



УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной работе  
и инновациям ТУСУРа

А.Г. Лощилов

«01» 04 2024 г.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

федерального государственного бюджетного образовательного учреждения  
высшего образования «Томский государственный университет  
систем управления и радиоэлектроники» (ТУСУР)

Диссертация «Моделирование многопроводных линий передачи с произвольными поперечными сечениями методом моментов» выполнена на кафедре телевидения и управления (ТУ) ТУСУРа.

В период подготовки диссертации соискатель Максимов Александр Евгеньевич обучался в очной аспирантуре ТУСУРа и работал на кафедре ТУ ТУСУРа в должности ассистента. В 2023 г. Максимов А.Е. успешно прошел государственную итоговую аттестацию и получил диплом по направлению подготовки «Электроника, радиотехника и системы связи».

Научный руководитель – Куксенко Сергей Петрович, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры ТУ ТУСУР.

По итогам обсуждения принято следующее заключение:

**Оценка выполненной соискателем работы.** Диссертация Максимова А.Е. является научно-квалификационной работой, в которой изложены новые методы для моделирования многопроводных линий передачи методом моментов с уменьшенными вычислительными затратами, имеющие большое значение для развития технических наук.

**Актуальность темы и направленность исследования.** Конкуренция производителей радиоэлектронных средств вызывает необходимость их регулярного обновления и совершенствования. С ростом сложности радиотехнических и радиоэлектронных устройств это становится невозможным без применения автоматизированного проектирования с использованием средств моделирования. Линии передачи, в том числе многопроводные, 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 многопроводных линий передачи 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 универсальным из которых является метод моментов.

При моделировании многопроводных линий передачи с использованием метода моментов необходимо решение матричного уравнения для вычисления характеризующих линию матриц погонных параметров. Однако для формирования этого уравнения необходима корректная сегментация границ поперечного сечения многопроводных линий передачи. 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 удастся точнее учесть особенности решения задачи и тем самым повысить точность моделирования. Поэтому сегментация должна обеспечивать низкие вычислительные затраты и давать результаты с высокой точностью.

Случайные вариации геометрических параметров многопроводных линий передачи, обусловленные неидеальностью технологического процесса, а также поиск оптимальных значений этих параметров, делают необходимым многократное вычисление параметров линии, что приводит к соответствующему росту вычислительных затрат и тем самым затрудняет эффективное проектирование. Кроме того, при анализе некоторых многопроводных линий передачи 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 методы моделирования многопроводных линий передачи.

**Личное участие автора в получении результатов, изложенных в диссертации.** Все результаты исследования получены автором лично или совместно с соавторами публикаций при его непосредственном участии. Цель и задачи исследования сформулированы совместно с научным руководителем.

**Степень достоверности результатов проведенных исследований.** Достоверность результатов 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.

### **Научная новизна диссертации:**

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.

### **Практическая значимость диссертации и использование полученных результатов:**

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 (Bl-BiCGStab) для решения последовательности матричных уравнений и адаптивная перекрестная аппроксимация.

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

6. Результаты исследования внедрены в учебный процесс ТУСУРа.

7. Результаты исследования использованы в 7 НИР.

8. Заключен лицензионный договор о предоставлении права использования программы для ЭВМ.

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, государственное задание, проект №8.9562.2017/БЧ, 2017–2019 гг.
2. Модальное резервирование электрических цепей критичных радиоэлектронных средств и систем, грант РФФИ №19-19-00424, 2019–2021 гг.
3. Комплекс фундаментальных исследований по электромагнитной совместимости, государственное задание, проект FEWM-2020-0041, 2020–2021 гг.
4. Теоретические основы создания перспективных систем автоматизированного проектирования радиоэлектронной аппаратуры, работающей в экстремальных условиях, государственное задание, 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, государственное задание, проект FEWM-2020-0039, 2020–2022 гг.
6. Экспертная система для решения задач электромагнитной совместимости при автоматизированном проектировании элементов радиоэлектронных средств, программа стратегического академического лидерства «Приоритет 2030», 2021–2023 гг.
7. Вычислительные алгоритмы для корректного моделирования ребер многопроводных линий передачи с минимальными вычислительными затратами, грант РФФИ №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 РФФИ № 23-79-10165, 2023–2024 гг.

**Ценность научных работ соискателя, полнота изложения материалов диссертации в печатных работах.**

- По материалам диссертационной работы опубликовано 24 работы:
- 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<sup>4</sup> и Scopus (переводная версия);
  - 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/или 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.

*Статьи в журналах из перечня ВАК*

1. **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.

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.** 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.

*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 квазистатическом 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. Ключкин, 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.

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. – Krasnoyarsk, 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. – Tomsk, 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»: Сборник избранных статей научной сессии 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. Куksenko // Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири (СИБРЕСУРС-26-2020): 26-я международная научно-практическая конференция. – Томск: Издательство Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники, 2020. – С. 112–116.

12. **Максимов А. Е.** Неравномерная сегментация границ многопроводной линии передачи для расчета физической матрицы коэффициентов электростатической индукции / **А. Е. Максимов** // Электронные средства и системы управления. Материалы докладов Международной научно-практической конференции. – 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»: Сборник избранных статей научной сессии ТУСУР. – 2022. – № 1-1. – С. 218–221.

14. **Максимов А. Е.** Неравномерная проекционная сегментация границ многопроводных линий передачи / **А. Е. Максимов** // Электронные средства и системы управления. Материалы докладов Международной научно-практической конференции. – 2022. – № 1-1. – С. 297–299.

15. Бучинский А. Д. Квазистатический анализ микрополосковых линий передачи методом Галёркина / А. Д. Бучинский, **А. Е. Максимов** // Природные и интеллектуальные

ресурсы Сибири (СИБРЕСУРС-28-2022): доклады 28-й международной научно-практической конференции, Томск. 16 ноября 2022 года. – Томск: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 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** // Электронные средства и системы управления. Материалы докладов Международной научно-практической конференции. – 2023. – Т. 2. – С. 53–56.

*Доклады в сборниках трудов всероссийских конференций*

17. **Максимов А. Е.** Адаптивное уച്ചение сетки при анализе линий передачи методом моментов / **А. Е. Максимов**, И. А. Онищенко, С. П. Куксенко // Информационные технологии и когнитивная электросвязь: Тезисы докладов VI Всероссийской научно-практической конференции. – Екатеринбург: УрТИСИ СибГУТИ, 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. – Москва: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт радиотехники и электроники имени В. А. Котельникова Российской академии наук, 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 // Нанотехнологии. Информация. Радиотехника (НИР-23): материалы Всероссийской молодежной научно-практической конференции, Омск, 18 апреля 2023 года. – Омск: Омский государственный технический университет, 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. – Москва: Российский государственный университет им. А. Н. Косыгина, 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». – Томск: Изд-во ТУСУРа, 2022. – С. 496–499.

*Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ*

22. Свидетельство № 2022662895, Российская Федерация. Программа для расчета матриц коэффициентов электростатической и электромагнитной индукции методом моментов: № 2022662295: заявл. 01.07.2022: опубл. 07.07.2022. Авторы: **А. Е. Максимов**, С. П. Куксенко.

23. Свидетельство № 2022680875, Российская Федерация. Программа для моделирования антенн на основе поверхностной треугольной аппроксимации: № 2022680455: заявл. 02.11.2022: опубл. 08.11.2022. Авторы: А. А. Квасников, А. В. Демаков, Д. В. Ключин, А. А. Иванов, А. Алхадж Хасан, **А. Е. Максимов**, С. П. Куксенко.

24. Свидетельство № 2023618341, Российская Федерация. 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. Авторы: П. П. Снетков, **А. Е. Максимов**.

**Соответствие содержания диссертации избранной специальности.** Результаты исследования соответствуют пункту 14 паспорта научной специальности 2.2.13 – «Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения» в части разработки и исследования методов моделирования радиотехнических устройств и систем.

Диссертация «Моделирование многопроводных линий передачи с произвольными поперечными сечениями методом моментов» Максимова Александра Евгеньевича рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.2.13 – «Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения».

Заключение принято на семинаре кафедры ТУ ТУСУРа. Присутствовало на заседании 27 чел. Результаты голосования: «за» – 27 чел., «против» – 0 чел., «воздержалось» – 0 чел., протокол № 8 от 30.03.2024 г.

Председатель семинара д.т.н., профессор, зав. каф. ТУ



Т.Р. Газизов

Секретарь семинара к.т.н., с.н.с. НИЛ ФИЭМС



М.А. Самойличенко