G}$  полосковой структуры в диапазоне изменения её параметров.

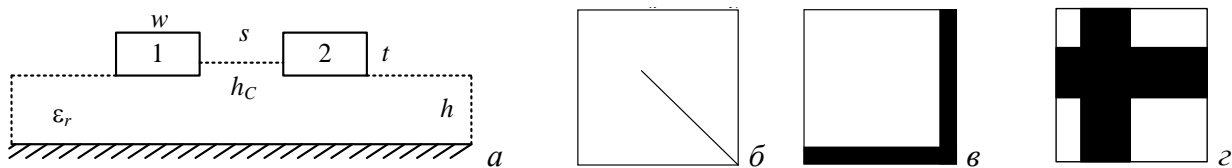


Рисунок 1 – Поперечное сечение связанной микрополосковой линии (а) (1, 2 – проводник); структура изменений в матрице СЛАУ (выделено черным) при изменении  $\varepsilon_r$  (б),  $h_c$  (в) и  $t$  (г)

**В разделе 4** приведены результаты разработки двух комплексов программ. Первый предназначен для итерационного решения СЛАУ: однократного и многократного. Второй интегрирован в систему TALGAT: разработан модуль матричных операций, позволяющий решать СЛАУ, используя 8 прямых и 6 итерационных методов, 6 способов предобусловливания и 10 способов предфильтрации, включая предложенные автором новые и усовершенствованные, реализована возможность использования DHTML-диалогов, визуализация матриц; модуль вычисления эффективности экранирования корпуса с возможностью трехмерного отображения; модуль вычислений на графическом процессоре. Кроме того, усовершенствованы вычислительные модули двумерных и трехмерных структур путем внедрения новых вычислительных процедур и субмодулей (построения сетки и многовариантного анализа).

**В разделе 5** на примере анализа линейных антенн (рисунок 2) показано, что для минимизации затрат времени предпочтительно использовать LU-разложение по сравнению с другими видами разложения (BiCGStab и CGS). Точность результатов, полученных итерационным методом при увеличении количества итераций, по сравнению с методом Гаусса показана для антенны, изо-

браженной на рисунке 2,а. После трёх итераций диаграммы направленности (ДН) совпадают (рисунок 3).

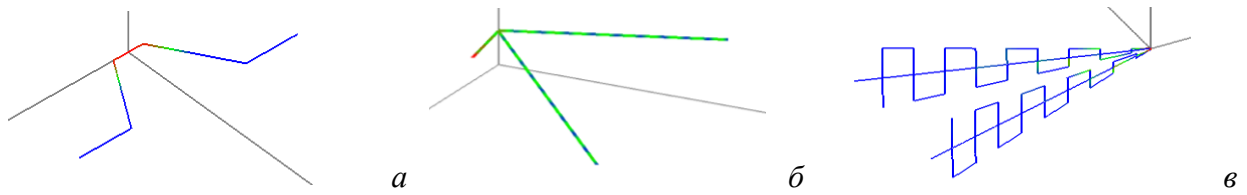


Рисунок 2 – Вид антенн: а – «чайка»; б – широкодиапазонная; в – трапецевидная зубчатая

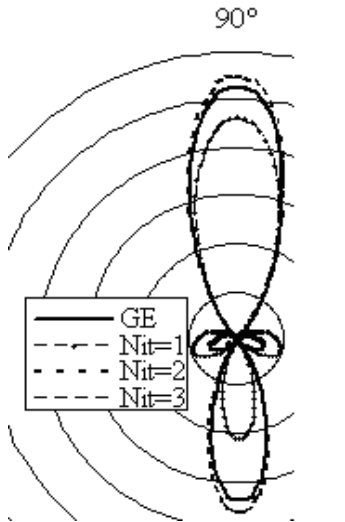


Рисунок 3 – ДН ( $|E\varphi|$ , шкала линейная от 0 до 6 В/м) антенны «чайка» в плоскости XY при решении СЛАУ методами Гаусса (GE) и BiCGStab при увеличении количества итераций

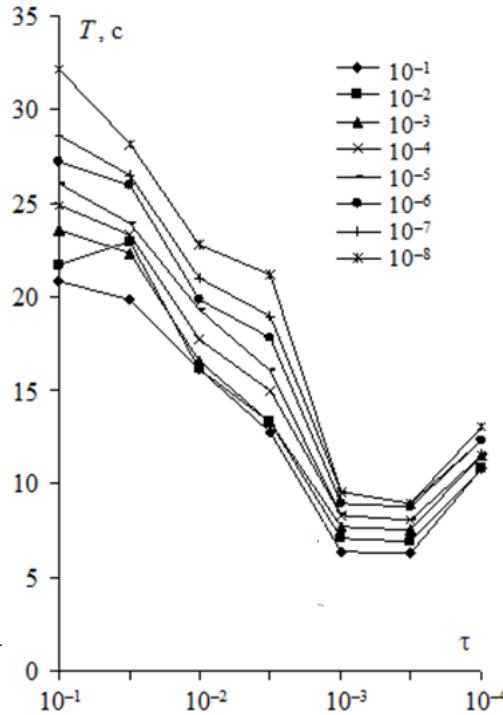


Рисунок 4 – Зависимости времени решения СЛАУ от  $\tau$  для разных  $tol$

Установлено существование оптимального (по критерию минимального времени) значения  $\tau_{opt}$  (рисунок 4). В диапазоне частот способ (2.1) даёт стабильность  $\tau_{opt}$  (таблица 1 для антенны на рисунке 2,в при использовании LU- и PLU(0)-разложений для вычисления предобусловливателя). Аналогичный результат показан при анализе антенны, изображенной на рисунке 2,б, и диполя (угол между лучами  $180^\circ$ ).

Таблица 1 – Значения  $\tau_{opt}$  при решении СЛАУ методом BiCGStab для антенны, показанной на рисунке 2,в

Предфильтрация	4 ГГц	6 ГГц	8 ГГц	10 ГГц	12 ГГц
(1.46)	$10^{+0} (5 \cdot 10^{-1})$	$10^{+0} (5 \cdot 10^{-1})$	$5 \cdot 10^{-1} (5 \cdot 10^{-1})$	$5 \cdot 10^{-1} (5 \cdot 10^{-1})$	$5 \cdot 10^{-1} (5 \cdot 10^{-1})$
(1.47)	$5 \cdot 10^{-3} (10^{-3})$	$5 \cdot 10^{-3} (10^{-3})$	$10^{-3} (5 \cdot 10^{-4})$	$5 \cdot 10^{-4} (5 \cdot 10^{-4})$	$5 \cdot 10^{-4} (5 \cdot 10^{-4})$
(1.48)	$10^{+0} (10^{+0})$	$5 \cdot 10^{+0} (10^{+0})$	$10^{+0} (10^{+0})$	$10^{+0} (10^{+0})$	$10^{+0} (10^{+0})$
(1.49)	$5 \cdot 10^{-3} (10^{-3})$	$5 \cdot 10^{-3} (5 \cdot 10^{-3})$	$5 \cdot 10^{-3} (5 \cdot 10^{-3})$	$5 \cdot 10^{-3} (5 \cdot 10^{-3})$	$5 \cdot 10^{-3} (10^{-3})$
(2.1)	$5 \cdot 10^{-3} (10^{-3})$	$5 \cdot 10^{-3} (10^{-3})$	$5 \cdot 10^{-3} (10^{-3})$	$5 \cdot 10^{-3} (10^{-3})$	$5 \cdot 10^{-3} (10^{-3})$
(2.2)	$5 \cdot 10^{-4} (5 \cdot 10^{-5})$	$5 \cdot 10^{-5} (5 \cdot 10^{-5})$	$5 \cdot 10^{-5} (5 \cdot 10^{-5})$	$5 \cdot 10^{-5} (5 \cdot 10^{-4})$	$5 \cdot 10^{-5} (5 \cdot 10^{-5})$

Обнаруженная стабильность подтверждена при анализе и в большем количестве частотных точек. Она важна при многовариантном анализе или при оптимизации по частоте, широко применяемым на практике. Помимо этого, способ (2.1) показал контролируемое изменение  $\tau_{opt}$  при учащении сегментации.

Таким образом, способ алгебраической предфильтрации на основе евклидовой нормы строк матрицы СЛАУ характеризуется стабильностью  $\tau_{opt}$  при изменении частоты в ходе электродинамического анализа линейных антенн.

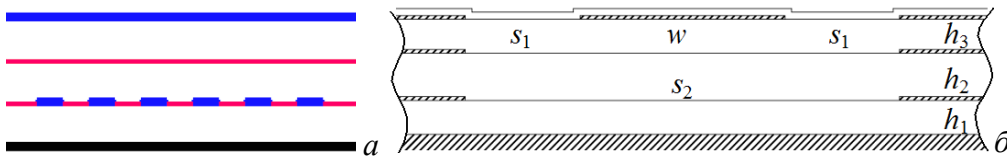


Рисунок 5 – Поперечные сечения МПП

К рисунку 5 применены три варианта АИВОС.

Таблица 2 – Результаты сегментации для структуры на рисунке 5,а

Построение сетки	Параметры решения	Количество проводников				
		2	4	6	8	10
Сегментация $t/3$	$\underline{C}$ , пФ/м	97,12	97,12	97,12	97,12	97,12
	$T$ , с	2,52	6,38	12,71	22,15	35,15
	$N$	1162	1714	2266	2818	3370
АИВОС	$ \underline{C} - \underline{C}_{it} /\underline{C}$ , %	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07
	$T/T_{it}$	0,68	0,69	0,69	0,69	0,70
	$N/N_{it}$	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94
АИВОС-У1	$ \underline{C} - \underline{C}_{it} /\underline{C}$ , %	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24
	$T/T_{it}$	2,15	2,24	2,29	2,37	2,42
	$N/N_{it}$	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50
АИВОС-У2	$ \underline{C} - \underline{C}_{it} /\underline{C}$ , %	0,58	0,58	0,58	0,58	0,58
	$T/T_{it}$	3,32	3,54	3,69	3,88	3,99
	$N/N_{it}$	1,86	1,86	1,86	1,86	1,86
АИВОС-У3	$ \underline{C} - \underline{C}_{it} /\underline{C}$ , %	3,98	3,98	3,98	3,98	3,98
	$T/T_{it}$	49,41	66,46	63,55	82,04	87,88
	$N/N_{it}$	7,26	7,26	7,26	7,26	7,26

Таблица 3 – Результаты (относительно  $t/3$ ) для рисунка 5,б

Параметры	АИВОС	АИВОС-У1	АИВОС-У2	АИВОС-У3
$\underline{C}_{it}$ , пФ/м	128,88	131,74	127,02	131,87
$N/N_{it}$	9,29	1,50	33,62	0,30
$ \underline{C} - \underline{C}_{it} /\underline{C}$ , %	2,22	0,05	3,63	0,05
$T/T_{it}$	131,11	2,40	1417,43	0,03

Из таблицы 3 видно, что АИВОС и вариант АИВОС-У2 дают высокую погрешность. Время при АИВОС-У3 велико. АИВОС-У1 даёт ускорение в 2,4 раза. Также показано, что использование значения плотности заряда на сегментах для останова итераций (АИВОС-У4) неэффективно.

Таким образом, использование модифицированного АИВОС и  $ILU(0)$ -разложения в сочетании с модифицированным разреженным строчным форматом уменьшает вычислительные затраты.

Для двух МПП показано ускорение до 19 раз на заполнение матрицы СЛАУ при использовании графического процессора относительно центрального.

На примере вычисления матриц  $\underline{C}$  двух связанных МПЛ (рисунок б) выполнено исследование трех предложенных модификаций алгоритма  $ILU(0)$ -разложения матрицы, хранящейся в разреженном строчном формате. Показано, что каждая из последующих модификаций позволяет дополнительно ускорить вычисления (общее ускорение до 4 раз). Время вычисления для первой версии

В таблице 2 приведены результаты при сегментации  $t/3$ , где  $\underline{C}$  – контролируемый параметр (собственный коэффициент электростатической индукции сигнального проводника);  $T$  – время вычисления;  $N$  – количество сегментов на границах структуры. Параметры  $\underline{C}_{it}$ ,  $T_{it}$  и  $N_{it}$  аналогичны, но получены при использовании вариантов АИВОС. Видно, что исходный АИВОС даёт большее время, чем при сегментации  $t/3$ . АИВОС-У1 при меньшей точности даёт ускорение до 2,4 раза. Бóльшее ускорение получено для вариантов У2 и У3, но их погрешность велика.



( $T$ ) относительно исходной ( $T_{ИСХ}$ ) и метода Гаусса ( $T_{GE}$ ) приведено в таблице 4, а двух последующих ( $T_r$  и  $T_s$ ) относительно неё – на рисунке 7. Для воздушной МПЛ получено ускорение до 2 раз. При этом экономия памяти составила до 2 раз ( $q_{As} \approx 25\%$ ). Далее показано, что при больших плотностях матрицы  $A_s$  предпочтительна параллельная версия алгоритма, а при малых – последовательная. В конце раздела приведены рекомендации по использованию результатов исследования.

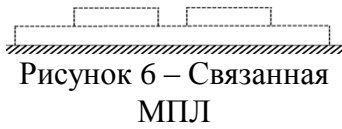


Таблица 4 – Результаты для рисунка 6

$N$	$T_{ИСХ}/T$	$T_{GE}/T$
4800	1,6	1,3
6000	1,6	1,2
8000	1,5	4,4

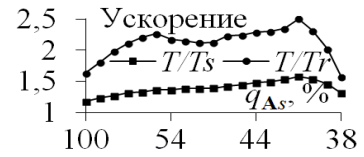


Рисунок 7 – Результаты для рисунка 6

В разделе 6 разработанные модели, метод, алгоритмы и программы для решения СЛАУ апробированы при многократном вычислении матриц  $\underline{C}$  проводных и полосковых структур. Сначала на примере связанной МПЛ (см. рисунок 6) показано, что для минимизации времени решения последовательности СЛАУ итерационным методом с одинаковым («замороженным») предобусловливателем предпочтительнее использовать в качестве начального приближения решение предыдущей СЛАУ по сравнению с фиксированным начальным приближением. Затем также на примере МПЛ показано, что при изменении  $\varepsilon_r$  подложки вычисление матрицы  $\underline{C}$  может быть ускорено. При этом требуемая точность результатов легко контролируется параметром  $tol$  (рисунок 8). Установлено (рисунок 9), что изменение толщины проводника  $t$  приводит к большим изменениям в значениях элементов матрицы СЛАУ по сравнению с изменением толщины подложки  $h$  и ширины проводника  $w$ . Далее показано, что при изменении параметров структуры увеличивается различие в значениях элементов матрицы СЛАУ, что приводит к монотонному росту требуемого количества итераций и делает обоснованным переформирование предобусловливателя.

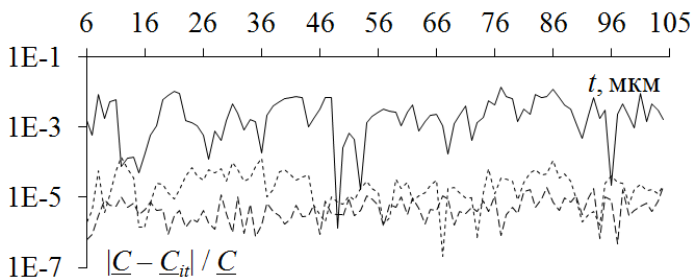


Рисунок 8 – Погрешность ёмкости МПЛ при разных  $t$  и  $tol = 10^{-4}$  (—),  $10^{-6}$  (- -) и  $10^{-8}$  (- - -)

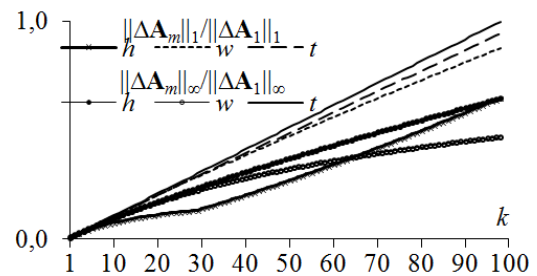


Рисунок 9 – Зависимости отношений норм матриц изменений для  $h$ ,  $w$ ,  $t$

При изменении толщины проводника  $t$  МПЛ выявлено, что зависимость среднего арифметического времени решения последовательности СЛАУ имеет минимум, который может быть использован для определения момента адаптивного переформирования предобусловливателя. То же самое справедливо и при использовании средней арифметической сложности решения. При изменении  $t$  двух структур МФ (рисунок 10) и изменении  $s$  для методов BiCGStab и CGS показано, что переформирование предобусловливателя ускоряет вычисление



100 матриц  $\underline{C}$  относительно вычисления без переформирования (таблица 5 для метода BiCGStab).

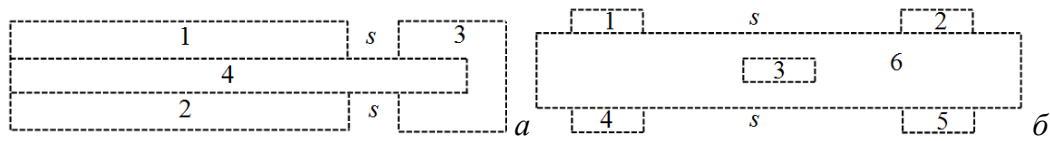


Рисунок 10 – Поперечные сечения МФ: а – с лицевой связью (1–3 – проводники, 4 – диэлектрик); б – зеркально-симметричный (1–5 – проводники, 6 – диэлектрик)

Таблица 5 – Ускорение относительно случая без переформирования предобусловливателя

Структура	$N$	Оптимальный порог $Nit$ (в скобках)	$O$ -нотация	Средняя арифметическая сложность	Обратный порядок относительно прямого	Выбор средней матрицы
МПЛ	1600	1,51 (8)	1,20	1,12	1,76	2,07
	3200	1,24 (8)	0,92	0,86	1,63	2,21
Рисунок 10,а	2001	1,62 (10)	1,60	1,52	1,71	2,14
	3001	1,58 (10)	1,55	1,44	1,84	1,94
Рисунок 10,б	1709	1,12 (9)	1,55	1,55	1,82	1,81
	3109	1,03 (10)	1,59	1,59	1,83	1,86

Таким образом, использование средних арифметических времени и сложности решения позволяет адаптивно и без участия пользователя ускорить процесс вычисления матриц  $\underline{C}$  полосковой структуры в диапазоне параметров.

Выявлено, что вычисление матриц  $\underline{C}$  структуры в диапазоне параметров может быть ускорено только за счёт выбора обратного (от большего значения параметра к меньшему) порядка решения относительно прямого. Выбор средней матрицы из последовательности СЛАУ для формирования предобусловливателя еще больше ускоряет это вычисление (до 2,21 раза для 100 матриц, см. таблицу 5) без необходимости переформирования предобусловливателя. При этом дальнейший порядок решения остальных СЛАУ не оказывает влияния на итоговое ускорение. Показано, что при выборе матрицы СЛАУ для вычисления предобусловливателя из диапазона от 30-й до 60-й значение итогового ускорения практически не изменяется. Далее разработанные алгоритмы апробированы на итерационном решении последовательности СЛАУ с несколькими правыми частями. Установлено, что метод BI-BiCGStab с решением предыдущей СЛАУ для начального приближения ускоряет вычисление 100 матриц  $\underline{C}$  более чем в 22 раза, а метод Seed-BiCGStab неэффективен.

Таким образом, квазистатический анализ полосковых структур в диапазоне параметров методом моментов ускоряется за счёт оптимального выбора очередности итерационного решения СЛАУ.

Вычислено 10 матриц  $\underline{C}$  соединителя (рисунок 11,а) при изменении  $\epsilon_r$  и учащении сегментации проводников и диэлектриков с использованием двух модификаций исходного алгоритма, основанных на блочном LU-разложении. Показано, что они обеспечивают дополнительное ускорение, увеличивающееся с ростом количества вычисляемых матриц  $\underline{C}$ . Это подтверждено на примере анализа проводных отводов (рисунки 11,б и в) силовой шины электропитания (СШЭП) с ускорением вычисления 512 матриц  $\underline{C}$  более чем в 18 раз.

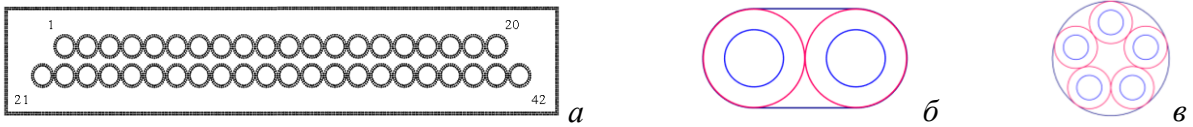


Рисунок 11 – Поперечные сечения СНП 339 (а) и 2-проводных (б) и 5-проводных (в) отводов СШЭП

Выполненная оценка влияния программной реализации на эффективность работы алгоритма с использованием 4 математических пакетов показала, что вычислительные оценки хорошо согласуются с аналитическими. Точность модификаций продемонстрирована на примере вычисления временного отклика в конце связанной МПЛ с учётом частотной зависимости материала подложки.

Выполнено исследование еще одной модификации исходного алгоритма и показано, что затраты времени могут быть дополнительно сокращены примерно в 2 раза. Эта модификация использована при анализе трехмерных МПЛ с количеством проводников  $N_{COND}=3$  (рисунок 12, в), 5 и 10 с ускорением вычисления  $m$  матриц  $\underline{C}$  при той же точности (рисунок 12, з). При изменении высоты диэлектрика показано, что ускорение достигает 15 раз, а вычислительные и аналитические оценки хорошо коррелируют между собой. При изменении геометрических параметров двух связанных полосковых линий выявлено, что перенумерация позволяет сократить затраты времени до 3 раз относительно исходного алгоритма. Установлены пределы эффективности алгоритмов. На примере 5-проводной МПЛ (рисунок 12, а) показано сокращение времени решения СЛАУ гибридным методом до 25 раз (вычисление 100 матриц  $\underline{C}$  при изменении  $\epsilon_r$  подложки) при  $tol=10^{-4}$  относительно исходного алгоритма.

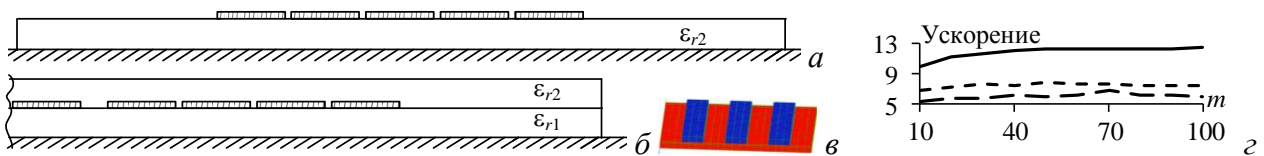


Рисунок 12 – Поперечные сечения 5-проводной МПЛ (а) и симметричного 10-контактного плоского кабеля (б). Общий вид МПЛ при  $N_{COND} = 3$  (в) и ускорение при использовании модифицированного алгоритма относительно исходного при  $N_{COND} = 3$  (---), 5 (- -) и 10 (—) (з)

В таблице 6 приведены результаты вычислений, где I и II означают начальное приближение нулевое и решение предыдущей СЛАУ, а  $\rightarrow$  и  $\leftarrow$  показывают прямой и обратный порядок решения соответственно. Точность вычислений показана на примере кабеля, изображенного на рисунке 12, б. На рисунке 13 приведены первые 3 строки и 3 столбца полученных матриц  $\underline{C}$  при  $tol=10^{-4}$  (максимальная поэлементная погрешность менее 1%) и  $tol=10^{-1}$  (менее 4%).

Таблица 6 – Время (с) вычислений и количество итераций (*курсив*) при разных порядках решения для МПЛ, изображенной на рисунке 12, а

Исходный	Гибрид-I		Гибрид-II	
	$\rightarrow$	$\leftarrow$	$\rightarrow$	$\leftarrow$
250,05	12,40 <i>197</i>	12,40 <i>197</i>	9,94 99	9,94 99

Для МПЛ на рисунке 12, а выполнено исследование произвольного выбора значения  $\epsilon_r$  из заданного диапазона. Сначала в диапазоне частот от 1 МГц до 1 ГГц по модели частотной зависимости  $\epsilon_r$  получено 100 её значений.

Этот массив данных затем произвольно перемешан и использован при многократном решении СЛАУ. Ускорение аналогично полученному при обратном порядке решения. Следовательно, гибридный метод ускоряет и оптимизацию.

Таким образом, использование блочного LU-разложения или его гибридизации с итерационным методом позволяет ускорить квазистатический анализ.

159,166	-27,0511	-1,00930	159,166	-27,0511	-1,00930	158,823	-27,0230	-1,02412
-27,0593	167,278	-25,1093	-27,0593	167,278	-25,1093	-27,0150	166,938	-25,0715
-1,01324	-25,1093	167,285	-1,01323	-25,1093	167,285	-1,01994	-25,0715	166,945

Рисунок 13 – Первые 3 строки и 3 столбца матриц  $\underline{C}$  для МПЛП на рисунке 12,б по исходному алгоритму (а) и при использовании гибридного метода при  $tol=10^{-4}$  (б) и  $10^{-1}$  (в)

В разделе 7 описано использование результатов работы.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

### Итоги исследования

Предложены 2 новых способа и 3 модификации известных способов алгебраической предфильтрации. Разработан параллельный алгоритм вычисления значений элементов матрицы СЛАУ с использованием графического ускорителя. Предложены 4 модификации алгоритма итерационного умягчения сетки при решении задач электростатики. Получены аналитические оценки коэффициента сжатия трех форматов хранения разреженных матриц и выполнено их сравнение на тестовых задачах. Разработаны 3 модификации алгоритма LU(0)-разложения и его параллельная версия.

Разработаны алгоритмы для решения последовательности СЛАУ с изменяемой матрицей при анализе полосковых структур. Предложено учитывать специфику изменений в матрице для уменьшения затрат времени (ускорения) при использовании прямого и итерационных методов, а также их совместной реализации (гибридный метод). Так, для итерационных методов разработаны 2 способа ускорения вычислений, а для повышения эффективности предобусловливателя предложены 3 условия его переформирования в ходе решения последовательности СЛАУ. Также разработаны алгоритмы многократного решения СЛАУ с выбором очередности их решения и матрицы для вычисления предобусловливателя. С использованием блочного LU-разложения разработаны алгоритмы многократного вычисления матрицы  $\underline{C}$  при изменении параметров структуры, аналогичные по точности исходному алгоритму. За счет обобщения результатов создан гибридный метод вычисления. На основе полученных результатов предложены 3 математические модели для многократного вычисления матриц  $\underline{C}$  и  $\underline{G}$  полосковой структуры в диапазоне изменения её геометрических и электрофизических параметров.

Разработаны 2 комплекса программ. Первый интегрирован в комплекс программ TALGAT путем совершенствования имеющихся и разработки новых его модулей. Второй комплекс предназначен для итерационного решения СЛАУ: однократного и многократного.

С использованием первого комплекса на примере линейных антенн выполнено сравнение 7 итерационных методов в сочетании с 5 способами формиро-

вания предобусловливания. Показано, что существует оптимальное значение допуска обнуления по критерию минимизации времени решения СЛАУ. На исследованных примерах выбор этого значения ускорил решение по сравнению с методом Гаусса почти в 20 раз, а уменьшение заданной точности решения СЛАУ от 10 до 4 знаков ускорило решение в 1,5 раза. Также показано, что за счет выбора способа предфильтрации можно ускорить решение СЛАУ на 40%. На примере 7 МПЛП выполнено исследование 4 модификаций метода для адаптивного построения сетки. Установлено, что одна из них (АИВОС-У1) ускоряет построение в 2,4 раза при точности контролируемой величины до 0,24% относительно равномерной сегментации. Исследовано применение графического процессора для заполнения матрицы СЛАУ и на рассмотренных линиях передачи показано ускорение в 19 раз относительно использования центрального процессора. Приведены рекомендации по построению сетки, формированию матрицы и использованию итерационных методов при решении СЛАУ с плотной матрицей на примере анализа линейных антенн и полосковых структур.

Показано, что в случае многократного решения СЛАУ с использованием блочного алгоритма при изменении  $\varepsilon_r$  диэлектрика увеличение количества вычисляемых ёмкостных матриц, а также отношения количества неизменяемых подынтервалов к их общему количеству приводит к увеличению выигрыша времени при использовании предложенных модификаций исходного алгоритма. Это подтверждено на примере анализа соединителя СНП 339 и проводных отводов силовой шины электропитания, показавшего выигрыш относительно исходного алгоритма более чем в 18 раз. Точность алгоритма продемонстрирована на примере вычисления временного отклика в конце связанной МПЛ с учётом частотной зависимости материала подложки. При этом полученные вычислительные оценки ускорения хорошо согласуются с аналитическими. Анализ трехмерных линий передачи показал, что ускорение достигает почти 13 раз при той же точности вычислений (значений элементов ёмкостной матрицы). Использование алгоритма при изменении геометрии структуры показало ускорение до 15 раз. При этом перенумерация сегментов позволяет сократить затраты времени более чем в 2 раза относительно исходного алгоритма, основанного на полном пересчёте. Выполненные вычисления с использованием гибридного метода показали уменьшение затрат времени до 25 раз относительно исходного алгоритма. Установлено, что предложенные алгоритмы применимы не только для многовариантного анализа, но и для оптимизации.

С использованием второго комплекса программ выполнено исследование 3 предложенных модификаций алгоритма  $ILU(0)$ -разложения матрицы, хранящейся в разреженном строчном формате, а также параллельной версии этого алгоритма. На рассмотренных примерах общее ускорение вычисления  $ILU(0)$ -разложения достигает 5 раз, а решения СЛАУ – 4 раз. Также показано, что при больших плотностях матрицы предпочтительна параллельная версия алгоритма, а при малых – последовательная.

Показано, что при многократном решении СЛАУ с одной правой частью итерационным методом с одинаковым для всей последовательности предобусловливателем («замороженным») для минимизации затрат времени предпочтительнее использовать решение предыдущей СЛАУ по сравнению с фиксированным начальным приближением. Так, при изменении  $\epsilon_r$  диэлектрика структуры процесс вычисления может быть ускорен более чем в 49 раз по сравнению с использованием метода Гаусса. При изменении геометрии структуры эти приёмы ускоряют процесс вычисления относительно метода Гаусса до 12 раз. При этом максимальная погрешность значения ёмкости полоски составила около 0,001%. На примере МПЛ показано, что использование переформирования предобусловливателя по порогу количества итераций позволяет дополнительно ускорить её многовариантный анализ в 1,72 раза. При анализе МФ использование среднего арифметического времени решения для переформирования предобусловливателя ускорило процесс вычисления относительно вычисления без переформирования в 1,6 раза. На примере МПЛ и двух МФ для двух итерационных методов апробировано использование средней арифметической сложности решения для определения момента переформирования предобусловливателя. Установлено, что многократное решение СЛАУ может быть ускорено в 1,6 раза относительно аналогичного решения без переформирования предобусловливателя. Также показано, что только за счёт выбора очередности решения многократное решение СЛАУ может быть ускорено в 1,84 раза, а использование средней матрицы последовательности СЛАУ для вычисления предобусловливателя ускоряет её решение в 2,21 раза и не требует переформирования предобусловливателя. Выполнена оценка работоспособности разработанных алгоритмов для итерационного решения последовательности СЛАУ с несколькими правыми частями на примере двух структур МФ. Показано, что использование метода  $Vl-BiCGStab$  и предыдущего решения СЛАУ для начального приближения ускоряет многократное решение СЛАУ более чем в 22 раза относительно решения СЛАУ с каждой правой частью отдельно методом  $BiCGStab$  с нулевым начальным приближением.

Результаты работы масштабированы использованы в ходе различных НИОКР, на производстве, при разработке новых устройств и в учебном процессе двух университетов.

Совокупность результатов работы позволяет считать, что её цель достигнута.

### **Рекомендации**

Для анализа линейных антенн и полосковых структур при малых порядках СЛАУ (редкая сетка) предпочтительнее прямые методы решения СЛАУ, а при больших (густая сетка) – итерационные. При заполнении СЛАУ эффективно использовать графический процессор. Использование итерационных методов решения СЛАУ при анализе линейных антенн, например для оценки их ДН, является эффективным средством повышения быстродействия с приемлемой точностью. Если особо критична точность контролируемого параметра, то процесс вычисления следует итерационно повторить несколько раз при учащении сетки на каждой итерации. При этом для получения предварительных результа-

тов предпочтительней использовать итерационный метод решения СЛАУ, который позволяет за счёт уменьшения точности существенно повысить быстродействие.

В случае моделирования в диапазоне параметров структуры следует до начала вычислений оценить с помощью полученных выражений применимость алгоритмов блочного LU-разложения. Так, если изменяемых параметров оказывается много, то лучше использовать полный пересчёт, и наоборот, если изменения в матрице СЛАУ малы, то рассмотренные в работе методы и алгоритмы очень эффективны. При этом за счёт нумерации изменяемых подынтервалов последними эффективность алгоритмов может быть дополнительно повышена. Ещё одним средством повышения быстродействия является использование разработанного гибридного метода, который при увеличении количества решаемых СЛАУ обеспечивает большее ускорение вычислений.

Для вычисления предобусловливателя при одновариантном анализе линейных антенн и полосковых структур эффективным является использование предфильтрации в сочетании с ILU(0)-разложением, а при многовариантном – полного LU-разложения без предфильтрации. При этом в случае матрицы СЛАУ с малой плотностью лучше использовать последовательную версию алгоритма ILU(0)-разложения, а с большой – параллельную. При необходимости многократного решения СЛАУ для формирования предобусловливателя целесообразно выбрать матрицу из середины решаемой последовательности СЛАУ, а для условия его переформирования – оценку средней арифметической сложности решения.

### **Перспективы дальнейшей разработки темы**

Целесообразно оценить применимость разработанных математических моделей и алгоритмов при анализе другими численными методами (кроме MoM) или при оптимизации генетическими алгоритмами. Полезно оценить применимость разработанных алгоритмов многократного решения СЛАУ при оценке влияния температуры на параметры моделируемой структуры. Возможна и разработка новых способов корректировки и переформирования предобусловливателя применительно к многократному решению СЛАУ с плотной и частично изменяющейся матрицей. Наконец, целесообразны работы по интеграции предложенных решений в различные САПР.

*В итоге, в работе решена научная проблема разработки методов уменьшения вычислительных затрат на анализ и оптимизацию полосковых структур и линейных антенн с учётом ЭМС, имеющая важное хозяйственное значение.*

## **СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО МАТЕРИАЛАМ ДИССЕРТАЦИИ**

### **Статьи в журналах из перечня ВАК**

1. Газизов, Т.Р. Оптимизация допуска обнуления при решении СЛАУ итерационными методами с предобусловливанием в задачах вычислительной электродинамики / Т.Р. Газизов, С.П. Куксенко // Электромагнитные волны и электронные системы. – 2004. – № 8. – С. 26–28.

2. Куксенко, С.П. Методы решения СЛАУ в задачах вычислительной электродинамики / С.П. Куксенко, Т.Р. Газизов // Вестник Томского государственного педагогического университета. Сер. Естественные и точные науки. Спецвыпуск. – 2005. – № 7. – С. 144–149.
3. Костарев, И.С. Повышение эффективности решения системы линейных алгебраических уравнений итерационными методами / И.С. Костарев, С.П. Куксенко, Т.Р. Газизов // Вестник Томского государственного педагогического университета. Сер. Естественные и точные науки. Спецвыпуск. – 2005. – № 7. – С. 150–155.
4. Компьютерное моделирование сложных структур проводников при проектировании телевизионно-вычислительных систем / Т.Р. Газизов, А.О. Мелкозеров, Т.Т. Газизов, С.П. Куксенко [и др.] // Известия вузов. Приборостроение. – 2005. – Т. 48, № 11. – С. 64–67.
5. Куксенко, С.П. Сравнение способов предфильтрации при решении СЛАУ с плотной матрицей итерационными методами с предобусловливанием / С.П. Куксенко, Т.Р. Газизов // Инфокоммуникационные технологии. – 2007. – Т. 5, № 2. – С. 61–65.
6. Куксенко, С.П. Совершенствование способов предфильтрации для решения СЛАУ с плотной матрицей итерационными методами с предобусловливанием в задачах вычислительной электродинамики / С.П. Куксенко, Т.Р. Газизов // Электромагнитные волны и электронные системы. – 2007. – № 9. – С. 12–17.
7. Суровцев, Р.С. Ускорение многократного решения СЛАУ с частично изменяющейся матрицей / Р.С. Суровцев, С.П. Куксенко, Т.Р. Газизов // Доклады ТУСУР. – 2011. – № 2-1. – С. 141–144.
8. Куксенко, С.П. Усовершенствование алгоритма вычисления методом моментов ёмкостных матриц структуры проводников и диэлектриков в диапазоне значений диэлектрической проницаемости / С.П. Куксенко, Т.Р. Газизов // Электромагнитные волны и электронные системы. – 2012. – № 10. – С. 13–21.
9. Суровцев, Р.С. Вычисление матрицы емкостей произвольной системы проводников и диэлектриков методом моментов: зависимость ускорения за счет блочного LU-разложения от порядка матрицы СЛАУ / Р.С. Суровцев, С.П. Куксенко // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2012. – Т. 55, № 9/3. – С. 126–130.
10. Ахунов, Р.Р. Вычисление матрицы емкостей произвольной системы проводников и диэлектриков методом моментов: оценка использования разреженного строчного формата при решении СЛАУ методом BiCGStab / Р.Р. Ахунов, С.П. Куксенко // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2012. – Т. 55, № 7/2. – С. 27–30.
11. Куксенко, С.П. Использование блочного LU-разложения для ускорения вычисления временного отклика связанных линий передачи с учетом частотной зависимости диэлектрической проницаемости подложки / С.П. Куксенко, В.К. Салов, Р.С. Суровцев // Инфокоммуникационные технологии. – 2013. – Т. 12, № 3. – С. 64–69.
12. Салов, В.К. Использование графического ускорителя для вычисления элементов матрицы системы линейных алгебраических уравнений в системе TALGAT / В.К. Салов, К.Э. Джанбаев, С.П. Куксенко // Доклады ТУСУР. – 2015. – № 4(38). – С. 140–143.
13. Лежнин, Е.В. Алгоритм ILU(0)-разложения с использованием OpenMP / Е.В. Лежнин, Р.Р. Ахунов, С.П. Куксенко // Доклады ТУСУР. – 2015. – № 3(37). – С. 181–183.
14. Суровцев, Р.С. Многократное решение системы линейных алгебраических уравнений с помощью блочного LU-разложения для вычисления емкостной матрицы



системы проводников и диэлектриков при изменении ее параметров / Р.С. Суровцев, С.П. Куксенко, Т.Р. Газизов // Доклады ТУСУР. – 2015. – № 3(37). – С. 132–138.

15. Суровцев, Р.С. Многократное вычисление емкостной матрицы системы проводников и диэлектриков с изменяющимися параметрами с помощью блочного LU-разложения при решении СЛАУ / Р.С. Суровцев, С.П. Куксенко, Т.Р. Газизов // Информационные технологии. – 2015. – Т. 13, № 4. – С. 375–384.

16. Ахунув, Р.Р. Простой способ ускорения вычисления емкостных матриц полосковой структуры при изменении её геометрического параметра / Р.Р. Ахунув, С.П. Куксенко, Т.Р. Газизов // Доклады ТУСУР. – 2015. – № 4. – С. 144–148.

17. Новые возможности системы моделирования электромагнитной совместимости TALGAT / С.П. Куксенко, А.М. Заболоцкий, А.О. Мелкозеров, Т.Р. Газизов // Доклады ТУСУР. – 2015. – № 2(36). – С. 45–50.

18. Куксенко, С.П. Сравнение вычислительных и аналитических оценок ускорения многократного решения СЛАУ блочным LU-разложением / С.П. Куксенко, Р.С. Суровцев // Доклады ТУСУР. – 2016. – Т. 19, № 2. – С. 71–75.

19. Газизов, Т.Р. Магистерская программа ТУСУРа «Электромагнитная совместимость радиоэлектронной аппаратуры» / Т.Р. Газизов, С.П. Куксенко, А.М. Заболоцкий, М.Е. Комнатнов, В.К. Салов // Технологии ЭМС. – 2016. – № 1(56). – С. 24–33.

20. Куксенко, С.П. Оценка уровня излучаемой электромагнитной эмиссии семикаскадного модального фильтра для сети Ethernet 100 Base-T / С.П. Куксенко, Р.Р. Хажибеков, Т.Т. Газизов // Технологии ЭМС. – 2017. – № 1(60). – С. 13–20.

21. Куксенко, С.П. Ускорение многократного вычисления матрицы коэффициентов электростатической индукции полосковой структуры // Доклады ТУСУР. – 2018. – Т. 21, № 4-1. – С. 41–46.

22. Куксенко, С.П. Гибридный метод решения СЛАУ для вычисления матрицы коэффициентов электростатической индукции многопроводных линий передачи в диапазоне значений диэлектрической проницаемости // Информационные технологии. – 2019. – Т. 17, № 2. – С. 7–16.

23. Куксенко, С.П. Моделирование помехозащищенной сети электропитания космического аппарата // Труды МАИ. – 2019. – № 105. – С. 1–20. – URL: [http://trudymai.ru/upload/iblock/36b/Kuksenko\\_rus.pdf](http://trudymai.ru/upload/iblock/36b/Kuksenko_rus.pdf).

### **Статьи в журналах из перечня ВАК, индексируемых в Scopus и(или) WoS**

24. Akhunov, R.R. Sparse matrix storage formats and acceleration of iterative solution of linear algebraic systems with dense matrices / R.R. Akhunov, S.P. Kuksenko, V.K. Salov, T.R. Gazizov // Journal of mathematical sciences. – 2013. – Vol. 191, no 1. – P. 10–18.

25. Akhunov, R.R. Optimization of the ILU(0) factorization algorithm with the use of compressed sparse row format / R.R. Akhunov, S.P. Kuksenko, V.K. Salov, T.R. Gazizov // Journal of mathematical sciences. – 2013. – Vol. 191, no 1. – P. 19–27.

26. Akhunov, R.R. Multiple iterative solution of linear algebraic systems with a partially varying matrix / R.R. Akhunov, S.P. Kuksenko, V.K. Salov, T.R. Gazizov // Journal of mathematical sciences. – 2014. – Vol. 199, no 4. – P. 381–385.

27. Akhunov, R.R. Acceleration of multiple iterative solution of linear algebraic systems in computing the capacitance of a microstrip line in wide ranges of its sizes / R.R. Akhunov, S.P. Kuksenko, T.R. Gazizov // Journal of mathematical sciences. – 2015. – Vol. 207, no 5. – P. 686–692.



28. Akhunov, R.R. Multiple solution of systems of linear algebraic equations by an iterative method with recomputed preconditioners / R.R. Akhunov, S.P. Kuksenko, T.R. Gazizov // *Journal of mathematical sciences*. – 2015. – Vol. 207, no 5. – P. 693–697.

29. Surovtsev, R.S. Analytic evaluation of the computational costs for solving systems of linear algebraic equations in multiple computing of the capacitance matrix in a range of the dielectric permittivity of dielectrics / R.S. Surovtsev, S.P. Kuksenko, T.R. Gazizov // *Journal of mathematical sciences*. – 2015. – Vol. 207, no 5. – P. 795–802.

30. Akhunov, R.R. Multiple solution of systems of linear algebraic equations by an iterative method with the adaptive recalculation of the preconditioner / R.R. Akhunov, S.P. Kuksenko, T.R. Gazizov // *Computational mathematics and mathematical physics*. – 2016. – Vol. 56, no 8. – P. 1382–1387.

### **Статьи в зарубежных журналах, индексируемых в Scopus и(или) WoS**

31. Gazizov, T.R. Acceleration of multiple solution of linear systems for analyses of microstrip structures / T.R. Gazizov, S.P. Kuksenko, R.R. Akhunov // *International journal of mathematical models and methods in applied sciences*. – 2015. – Vol. 9. – P. 721–726.

32. Gazizov, T.R. Stable delay of microstrip line with side grounded conductors / T.R. Gazizov, V.K. Salov, S.P. Kuksenko // *Wireless communications and mobile computing*. – 2017. – Vol. 2017. – P. 1–5.

33. Kuksenko, S.P. Choosing order of operations to accelerate strip structure analysis in parameter range / S.P. Kuksenko, R.R. Ahunov, T.R. Gazizov // *Journal of physics: conference series*. – 2018. – Vol. 1015, no 3. – P. 1–6.

34. Gazizov, T.R. Solving the complexity problem in the electronics production process by reducing the sensitivity of transmission line characteristics to their parameter variations / T.R. Gazizov, I.Ye. Sagiyeva, S.P. Kuksenko // *Complexity*. – Vol. 2019. – 11 p. – URL: <https://doi.org/10.1155/2019/6301326>.

35. Kuksenko, S.P. Preliminary results of TUSUR University project for design of spacecraft power distribution network: EMC simulation // *Journal of physics: conference series*. – 2019. – P. 1–6.

### **Статьи в журналах, индексируемых в РИНЦ**

36. Система компьютерного моделирования сложных структур проводников и диэлектриков TALGAT / Т.Р. Газизов, А.О. Мелкозеров, Т.Т. Газизов, С.П. Куксенко [и др.] // *Компьютерные учебные программы и инновации*. – 2007. – № 10. – С. 89–90.

37. Пути решения актуальных проблем проектирования радиоэлектронных средств с учетом электромагнитной совместимости / Т.Р. Газизов, А.М. Заболоцкий, А.О. Мелкозеров, С.П. Куксенко [и др.] // *Техника радиосвязи*. – 2014. – № 2 (22). – С. 11.

### **Доклады в трудах конференций, индексируемых в Scopus и(или) WoS**

38. Kuksenko, S.P. Dense linear system solution by preconditioned iterative methods in computational electromagnetic / S.P. Kuksenko, T.R. Gazizov // *19th International Zurich symposium of electromagnetic compatibility*. – Singapore, 2008. – P. 918–921.

39. New results on EMC simulation for space projects of TUSUR University / T. Gazizov, A. Melkozerov, P. Orlov, V. Salov, R. Ashirbakiev, R. Akhunov, S. Kuksenko, I. Kalimulin // *IEEE International conference on numerical electromagnetic modeling and optimization for RF, microwave, and terahertz applications*. – Pavia, Italy, 2014. – P. 1–4.

40. Gazizov, T.R. Acceleration of multiple solution of a boundary value problem involving a linear algebraic system / T.R. Gazizov, S.P. Kuksenko, R.S. Surovtsev // *Proceedings*

of the 13th International conference of numerical analysis and applied mathematics. – Rhodes, Greece, 2015. – P. 1–4.

41. Ahunov, R.R. Multiple solution of linear algebraic systems by an iterative method with recomputed preconditioner in the analysis of microstrip structures / S.P. Kuksenko, T.R. Gazizov // Proceedings of the 13th International conference of numerical analysis and applied mathematics. – Rhodes, Greece, 2015. – P. 1–4.

42. New concept of critical infrastructure strengthening / T.R. Gazizov, P.E. Orlov, A.M. Zabolotsky, S.P. Kuksenko // Proceedings of the 13th International conference of numerical analysis and applied mathematics. – Rhodes, Greece, 2015. – P. 1–3.

43. Ensurance and simulation of electromagnetic compatibility: recent results in TUSUR University / T. Gazizov, A. Melkozerov, A. Zabolotsky, S. Kuksenko [et. al.] // International conference on applied physics, simulation and computers. – Vienna, Austria, 2015. – P. 1–12.

44. New developments for improved simulation of interconnects based on method of moments / S.P. Kuksenko, T.R. Gazizov, A.M. Zabolotsky, R.R. Ahunov [et al.] // Proceedings of the 2015 International conference on modelling, simulation and applied mathematics. – Phuket, Thailand, 2015. – P. 1–8.

45. Kuksenko, S.P. Approximation of an initial matrix by a Toeplitz one for acceleration of iterative solution of dense linear algebraic systems in scattering problems / S.P. Kuksenko, T.R. Gazizov, I.S. Kostarev // International Siberian conference on control and communications. – Moscow, 2016. – P. 1–5.

46. Orlov, P.E. Modal distortions of pulse signal in multiconductor PCB structure / P.E. Orlov, T.R. Gazizov, S.P. Kuksenko // International Siberian conference on control and communications. – Moscow, 2016. – P. 1–3.

47. Kuksenko, S.P. Multiple solution of linear algebraic systems by iterative methods in the analysis of modal filters / S.P. Kuksenko // Proceedings of IEEE 2017 International multi-conference on engineering, computer and information sciences. – Novosibirsk, 2017. – P. 449–452.

48. Lezhnin, E.V. Algorithm of nonequidistant segmentation of boundaries of conductors and dielectrics for computer-aided design of strip structures / E.V. Lezhnin, S.P. Kuksenko // Proceedings of IEEE 2017 International multi-conference on engineering, computer and information sciences. – Novosibirsk, 2017. – P. 468–471.

#### **Доклады (тезисы) в трудах других конференций (симпозиуме)**

49. Куксенко, С.П. Оптимизация параметров стабилизированного метода бисопряжённых градиентов при решении задач вычислительной электродинамики / С.П. Куксенко, Т.Р. Газизов // Материалы шестой всероссийской научно-практической конференции «Проблемы информационной безопасности государства, общества и личности». – Томск, 2004. – С. 113–115.

50. Куксенко, С.П. Исследование решения системы линейных алгебраических уравнений итерационным методом BiCGstab // Сборник научных трудов всероссийской научно-технической конференции «Научная сессия ТУСУР-2004». – Томск, 2004. – Ч. 1. – С. 110–113.

51. Куксенко, С.П. Повышение эффективности решения системы линейных алгебраических уравнений // Сборник научных трудов XII международной молодежной научной конференции «Туполевские чтения». – Казань, 2004. – Т. 3. – С. 160–161.

52. Куксенко, С.П. Ускорение решения СЛАУ в задачах вычислительной электродинамики / С.П. Куксенко, Т.Р. Газизов // Материалы седьмой всероссийской научно-

практической конференции «Проблемы информационной безопасности государства, общества и личности». – Томск, 2005. – С. 54–57.

53. Куксенко, С.П. Использование метода BiCGStab для решения нескольких СЛАУ с одинаковой плотной несимметричной матрицей в задачах вычислительной электродинамики // Сборник научных трудов третьей международной научно-практической конференции «Электронные средства и системы управления», посвященной 60-летию Победы в Великой Отечественной войне и 110-летию изобретения радио. – Томск, 2005. – Ч. 2. – С. 128–132.

54. Комплексная оптимизация генетическими алгоритмами для обеспечения ЭМС / Т.Р. Газизов, А.О. Мелкозеров, Т.Т. Газизов, С.П. Куксенко [и др.] // Сборник научных докладов VI Международного симпозиума по электромагнитной совместимости и электромагнитной экологии. – Санкт-Петербург, 2005. – С. 160–164.

55. Костарев, И.С. Увеличение скорости решения системы линейных алгебраических уравнений с помощью быстрого преобразования Фурье / И.С. Костарев, С.П. Куксенко // Сборник научных трудов всероссийской научно-технической конференции «Научная сессия ТУСУР-2005». – Томск, 2005. – Ч. 1. – С. 112–114.

56. Костарев, И.С. Увеличение скорости решения системы линейных алгебраических уравнений итерационными методами / И.С. Костарев, С.П. Куксенко // Сборник научных трудов третьей международной научно-практической конференции «Электронные средства и системы управления», посвященной 60-летию Победы в Великой Отечественной войне и 110-летию изобретения радио. – Томск, 2005. – Ч. 1. – С. 110–113.

57. Куксенко, С.П. Зависимость оптимального допуска обнуления от дискретизации антенны / С.П. Куксенко, С.Т. Сивцев // Материалы всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР-2007», посвященной 45-летию ТУСУРа. – Томск, 2007. – С. 119–122.

58. Куксенко, С.П. Новый способ предфильтрации при решении СЛАУ с плотными матрицами итерационными методами с предобусловливанием // Материалы всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР-2007», посвященной 45-летию ТУСУРа. – Томск, 2007. – Ч. 1. – С. 341–344.

59. Куксенко, С.П. Совершенствование предобусловливания при решении СЛАУ с плотной матрицей итерационными методами / С.П. Куксенко, Т.Н. Савельева // 2-я научно-методическая конференция «Групповое проектное обучение». – Томск, 2007. – Т. 1. – С. 150–153.

60. Куксенко, С.П. Сравнение итерационных методов при использовании предобусловливания на примере определения токов в проводной антенне / С.П. Куксенко, С.Т. Сивцев // 4-я международная научно-практическая конференция «Электронные средства и системы управления. Опыт инновационного развития». – Томск, 2007. – Ч. 1. – С. 254–258.

61. Куксенко, С.П. Изменение оптимального значения допуска обнуления от частоты сигнала и дискретизации антенны / С.П. Куксенко, С.Т. Сивцев // Сборник научных трудов XV международной молодежной научной конференции «Туполевские чтения». – Казань, 2007. – Т. 2. – С. 206–208.

62. Возможности применения новых модальных явлений в целях электромагнитного терроризма и для защиты от него / Т.Р. Газизов, А.М. Заболоцкий, А.О. Мелкозеров, Т.Т. Газизов, С.П. Куксенко, Е.П. Горин, И.Г. Бевзенко // Труды VII

Международного симпозиума по электромагнитной совместимости и электромагнитной экологии. – Санкт-Петербург, 2007. – С. 266–269.

63. Добуш, И.М. Компьютерный электромагнитный анализ металлического корпуса с щелями / И.М. Добуш, К.С. Дмитриенко, С.П. Куксенко // Материалы докладов всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР-2008». – Томск, 2008. – Т. 1. – С. 54–57.

64. Исабеков, Э.К. Особенности метода конечных элементов / Э.К. Исабеков, С.П. Куксенко // Материалы докладов всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР-2008». – Томск, 2008. – Т. 1. – С. 68–71.

65. Сивцев, С.Т. Применение вейвлет-преобразования при решении СЛАУ итерационными методами / С.Т. Сивцев, С.П. Куксенко // Материалы докладов всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР-2008». – 2008. – Т. 1. – С. 74–77.

66. Лаптев, К.Н. Предложения по организации кластеров в образовательных учреждениях / К.Н. Лаптев, С.П. Куксенко // Материалы докладов всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР-2008». – Томск, 2008. – Т. 1. – С. 77–80.

67. Дегтярев, Д.С. Оценка электромагнитных воздействий на космические аппараты / Д.С. Дегтярев, Д.И. Олейник, С.П. Куксенко // Материалы докладов всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР-2008». – Томск, 2008. – Т. 2. – С. 129–131.

68. Дмитриенко, К.С. Метод анализа электромагнитных помех и электромагнитной совместимости кабелей и печатных плат, расположенных в сложных металлических структурах / К.С. Дмитриенко, И.М. Добуш, С.П. Куксенко // Тезисы докладов научно-технической конференции молодых специалистов «Электронные и электромеханические системы и устройства». – Томск, 2008. – С. 114–115.

69. Добуш, И.М. Электродинамический анализ металлического корпуса со щелями / И.М. Добуш, К.С. Дмитриенко, С.П. Куксенко // Сборник научных трудов XV международной молодежной научной конференции «Туполевские чтения». – Казань, 2008. – С. 56–59.

70. Ускорение вычислений в задачах моделирования ЭМС / В.К. Салов, С.П. Куксенко, М.Е. Комнатнов, Р.Р. Ахунов [и др.] // Труды 9-го Международного симпозиума по электромагнитной совместимости и электромагнитной экологии. – Санкт-Петербург, 2011. – С. 269–272.

71. Комнатнов, М.Е. Сравнение производительности математических библиотек на примере решения системы линейных алгебраических уравнений / М.Е. Комнатнов, С.П. Куксенко // Материалы докладов научно-технической конференции молодых специалистов ОАО «Информационные спутниковые системы» имени академика М.Ф. Решетнева «Разработка, производство, испытания и эксплуатация космических аппаратов и систем», посвященной 50-летию полета в космос Ю.А. Гагарина. – Железногорск, 2011. – С. 396–398.

72. Салов, В.К. Ускорение вычислений за счет использования графических процессоров / В.К. Салов, С.П. Куксенко // Материалы докладов научно-технической конференции молодых специалистов ОАО «Информационные спутниковые системы» имени академика М.Ф. Решетнева «Разработка, производство, испытания и эксплуатация

космических аппаратов и систем», посвященной 50-летию полета в космос Ю.А. Гагарина. – Железногорск, 2011. – С. 419–420.

73. Комнатнов, М.Е. Сравнение производительности математических библиотек при использовании различных типов данных / М.Е. Комнатнов, С.П. Куксенко // Материалы докладов всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР-2011». – Томск, 2011. – Ч. 1. – С. 127–129.

74. Ахунов, Р.Р. Ускорение многократного решения СЛАУ с изменяющейся матрицей / Р.Р. Ахунов, С.П. Куксенко // Международная конференция «Актуальные проблемы вычислительной и прикладной математики 2015», посвященная 90-летию со дня рождения академика Гурия Ивановича Марчука. – Новосибирск, 2015. – С. 84–90.

75. Кропотов, В.В. Блок модальных фильтров для сети Ethernet 100 Base-T / В.В. Кропотов, С.П. Куксенко // Материалы XI международной научно-практической конференции «Электронные средства и системы управления». – Томск, 2015. – Ч. 2. – С. 36–39.

76. Квасников, А.А. Расширение функциональных возможностей и совершенствование графического интерфейса системы TALGAT / А.А. Квасников, Е.В. Лежнин, С.П. Куксенко // Материалы XI международной научно-практической конференции «Электронные средства и системы управления». – Томск, 2015. – Ч. 2. – С. 39–42.

77. Гутник, К.А. Совершенствование адаптивного итерационного выбора оптимальной сегментации границ структуры проводников и диэлектриков / К.А. Гутник, С.П. Куксенко // Материалы XI международной научно-практической конференции «Электронные средства и системы управления». – Томск, 2015. – Ч. 2. – С. 63–66.

78. Лесков, А.Н. Сравнительное вычисление волнового сопротивления симметричной полосковой линии / А.Н. Лесков, С.П. Куксенко // Материалы XI международной научно-практической конференции «Электронные средства и системы управления». – Томск, 2015. – Ч. 2. – С. 66–68.

79. Новый подход к компоновке плоских кабелей в необслуживаемых летательных аппаратах / Е.Н. Буичкин, П.Е. Орлов, С.П. Куксенко, Т.Р. Газизов [и др.] // Materials of the XII international scientific and practical conference «Areas of scientific thought». – Sheffield, 2015. – Vol. 18. – P. 22–24.

80. Газизов, Р.Р. Численные оценки эффективности использования перенумерации подынтервалов границ проводников и диэлектриков при многовариантном анализе полосковых структур / Р.Р. Газизов, Е.В. Лежнин, С.П. Куксенко // Материалы двенадцатой международной научно-практической конференции «Электронные средства и системы управления». – Томск, 2016. – Т. 1. – С. 203–205.

81. Куксенко, С.П. Оценка уровня излучаемых эмиссий семикаскадного модального фильтра для сети Etherne 100Base-T / С.П. Куксенко, Р.Р. Хажобеков // Материалы двенадцатой международной научно-практической конференции «Электронные средства и системы управления». – Томск, 2016. – Т. 1. – С. 208–211.

82. Лемешко, К.А. Оценка эффективности использования  $PLU(0)$ -разложения при анализе полосковых структур / К.А. Лемешко, С.П. Куксенко // Материалы двенадцатой международной научно-практической конференции «Электронные средства и системы управления». – Томск, 2016. – Т. 1. – С. 213–215.

83. Куксенко, С.П. Лабораторный практикум для обучения основам построения компьютерных сетей / С.П. Куксенко // Материалы международной научно-

методической конференции «Современное образование: проблемы взаимосвязи образовательных и профессиональных стандартов». – Томск, 2016. – С. 115–116.

84. Газизов, Т.Р. Магистерская программа «Электромагнитная совместимость радиоэлектронной аппаратуры» / Т.Р. Газизов, С.П. Куксенко, А.М. Заболоцкий, М.Е. Комнатнов [и др.] // Материалы международной научно-методической конференции «Современное образование: проблемы взаимосвязи образовательных и профессиональных стандартов». – Томск, 2016. – С. 124–126.

85. Куксенко, С.П. Новая постановка дисциплины «Теория ЭМС радиоэлектронных средств и систем» / С.П. Куксенко, А.О. Белоусов, А.В. Носов // Материалы международной научно-методической конференции «Современное образование: проблемы взаимосвязи образовательных и профессиональных стандартов». – Томск, 2016. – С. 134–135.

86. Куксенко, С.П. Актуальность подготовки специалистов по электромагнитной совместимости в топливно-энергетическом комплексе Сибири / С.П. Куксенко // 22-я международная научно-практическая конференция «Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири (СИБРЕСУРС-22-2016)». – Томск, 2016. – С. 88–92.

87. Куксенко, С.П. Использование системы TALGAT при решении задач электроэнергетики / С.П. Куксенко, Р.Р. Мусабаев // Материалы региональной научно-практической конференции «Наука и практика: проектная деятельность от идеи до внедрения». – Томск, 2016. – С. 1–2.

88. Рыжова, М.В. Использование адаптивной перекрестной аппроксимации при решении электромагнитных задач методом моментов / М.В. Рыжова, С.П. Куксенко // Материалы 23-й международной научно-практической конференции «Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири (СИБРЕСУРС-23-2017)». – Томск, 2017. – С. 172–177.

89. Газизов, Р.Р. Оценки использования перенумерации подынтервалов границ проводников и диэлектриков при многовариантном анализе полосковых структур / Р.Р. Газизов, Е.В. Лежнин, С.П. Куксенко // Микроэлектроника и информатика-2017: материалы Всероссийской межвузовской научно-технической конференции студентов и аспирантов. – Москва, 2017. – С. 14–20.

90. Мусабаев, Р.Р. Программная реализация алгоритма вычисления матрицы погонных сопротивлений многопроводной линии передачи в системе TALGAT / Р.Р. Мусабаев, Е.В. Лежнин, С.П. Куксенко // Материалы всероссийской научно-технической конференции «Современные проблемы радиоэлектроники». – Красноярск, 2017. – С. 16–18.

91. Газизов, Р.Р. Комплексные оценки использования алгоритма перенумерации при многовариантном анализе полосковых структур / Р.Р. Газизов, Е.В. Лежнин, С.П. Куксенко // Материалы XIII международной научно-практической конференции «Электронные средства и системы управления», посвященной 55-летию ТУСУРа. – Томск, 2017. – Ч. 2. – С. 8–10.

92. Квасников, А.А. Разработка подсистем графического интерфейса системы TALGAT / А.А. Квасников, С.П. Куксенко, Е.В. Лежнин // Материалы XIII международной научно-практической конференции «Электронные средства и системы управления», посвященной 55-летию ТУСУРа. – Томск, 2017. – Ч. 2. – С. 15–18.

93. Квасников, А.А. Совершенствование алгоритма вычисления матрицы погонных сопротивлений линии передачи / А.А. Квасников, С.П. Куксенко // Материалы XIV

международной научно-практической конференции «Электронные средства и системы управления». – Томск, 2018. – С. 290–293.

94. Куксенко, С.П. Магистерская программа «Электромагнитная совместимость в топливно-энергетическом комплексе» / С.П. Куксенко // Материалы региональной научно-практической конференции «Наука и практика: проектная деятельность от идеи до внедрения». – Томск, 2018. – С. 560–565.

95. Хажобеков, Р.Р. Особенности обучения студентов моделированию задач электромагнитной совместимости / Р.Р. Хажобеков, С.П. Куксенко // Материалы международной методической конференции «Современное образование: повышение профессиональной компетентности преподавателей вуза – гарантия обеспечения качества образования». – Томск, 2018. – С. 59–60.

### **Патенты на изобретение**

96. Пат. 2431912 РФ. Устройство защиты от импульсных сигналов / Газизов Т.Р., Заболоцкий А.М., Бевзенко И.Г., Самотин И.Е., Орлов П.Е., Мелкозеров А.О., Газизов Т.Т., Куксенко С.П., Костарев И.С. – Заявка № 2010108520/07(012016); приор. 09.03.2010; опубл. 20.10.2011, Бюл. № 29.

97. Пат. 2431897 РФ. Устройство для нарушения работы аппаратуры за счет разложения и восстановления импульсов / Газизов Т.Р., Заболоцкий А.М., Бевзенко И.Г., Самотин И.Е., Орлов П.Е., Мелкозеров А.О., Газизов Т.Т., Куксенко С.П., Костарев И.С. – Заявка № 2010108518/07(012013); приор. 9.03.2010; опубл. 20.10.2011, Бюл. № 29.

98. Пат. 2597940 РФ. Линия задержки, защищающая от сверхкоротких импульсов / Суровцев Р.С., Газизов Т.Р., Носов А.В., Заболоцкий А.М., Куксенко С.П. – Заявка № 2015120797; приор. 01.06.2016; опубл. 20.09.2016, Бюл. № 26.

99. Пат. 2600098 РФ. Меандровая линия задержки из двух витков, защищающая от сверхкоротких импульсов / Суровцев Р.С., Газизов Т.Р., Носов А.В., Заболоцкий А.М., Куксенко С.П. – Заявка № 2015137528; приор. 02.09.2015; опубл. 20.10.2016, Бюл. № 29.

100. Пат. 2603843 РФ. Способ резервирования для печатных плат / Газизов Т.Р., Орлов П.Е., Шарафутдинов В.Р., Кузнецова-Таджибаева О.М., Заболоцкий А.М., Куксенко С.П., Буичкин Е.Н. – Заявка № 2015137547; приор. 02.09.2015; опубл. 10.12.2016, Бюл. № 34.

101. Пат. 2603850 РФ. Способ трассировки печатных проводников цепей с резервированием / Газизов Т.Р., Орлов П.Е., Шарафутдинов В.Р., Кузнецова-Таджибаева О.М., Заболоцкий А.М., Куксенко С.П., Буичкин Е.Н. – Заявка № 2015129253; приор. 16.07.2015; опубл. 10.12.2016, Бюл. № 34.

102. Пат. 2606776 РФ. Меандровая линия задержки из двух витков с разными разносами, защищающая от сверхкоротких импульсов / Суровцев Р.С., Газизов Т.Р., Носов А.В., Заболоцкий А.М., Куксенко С.П. – Заявка № 2015137524; приор. 02.09.2015; опубл. 10.01.2017, Бюл. № 1.

103. Пат. 2606709 РФ. Меандровая линия задержки с лицевой связью, защищающая от сверхкоротких импульсов / Газизов А.Т., Заболоцкий А.М., Куксенко С.П. – Заявка № 2015137545; приор. 02.09.2015; опубл. 10.01.2017, Бюл. № 1.

104. Пат. 2607252 РФ. Меандровая микрополосковая линия задержки, защищающая от сверхкоротких импульсов / Суровцев Р.С., Газизов Т.Р., Носов А.В., Заболоцкий А.М., Куксенко С.П. – Заявка № 2015129255; приор. 16.07.2015; опубл. 10.01.2017, Бюл. № 1.

105. Пат. 2656834 РФ. Усовершенствованная линия задержки, защищающая от сверхкоротких импульсов с увеличенной длительностью / Газизов Т.Р., Суровцев Р.С., Носов А.В., Куксенко С.П., Газизов Т.Т. – Заявка № 2016141523; приор. 21.10.2016; опубл. 06.06.2018, Бюл. № 16.

106. Пат. 2603851 РФ. Способ трассировки печатных проводников с изменением диэлектрического заполнения между ними для цепей с резервированием / Газизов Т.Р., Орлов П.Е., Шарафутдинов В.Р., Кузнецова-Таджибаева О.М., Заболоцкий А.М., Куксенко С.П., Буичкин Е.Н. – Заявка № 2015129263; приор. 16.07.2015; опубл. 10.12.2016, Бюл. № 34.

107. Пат. 2603848 РФ. Способ резервирования плоских кабелей / Газизов Т.Р., Орлов П.Е., Шарафутдинов В.Р., Кузнецова-Таджибаева О.М., Заболоцкий А.М., Куксенко С.П., Буичкин Е.Н. – Заявка № 2015156667; приор. 28.12.2015; опубл. 10.12.2016, Бюл. № 34.

108. Пат. 2614156 РФ. Способ компоновки печатных плат для цепей с резервированием / Газизов Т.Р., Орлов П.Е., Шарафутдинов В.Р., Кузнецова-Таджибаева О.М., Заболоцкий А.М., Куксенко С.П., Буичкин Е.Н. – Заявка № 2015137532; приор. 02.09.2015; опубл. 23.03.2017, Бюл. № 9.

109. Пат. 2624465 РФ. Четырехпроводная зеркально-симметричная структура, защищающая от сверхкоротких импульсов / Заболоцкий А.М., Газизов Т.Р., Куксенко С.П. – Заявка № 2015137546; приор. 02.09.2015; опубл. 04.07.2017, Бюл. № 19.

110. Пат. 2624637 РФ. Способ внутренней компоновки печатных плат для цепей с резервированием / Газизов Т.Р., Орлов П.Е., Шарафутдинов В.Р., Кузнецова-Таджибаева О.М., Заболоцкий А.М., Куксенко С.П., Буичкин Е.Н. – Заявка № 2015137548; приор. 02.09.2015; опубл. 05.07.2017, Бюл. № 19.

111. Пат. 2637484 РФ. Линия задержки, защищающая от сверхкоротких импульсов с увеличенной длительностью / Газизов Т.Р., Суровцев Р.С., Носов А.В., Куксенко С.П., Газизов Т.Т. – Заявка № 2016141521; приор. 21.10.2016; опубл. 04.12.2017, Бюл. № 34.

### **Патенты на полезную модель**

112. Пат. 79213 РФ. Устройство воздействия на аппаратуру / Газизов Т.Р., Заболоцкий А.М., Бевзенко И.Г., Самотин И.Е., Орлов П.Е., Мелкозеров А.О., Газизов Т.Т., Куксенко С.П., Костарев И.С. – Заявка № 2008127574/22(033831); приор. 07.07.2008; опубл. 20.12.2008, Бюл. № 35.

113. Пат. 79355 РФ. Модальный фильтр / Газизов Т.Р., Заболоцкий А.М., Бевзенко И.Г., Самотин И.Е., Орлов П.Е., Мелкозеров А.О., Газизов Т.Т., Куксенко С.П., Костарев И.С. – Заявка № 2008127527/22(033781); приор. 07.07.2008; опубл. 27.12.2008, Бюл. № 36.

114. Пат. 800100 РФ. Устройство модального зондирования / Газизов Т.Р., Заболоцкий А.М., Бевзенко И.Г., Самотин И.Е., Орлов П.Е., Мелкозеров А.О., Газизов Т.Т., Куксенко С.П., Костарев И.С. – Заявка № 2008127580/22(033837); приор. 07.07.2008; опубл. 20.01.2009, Бюл. № 2.

115. Пат. 2386964 РФ. Устройство обнаружения, идентификации и диагностики многопроводных линий передачи / Т.Р. Газизов, А.О. Мелкозеров, А.М. Заболоцкий, С.П. Куксенко, П.Е. Орлов, И.Г. Бевзенко, И.Е. Самотин, Т.Т. Газизов, И.С. Костарев. – Заявка № 2009108905/28; приор. 10.03.2009; опубл. 20.04.2010; Бюл. № 11.



### **Свидетельства о регистрации программы для ЭВМ**

116. Свид. № 8376 от 24.05.2007. Система компьютерного моделирования сложных структур проводников и диэлектриков TALGAT / Т.Р. Газизов, А.О. Мелкозеров, Т.Т. Газизов, С.П. Куксенко. – Зарег. в Отраслевом фонде алгоритмов и программ Госкоорцентра Минобрнауки РФ с присвоением номера государственной регистрации ВНИИЦ № 50200701103.

117. Свид. № 2009614871. TALGAT 2008 / Т.Р. Газизов, А.О. Мелкозеров, Т.Т. Газизов, С.П. Куксенко [и др.]. – Заявка № 2009613644. Дата поступления 09.07.2009. Зарег. в Реестре программ для ЭВМ 08.09.2009.

118. Свид. № 2010613497. TALGAT 2009 / Т.Р. Газизов, А.О. Мелкозеров, Т.Т. Газизов, С.П. Куксенко [и др.]. – Заявка № 2010612008. Дата поступления 13.04.2010. Зарег. в Реестре программ для ЭВМ 28.05.2010.

119. Свид. № 2012610712. TALGAT 2010 / Т.Р. Газизов, А.О. Мелкозеров, Т.Т. Газизов, С.П. Куксенко [и др.]. – Заявка № 2011617178. Дата поступления 26.09.2011. Зарег. в Реестре программ для ЭВМ 13.01.2012.

120. Свид. № 2012660373. TALGAT 2011 / Т.Р. Газизов, А.О. Мелкозеров, Т.Т. Газизов, С.П. Куксенко [и др.]. – Заявка № 2012618426. Дата поступления 05.10.2012. Зарег. в Реестре программ для ЭВМ 16.11.2012.

121. Свид. № 2013619615. TALGAT 2012 / Т.Р. Газизов, А.О. Мелкозеров, Т.Т. Газизов, С.П. Куксенко [и др.]. – Заявка № 2013617773. Дата поступления 29.08.2013. Зарег. в Реестре программ для ЭВМ 11.10.2013.

122. Свид. № 2014661022. SEplate / М.Е. Комнатнов, Т.Р. Газизов, С.П. Куксенко. – Заявка № 2014615110. Дата поступления 29.05.2014. Зарег. в Реестре программ для ЭВМ 22.10.2014.

123. Свид. № 2014617440. SEbox / М.Е. Комнатнов, Т.Р. Газизов, С.П. Куксенко. – Заявка № 2014615102. Дата поступления 29.05.2014. Зарег. в Реестре программ для ЭВМ 22.07.2014.

124. Свид. № 20156143. TALGAT 2013 / Т.Р. Газизов, А.О. Мелкозеров, Т.Т. Газизов, С.П. Куксенко [и др.]. – Заявка № 2015611288. Дата поступления 03.03.2015. Зарег. в Реестре программ для ЭВМ 16.04.2015.

125. Свид. № 2015615730. Организация хранения плотной матрицы в модифицированном строчном разреженном формате после предфильтрации, основанной на максимальном элементе матрицы / Р.Р. Ахунов, С.П. Куксенко, Т.Р. Газизов. – Заявка № 2015612891. Дата поступления 09.04.2015 г. Зарег. в Реестре программ для ЭВМ 22.05.2015.

126. Свид. № 2015615729. Многократное решение СЛАУ итерационным методом BiCGStab с переформированием матрицы предобусловливания при превышении среднего времени решения одной системы / Р.Р. Ахунов, С.П. Куксенко, Т.Р. Газизов. – Заявка № 2015612890. Дата поступления 09.04.2015. Зарег. в Реестре программ для ЭВМ 22.05.2015.

127. Свид. № 2015615793. Многократное решение систем линейных алгебраических уравнений с частично изменяющейся матрицей / Р.С. Суровцев, С.П. Куксенко, Т.Р. Газизов. – Заявка № 2015612566. Дата поступления 02.04.2015. Зарег. в Реестре программ для ЭВМ 25.05.2015.

128. Свид. № 2015615837. Многократное решение СЛАУ итерационным методом BiCGStab с использованием переформирования матрицы предобусловливания по заданному порогу числа итераций / Р.Р. Ахунов, С.П. Куксенко, Т.Р. Газизов. – Заявка

№ 2015612782. Дата поступления 09.04.2015. Зарег. в Реестре программ для ЭВМ 26.05.2015.

129. Свид. № 2015615835. ILU(0)-разложение матрицы, хранимой в разреженном строчном формате, с последовательным перебором элементов / Р.Р. Ахунов, С.П. Куксенко, Т.Р. Газизов. – Заявка № 2015612781. Дата поступления 09.04.2015. Зарег. в Реестре программ для ЭВМ 26.05.2015.

130. Свид. № 2015616124. ILU(0)-разложение матрицы, хранимой в модифицированном разреженном строчном формате, с использованием вспомогательного вектора / Р.Р. Ахунов, С.П. Куксенко, Т.Р. Газизов. – Заявка № 2015612895. Дата поступления 09.04.2015. Зарег. в Реестре программ для ЭВМ 01.06.2015.

131. Свид. № 2015616205. ILU(0)-разложение матрицы, хранимой в модифицированном разреженном строчном формате / Р.Р. Ахунов, С.П. Куксенко, Т.Р. Газизов. – Заявка № 2015612783. Дата поступления 09.04.2015. Зарег. в Реестре программ для ЭВМ 03.06.2015.

132. Свид. № 2015616321. Решение СЛАУ с матрицей, полученной с помощью ILU(0)-разложения и хранимой в модифицированном разреженном строчном формате / Р.Р. Ахунов, С.П. Куксенко, Т.Р. Газизов. – Заявка № 2015612893. Дата поступления 09.04.2015. Зарег. в Реестре программ для ЭВМ 05.06.2015.

133. Свид. № 2015616322. Многократное решение СЛАУ итерационным методом BiCGstab с использованием при решении текущей системы вектора решения предыдущей / Р.Р. Ахунов, С.П. Куксенко, Т.Р. Газизов. – Заявка № 2015612894. Дата поступления 09.04.2015. Зарег. в Реестре программ для ЭВМ 05.06.2015.

134. Свид. № 2015616320. Многократное решение СЛАУ итерационным методом BiCGStab с использованием матрицы предобусловливания, полученной при решении первой системы / Р.Р. Ахунов, С.П. Куксенко, Т.Р. Газизов. – Заявка № 2015612892. Дата поступления 09.04.2015. Зарег. в Реестре программ для ЭВМ 05.06.2015.

135. Свид. № 2015617550. TALGAT 2014 / Т.Р. Газизов, А.О. Мелкозеров, Т.Т. Газизов, С.П. Куксенко [и др.]. – Заявка № 2015614488. Дата поступления 27.05.2015. Зарег. в Реестре программ для ЭВМ 17.07.2015.

136. Свид. № 2015618664 РФ. Вычисление комплексной емкостной матрицы многопроводной микрополосковой линии на подложке из FR-4 в диапазоне частот с помощью блочного LU-разложения / Р.С. Суровцев, С.П. Куксенко, Т.Р. Газизов. – Заявка № 2015612938. Дата поступления 02.04.2015. Зарег. в Реестре программ для ЭВМ 13.08.2015.

137. Свид. № 2015660487. TALGAT 2015 / Т.Р. Газизов, А.О. Мелкозеров, Т.Т. Газизов, С.П. Куксенко [и др.]. – Заявка № 2015617580. Дата поступления 17.08.2015. Зарег. в Реестре программ для ЭВМ 01.10.2015.

138. Свид. № 2016662520. TALGAT 2016 / Т.Р. Газизов, А.О. Мелкозеров, Т.Т. Газизов, С.П. Куксенко [и др.]. – Заявка № 20166619296. Дата поступления 01.09.2016. Зарег. в Реестре программ для ЭВМ 14.11.2016.

139. Свид. № 2018611481. TALGAT 2017 / Т.Р. Газизов, А.О. Мелкозеров, Т.Т. Газизов, С.П. Куксенко [и др.]. – Заявка № 2017663209. Дата поступления 13.12.2017. Зарег. в Реестре программ для ЭВМ 02.02.2018.

140. Свид. № 2018661874. Вычисление и трехмерное отображение эффективности экранирования металлическим корпусом с апертурой / А.А. Квасников, М.Е. Комнатнов, С.П. Куксенко, Т.Р. Газизов. – Заявка № 2018616275. Дата поступления 18.06.2018. Зарег. в Реестре программ для ЭВМ 20.09.2018.

### Монографии и учебное пособие

141. Куксенко, С.П. Итерационные методы решения системы линейных алгебраических уравнений с плотной матрицей / С.П. Куксенко, Т.Р. Газизов. – Томск: Изд-во ТГУ, 2007. – 208 с.

142. Куксенко, С.П. Итерационные методы решения СЛАУ в вычислительной электродинамике / С.П. Куксенко. – Saarbrücken: LAP Academic Publishing, 2012. – 136 с.

143. Совершенствование моделирования и обеспечения электромагнитной совместимости бортовой радиоэлектронной аппаратуры космических аппаратов / В.К. Салов, А.М. Заболоцкий, С.П. Куксенко, П.Е. Орлов, Р.С. Суровцев. – Томск: Изд-во ТУСУРа, 2014. – 131 с.

144. Ахунов, Р.Р. Многократное решение систем линейных алгебраических уравнений итерационными методами с предобуславливанием в задачах электромагнитной совместимости / Р.Р. Ахунов, С.П. Куксенко, Т.Р. Газизов, П.Е. Орлов. – Томск: Изд-во ТУСУРа, 2015. – 152 с.

145. Куксенко, С.П. Электромагнитная совместимость: моделирование / С.П. Куксенко; под ред. Т.Р. Газизова. – Томск: В-Спектр, 2018. – 188 с.

146. Газизов, Т.Р. Электромагнитная совместимость: преднамеренные силовые электромагнитные воздействия: учеб. пособие / Т.Р. Газизов, А.М. Заболоцкий, С.П. Куксенко. – Томск: Изд-во ТУСУРа, 2018. – 114 с.