

На правах рукописи



Газизов Рустам Рифатович

**Комплексный поиск уязвимых мест
в радиоэлектронных устройствах**

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

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Томск – 2025

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования (ФГАОУ ВО) «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» (ТУСУР) и ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики» (НИУ ВШЭ)

Научный руководитель – **Елизаров Андрей Альбертович**,
доктор технических наук, профессор, профессор
департамента электронной инженерии НИУ
ВШЭ

Официальные оппоненты – **Увайсов Сайгид Увайсович**,
доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой конструирования и
производства радиоэлектронных средств
ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский
технологический 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 «Казанский национальный
исследовательский технический университет
им. А.Н. Туполева – КАИ», г. Казань

Защита состоится 15 апреля 2025 г. в 09 часов 00 минут на заседании диссертационного совета 24.2.415.01, созданного на базе Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники, по адресу: 634050, г. Томск, ул. Ленина, 40, ауд. 201.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ТУСУРа <https://postgraduate.tusur.ru/urls/tvve9ekn>

Автореферат разослан ____ февраля 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор физико-математических
наук, профессор



Мандель Аркадий Евсеевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Современные радиоэлектронные устройства (РЭУ), используемые в различных сферах жизнедеятельности общества, играют ключевую роль в обеспечении безопасности, стабильности и эффективности множества процессов. Однако, несмотря на достижения в области разработки и производства РЭУ, существует множество факторов, способных негативно повлиять на их работу. К ним относятся электромагнитные помехи, возникающие вследствие взаимодействия различных электронных компонентов внутри самой системы, а также внешних источников.

Поиск уязвимых мест в РЭУ актуален из-за следующих факторов:

1. Рост сложности и плотности размещения элементов: современные РЭУ становятся всё более компактными и сложными, что увеличивает плотность компоновки печатных плат. Это, в свою очередь, увеличивает вероятность возникновения взаимных влияний между элементами схемы, приводящих к возникновению нежелательных электромагнитных помех.

2. Увеличение количества беспроводных технологий: широкое распространение беспроводных сетей и технологий передачи данных (Wi-Fi, Bluetooth, LTE, 5G и др.) создаёт дополнительные источники электромагнитного излучения, которые могут влиять на работу других устройств. Кроме того, многие современные устройства оснащены несколькими радиочастотными модулями, работающими одновременно, что усложняет обеспечение их совместной работы без взаимных помех.

3. Требования надёжности и безопасности: в условиях растущих требований к критически важным системам необходимо уделять особое внимание электромагнитной совместимости (ЭМС). Ошибки в проектировании РЭУ могут привести к сбоям в работе, имеющим тяжелые последствия.

4. Проблемы информационной безопасности: электромагнитные помехи могут использоваться злоумышленниками для атак на электронные системы. Например, целенаправленное создание сильных электромагнитных полей вблизи чувствительных компонентов может привести к нарушению их нормальной работы и даже выходу из строя. Поэтому вопросы защиты РЭУ от подобных воздействий приобретают особую важность.

5. Международные стандарты и сертификация: для выхода на международные рынки производители РЭУ должны обеспечивать соответствие строгим стандартам ЭМС. Несоответствие их требованиям может существенно ограничить возможности сбыта продукции.

Степень разработанности темы. Известными зарубежными учеными в области ЭМС, в частности, по анализу линий передачи (ЛП), являются A.R. Djordjevic, M.S. Nakhla, C.R. Paul, T.K. Sarkar и др. Среди отечественных ученых известны З.М. Гизатуллин, Л.Н. Кечиев, С.Ф. Чермошенцев и др. Безопасность и ЭМС РЭУ исследовали в ТУСУРе Т.Р. Газизов, Т.Т. Газизов, Р.Р. Газизов, Е.С. Жечев, А.М. Заболоцкий, М.Е. Комнатнов, С.П. Куксенко, Р.С. Суровцев, Е.Б. Черникова, В.Р. Шарифутдинов и др. Между тем неполно исследован ряд вопросов, связанных с ускорением многократного решения

системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ), локализацией экстремумов сигналов и использованием N -норм при поиске уязвимых мест.

Цель работы – усовершенствовать анализ безопасности РЭУ. Для её достижения целесообразно решить следующие задачи:

1. Оценить эффективность использования перенумерации элементов матрицы для ускорения моделирования методом моментов.
2. Выполнить моделирование распространения сигналов в силовых шинах электропитания (СШЭП).
3. Исследовать защищенность цепей с помощью N -норм.
4. Усовершенствовать локализацию экстремумов сигналов.

Научная новизна

1. Исследовано многократное вычисление методом моментов ёмкостной матрицы 2- и 3-проводных микрополосковых линий передачи с изменяющейся толщиной проводника, отличающееся использованием блочного LU-разложения.
2. Предложены локализация максимума напряжения и оценка перекрестных наводок в печатной плате системы автономной навигации космического аппарата, отличающиеся использованием эволюционных стратегий и генетических алгоритмов.
3. Усовершенствована локализация экстремумов сигнала за счет учета его параллельных путей в многопроводных линиях передачи и схеме из их отрезков.

Теоретическая значимость

1. Применительно к локализации экстремумов сигнала результативно использованы метод моментов, модифицированный узловой метод, методы оптимизации и N -нормы.
2. Выполнен массовый анализ безопасности структур с модальным резервированием с помощью N -норм.
3. Раскрыто, что при моделировании различных сигналов в силовой шине электропитания максимум напряжения локализуется вблизи источника.

Практическая значимость

1. Показано ускорение многократного решения СЛАУ до 3 раз при использовании блочного LU-разложения матриц.
2. Результаты использованы в ряде НИР и учебном процессе ТУСУРа и АО «ИСС», г. Железногорск.
3. Результаты интеллектуальной деятельности: 4 свидетельства о регистрации программы для ЭВМ.

Методы исследования. В работе использованы блочное LU-разложение, моделирование методом моментов, квазистатический анализ, оптимизация различными методами, N -нормы, натурный эксперимент.

Положения, выносимые на защиту

1. Многократное вычисление методом моментов ёмкостной матрицы 2- и 3-проводных микрополосковых линий передачи с изменяющейся толщиной проводника ускоряется использованием блочного LU-разложения матрицы, если её изменяющиеся элементы нумеровать последними.

2. Использование генетических алгоритмов и эволюционных стратегий позволяет улучшить результаты локализации максимума напряжения в активном проводнике (120% от воздействия на входе) и оценки наихудшего уровня перекрестной наводки (78% от воздействия на входе) в печатной плате системы автономной навигации космического аппарата.

3. Локализация экстремумов напряжения сигнала, автоматически учитывающая его параллельные пути в многопроводных линиях передачи и схеме из их отрезков, более быстра и корректна по месту (в любом из путей) и уровню (в несколько раз больше).

Достоверность результатов основана на корректности численных методов, обширном тестировании, согласованности аналитических и вычислительных оценок и совпадении полученных результатов с результатами коммерческого программного обеспечения и натурального эксперимента.

Использование результатов

1. НИР «Разработка новых программных и аппаратных средств для моделирования и обеспечения электромагнитной совместимости радиоэлектронной аппаратуры», проект 8.1802.2014/К, 2014–2016 гг.

2. НИР «Выявление новых подходов к совершенствованию обеспечения электромагнитной совместимости радиоэлектронной аппаратуры и моделирования систем активного зрения роботов», 8.9562.2017, 2017–2019 гг.

3. ПНИ «Теоретические и экспериментальные исследования по синтезу оптимальной сети высоковольтного электропитания для космических аппаратов» в рамках федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы», RFMEFI57417X0172, 2017–2020 гг.

4. НИР «Модальное резервирование электрических цепей критичных радиоэлектронных средств и систем», грант РФФ 19-19-00424, 2019–2021 гг.

5. НИР «Структурно-параметрический синтез оптимальных полосковых структур для защиты технических средств от сверхкоротких импульсов» по гранту Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых, МД-2652.2019.9, 2020–2022 гг.

6. НИР «Многокритериальная оптимизация порядка переключения после отказов при многократном модальном резервировании цепей», грант РФФ 20-19-00446П, 2023–2024 гг.

7. НИР «Комплексный анализ преднамеренных электромагнитных воздействий по цепям заземления критичной аппаратуры», грант РФФ 24-29-00579, 2024–2025 гг.

8. Проект 23-00-003 «Исследование технологий и устройств беспроводного трансфера электромагнитной энергии для высокоскоростных мобильных и нательных устройств Интернета вещей (IoT/ПоТ) и киберфизических систем» научно-учебной группы «Электродинамика замедляющих систем и метаматериалов», НИУ ВШЭ, 2024 г.

Апробация результатов

По результатам подготовлены заявки, победившие в следующих конкурсах: специальная стипендия факультета безопасности ТУСУРа 2016 г.;

повышенная государственная академическая стипендия студентам за достижения в научно-исследовательской деятельности в ТУСУРе 2016–2019 гг.; стипендия Правительства РФ 2016 и 2017 гг. студентам по приоритетным направлениям; стипендия Правительства РФ 2016 г.; стипендия Президента РФ 2017–2019 гг. студентам и аспирантам по приоритетным направлениям; стипендия Президента РФ 2018 г.; именная стипендия Ф.И. Перегудова ТУСУРа 2018 г.; именная стипендия Г.С. Зубарева ТУСУРа 2019 г.; именная стипендия муниципального образования «Город Томск» 2019 г.; российская национальная премия «Студент года – 2019»; премия Томской области в сфере образования, науки, здравоохранения и культуры за отличные результаты в учебе, научно-исследовательской работе и активное участие в социально значимых проектах 2019 г.; звание «Лучший выпускник ТУСУРа» 2020 г.; стипендия Президента РФ среди аспирантов 2022 г.; стипендия Благотворительного фонда «Система» для талантливой молодежи среди школьников, студентов и аспирантов 2023 г.; специальная стипендия НИУ ВШЭ для аспирантов за 2023 г.

Результаты представлялись на следующих конференциях: межд. научно-техн. конф. НС ТУСУР, г. Томск, 2016, 2021 гг.; межд. научно-практ. конф. ЭСиСУ, г. Томск, 2016, 2017 гг.; межд. научно-практ. конф. Сибресурс, г. Томск, 2024 г.; Всеросс. межвузовская научно-техн. конф. студентов и аспирантов «Микроэлектроника и информатика – 2017», г. Москва, 2017 г.; Int. scientific and technical conf. Dynamics, г. Омск, 2020, 2021 гг.; MWENT, г. Москва, 2018, 2020 гг.; Int. conf. EDM, Республика Алтай, 2018, 2020, 2022 гг.; Int. multi-conf. SIBIRCON, г. Томск, 2019 г.; III межд. конф. MIST: Aerospace-III, г. Красноярск, Россия, 2020 г.; IEEE Ural symp. USBEREIT, г. Екатеринбург, Россия, 2022 г.; Int. conf. EMSTECH, г. Вена, Австрия, 2023 г.

Публикаций 28 (3 без соавторов): 2 статьи в журналах из перечня ВАК, 11 докладов в трудах конференций, индексируемых в WoS и Scopus, 3 статьи в журналах РИНЦ, 7 докладов и 1 тезисы в трудах отечественных конференций, 4 свидетельства о регистрации программы для ЭВМ.

Личный вклад. Результаты, сформулированные в положениях, выносимых на защиту, и составляющие научную новизну, получены автором лично или при его участии. Оценка эффективности перенумерации выполнена с С.П. Куксенко и Е.В. Лежниним. Исследования экстремумов сигнала выполнены с Р.Р. Газизовым. Усовершенствование алгоритма локализации экстремумов выполнено с А.А. Квасниковым. Отдельные результаты получены совместно с соавторами публикаций. Непосредственный вклад автора состоит в моделировании, оптимизации, обработке и интерпретации данных, а также подготовке публикаций на всех этапах исследования.

Структура и объем диссертации. В состав кандидатской диссертации входят введение, 5 разделов, заключение, список источников из 138 наим. и приложение. Объем диссертации 191 с., в т.ч. 133 рис. и 88 табл.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

1. Обзор исследований по поиску уязвимых мест в РЭУ

Показана актуальность поиска уязвимых мест в РЭУ. Рассмотрены используемые в работе подходы: выражения для расчёта откликов, потери в проводниках и диэлектриках, методы оптимизации, влияние температуры на параметры структуры, N -нормы, решение СЛАУ, алгоритмы исследования структур. Рассмотрены программы для моделирования. Приведен обзор работ по модальному резервированию. Сформулированы цель и задачи работы.

2. Перенумерация изменяющихся элементов матрицы для ускорения многократного решения систем линейных алгебраических уравнений

В подразделе 2.1 описывается, как доработано формирование матрицы СЛАУ, а также показан принцип перенумерации, при котором неизменяемые элементы матрицы, перемещаются в левый верхний блок. Тем самым, пересчитываются только оставшиеся элементы.

В подразделе 2.2 сравнены аналитические и вычислительные оценки эффективности перенумерации. Рассматривались 2- и 3-проводные МПЛ (рисунок 2.1). Параметры из рисунка 2.1а: $w=1890$ мкм, $s=900$ мкм, $h=290$ мкм, начальное значение $t=35$ мкм, порядок матрицы $N=1100$. Параметры из рисунка 2.1б: $w=8$ мкм, $s=10$ мкм, $h_1=6$ мкм, $h_2=11$ мкм, начальное значение $t=6$ мкм, $N=292$. Средние различия аналитических и численных оценок ускорения с перенумерацией составили для 2-проводной структуры 16,3%, а 3-проводной – 20,8%.

В подразделе 2.3 оценена эффективность перенумерации при изменениях t : сначала одного проводника (№ 1), затем двух (№ 2), с контролем отношения числа неизменяемых сегментов к общему (N_s/N). Приведено ускорение (d). Время 2^k вычислений матрицы C при изменении t без перенумерации и с ней для рисунка 2.1а приведено в таблице 2.1. Получено, что перенумерация ускоряет многократное вычисление матрицы C . Рост N_s/N повышает ускорение. Так, при изменении t двух проводников 2-проводной линии получено ускорение 1,21 раза и одного – 1,79 раза, а для 3-проводной линии – 1,52 и 2 раза.

В подразделе 2.4 аналогично сравнены аналитические (А) и вычислительные (В) оценки эффективности перенумерации при $k=1-9$. Результаты для 3-проводной структуры приведены в таблице 2.2. Получено, что вычислительные оценки эффективности алгоритма перенумерации выше аналитических во всех случаях. Чем больше k , тем больше ускорение, но есть и

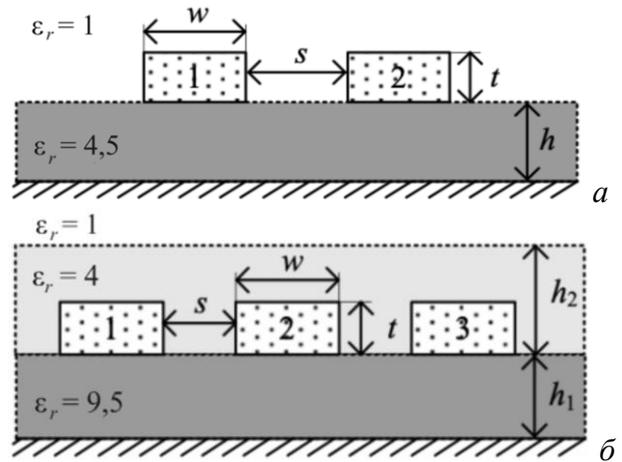


Рисунок 2.1 – Поперечные сечения 2- (а) и 3- (б) проводных МПЛ

Таблица 2.1 – Время 2^k вычислений матрицы C для 2-проводной МПЛ

№	k	Время, с		N_s/N	d
		Без	С		
1	6	43,0	23,9	0,73	1,79
	7	86,6	48,9	0,73	1,77
2	6	42,9	35,6	0,46	1,2
	7	86,5	71,7	0,46	1,21

снижение ускорения. В итоге, рост отношения числа неизменяемых сегментов к порядку матрицы ускоряет решение за счет перенумерации: до 2,2 раза для 2-проводной МПЛ и 3 – 3-проводной.

3. Исследование экстремумов сигнала в СШЭП и печатных платах

В подразделе 3.1 исследовано влияние электростатического разряда (ЭСР) на СШЭП и синфазного и дифференциального воздействий сверхкороткого импульса (СКИ). Фотография макета СШЭП с проводными отводами приведена на рисунке 3.1. Моделирование распространения СКИ и ЭСР в СШЭП различных конфигураций показало, что в активном проводнике максимум напряжения локализуется в ближайшем к источнику отрезке (пример на рисунке 3.2), а ситуация с пассивными проводниками и наводками в них аналогична.

В подразделе 3.2 представлено применение генетических алгоритмов (ГА) и эволюционных стратегий (ЭС) при исследовании экстремумов сигнала в СШЭП и ПП. Оптимизировалась общая длительность СКИ (от 0,03 нс до 30 нс) с целью уменьшения максимума напряжения в СШЭП: вдоль каждого проводника каждого отрезка МПЛП. ГА запускался по 10 раз для каждого набора параметров (N). Получено, что

Таблица 2.2 – Ускорение 2^k вычислений матрицы C для 3-проводной ЛП

№	k	N_s/N	A	B
1	1	0,82	0,64	2,64
	2		0,99	2,67
	3		1,36	2,71
	4		1,68	2,75
	5		1,90	2,83
	6		2,03	2,72
	7		2,11	2,78
	8		2,15	2,68
	9		2,17	2,69
2	1	0,65	0,72	2,58
	2		0,89	2,78
	3		1,01	2,88
	4		1,08	2,98
	5		1,12	2,97
	6		1,14	2,99
	7		1,15	2,87
	8		1,16	3,03

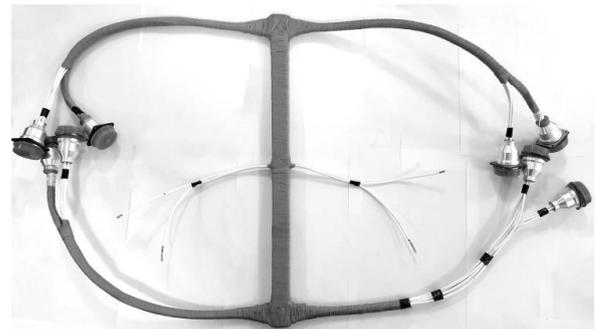


Рисунок 3.1 – СШЭП с отводами

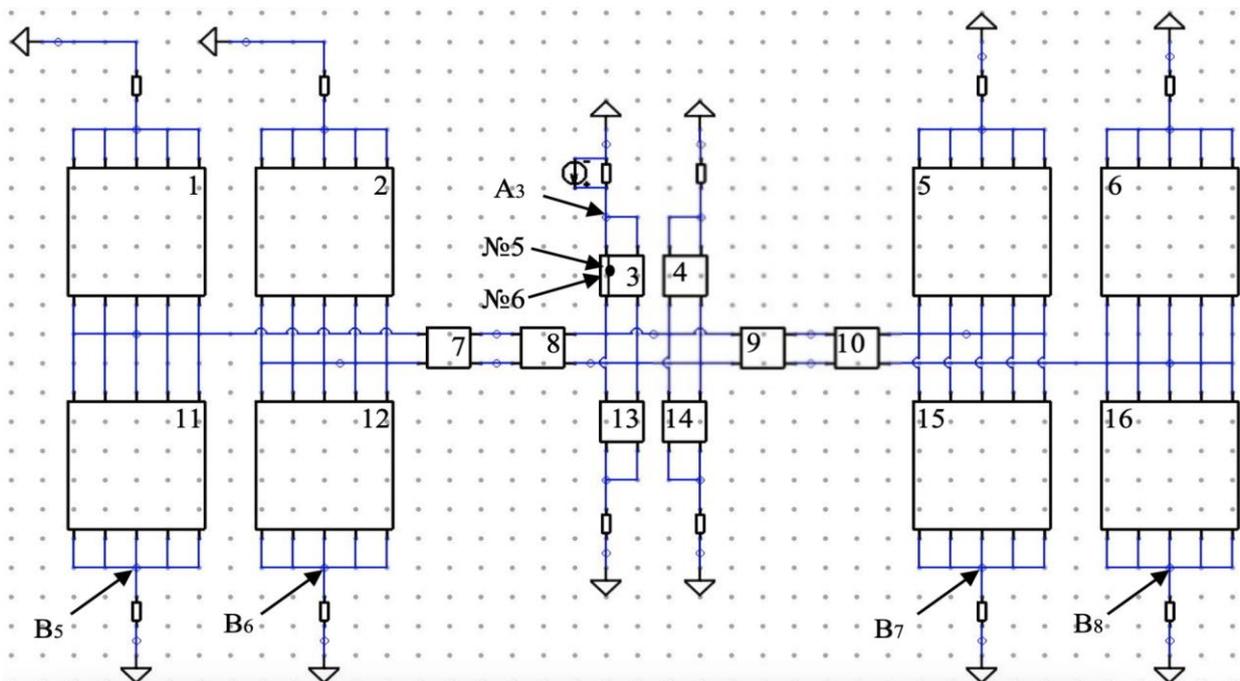


Рисунок 3.2 – Принципиальная схема СШЭП с источником ЭСР в центральном отводе

оптимизация длительности дифференциального воздействия СКИ на СШЭП снизила максимум напряжения в 1,5 раза.

Оптимизировалась длина СШЭП по критерию минимизации максимума напряжения вдоль СШЭП. Сравнены два подхода к оптимизации, с разным набором чисел особей и поколений, при равном количестве вычислений ГА. Выявлено, что выбор разного числа особей и поколений слабо влияет на результат при одинаковом числе вычислений ГА. Оптимизация снизила максимум с 21,13 до 20,4 мВ (3,4%), что незначительно.

ЭС и ГА использованы при выявлении худших случаев распространения СКИ с ЭДС 1 В в ПП системы автономной навигации (САН) космического аппарата (КА). Фрагмент ПП с указанием узла V_{77} , который рассматривался в качестве уязвимого места, изображен на рисунке 3.4. Оптимизация с помощью ЭС и ГА проводилась с целью получить параметры длительности СКИ с

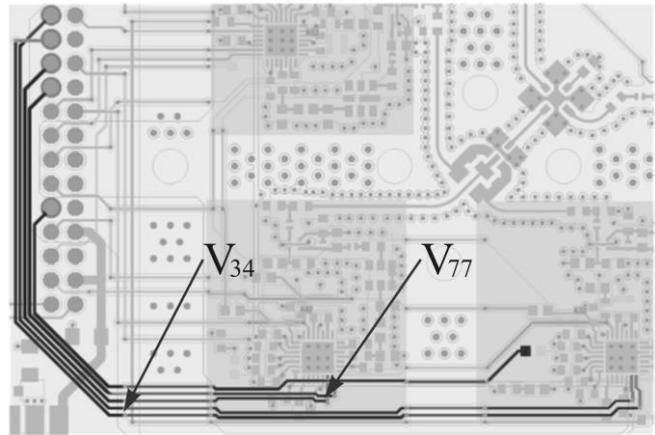


Рисунок 3.4 – Исследуемая шина на ПП

наибольшим значением напряжения в узле V_{77} . ЭС запускалась по 20 раз при начальном решении 300 пс, а ГА – 10 раз для каждой комбинации числа особей и поколений. Параметры ГА с бинарным кодированием: коэффициент мутации 0,1, коэффициент кроссовера – 0,5, число особей – 5 и 10, а число поколений – 5, 7, 10 и 15. Зависимость U_{\max} от номера запуска (N_R) для ЭС приведена на рисунке 3.5а, а для ГА при разном числе вычислений целевой функции (N) – на рисунке 3.5б. При использовании СКИ, длительность которого оптимизирована с помощью ГА, получено пиковое значение перекрестных помех, с уровнем 0,39 В (78% от воздействия на входе). При использовании длительности СКИ, после оптимизации ЭС, получена амплитуда перекрестных помех 0,16 В (32% от воздействия на входе).

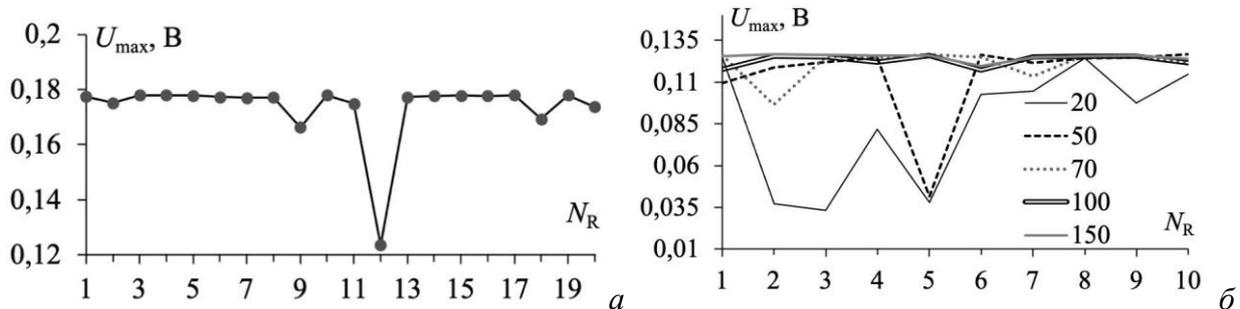


Рисунок 3.5 – Зависимости U_{\max} в узле V_{77} от N_R для ЭС (а) и ГА (б)

С помощью ЭС оптимизирована общая длительность СКИ для максимума напряжения в узле V_{34} . ЭС запускалась по 10 раз для каждого начального значения: 3, 0,3, 0,03 нс. Получен максимум напряжения 598 мВ (120% от воздействия на входе).

В подразделе 3.3 представлено влияние ЭСР на ПП СН50. Для анализа выбрана цепь 122 (рисунок 3.6а). Она идет от соединителя X2.2 к резистору 51,1 Ом и далее (этот отрезок не показан) к группе диодов, являющихся частью схемы вторичного источника питания. Выбор цепи обусловлен наличием связанных линий на большом протяжении, наличием вблизи неё соединителей и цепей питания и отсутствием полигонов схемной земли вблизи цепи. Цепь 122 расположена на ПП с металлическим основанием, которое можно моделировать плоскостью земли. Схемная модель представлена на рисунке 3.6б и учитывает отрезки 1–7, в которых с цепью 122 в различной степени связаны цепи 109, 127, 117, 108, 107, 125 и 146. Для каждого из 7 участков цепи 122 построены эскизы поперечных сечений и их геометрические модели, а также вычислены матрицы погонных параметров. Построена принципиальная схема и моделировалось воздействие ЭСР на цепь 122. Выявлены перекрестные наводки в начале и конце 7 проводников с широким диапазоном пиковых уровней: от малого (0,2%) до воздействующего (102%).

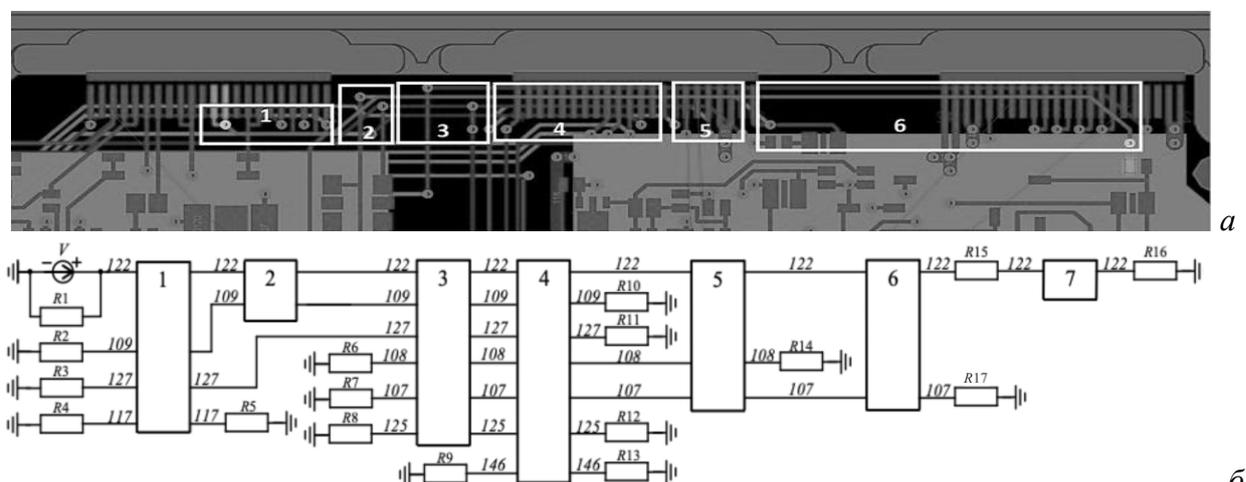


Рисунок 3.6 – Цепь 122, с трассами других слоёв и разделением на отрезки 1–6 (а), и ее схемная модель (б)

4. Исследования защищенности цепей с помощью N -норм

В подразделе 4.1 рассмотрен пример массового исследования структур с модальным резервированием до и после оптимизации эвристическим поиском (геометрические параметры и ϵ_r подбирались так, чтобы разность задержек мод была максимальной). Рассматривались 5 структур (однослойная трассировка резервированных цепей с боковой связью, экранированная однослойная трассировка резервированных цепей с лицевой связью, однослойная трассировка резервированных цепей с лицевой связью и полигонами, 2-слойная трассировка резервированных цепей с боковой связью, экранированная 2-слойная трассировка резервированных цепей с лицевой связью). Вдоль активного проводника вычислялись временные отклики и определялись 5 их N -норм. Окончания структур брались резистивными, со значением сопротивления равным среднему геометрическому волновых сопротивлений четной и нечетной мод. В качестве воздействия использовались: трапецевидный СКИ, ЭСР и реальный СКИ. Подход показал приемлемость для массового исследования структур с МР, возбуждаемых разными помеховыми сигналами.

В подразделе 4.2

показано влияние температуры на геометрические параметры и N -нормы резервированной цепи. Рассматривалась цепь с лицевой связью и полигонами (полагаются схемной землей),

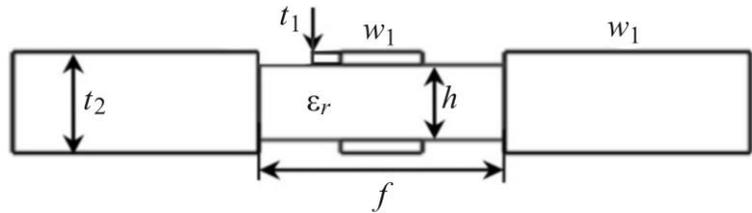


Рисунок 4.1 – Поперечное сечение структуры

поперечное сечение которой более детально представлено на рисунке 4.1, где w_1 и w_2 – ширины центральных проводников и полигонов, t_1 – толщина центральных проводников, h – толщина подложки, t_2 – толщина боковых проводников, имитирующих соединенные полигоны, f – ширина подложки, ϵ_r – относительная диэлектрическая проницаемость подложки. Воздействие – СКИ с ЭДС 1 В и длительностями фронта, спада и плоской вершины по 100 пс. Сопротивления $R1$ – $R4$ равны 68 Ом. Вычислены зависимости параметров структуры от T . Получено, что w_1 , w_2 , t_1 , t_2 , t_3 , f и l с ростом T от минус 50 до +150°C растут слабо, а ϵ_r уменьшается от 4,58 до 4,11. Итоги изменения: геометрические параметры до 0,35%, погонные задержки до 2%, N -нормы до 3%.

В подразделе 4.3 приведены созданные модели для оценки влияния температуры и влаги на параметры цепи на однослойной ПП с МР и боковой связью, позволяющие упростить и автоматизировать исследования по влиянию окружающей среды на ПП.

5. Усовершенствованная локализация экстремумов сигнала

В подразделе 5.1

показан недостаток локализации экстремумов сигнала: в исходном алгоритме проверялся только один из путей

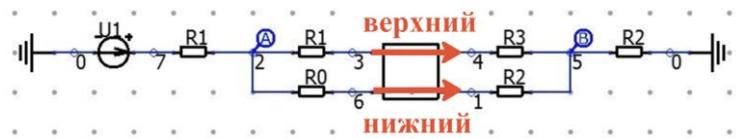


Рисунок 5.1 – Схема с двумя параллельными путями

(в зависимости от очередности соединения элементов схем с начальной точкой А), а в усовершенствованном – все. На рисунке 5.1 приведен пример, когда выбирался только верхний путь между точками А и В из-за того, что при построении принципиальной схемы резистор $R1$ был соединен с точкой А в первую очередь, а $R0$ – во вторую. В новом алгоритме проверяются оба пути.

В подразделе 5.2 описана программная реализация алгоритма на языке C++, а в подразделе 5.3 апробирована его работа на 7 структурах (2-проводная МПЛ, последовательное соединение двух 2-проводных МПЛ, параллельное соединение двух 2-проводных МПЛ, параллельное соединение двух одиночных МПЛ, 3-проводная МПЛ, модальный фильтр (МФ) без одного опорного проводника, МФ со связывающими проводниками), выявившая более глобальные максимумы напряжения. Наибольшее различие N -норм было 5-кратным у реальной структуры (рисунок 5.2). На рисунке 5.3 приведены портреты N_1 при работе исходного (а) и усовершенствованного (б) алгоритмов для реальной структуры (цифрами 5, 6 и 7 показаны номера проводников, которым соответствует часть портрета N_1).

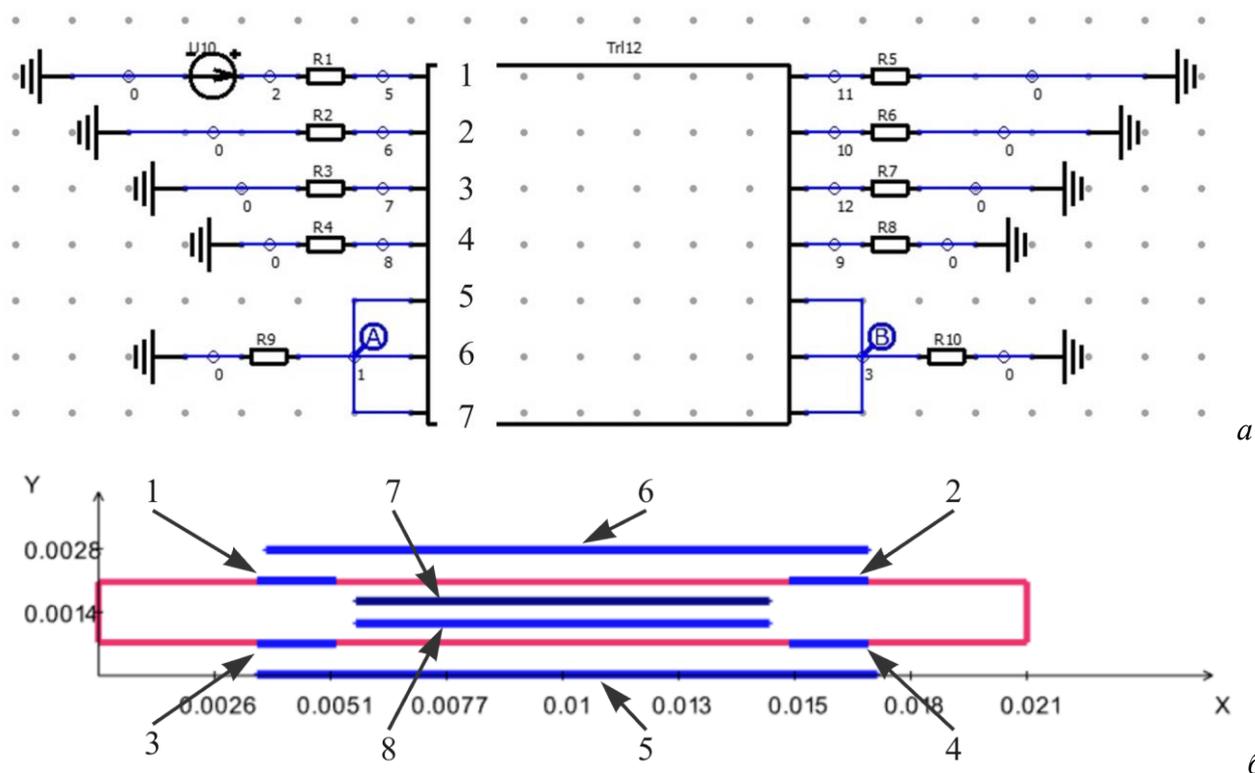


Рисунок 5.2 – Схема (а) и поперечное сечение (б) МФ со связывающими проводниками

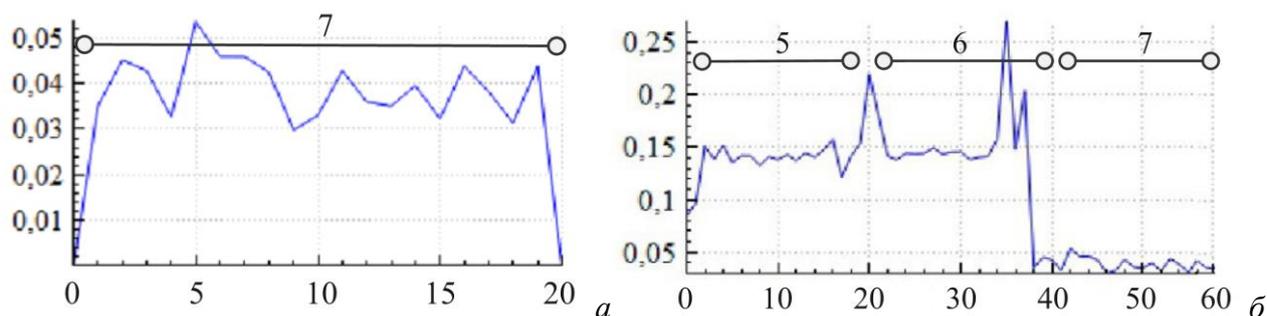


Рисунок 5.3 – Портреты N_1 для рисунка 5.2 при работе исходного (а) и усовершенствованного (б) алгоритмов

В подразделе 5.4 приведено экспериментальное подтверждение корректности алгоритма на примере реальной структуры: свернутой в меандр связанной МПЛ длиной 6,063 м. Оба её проводника в начале и конце соединены между собой, так что образуются два параллельных пути распространения воздействия (по сути, синфазного) вдоль МПЛ. Для подложки взята FR-4 толщиной 2 мм. Разнос и ширина проводников равны 3,28 мм, а толщина – 35 мкм. На рисунке 5.4а приведена фотография макета (цифрами отмечены 8 точек, в которых получены формы напряжения), а на рисунке 5.4б – экспериментальной установки (слева генератор СКИ, а сверху осциллограф). При моделировании полагалось, что у подложки $\epsilon_r=4,6$ и $\text{tg}\delta=0,025$. Сравнены формы напряжения в точках 1–8, измеренные осциллографом и вычисленные в системах TUSUR.EMC и ADS (рисунок 5.5). На рисунке 5.6 приведены максимумы напряжения в точках 1–8, полученные осциллографом (с интервалами погрешности в 5,5%), в TUSUR.EMC и ADS.

Видно, что результаты согласуются. Для детального сравнения максимумов напряжения, полученных осциллографом и TUSUR.EMC, для

каждой точки вычислено отношение модуля разности значений к модулю суммы. В точках 3–7 оно равно в среднем 2,6%. Различия обусловлены погрешностями при проведении эксперимента (погрешность установки амплитуды сигнала генератором 5%, максимальная погрешность определения амплитуды осциллографом 0,5%), а также различием реальных значений параметров и принятых в моделировании.



Рисунок 5.4 – Макет с линией (а) и экспериментальная установка (б)

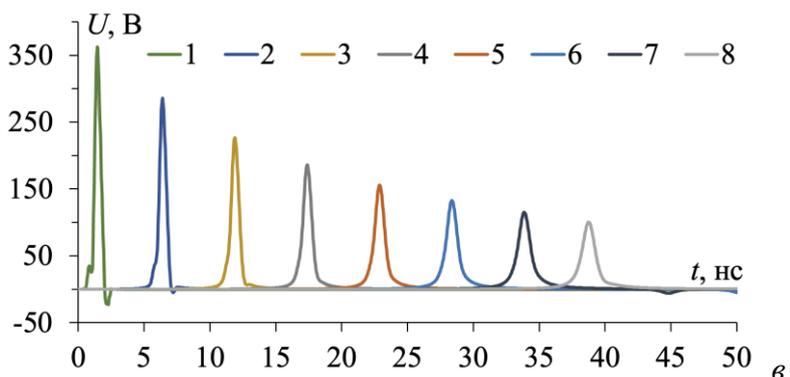
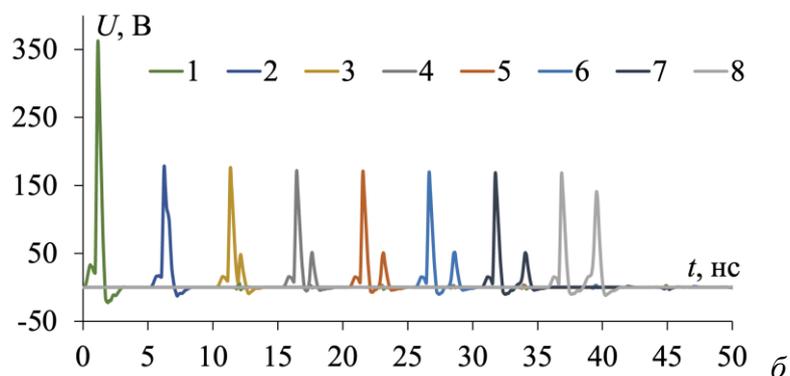
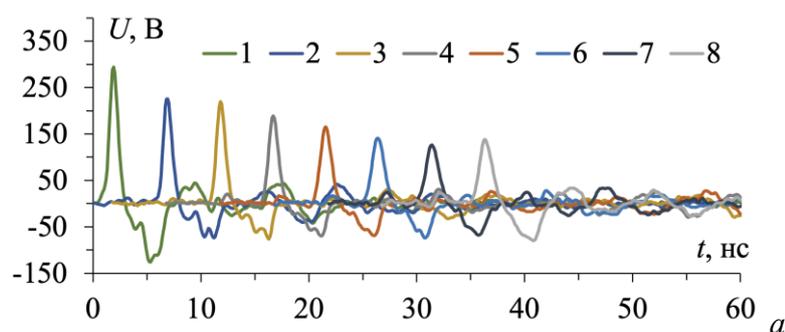


Рисунок 5.5 – Формы напряжения в точках 1–8, полученные осциллографом (а), TUSUR.EMC (б) и ADS (в)

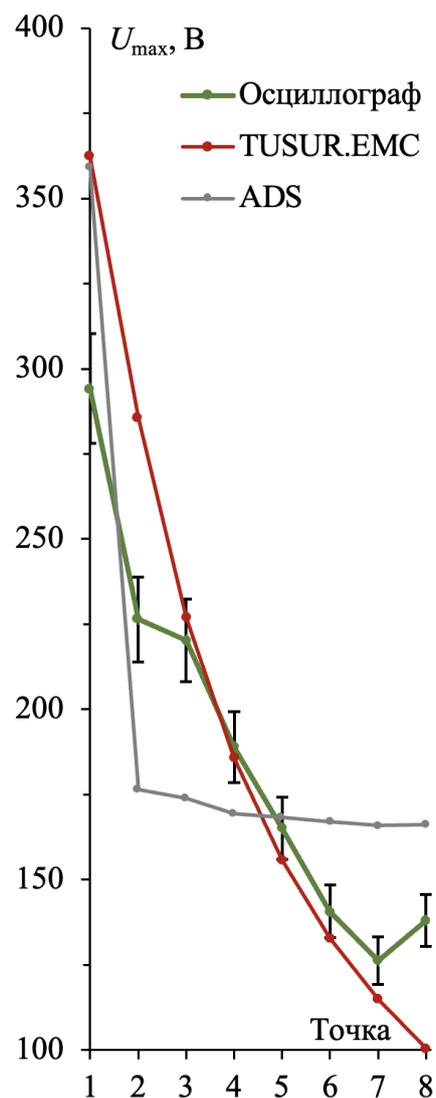
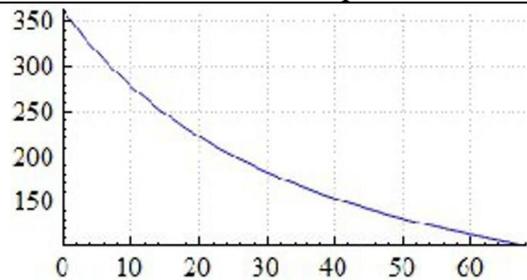
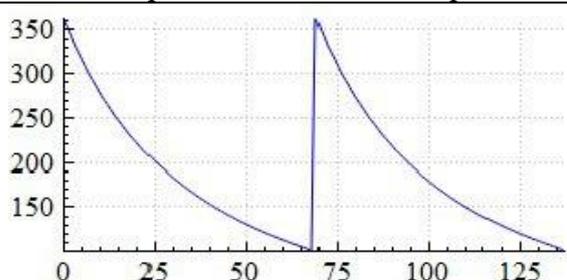
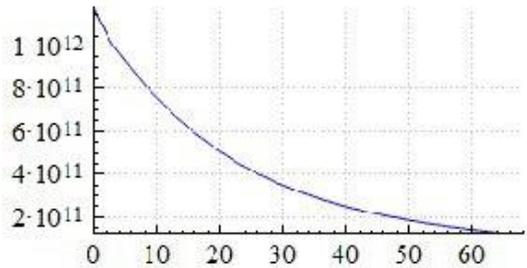
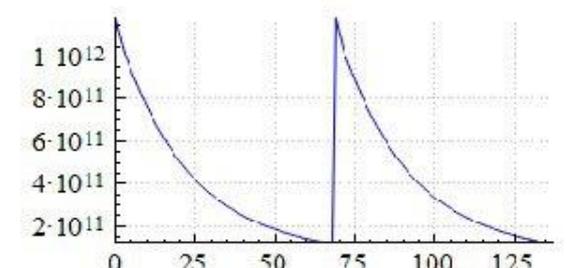
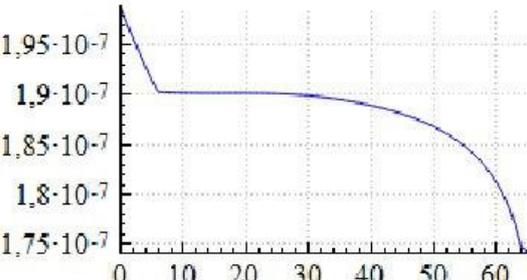
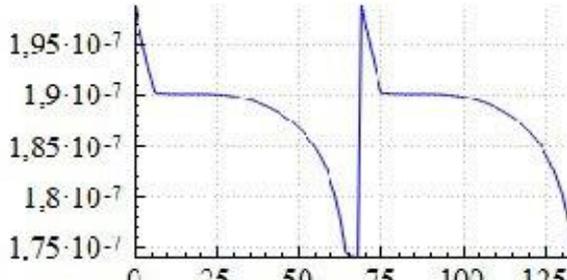
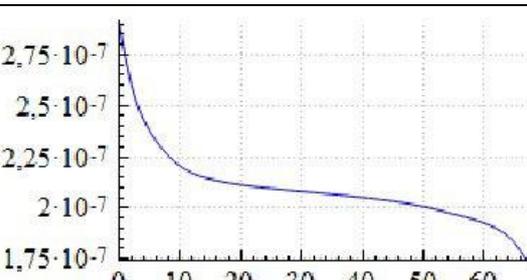
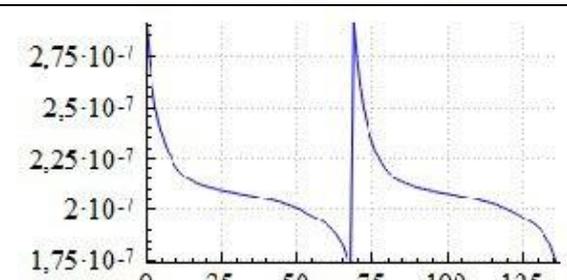
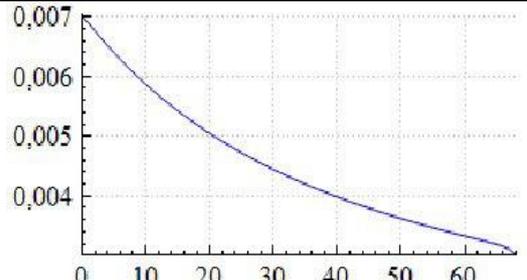
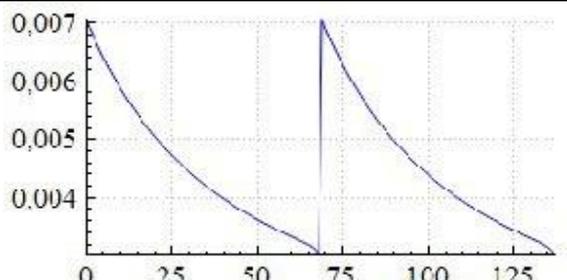


Рисунок 5.6 – Максимумы напряжения в точках 1–8

В таблице 5.1 сравнены портреты N -норм по двум алгоритмам: исходному и усовершенствованному. С помощью усовершенствованного алгоритма в симметричной структуре корректно найдены максимумы напряжения в параллельных путях структуры. По формам для усовершенствованного алгоритма видно, что правая часть (после сегмента 70) каждого портрета повторяет левую, так как это части двух параллельных и одинаковых проводников связанной МПЛ.

Таблица 5.1 – Портреты N -норм по двум алгоритмам исследуемой линии

N	Исходный алгоритм	Усовершенствованный алгоритм
1		
2		
3		
4		
5		

Исходная «ручная» локализация экстремумов напряжения параллельных путей работоспособна, но очень затратна по времени, поскольку для каждого из путей она требует построения структуры с первоочередным соединением каждого пути с точкой А, запуска моделирования и сохранения результатов с выбором глобального экстремума пользователем; причем с ростом числа параллельных путей затраты времени пропорционально растут. Усовершенствованная локализация «автоматически» анализирует любое число параллельных путей и надежно выбирает глобальный экстремум, динамически визуализируя весь этот процесс (последовательно отображая разными цветами сегменты, в которых вычисляется временной отклик, и формы отклика этим же цветом, с выбором отклика с экстремумом).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты исследования

1. Протестирован ранее реализованный в программе TUSUR.EMC алгоритм перенумерации элементов матрицы, ускоряющий многократное решение изменяющейся СЛАУ. Для 2-проводной МПЛ среднее различие аналитических и численных оценок ускорения составило 16,3%, а 3-проводной – 20,8%. Показано, что рост отношения числа неизменяемых сегментов к порядку матрицы ускоряет решение за счет перенумерации: до 2,2 раза для 2-проводной МПЛ и 3 – 3-проводной.

2. Выявлено, что при моделировании распространения СКИ и ЭСР в проводниках СШЭП различных конфигураций максимум напряжения в активном и пассивных проводниках локализуется вблизи источника.

3. Аналогичный результат получен и при моделировании синфазного воздействия ЭСР на СШЭП с заземлением, показавшем, что максимумы и минимумы локализованы вблизи источника.

4. Моделирование дифференциального и синфазного воздействий СКИ на СШЭП показало при синфазном воздействии в 3 из 4 случаев локализацию максимума в самом дальнем от источника отрезке проводного отвода, тогда как при дифференциальном воздействии в 2 случаях максимум в ближайшем отрезке, а в 2 других – в дальних. При синфазном воздействии максимум на 8% больше, чем дифференциальном, а минимум при дифференциальном воздействии больше на 46%, чем при синфазном.

5. Представлены результаты использования методов оптимизации: в 1,5 раза снижен максимум напряжения в СШЭП при оптимизации длительности СКИ и на 3,4% – длины СШЭП; после оптимизации посредством ЭС параметров длительности сигналов в ПП САН найден наилучший случай с превышением максимума напряжения в активном проводнике на 20% относительно сигнала на входе; после оптимизации посредством ЭС и ГА воздействующих сигналов на ПП САН получена перекрестная наводка 78% от воздействия на входе.

6. Моделирование форм перекрестных наводок в начале и конце 7 проводников при воздействии ЭСР на цепь реальной ПП показало широкий диапазон пиковых уровней: от малого (0,2%) до воздействующего (102%).

7. Апробировано массовое исследование с помощью N -норм на примере 6 различных структур (одно-, двух- и многослойных с МР с боковой и лицевой связями проводников до и после оптимизации. Вычислен временной отклик (и 5 его N -норм) на воздействие импульсов (трапециевидного, ЭСР и сверхкороткого от реального генератора) и локализованы максимумы и минимумы вычисленных норм, определяющих конкретные угрозы. Подход показал приемлемость для массового исследования структур с МР, возбуждаемых разными помеховыми сигналами.

8. Исследовано влияние температуры и влаги резервированной структуры с лицевой связью и полигонами на параметры цепи. Показано, что изменение температуры от минус 50 до +150°C слабо влияет на геометрические параметры (до 0,35%), погонные задержки (до 2%) и N -нормы (до 3%).

9. Разработаны модели для оценки влияния температуры и влаги на параметры цепи на однослойной ПП с МР и боковой связью, позволяющие упростить и автоматизировать исследования по влиянию среды на ПП.

10. Усовершенствована и программно реализована в системе TUSUR.EMC на языке C++ локализация экстремумов сигнала, апробированная на 7 структурах и выявившая более глобальные максимумы напряжения, с наибольшим (5-кратным) различием N -норм при анализе реальной структуры.

11. Экспериментально подтверждена корректность усовершенствованной локализации экстремумов сигнала: среднее отклонение по 5 центральным точкам 2,6%.

12. С помощью усовершенствованной локализации в симметричной структуре получен корректный результат поиска максимума напряжения в параллельных путях структуры.

Рекомендации. Применение алгоритма перенумерации элементов матрицы, для ускорения многократного решения СЛАУ при анализе безопасности РЭУ. Применение методов оптимизации, для ускорения моделирования худших случаев распространения сигнала. Выявление и локализация экстремумов N -норм для поиска уязвимых мест в РЭУ. Упрощение и автоматизация оценки влияния температуры и влаги на ПП с помощью разработанных моделей. Применение в образовательном процессе представленных подходов к моделированию, оптимизации параметров и усовершенствованного алгоритма локализации экстремумов сигнала.

Перспективы дальнейшей разработки темы. Применение алгоритмов перенумерации при моделировании более сложных элементов РЭУ. Использование методов оптимизации для поиска оптимальных параметров РЭУ при их проектировании. Использование N -норм для массового анализа безопасности РЭУ. Внедрение усовершенствованного программного модуля локализации экстремумов сигнала в различные системы моделирования.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в журналах из перечня ВАК

1. Газизов Р.Р. Усовершенствованный алгоритм исследования безопасности электронных цепей с помощью N -норм в радиоэлектронной аппаратуре /

Р.Р. Газизов // Системы управления, связи и безопасности. – 2023. – №4. – С. 267–282.

2. Зима Е. Модальное резервирование: современное состояние / Е. Зима, Р.Р. Газизов // Доклады ТУСУР. – 2024. – Т. 27. – №3. – С. 55–69.

Доклады в трудах конференций, индексируемых WoS и Scopus

3. Gazizov Ruslan R. Use of evolution strategy in identifying the worst case effects of ultrashort pulse propagation in PCB bus of spacecraft autonomous navigation system / Ruslan R. Gazizov, Rustam R. Gazizov and Talgat R. Gazizov // Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies (MWENT). – Moscow, 13–15 March. – 2018. – P. 1–4.

4. Gazizov Ruslan R. Use of genetic algorithm and evolution strategy when revealing the worst case effects of crosstalk propagation in PCB bus of spacecraft autonomous navigation system / Ruslan R. Gazizov, A.M. Zabolotsky, Rustam R. Gazizov // 19st Int. conf. on micro/nanotechnologies and electron devices EDM 2018. – P. 93–97.

5. Gazizov Rustam R. Simulating the influence of electrostatic discharge on a spacecraft power supply bus / Rustam R. Gazizov, Ruslan R. Gazizov, Timur T. Gazizov // 2019 Int. multi-conf. on engineering, computer and information sciences (SIBIRCON). – Tomsk, 21–27 October, 2019. – P. 269–272.

6. Gazizov Rustam R. Simulation the effect of common-mode excitation of electrostatic discharge on the shielded power supply bus conductors / Rustam R. Gazizov, Ruslan R. Gazizov, Timur T. Gazizov // 2020 Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies (MWENT). – Moscow, 11–13 March. – 2020. – P. 1–6.

7. Gazizov Rustam R. The detection of voltage extreme points of the shielded power supply bus under the ultrashort pulse excitation / Rustam R. Gazizov, Ruslan R. Gazizov, Timur T. Gazizov // Proc. of 21th int. conf. of young specialists on micro/nanotechn. and electron devices (EDM) 2020. – P. 214–218.

8. Gazizov Rustam R. Optimization of duration of ultrashort pulse exciting the spacecraft power supply bus / Rustam R. Gazizov, Ruslan R. Gazizov, Timur T. Gazizov // 2020 Int. IEEE scientific and technical conf. «Dynamics of systems, mechanisms and machines». – Omsk, Russian Federation, 2020. – P. 1–4.

9. Gazizov Rustam R. Differential mode pulse minimization by using the genetic algorithm in the bus / Rustam R. Gazizov, Ruslan R. Gazizov, Timur T. Gazizov, Mariia N. Kalinina // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2021. – Vol. 1047, no. 1. – P. 1–7.

10. Gazizov R.R. Using portraits of N-norms for large-scale investigation of circuits with modal reservation / R.R. Gazizov, A.V. Medvedev and T.R. Gazizov // Int. scientific and technical conf. «Dynamics of systems, mechanisms and machines». – 2022. – P. 1–4.

11. Gazizov R.R. The models for evaluation of environment impact for the circuit board with modal reservation using N-norms / R.R. Gazizov; T.R. Gazizov // 2022 Ural-Siberian conf. on biomedical engineering, radioelectronics and information technology (USBREIT). – 2022. – P. 119–121.

12. Gazizov R.R. Evaluation of the electrostatic discharge impact on the printed circuit board: a case study / R.R. Gazizov // 23st Int. conf. of young professionals in electron devices and materials (EDM). – Novosibirsk, Russia 2022. – P. 1–5.

13. Gazizov R.R. Studying the safety of electronic circuits using an improved N-norms-based approach / R.R. Gazizov, A.A. Kvasnikov, A.A. Yelizarov // 2023 International conference «Engineering management of communication and technology (EMCTECH). – 2023. – P. 1–5.

Статьи в журнале, индексируемом в РИНЦ

14. Газизов Р.Р. Оптимизация длительности сверхкороткого импульса, воздействующего на шину электропитания космического аппарата / Руст. Р. Газизов, Русл. Р. Газизов, Т.Т. Газизов, М.Н. Калинина // Динамика систем, механизмов и машин. – 2020. – Т. 8, №4. – С. 19–25.

15. Газизов Р.Р. Минимизация влияния дифференциального воздействия на силовую шину электропитания космического аппарата при изменении ее длины с использованием генетического алгоритма / Руст. Р. Газизов, Русл. Р. Газизов, Т.Т. Газизов // Динамика систем, механизмов и машин. – 2020. – Т. 8, №4. – С. 12–18.

16. Газизов Р.Р. Использование портретов N-норм для массового исследования цепей с модальным резервированием / Р.Р. Газизов, А.В. Медведев, Т.Р. Газизов // Динамика систем, механизмов и машин. – 2021. – Т. 9, №3. – С. 104–109.

Доклады в трудах отечественных конференций

17. Газизов Р.Р. Алгоритм перенумерации в системе TALGAT / Р.Р. Газизов, Евг. В. Лежнин // Материалы докладов межд. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР-2016». – 2016. – Ч. 2. – С. 313–316.

18. Газизов Руст. Р. Численные оценки эффективности использования перенумерации подынтервалов границ проводников и диэлектриков при многовариантном анализе полосковых структур / Руст. Р. Газизов, Е.В. Лежнин, С.П. Куксенко // Межд. науч.-практ. конф. «Электронные средства и системы управления». – Томск, 16–18 ноября 2016. – Т. 1. – С. 203–205.

19. 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 // Материалы научно-техн. конф. «Микроэлектроника и информатика - 2017»: сборник статей. – 2017. – С. 14–20.

20. Газизов Р.Р. Комплексные оценки ускорения при использовании алгоритма перенумерации при многовариантном анализе полосковых структур / Р.Р. Газизов, Е.В. Лежнин, С.П. Куксенко // Материалы 13-й межд. науч.-практ. конф., посвященной 55-летию ТУСУРа «Электронные средства и системы управления». – Томск, 29 ноября–1 декабря 2017. – Т. 2. – С. 8–10.

21. Газизов Р.Р. Влияние температуры на параметры резервированной цепи / Р.Р. Газизов, А.Т. Газизов, М.Н. Калинина // Материалы сборника избранных статей международной научно-технической конференции студентов,

аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР - 2021». – Томск, 2021. – Ч. 2. – С. 47–50.

22. Юсаф М.Д. Перекрестные наводки в модальном фильтре со связывающими проводниками при воздействии сверхкороткого импульса по схемной земле / М.Д. Юсаф, Р.Р. Газизов // Материалы 30-й Межд. науч.-практ. конф. «Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири (СИБРЕСУРС-30-2024)». – Томск, 2024. – С. 168–174.

23. Газизов Р.Р. Локализация максимума синфазного напряжения вдоль связанной микрополосковой линии тремя способами / Р.Р. Газизов // Материалы 30-й Межд. науч.-практ. конф. «Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири (СИБРЕСУРС-30-2024)». – Томск, 2024. – С. 106–110.

Тезисы в трудах отечественных конференций

24. Газизов Р.Р. Сравнение вычислительных и аналитических оценок эффективности перенумерации подынтервалов границ проводников и диэлектриков при многовариантном анализе полосковых структур / Р.Р. Газизов, Е.В. Лежнин // Тезисы докладов 24-ой Всеросс. межвуз. научно-техн. конф. студентов и аспирантов «Микроэлектроника и информатика - 2017», 19–20 апреля 2017. – С. 143.

Свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ

25. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2015617550. TALGAT 2014. Авторы: Газизов Т.Р., Мелкозеров А.О., Газизов Т.Т., Куксенко С.П., Заболоцкий А.М. и др. Всего 17 чел. Заявка №2015614488. Дата поступления 27.05.2015 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 17.07.2015 г.

26. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №20156660487. TALGAT 2015. Авторы: Газизов Т.Р., Мелкозеров А.О., Газизов Т.Т., Куксенко С.П., Заболоцкий А.М. и др. Всего 17 чел. Заявка №2015617580. Дата поступления 17.08.2015 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 01.10.2015 г.

27. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2016662520. TALGAT 2016. Авторы: Газизов Т.Р., Мелкозеров А.О., Газизов Т.Т., Куксенко С.П., Заболоцкий А.М. и др. Всего 27 чел. Заявка №20166619296. Дата поступления 01.09.2016 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 14.11.2016 г.

28. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2018611481. TALGAT 2017. Авторы: Газизов Т.Р., Мелкозеров А.О., Газизов Т.Т., Куксенко С.П., Заболоцкий А.М. и др. Всего 23 чел. Заявка №2017663209. Дата поступления 13.12.2017 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 02.02.2018 г.