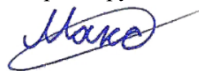


На правах рукописи



Максимов Александр Евгеньевич

**МОДЕЛИРОВАНИЕ МНОГОПРОВОДНЫХ ЛИНИЙ ПЕРЕДАЧИ
С ПРОИЗВОЛЬНЫМИ ПОПЕРЕЧНЫМИ СЕЧЕНИЯМИ МЕТОДОМ МОМЕНТОВ**

Специальность 2.2.13 –
Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск 2024

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

Научный руководитель: **Куксенко Сергей Петрович**,
доктор технических наук, доцент,
профессор кафедры телевидения и управления
ТУСУРа

Официальные оппоненты: **Горбачёв Анатолий Петрович**,
доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры радиоприемных и
радиопередающих устройств ФГБОУ ВО
«Новосибирский государственный технический
университет»;
Дмитренко Анатолий Григорьевич,
доктор физико-математических наук, профессор,
профессор кафедры прикладной математики
ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский
Томский государственный университет»

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Воронежский государственный технический
университет»

Защита состоится «27» июня 2024 г. в 11 часов 30 минут на заседании диссертационного совета 24.2.415.01, созданного на базе ТУСУРа, по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40, ауд. 201.

С диссертацией можно ознакомиться на официальном сайте по ссылке <https://postgraduate.tusur.ru/urls/4pveb75o> и в библиотеке ТУСУРа по адресу: 634045, г. Томск, ул. Красноармейская, 146.

Автореферат разослан «__» мая 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.2.415.01,
д-р физ.-мат. наук, профессор



А.Е. Мандель

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Конкуренция производителей радиоэлектронных средств вызывает необходимость их регулярного обновления и совершенствования. При этом с ростом сложности радиотехнических и радиоэлектронных устройств это становится невозможным без применения автоматизированного проектирования с использованием средств моделирования. Линии передачи, в том числе многопроводные (МПЛП), относятся к радиотехническим устройствам и являются одним из основных элементов радиоэлектронных средств, поэтому требуется их тщательное проектирование для учета требований по целостности сигналов и питания, а также электромагнитной совместимости в целом. Расчет параметров МПЛП из-за сложности их структуры при помощи аналитических методов трудно реализуем, поэтому часто используют квазистатическое приближение, основанное на решении уравнения Пуассона/Лапласа, и численные методы, наиболее универсальными из которых являются метод конечных разностей, метод конечных элементов и метод моментов (method of moments, MoM).

При моделировании МПЛП с использованием MoM необходимо решение матричного уравнения $\mathbf{S}\mathbf{\Sigma} = \mathbf{V}$ (\mathbf{S} – матрица размера $N \times N$, описывающая МПЛП через связи сегментов ее границ между собой, где N – число сегментов расчетной сетки; $\mathbf{\Sigma}$ – матрица размера $N \times M$, содержащая неизвестные общие плотности заряда на сегментах границ, где M – число проводников линии, не считая заземленных; \mathbf{V} – матрица размера $N \times M$, содержащая известные потенциалы на проводниках) для вычисления характеризующих линию матриц погонных параметров (наиболее вычислительно затратной матрицы коэффициентов электростатической индукции \mathbf{C} (Ф/м), матрицы коэффициентов электромагнитной индукции \mathbf{L} (Гн/м), матриц \mathbf{R} (Ом/м) и \mathbf{G} (См/м), описывающих потери в проводниках и диэлектриках соответственно). Однако для формирования этого уравнения необходима корректная сегментация границ поперечного сечения МПЛП. Так, от числа сегментов напрямую зависят размеры решаемого матричного уравнения, определяющие вычислительную сложность моделирования, поэтому целесообразно стремиться уменьшать это число. Однако с ростом числа сегментов удается точнее учесть особенности решения задачи и тем самым повысить точность моделирования. Поэтому возникают два противоречивых требования: сегментация должна обеспечивать низкие вычислительные затраты и давать результаты (матрицы погонных параметров МПЛП) с высокой точностью.

Случайные вариации геометрических параметров МПЛП, обусловленные неидеальностью технологического процесса, а также поиск их оптимальных значений требуют многократного вычисления параметров линии, что приводит к дополнительному росту суммарных вычислительных затрат и тем самым затрудняет эффективное проектирование. Кроме того, при анализе некоторых МПЛП с использованием программных средств матрицы погонных параметров могут оказаться неточными, что приводит к «нефизичности» последующего моделирования, основанного на этих матрицах. Таким образом, для уменьшения вычислительных затрат (время моделирования и объем требуемой машинной памяти) при сохранении

или повышении точности получаемых результатов необходимо совершенствовать моделирование МПЛП.

Степень разработанности темы исследования. Значительный вклад в разработку методов и подходов к моделированию МПЛП внесли М.В. Bazdar, А. Das, D. de Zutter, А.Р. Djordjevic, V.F. Fusco, D. Gope, R.F. Harrington, M. Ianoz, S.K. Kim, R.R. Nair, С.Р. Paul, А.Ф. Peterson, S.M. Rao, Т.К. Sarker, F.M. Tesche, Т.Р. Газизов, С.Н. Макаров, Н.Д. Малютин, А.Н. Сычев и др.

Сложность анализа МПЛП обусловлена тем, что некорректный выбор сегментации границ ее поперечного сечения или параметра моделирования, ограничивающего структуру, может дать неточное вычисление матриц погонных параметров, как показано, например, в работах S. Balakrishnan, В.К. Gilbert, Н. Kim, G.W. Pan, J.H. Park, G. Wang и др. Неточные матрицы могут стать причиной последующего «нефизического» моделирования МПЛП, что препятствует их рациональному проектированию, как показано, например, в работах J.L. Drewniak, Z. Peterson, D. Pommerenke, J. Zhang и др.

Цель работы – разработать новые и модифицировать известные методы для моделирования МПЛП методом моментов с уменьшенными вычислительными затратами.

Для достижения цели решены следующие **задачи**: проведен обзор известных методов моделирования МПЛП с уменьшенными вычислительными затратами, а также соответствующих программных средств; определены критерии и параметры моделирования, обеспечивающие точный расчет матриц коэффициентов электростатической индукции МПЛП методом моментов; модифицированы известные и разработаны новые методы сегментации границ поперечного сечения МПЛП с уменьшенными вычислительными затратами на их многовариантный анализ и оптимизацию; исследована применимость комбинации из блочных итерационных методов решения матричных уравнений и адаптивной перекрестной аппроксимации для уменьшения вычислительных затрат на многовариантный анализ и оптимизацию МПЛП; выполнена апробация разработанных методов.

Научная новизна

1. Впервые установлено влияние на точность расчета методом моментов матрицы коэффициентов электростатической индукции многопроводных линий передачи на печатных платах с двумя и тремя диэлектрическими слоями числа проводников и минимального расстояния от торцов крайних проводников до границ линий передачи.

2. Применительно к анализу многопроводных линий передачи методом моментов предложен метод итерационного неравномерного учащения сегментации границ их поперечных сечений, отличающийся учетом числа проводников и максимальной плотности заряда на сегментах.

3. Применительно к многовариантному анализу многопроводных линий передачи методом моментов предложен метод, отличающийся совместным использованием адаптивной перекрестной аппроксимации и блочного итерационного решения последовательности матричных уравнений.

Теоретическая значимость работы

1. Обобщены критерии оценки точности расчета матриц погонных параметров многопроводных линий передачи.

2. Предложены условия для априорного определения минимального расстояния от торца крайнего проводника до границы многопроводной линии передачи при ее моделировании методом моментов.

3. Для уменьшения вычислительных затрат на многовариантный анализ многопроводных линий передачи результативно использован комплекс численных методов.

Практическая значимость работы

1. На примере расчета матриц погонных параметров многопроводных линий передачи сравнены шесть программных средств, основанных на методе моментов.

2. Программно реализован расчет матриц коэффициентов электростатической и электромагнитной индукции многопроводных линий передачи на основе совместного использования метода моментов и методов неравномерной сегментации границ линии: проекционной сегментации, сегментации с учетом плотности распределения заряда, итерационного учащения сегментации.

3. Исследовано влияние формы проводников многопроводной линии передачи на матрицы погонных параметров и временные отклики в конце линии.

4. Применительно к многовариантному анализу многопроводных линий передачи методом моментов совместно использованы блочный итерационный стабилизированный метод бисопряженных градиентов (BI-BiCGStab) для решения последовательности матричных уравнений и адаптивная перекрестная аппроксимация.

5. Получены 3 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ.

6. Результаты внедрены в учебный процесс ТУСУРа (*акт внедрения*).

7. Результаты использованы в 7 НИР (*акт использования*).

8. Результаты использованы в ООО «ТУСУР-Электроника» (*акт использования*).

9. Заключен лицензионный договор № 25/707 от 02.11.2022 г. о предоставлении права использования программы для ЭВМ № 2022662895 (*акт приема-передачи*).

Методология и методы исследования. Использованы квазистатическое приближение, моделирование МПЛП методом моментов, многовариантный и статистический анализ МПЛП, адаптивная перекрестная аппроксимация, прямые и итерационные методы решения матричных уравнений.

Положения, выносимые на защиту

1. При заданном числе проводников (до 24) для линий передачи на печатных платах с числом диэлектрических слоев до трех существуют минимальные расстояния от торцов крайних проводников до границ линий передачи, при которых полученные методом моментов с использованием равномерной сегментации границ поперечных сечений матрицы коэффициентов электростатической индукции корректны с точностью до 1%.

2. Использование при многовариантном анализе многопроводных линий передачи итерационного неравномерного учащения сегментации границ их поперечных сечений с учетом числа проводников и максимальной плотности заряда на сегментах позволяет методом моментов получить корректные матрицы

коэффициентов электростатической индукции с погрешностью менее 1% и уменьшить затраты времени до 2 раз за счет пересчета только меняющихся между итерациями элементов матричного уравнения.

3. При варьировании толщины проводников многопроводных линий передачи совместное использование адаптивной перекрестной аппроксимации и блочного итерационного решения последовательности из 11 матричных уравнений стабилизированным методом бисопряженных градиентов позволяет уменьшить затраты машинной памяти более 3 раз при увеличении времени решения не более 3 раз и различиях в получаемых методом моментов матрицах коэффициентов электростатической индукции относительно полученных методом Гаусса менее 2%.

Результаты исследования соответствуют п. 14 паспорта специальности 2.2.13 «Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения» в части разработки и исследования методов моделирования радиотехнических устройств и систем.

Достоверность результатов исследования подтверждена применением известных численных методов, контролем сходимости и согласованностью результатов, полученных в программных средствах и опубликованных, в т.ч. полученных экспериментально и другими численными методами.

Использование результатов. Результаты исследования использованы в учебном процессе ТУСУРа и в следующих НИР:

1. Выявление новых подходов к совершенствованию обеспечения электромагнитной совместимости радиоэлектронной аппаратуры и моделирования систем активного зрения роботов, госзадание, проект №8.9562.2017/БЧ, 2017–2019 гг.

2. Модальное резервирование электрических цепей критических радиоэлектронных средств и систем, грант РФФ №19-19-00424, 2019–2021 гг.

3. Комплекс фундаментальных исследований по электромагнитной совместимости, госзадание, проект FEWM-2020-0041, 2020–2021 гг.

4. Теоретические основы создания перспективных систем автоматизированного проектирования радиоэлектронной аппаратуры, работающей в экстремальных условиях, госзадание, проект FEWM-2022-0001, 2022–2023 гг.

5. Радиофизические исследования взаимных и невзаимных эффектов обратного рассеяния радиоволн в задачах зондирования Земли, определения местоположения излучателей методами пассивной радиолокации и развитие численных методов при моделировании электромагнитных полей, радиолокационных систем и их компонент, госзадание, проект FEWM-2020-0039, 2020–2022 гг.

6. Экспертная система для решения задач электромагнитной совместимости при автоматизированном проектировании элементов радиоэлектронных средств, программа стратегич. академич. лидерства «Приоритет 2030», 2021–2023 гг.

7. Вычислительные алгоритмы для корректного моделирования ребер многопроводных линий передачи с минимальными вычислительными затратами, грант РФФ №22-79-00101, 2022–2024 гг.

8. Влияние многосекционного экранирования на целостность сигналов и помехоэмиссии в высокоскоростных печатных платах с активными компонентами встроенного и поверхностного монтажа, грант РФФ № 23-79-10165, 2023–2024 гг.

Апробация результатов. Результаты исследования позволили подготовить заявки и победить в конкурсах РФФИ (грант №22-79-00101) и на назначение государственных заданий (проекты FEWM-2020-0039 и FEWM-2022-0001).

Результаты исследования представлялись на следующих конференциях: международной науч.-практ. конф. «Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири» («СИБРЕСУРС»), г. Томск, 2020 и 2022 гг.; международной науч.-техн. конф. «Научная сессия ТУСУР», г. Томск, 2020 и 2022 гг.; международной науч.-практ. конф. «Электронные средства и системы управления», г. Томск, 2021, 2022 и 2023 гг.; всероссийской науч.-практ. конф. «Информационные технологии и когнитивная электросвязь», г. Екатеринбург, 2020 г.; всероссийской микроволновой конф., г. Москва, 2020 г.; всероссийской науч.-практ. конф. «Нанотехнологии. Информация. Радиотехника», г. Омск, 2023 г.; всероссийской науч.-инж. конф. имени профессора А. И. Комиссарова, г. Москва, 2023 г.; региональной науч.-практ. конф. «Наука и практика: проектная деятельность – от идеи до внедрения», г. Томск, 2022 г.

Публикации по результатам работы. Результаты исследования отражены в 24 работах (4 без соавторов):

- 2 статьи в журналах из перечня ВАК по специальности 2.2.13, без соавторов;
- 1 статья в журнале из перечня ВАК, индексируемом в Web of Science и Scopus;
- 3 статьи в журналах из перечня ВАК по смежной специальности;
- 1 статья в журнале, индексируемом в Web of Science и Scopus (Q1);
- 2 публикации в изданиях, индексируемых в Web of Science и Scopus;
- 7 докладов в сборниках трудов международных конференций, 2 без соавторов;
- 4 доклада в сборниках трудов всероссийских конференций;
- 1 доклад в сборнике трудов региональной конференции;
- 3 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Личный вклад. Все результаты получены автором лично или совместно с соавторами публикаций при его непосредственном участии. Цель и задачи исследования сформулированы совместно с научным руководителем.

Структура и объем работы. В состав работы входят введение, 4 раздела, заключение, список сокращений и условных обозначений, список литературы из 151 наименования и 4 приложения. Объем работы с приложениями – 189 с., в т. ч. 87 рисунков и 113 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении представлена краткая характеристика работы.

В разделе 1 приведен обзор существующих методов уменьшения вычислительных затрат на моделирование МПЛП.

В разделе 2 представлены исследованные в ходе диссертации 18 МПЛП при изменении числа проводников M , некоторые из них представлены на рисунке 1. Серым цветом обозначены проводники, белым – диэлектрики. Проводники нумеруются слева направо и сверху вниз. Заземленные проводники заштрихованы.

По структуре получаемых расчетных сеток методы сегментации можно разделить на 2 группы. Первая – это равномерная сегментация, при которой все

границы поперечного сечения МПЛП (вне зависимости от типа) разбиваются на сегменты равной длины. Вторая группа – это неравномерная сегментация, когда для границ разных типов используется разный шаг сегментации. Использование последовательного итерационного утачивания сегментов приводит к адаптивным сегментациям, причем, чаще всего, неравномерным.

В разделе рассмотрены критерии точного расчета матриц погонных параметров МПЛП, не связанные с выбором расчетной сетки, а также предложен и апробирован метод повышения точности расчета матрицы электростатической индукции, основанный на корректном выборе расстояния от торца крайнего проводника до границы МПЛП (расстояния до удаленных границ).

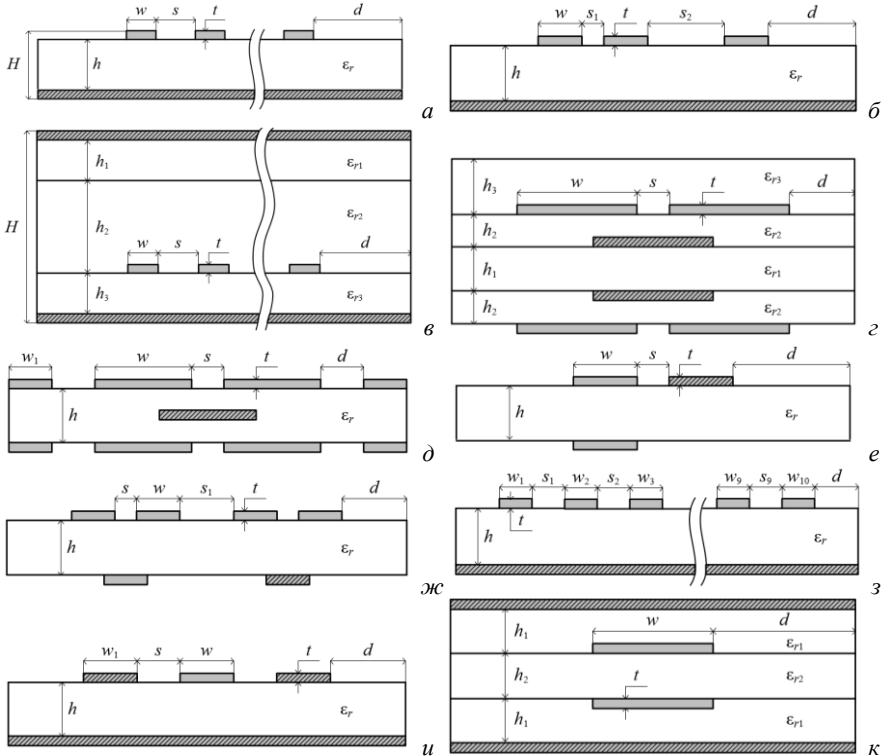


Рисунок 1 – Поперечные сечения МПЛП:

1 (а), 2 (б), 3 (в), 4 (г), 5 (д), 6 (е), 7 (ж), 8 (з), 9 (и) и 10 (к)

Подробно рассмотрены особенности матриц погонных параметров МПЛП, позволяющие судить о точности их расчета. Так, для матрицы \mathbf{C} сформулированы следующие критерии точности: матрица \mathbf{C} должна быть симметричной относительно главной диагонали, должна иметь диагональное преобладание, все ее диагональные элементы должны быть положительными, а внедиагональные – отрицательными, кроме того, она должна быть положительно определенной. Наконец, для МПЛП,

одинаковые проводники которых расположены на одной высоте над плоскостью земли в слоистой среде, значения внедиагональных элементов по мере удаления от диагонального должны уменьшаться.

Выявлено влияние расстояния между проводниками s на искажения передаваемого сигнала. Для этого на вход МПЛП 1 подавалась битовая последовательность длиной 10 Кбит. Амплитуда логической единицы составляла 1 В, нуля – 0 В. Длительность фронтов составляла 100 пс при битрейте 1 Гбит/с. Полученные глазковые диаграммы при $M = 1$ и 7 и $s = 0,5w$ приведены на рисунке 2.

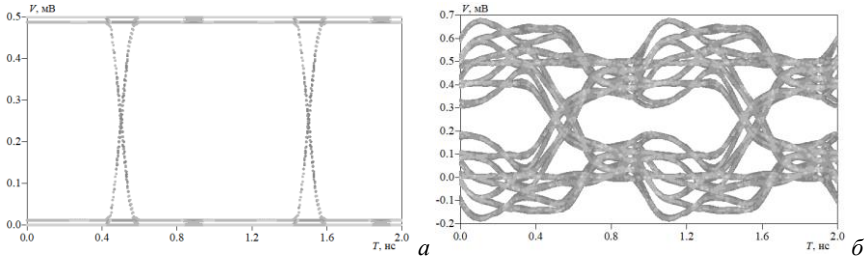


Рисунок 2 – Глазковые диаграммы для МПЛП 1 при $M = 1$ (а) и 7 (б) и $s = 0,5w$

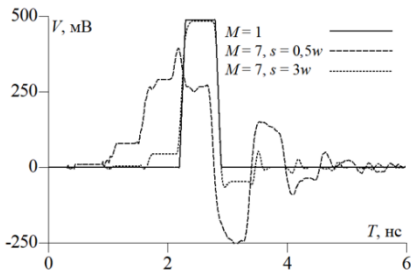


Рисунок 3 – Отклики на выходе МПЛП 1 при $M = 1$ и 7 , $s = 0,5w$ и $3w$

Из рисунка 2 видно, что форма «глаза» при увеличении числа полувитков существенно искажается, что может привести, в т. ч. к ложному переключению логических элементов схемы. Показано, что при увеличении расстояния s до $3w$ существенных искажений удастся избежать (рисунок 3).

Исследовано влияние расстояния до удаленных границ d на точность расчета матрицы C . Увеличение расстояния d повышает точность расчета матриц, однако требуемые вычислительные затраты возрастают (из-за необходимости добавления новых сегментов расчетной сетки). В таблице 1 приведены результаты для МПЛП 3 при $M = 10$, рассчитанные различными программными средствами со стандартными настройками. В TALGAT и GNU Octave (авторская реализация, получено свидетельство о регистрации программы для ЭВМ) для исключения влияния расчетной сетки на точность результатов использовалась равномерная сегментация с длиной сегментов $t/3$, где t – толщина проводников. Как видно из таблицы 1, не все результаты, полученные в программных средствах, удовлетворяют критериям точности (выделены полужирным начертанием). Так, в TALGAT и GNU Octave абсолютные значения c_{19} и c_{10} превышают значение c_{18} , что недопустимо для данного типа МПЛП. Кроме того, различие в элементах, например c_{10} , составляет до четырех порядков в разных программных средствах. Наконец, элементы $c_{14}-c_{17}$ и c_{10} в программных средствах PathWave ADS и FasterCap имеют положительные значения.

Таблица 1 – Результаты (первые строки матрицы **C**, пФ/м) для МПЛП 3 при $M = 10$, полученные в различных программных средствах (н. д. – нет данных)

Источник	d	c_{11}	c_{12}	c_{13}	c_{14}	c_{15}	c_{16}	c_{17}	c_{18}	c_{19}	c_{110}
PathWave ADS	н. д.	91,74	-8,37	-1,35· ·10 ⁻¹	-1,99· ·10 ⁻³	-7,51· ·10 ⁻³	-7,78· ·10 ⁻³	-7,78· ·10 ⁻³	-7,75· ·10 ⁻³	-7,74· ·10 ⁻³	-8,49· ·10 ⁻³
FasterCap	H	96,70	-9,65	-3,01· ·10 ⁻¹	3,23· ·10 ⁻²	1,43· ·10 ⁻²	4,87· ·10 ⁻³	5,29· ·10 ⁻³	-2,03· ·10 ⁻³	-2,02· ·10 ⁻²	1,66· ·10 ⁻²
TALGAT	H	97,65	-9,95	-1,43· ·10 ⁻¹	-5,15· ·10 ⁻³	-2,14· ·10 ⁻⁴	-8,98· ·10 ⁻⁶	-3,78· ·10 ⁻⁷	-1,76· ·10 ⁻⁸	-4,27· ·10 ⁻⁸	-1,78· ·10 ⁻⁶
GNU Octave	H	98,18	-9,99	-1,42· ·10 ⁻¹	-5,06· ·10 ⁻³	-2,09· ·10 ⁻⁴	-8,80· ·10 ⁻⁶	-4,21· ·10 ⁻⁷	-6,40· ·10 ⁻⁸	-8,74· ·10 ⁻⁸	-1,98· ·10 ⁻⁶

Часто используемые известные соотношения ($d = 3...5h$, $d = H$, где h – толщина подложки, H – высота поперечного сечения МПЛП) не зависят от M , поэтому для ряда МПЛП выполнены вычислительные эксперименты по выявлению минимальных значений d при которых выполняются все критерии точности матрицы **C**. В таблице 2

Таблица 2 – Минимальные значения расстояния d при изменении M и t для МПЛП 1

M	$t = 0,005$ мм		$t = 0,105$ мм	
	$\Delta c' < 25\%$	$\Delta c' < 10\%$	$\Delta c' < 25\%$	$\Delta c' < 10\%$
2	$2H$	$2H$	$1,5H$	$1,5H$
4	$2H$	$2,5H$	$1,5H$	$2H$
6	$2H$	$3H$	$6H$	$6H$
8	$3,5H$	$3,5H$	н. д.	н. д.
10	$5,5H$	$5,5H$	н. д.	н. д.
12	$9H$	$9H$	н. д.	н. д.

Таблица 3 – Матрицы **C** и **L** для МПЛП 1 при $M = 2$

Источник	C , пФ/м		L , мкГн/м	
Измеритель Agilent E4980A	136,15	-22,85	0,3225	0,0925
	-22,85	136,15	0,0925	0,3225
LINPAR	130,30	-22,66	0,3299	0,0962
	-22,66	130,30	0,0962	0,3299
PathWave ADS	131,85	-23,28	0,3255	0,0915
	-23,28	131,85	0,0915	0,3255
CONMTL	128,97	-22,35	0,3263	0,0930
	-22,35	128,97	0,0930	0,3263
Ansys Q2D Extractor	132,02	-23,48	0,3408	0,0904
	-23,48	132,02	0,0904	0,3408
TALGAT	131,50	-23,26	0,3261	0,0931
	-23,26	131,50	0,0931	0,3261
GNU Octave	132,18	-23,12	0,3257	0,0931
	-23,12	132,18	0,0931	0,3257

Выявлены минимальные расстояния до границ экрана. Для наглядности на рисунке 4 приведено распределение электрического поля в поперечном сечении МПЛП 1 при $M = 7$ и подаче на первый проводник 1 В. Боковые стенки экрана

приведены выявленные минимальные значения расстояния d для МПЛП 1, при которых матрицы точны, а изменения в матрицах по норме Фробениуса и по элементу c_{11} составляют менее 1%. Максимальное изменение по остальным элементам первой строки матрицы ($\Delta c'$) – 10 и 25%. Видно, что в большинстве случаев рост M требует увеличения расстояния d . Минимальные значения расстояния d выявлены и для других МПЛП, а их достоверность подтверждена согласованностью с результатами (матрица **C**) из ряда программных средств (LINPAR, PathWave ADS, CONMTL, FasterCap, Ansys Q2D Extractor, TALGAT) и измерений из открытой печати (таблица 3).

располагались на расстоянии $5h$ от крайних проводников, а верхняя часть – $10h$. Как видно из рисунка 4а, близость экрана значительно искажает картину поля, а при удалении границ экрана на расстояние $15h$ (рисунок 4б), влияние на результирующую картину поля существенно уменьшается.

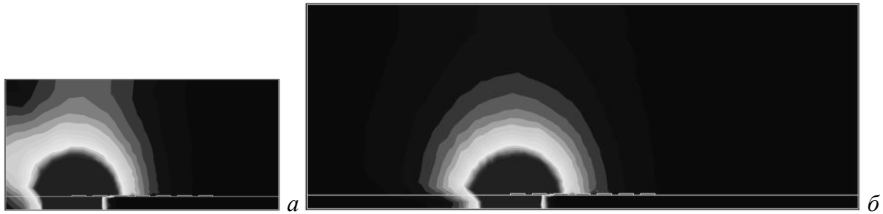


Рисунок 4 – Распределение электрического поля в поперечном сечении МПЛП 1 при $M = 7$: расстояния до боковых и верхней стенок экрана $5h$ и $10h$ (а) и до всех $15h$ (б)

Выполнена оценка влияния формы торцов проводников МПЛП на матрицы **C** и **L**, а также форму сигнала на дальнем конце активного проводника МПЛП. Проанализировано 5 типов торцов проводников: прямоугольный (далее тип I), трапециевидный (II, рисунок 5а) и три вида скругленных: только в верхней части (III, рисунок 5б); верхней и нижней частях (IV, рисунок 5в) и в углах (V, рисунок 5г). При моделировании использовалась равномерная сегментация с длиной сегментов $t/3$. Скругленные торцы (типы III–V) моделировались дугами, аппроксимированными полилиниями из прямолинейных сегментов.

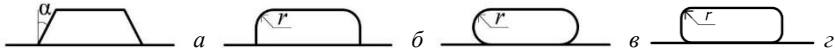


Рисунок 5 – Типы торцов проводников: II (а), III (б), IV (в) и V (г)

На примере МПЛП 1 при $M = 3$ получены матрицы **C** и **L**. С использованием полученных матриц вычислены отклики на дальнем конце проводника 3 при подаче на ближний конец проводника 1 трапецидального импульса с амплитудой ЭДС 1 В. Длительности фронтов и плоской вершины составляли 0,1 нс и 2 нс соответственно.

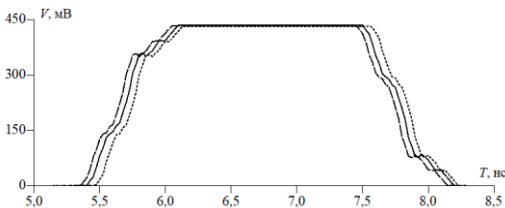


Рисунок 6 – Отклики на выходе проводника 3 МПЛП при $t = 18$ мкм, $w = 0,2$ мм и типе торцов I (—), IV при $r = 0,8t$ (---) и II при $\alpha = 45^\circ$ (- - -)

Наиболее различающиеся отклики (рисунок б) получены для типов торцов II при $\alpha = 45^\circ$ и IV при $r = 0,8t$, для которых сдвиг по времени составил около 0,1 нс. Вычисления показали, что наибольшее различие в матрицах **L** наблюдается для торцов типов I и II, а в **C** – для I и IV. Наименьшее различие – при сравнении типов I и III.

В разделе 3 предложены и апробированы методы сегментации границ поперечного сечения МПЛП, снижающие вычислительные затраты на их одновариантный и многовариантный анализ и оптимизацию.

В работе исследованы равномерная и различные неравномерные сегментации: адаптивный итерационный выбор оптимальной сегментации (АИВОС), итерационное учащение сегментации с начальной частой сегментацией в углах, итерационное учащение в областях сосредоточения особенностей решения, проекционная сегментация. Примеры использования таких видов сегментации приведены на рисунке 7.

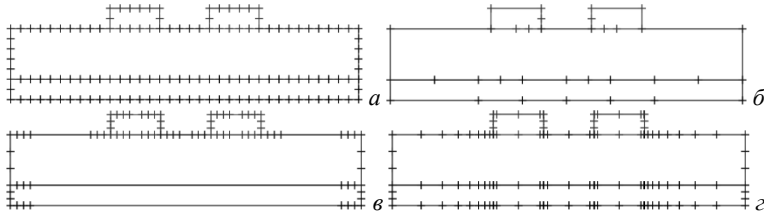


Рисунок 7 – Примеры сегментации границ МПЛП: равномерная (а), неравномерная с итерационным учащением сегментов в областях сосредоточения особенностей решения (б), с начальной частой сегментацией в углах (в), проекционная (г)

Оценено влияние на точность получаемых результатов длин сегментов при использовании равномерной сегментации вида t/m , где m – изменяемый параметр. Для МПЛП 3 при $M = 8$ произведен расчет матрицы C для 5 типовых значений t (мкм): 5, 18, 50, 70 и 105. Выполнена оценка результатов вычисления матрицы C при $m = 1, 3, 5, 7$ и 9. Величина t изменялась так, чтобы общие геометрические размеры МПЛП не менялись. Различия в полученных значениях матрицы C оценивались по норме Фробениуса ΔC_F и по элементу c_{11} . Установлено, что при $t \leq 50$ мкм переход от сегментации $t/3$ к сегментации $t/5$ дает различие менее 1%, и поэтому целесообразно использовать сегментацию $t/3$, а при $t > 50$ мкм – $t/5$, т. к. переход от $t/3$ к $t/5$ дает различие более 1%, а от $t/5$ к $t/7$ – менее 1%.

Далее выполнено детальное исследование методов итерационного учащения (ИУ) в областях сосредоточения особенностей решения и АИВОС в широких диапазонах их параметров. Порядок сегментации в этих методах следующий. Сначала нужно задать начальную длину сегментов l_0 , выбрать контролируемую величину K и вычислить ее значение. Затем итерационно уменьшать длину сегментов до тех пор, пока не будет достигнуто максимальное число итераций или различие по контролируемой величине не станет меньше допуска tol . В АИВОС все сегменты, полученные на предыдущей итерации, разбиваются пополам, а в ИУ лишь некоторые (типичное значение составляло $p = 5, 15$ и 25% от их общего числа с максимальными значениями плотности заряда на них). Выявлено, что метод ИУ дает существенную экономию как машинной памяти, так и времени вычисления. При этом чем меньше значение p , тем больше эта экономия. Однако этот метод обладает достаточно низкой точностью (Δc во многих случаях больше 1% и доходит до 7%). Следует отметить, что корреляция между параметрами l_0 и Δc при использовании метода ИУ мала. Метод АИВОС, напротив, показывает высокую зависимость от параметра l_0 . Так, одновременно высокой точности ($\Delta c < 1\%$) и экономии вычислительных ресурсов удается достичь лишь при $l_0 = 2w$, где w – ширина проводников.

Выполнена модификация ИУ (далее МИУ) так, чтобы учащалось не $p\%$ от общего числа сегментов, а $b\%$ для каждой правой части матричного уравнения, т. е. $p = bM$. В результате разбиению подлежат не только сегменты, имеющие наибольший заряд в решении для первого проводника, но и учитываются решения для остальных проводников. В вычислительных экспериментах установлено, что при p в диапазоне 65–85% результирующая матрица \mathbf{C} соответствует всем критериям точности.

Предложен метод для многовариантного анализа и оптимизации МПЛП при вариации ее параметров с использованием метода МИУ. Его суть заключается в том, что для двух вариаций параметра выполняется расчет элементов матрицы \mathbf{S} , учащение сегментации, а затем формируется и решается матричное уравнение. После выполнения второй итерации полученные матрицы \mathbf{S} сравниваются и находятся изменившиеся элементы. На третьей и последующих итерациях за основу берется матрица \mathbf{S} , сформированная на первой итерации, с последующим пересчетом только изменяющихся ее элементов, найденных после второй итерации.

Для демонстрации работоспособности метода МИУ использовано сравнение со случаем полного пересчета матричного уравнения при каждом изменении варьируемого параметра и последовательном изменении геометрических и электрофизических параметров. При вычислениях общие геометрические размеры МПЛП не изменялись. Все параметры изменялись в диапазоне $\pm 14\%$ (с шагом 2%, всего по 15 значений). Выявлено, что экономия времени вычислений составила 4–49%. При этом наибольшая экономия достигается при изменении ε_r . Стоит отметить, что, хотя метод МИУ и требует дополнительного предварительного вычисления, при большом числе значений варьируемого параметра сокращение времени вычислений существенно превышает накладные расходы на эту дополнительную итерацию, причем чем более широкий диапазон значений варьируемого параметра необходимо охватить, тем существеннее будет это сокращение.

Выполнено сравнение результатов вычисления матриц \mathbf{C} и \mathbf{L} при использовании равномерной (в таблице 4 – I) и адаптивных сегментаций: АИВОС (II), итерационного учащения с начальной частой сегментацией в углах (III), МИУ (IV), а также проекционный (V). Как видно из таблицы, метод V использует наименьшее число сегментов и тем самым дает наибольшую экономию вычислительных ресурсов.

Таблица 4 – Матрицы \mathbf{C} и \mathbf{L} для МПЛП 1 при $M = 2$ при использовании методов I–V

Метод	N	$\Delta C_F, \%$	$\Delta L_F, \%$	\mathbf{C} , пФ/м		\mathbf{L} , мкГн/м	
I	7106	–	–	132,18 –23,12	–23,12 132,18	0,3257 0,0931	0,0931 0,3257
II	3456	0,95	0,1	131,00 –22,63	–22,63 131,00	0,3254 0,0930	0,0930 0,3254
III	1464	1,18	0,34	133,70 –22,67	–22,67 133,70	0,3247 0,0925	0,0925 0,3247
IV	3852	0,12	0,63	132,30 –23,01	–23,01 132,30	0,3272 0,0946	0,0946 0,3272
V	86	2,15	1,58	130,43 –20,82	–20,82 130,43	0,3309 0,0919	0,0919 0,3309

Из таблицы 4 видно, что метод V относительно метода I дает число сегментов меньше в 83 раза. При этом различие в матрицах составило около 2%. Хотя методы II–IV позволили получить меньшие различия от метода I, экономия вычислительных ресурсов для них значительно меньше (2,1 раза при использовании метода II, 4,9 раза – III и 1,8 раза – IV).

В разделе 4 рассмотрено раздельное и совместное использование блочных версий итерационных методов решения матричного уравнения (стабилизированного метода бисопряженных градиентов, BI-BiCGStab и метода индуцированного уменьшения размерности, BI-IDR(S)) для уменьшения затрат времени и адаптивной перекрестной аппроксимации (ACA) для уменьшения затрат машинной памяти на многовариантный анализ и оптимизацию МПЛП.

Для оценки эффективности использования блочных итерационных методов решения матричного уравнения сначала исследованы закономерности изменения элементов матричного уравнения при последовательном изменении геометрических параметров МПЛП. Варьировались геометрические и электрофизические параметры МПЛП как раздельно, так и совместно. Так, на рисунке 8 приведены изменения портретов матрицы S матричного уравнения при варьировании параметров t и w (толщины и ширины проводников). Установлено, что наименьшее влияние на изменение элементов матрицы S оказывает параметр ϵ_r , а из геометрических – t и h . Наибольшее же влияние оказывают параметры s и w .



Рисунок 8 – Изменения портретов матрицы S при варьировании параметра t для МПЛП: 3, $M = 6$ (а) и 3, $M = 12$ (б), 5 (в), 7 (г) и 9 (д)

Выполнена оценка эффективности применения различных начальных приближений блочных итерационных методов. Получены затраты времени на многократное решение последовательности матричных уравнений. Показано, что использование BI-BiCGStab без предобусловливания при значении, контролирующего сходимость решения по относительной норме невязки матричного уравнения, параметра $tol = 10^{-1}$ может быть использовано для быстрой оценки, а использование диагонального предобусловливания является эффективным средством уменьшения затрат времени на многовариантный анализ и оптимизацию, причем использование решения предыдущего уравнения в качестве начального приближения по сравнению с нулевым начальным приближением дает меньшее число итераций и большее сокращение времени. В таблицу 5 для МПЛП 2 сведены полученные ускорения относительно метода Гаусса с использованием диагонального предобусловливания в сочетании с двумя начальными приближениями (нулевым и решением предыдущего матричного уравнения), а также общее число требуемых итераций (в скобках). Максимальное число итераций принято равным 150. Из таблицы видно, что для всех

вариантов начальных приближений и требуемой точности решения получено ускорение при использовании BI-BiCGStab. При $tol = 10^{-2}$ и использовании нулевого приближения среднее ускорение относительно метода Гаусса составило 32%, среднее число итераций – 114, а при использовании в качестве начального приближения решения предыдущего уравнения – 52% и 97 соответственно.

Таблица 5 – Число итераций при использовании метода BI-BiCGStab с диагональным предобусловливанием и ускорение относительно метода Гаусса для МПЛП 2

Изменяемые параметры	Нулевое приближение			Решение предыдущего уравнения		
	$tol = 10^{-1}$	$tol = 10^{-2}$	$tol = 10^{-3}$	$tol = 10^{-1}$	$tol = 10^{-2}$	$tol = 10^{-3}$
s_1	1,71 (85)	1,37 (108)	1,20 (123)	1,81 (80)	1,45 (98)	1,19 (127)
s_2	1,45 (99)	1,29 (116)	1,17 (130)	2,01 (68)	1,70 (85)	1,36 (111)
t	1,69 (86)	1,31 (114)	1,12 (135)	1,91 (76)	1,67 (87)	1,36 (111)
h	1,42 (103)	1,29 (116)	1,16 (131)	2,14 (62)	1,75 (83)	1,38 (107)
s_1 и s_2	1,67 (87)	1,36 (111)	1,16 (131)	1,91 (76)	1,42 (103)	1,18 (128)
s_1, s_2 и t	1,64 (89)	1,31 (115)	1,16 (131)	1,49 (97)	1,31 (115)	1,07 (146)
s_1, s_2, t и h	1,67 (87)	1,29 (116)	1,14 (132)	1,71 (85)	1,37 (108)	1,11 (137)

Выявлено, что использование метода BI-BiCGStab с предобусловливанием является эффективным средством снижения времени решения последовательности матричных уравнений как при анализе одного, так и нескольких параметров МПЛП. При использовании метода BI-BiCGStab без предобусловливания сходимость отсутствует. Использование метода BI-BiCGStab как с диагональным, так и с предобусловливанием в виде LU-разложения позволяет получить уменьшение затрат времени на оптимизацию при любом числе изменяемых параметров. Так, при использовании диагонального предобусловливания выигрыш относительно использования метода Гаусса составил до 1,8 раза при высокой точности результатов,

Таблица 6 – Число итераций при $n = 11$ и различия по матричным нормам при использовании методов BI-BiCGStab и АСА для МПЛП 4 при изменении t

$\Delta t, \%$	Без предобусловл.		Диагональное предобусловл.	
	N_{ii}	$\Delta C_F, \%$	N_{ii}	$\Delta C_F, \%$
-5	33	0,097	7	0,403
-4	32	0,096	7	0,651
-3	35	0,104	7	0,629
-2	34	0,095	7	0,356
-1	39	0,145	7	0,421
0	33	0,124	7	0,432
1	50	0,149	7	0,573
2	28	0,150	7	0,442
3	25	0,231	8	0,160
4	39	0,123	7	0,473
5	29	0,113	7	0,505

C (ΔC_F) для МПЛП 4. Из таблицы видно, что различия по матричным нормам для всех

а при LU – до 2,4 раза. Использование BI-BiCGStab с предобусловливанием в виде LU-разложения показывает наилучшие результаты при варьировании одного параметра МПЛП.

Исследована возможность сокращения используемой машинной памяти при итерационном решении последовательности матричных уравнений за счет совместного использования АСА и BI-BiCGStab. Для получения последовательности матричных уравнений параметр t варьировался в диапазоне $\pm 5\%$ от номинального значения с шагом 1% ($n = 11$). В таблицу 6 сведены число итераций и различия по нормам матрицы

случаев составили менее 1%. Без предобусловливания среднее число итераций составило 34, а с диагональным предобусловливанием – 7. Показано, что хотя требуемое время увеличивается до 2,6 раза, затраты машинной памяти уменьшаются до 3,6 раза при сохранении высокой точности вычислений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты исследования. В разделе 2 разработаны алгоритмы оценки точности расчета матриц погонных параметров МПЛП, в частности, подробно рассмотрены особенности матрицы C , позволяющие судить о точности ее расчета. Показано, что для точного расчета матриц погонных параметров МПЛП нельзя пренебрегать связью между разнесенными друг от друга проводниками. Выявлены зависимости для априорного определения минимального расстояния до удаленных границ для экранированных и неэкранированных МПЛП с различным числом слоев и проводников. Показаны различия, возникающие при расчете матриц погонных параметров МПЛП в различных программных средствах. Исследовано влияние формы поперечного сечения проводников МПЛП на точность расчета их матриц погонных параметров и характеристик.

В разделе 3 рассмотрены методы равномерной и неравномерной сегментации границ поперечного сечения МПЛП. Предложено 2 новых адаптивных метода: итерационного учащения в областях сосредоточения особенностей решения и итерационного учащения с начальной частой сегментацией в углах, позволивших получать физические и точные результаты при уменьшенных вычислительных затратах. Исследована возможность сокращения вычислительных затрат на многовариантный анализ МПЛП с использованием иерархических матриц и АСА. Разработан и апробирован метод проекционной сегментации границ поперечных сечений МПЛП, а также предложен метод неравномерной сегментации неортогональных границ проводников. Произведено сравнение всех рассмотренных и разработанных методов. Показано, что методы адаптивной сегментации позволяют получить высокую точность результатов относительно равномерной сегментации, экономя вычислительные ресурсы. При этом максимальной экономии удастся добиться при использовании проекционной сегментации.

В разделе 4 рассмотрено раздельное и совместное использование блочных версий итерационных методов BI-BiCGStab и BI-IDR(S) и адаптивной перекрестной аппроксимации для уменьшения затрат времени и машинной памяти на многовариантный анализ и оптимизацию МПЛП. Исследованы закономерности изменения элементов матрицы S матричного уравнения при последовательном изменении геометрических параметров МПЛП. Выполнено сравнение различных начальных приближений (нулевое и решение предыдущего уравнения) и предобусловливателей при решении матричного уравнения итерационными методами. Исследован гибридный метод, отличающийся тем, что первое матричное уравнение решается с использованием LU-разложения, а последующие – итерационным методом с этим разложением в качестве предобусловливателя. Приведено описание разработанных в ходе диссертационного исследования программ.

Таким образом, решена имеющая большое значение для развития технических наук задача повышения точности моделирования и уменьшения вычислительных затрат на одновариантный и многовариантный анализ являющихся одним из основных элементов радиоэлектронных средств многопроводных линий передачи с произвольными поперечными сечениями, различным числом диэлектрических слоев и проводников с ортогональными и не ортогональными границами.

Рекомендации по использованию результатов исследования. Исследованные и разработанные методы целесообразно использовать для уменьшения вычислительных затрат (как времени, так и машинной памяти) при одновариантном и многовариантном анализе, а также оптимизации МПЛП при моделировании и проектировании. В частности, рекомендуется использовать преобусловливание в виде LU-разложения для многовариантного анализа и оптимизации МПЛП. Так, LU-разложение лучше использовать для МПЛП с лицевой связью с любым числом оптимизируемых параметров. Для МПЛП с торцевой связью LU-разложение целесообразно использовать только при оптимизации по одному параметру МПЛП. Использование диагонального преобусловливания является эффективным средством уменьшения затрат времени на многовариантный анализ и оптимизацию МПЛП, причем использование решения предыдущего уравнения в качестве начального приближения по сравнению с нулевым начальным приближением дает меньшее число итераций и большее сокращение времени на вычисления.

Перспективы дальнейшей разработки темы. В дальнейшем целесообразны реализация предложенных методов с использованием низкоуровневых языков программирования и внедрение предложенных методов в другие программные средства и САПР радиоэлектронных средств для уменьшения вычислительных затрат на моделирование и совершенствования проектирования.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в журналах из перечня ВАК

1. **Максимов А. Е.** Об особенностях вычисления погонных параметров и характеристик многопроводных линий передачи / **А. Е. Максимов**, С. П. Куксенко // Радиотехника и электроника. – 2023. – Т. 68, № 12. – С. 1184–1201.
2. **Максимов А. Е.** Влияние формы поперечного сечения торцов проводников многопроводных линий передачи на точность расчета их параметров и характеристик / **А. Е. Максимов** // Электромагнитные волны и электронные системы. – 2023. – Т. 28, № 5. – С. 32–41.
3. **Максимов А. Е.** Использование адаптивной перекрестной аппроксимации и блочного итерационного решения последовательности матричных уравнений при многовариантном анализе многопроводных линий передачи методом моментов / **А. Е. Максимов** // Системы управления, связи и безопасности. – 2023. – № 3. – С. 197–226.

Статьи в журналах из перечня ВАК по смежной специальности

4. **Максимов А. Е.** Исследование методов построения адаптивных сеток при квазистатическом анализе многопроводных линий передачи методом моментов / **А. Е. Максимов**, С. П. Куксенко // Журнал радиоэлектроники. – 2021. – № 1. – 25 с.

5. **Максимов А. Е.** О методах адаптивной сегментации при квазистатистическом анализе многопроводных линий передачи / **А. Е. Максимов**, С. П. Куксенко // Журнал радиоэлектроники. – 2023. – № 1. – 19 с.

6. Разработка программного обеспечения для моделирования радиоэлектронных средств с учетом электромагнитной совместимости в ТУСУР / С. П. Куксенко, Т. Р. Газизов, А. А. Квасников, А. В. Демаков, А. А. Иванов, Д. В. Клюкин, А. Алхадж Хасан, **А. Е. Максимов**, А. В. Осинцев // Наноиндустрия. – 2023. – Т. 16, № S9-1(119). – С. 170–178.

Статья в журнале, индексируемом в Web of Science и Scopus (Q1)

7. **Maksimov A. E.** Accurate capacitance matrices for multiconductor transmission lines / **A. E. Maksimov**, S. P. Kuksenko // IEEE Transactions on electromagnetic compatibility. – 2022. – Vol. 64, no. 5. – P. 1514–1521.

Публикации в издании, индексируемом в Web of Science и Scopus

8. Conditions for ultrashort pulse decomposition in multi-cascade protection devices based on meander microstrip lines / G. Y. Kim, A. V. Nosov, R. S. Surovtsev, T. T. Gazizov, **A. E. Maximov** // Journal of Physics: Conference Series. – 2020. – Vol. 1679, no. 022059. – 6 p.

9. **Maksimov A.** Adaptive segmentation of multiconductor transmission lines in quasi-static analysis by the method of moments / **A. Maksimov**, S. Kuksenko // Journal of Physics: Conference Series. – 2021. – Vol. 1862, no. 012020. – 5 p.

Доклады в сборниках трудов международных конференций

10. **Максимов А. Е.** Использование адаптивной перекрестной аппроксимации при анализе линий передачи / **А. Е. Максимов**, И. А. Онищенко // XXV Международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Научная сессия ТУСУР». – 2020. – № 1-1. – С. 263–266.

11. **Максимов А. Е.** Адаптивный итерационный выбор оптимальной сегментации при решении электростатических задач методом моментов / **А. Е. Максимов**, С. П. Куксенко // 26-я международная научно-практическая конференция «Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири». – 2020. – С. 112–116.

12. **Максимов А. Е.** Неравномерная сегментация границ многопроводной линии передачи для расчета физической матрицы коэффициентов электростатической индукции / **А. Е. Максимов** // Международная научно-практическая конференция «Электронные средства и системы управления». – 2021. – № 1-2. – С. 50–52.

13. Ижболдина В. А. Применение метода Block-IDR(s) при многовариантном анализе многопроводных линий передачи / В. А. Ижболдина, **А. Е. Максимов** // XXVII Международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Научная сессия ТУСУР». – 2022. – № 1-1. – С. 218–221.

14. **Максимов А. Е.** Неравномерная проекционная сегментация границ многопроводных линий передачи / **А. Е. Максимов** // Международная научно-практическая конференция «Электронные средства и системы управления». – 2022. – № 1-1. – С. 297–299.

15. Бучинский А. Д. Квазистатистический анализ микрополосковых линий передачи методом Галёркина / А. Д. Бучинский, **А. Е. Максимов** // 28-я международная научно-

практическая конференция «Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири». – 2022. – С. 117–121.

16. Снетков П. П. Экономичная сегментация границ поперечного сечения многопроводной микрополосковой линии передачи с закругленными торцами проводников / П. П. Снетков, **А. Е. Максимов** // Международная научно-практическая конференция «Электронные средства и системы управления». – 2023. – Т. 2. – С. 53–56.

Доклады в сборниках трудов всероссийских конференций

17. **Максимов А. Е.** Адаптивное учащение сетки при анализе линий передачи методом моментов / **А. Е. Максимов**, И. А. Онищенко, С. П. Куксенко // VI Всероссийская научно-практическая конференция «Информационные технологии и когнитивная электросвязь». – 2020. – С. 34–36.

18. **Максимов А. Е.** Адаптивная сегментация границ структуры при решении электростатических задач методом моментов / **А. Е. Максимов**, С. П. Куксенко // VII Всероссийская Микроволновая Конференция. – 2020. – С. 149–153.

19. Снетков П. П. О влиянии закругления проводников связанной микрополосковой линии передачи на матрицы ее погонных параметров / П. П. Снетков, **А. Е. Максимов**, С. П. Куксенко // Всероссийская молодежная научно-практическая конференция «Нанотехнологии. Информация. Радиотехника». – 2023. – С. 224–227.

20. Снетков П. П. О влиянии закругления проводников многопроводной микрополосковой линии передачи на матрицы ее погонных параметров / П. П. Снетков, **А. Е. Максимов** // Всероссийская научно-инженерная конференции имени профессора А. И. Комиссарова. – 2023. – С. 153–157.

Доклад в сборнике трудов региональной конференции

21. Снетков П. П. Вычисление погонных параметров линии передачи с закругленными и трапециевидными проводниками / П. П. Снетков, К. К. Матушкин, **А. Е. Максимов** // XI Региональная научно-практическая конференция «Наука и практика: проектная деятельность – от идеи до внедрения». – 2022. – С. 496–499.

Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ

22. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022662895. Программа для расчета матриц коэффициентов электростатической и электромагнитной индукции методом моментов: № 2022662295: заявл. 01.07.2022: опубл. 07.07.2022 / **А. Е. Максимов**, С. П. Куксенко; заявитель ФГБОУ ВО «ТУСУР».

23. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022680875. Программа для моделирования антенн на основе поверхностной треугольной аппроксимации: № 2022680455: заявл. 02.11.2022: опубл. 08.11.2022 / А. А. Квасников, А. В. Демаков, Д. В. Клюкин, А. А. Иванов, А. Алхадж Хасан, **А. Е. Максимов**, С. П. Куксенко; заявитель ФГБОУ ВО «ТУСУР».

24. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023618341. Программа для расчета матриц коэффициентов электростатической и электромагнитной индукции многопроводных микрополосковых линий передачи методом моментов при аппроксимации ребер торцов их проводников дугами: № 2023616435: заявл. 05.04.2023: опубл. 21.04.2023 / П. П. Снетков, **А. Е. Максимов**; заявитель ФГБОУ ВО «ТУСУР».

Тираж 100 экз. Заказ _____
Томский государственный университет
систем управления и радиоэлектроники.
634050, г. Томск, пр. Ленина, 40.
Тел. (3822) 533018.