

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Томский государственный университет
систем управления и радиоэлектроники»

На правах рукописи



Газизов Руслан Рифатович

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

Специальность 05.13.18

Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель
д-р. техн. наук,
Заболоцкий Александр Михайлович

Томск 2018

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	5
1. Обзор проблемы моделирования электрических сигналов в многопроводных линиях передачи.....	16
1.1. Актуальность моделирования.....	16
1.2. Аналогии	18
1.3. Подходы к моделированию.....	21
1.4. Математические модели для вычисления временного отклика произвольных схем многопроводных межсоединений.....	22
1.4.1. Решение волновых уравнений	23
1.4.2. Уравнения для отрезка многопроводной линии передачи	25
1.4.3. Уравнения схемы для моделирования отклика	26
1.4.4. Алгоритмы для вычисления временного отклика в многопроводных линиях передачи	28
1.5. Методы оптимизации	30
1.5.1. Описание и схема работы генетического алгоритма	37
1.5.2. Описание и алгоритм эволюционной стратегии.....	38
1.6. Выводы по главе.....	41
2. Математическая модель и алгоритмы для выявления и локализации экстремумов сигнала.....	44
2.1. Описание математической модели.....	44
2.2. Алгоритм проведения вычислительного эксперимента	45
2.3. Алгоритм определения допустимого пути распространения сигнала по проводникам цепи	51
2.4. Алгоритм визуализации распространения сигнала по цепи.....	56
2.5. Алгоритм выявления и локализации экстремумов сигнала	58
2.6. Основные результаты и выводы.....	60
3. Модифицированный численный метод для вычисления токов и напряжений в многопроводных линиях передачи.....	61
3.1. Описание численного метода	61

3.2. Тестовое вычисление отклика	63
3.3. Моделирование шины печатной платы системы автономной навигации космического аппарата	66
3.3.1. Вычисление максимумов сигнала	66
3.3.2. Влияние длительности сверхкороткого импульса на локализацию пиковых значений напряжения.....	70
3.3.3. Воздействие электростатического разряда	89
3.3.4. Оптимизация эволюционными алгоритмами.....	98
3.4. Основные результаты и выводы.....	138
4. Комплекс программ для выявления и локализации экстремумов сигнала в многопроводных линиях передачи.....	142
4.1. Назначение и структура комплекса программ.....	142
4.2. Описание интерфейса программного комплекса.....	147
4.3. Тестирование вычисления отклика и динамического отображения.....	151
4.4. Тестирование выявления и локализации пиковых значений напряжения..	160
4.4.1. Тестовые схемы из одиночных отрезков линий передачи	160
4.4.2. Меандровая линия из двух витков	161
4.4.3. Меандровая линия из одного витка	164
4.4.4. Сравнение результатов квазистатического и электродинамического моделирования.....	171
4.5. Использование результатов исследования.....	175
4.5.1. Результаты интеллектуальной деятельности	175
4.5.2. ОКР по теме «УЭМ ТУСУР».....	179
4.5.3. ОКР по теме «САН».....	180
4.5.4. НИР по государственному заданию №8.1802.2014/К.....	182
4.5.5. НИР по государственному заданию №8.9562.2017/8.9.....	183
4.5.6. ПНИ по ФЦП №14.574.21.0172	184
4.5.7. НИР по программе УМНИК	185
4.5.8. Учебный процесс НИ ТГУ	186
4.5.9. Учебный процесс ТУСУРа.....	186

4.6. Основные результаты и выводы	188
Заключение	190
Список сокращений	192
Список литературы	193
Приложение	208

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы

Возрастающая сложность разрабатываемых устройств и протекающих в них процессов делает всё более важным математическое моделирование, поскольку натурное моделирование часто становится очень затратным. В этой связи, показательна широко проникающая в жизнь общества радиоэлектронная аппаратура (РЭА), требующая особенно тщательного математического моделирования, основой которого часто является численный анализ с построением схемной математической модели РЭА и вычислением её отклика на заданное воздействие.

Сложность точного математического моделирования РЭА во многом определяется электромагнитными взаимодействиями, особенно сильно выраженными в проводниках печатных плат (ПП). Эти взаимодействия довольно трудно контролировать, поскольку проводники, в общем случае, расположены произвольно. Однако существуют отдельные элементы ПП (например, многопроводные шины, спиральные индуктивности, линии задержки), которые отличаются спецификой трассировки, позволяющей контроль взаимодействий и даже их усиление для улучшения характеристик этих элементов. Тем не менее, из-за большого числа таких элементов на плате, большой площади отдельного элемента, а также сложной и протяженной формы, могут появиться их паразитные взаимодействия с другими элементами. Результаты исследований по моделированию межсоединений ПП представлены в работах таких исследователей как Л.Н. Кечиев, Е.Д. Пожидаев, С.Ф. Чермошенцев, R. Achar, F. Canavero, A.R. Djordjevich, M.S. Nakhla, C.R. Paul, T.K Sarkar и др.

Помимо помех, создаваемых полезными сигналами, опасны мощные преднамеренные электромагнитные импульсы наносекундного и субнаносекундного диапазонов, поскольку они способны проникать в различную РЭА и выводить ее из строя. Это важно для электромагнитной совместимости (ЭМС) и информационной безопасности: для оценки ситуации при

проявлениях электромагнитного терроризма, при мощных электромагнитных воздействиях по сети электропитания или для защиты специальных технических зданий от внешних электромагнитных воздействий. Распространение таких сигналов в многопроводных линиях передачи (МПЛП) хорошо исследовано. Однако особенности распространения сверхкоротких импульсов (СКИ) вдоль проводников с высокой плотностью межсоединений ПП изучены недостаточно, что может приводить к их неконтролируемому распространению. Выявление и локализация экстремумов сигнала важны, поскольку их результаты могут быть полезны для определения мест возможных паразитных взаимовлияний и излучений, чтобы своевременно принять меры по их устранению для обеспечения ЭМС. Кроме того, это может быть полезно для выявления более точных мест установки датчиков контроля полезных и мониторинга помеховых сигналов, что также важно для повышения помехозащищенности и надежности РЭА.

Для таких исследований особенно целесообразно использовать не измерения, а компьютерное моделирование, поскольку необходимо получение форм сигнала в большом числе точек вдоль каждого проводника сложных структур. Помимо этого, искажение сигнала импедансом измерителя сказывается на точности определения амплитуд напряжений. Большинство исследований проведено в частотной области, тогда как временной уделено меньше внимания. Между тем изучение процессов во временной области позволит усовершенствовать защиту от СКИ. Поэтому при проектировании РЭА все более важным становится предварительное моделирование целостности сигнала. Кроме того, в большинстве программных продуктов, либо полностью отсутствует возможность вычисления отклика на заданное воздействие в любой точке вдоль каждого отрезка каждого проводника МПЛП произвольной сложности, либо есть возможность его вычисления, но только в определенной точке, заданной пользователем. Однако, зачастую неизвестно, в каком месте будет наблюдаться превышение сигнала, что усложняет задачу анализа ЭМС и увеличивает время на его выполнение. Таким образом, актуальность диссертационной работы обусловлена необходимостью разработки математической модели, модификации

численного метода и разработки комплекса программ для выявления и локализации экстремумов сигнала вдоль любого проводника схемы из отрезков МПЛП произвольной сложности.

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

Объект исследования: распространение электрического сигнала в многопроводной линии передачи.

Предмет исследования: математическая модель, численный метод, алгоритмы и комплекс программ для выявления и локализации экстремумов сигнала.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Разработка математической модели для выявления и локализации экстремумов сигнала в МПЛП.
2. Модификация численного метода с целью создания возможности выявления и локализации экстремумов сигнала в МПЛП.
3. Разработка комплекса программ для выявления и локализации экстремумов сигнала в МПЛП.
4. Имитационное моделирование тестовых схем, одиночных отрезков связанных линий, а также конкретных элементов ПП с использованием разработанного комплекса программ.

Научная новизна диссертации:

1. Разработана математическая модель для вычисления отклика линии передачи, отличающаяся добавлением нового параметра, отвечающего за число сегментов вдоль отрезка многопроводной линии передачи, а также объединением двух моделей с разными матрично-векторными уравнениями. (Область исследований 1. Разработка новых математических методов моделирования объектов и явлений.)
2. Модифицирован численный метод, отличающийся вычислением токов и напряжений в любой точке вдоль проводников многопроводных линий передачи,

с помощью которого в различных полосковых структурах (меандровой линии, С-секции и шине печатной платы) выявляются и локализуются экстремумы сигнала. (Область исследований 5. Комплексные исследования научных и технических проблем с применением современной технологии математического моделирования и вычислительного эксперимента.)

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

Теоретическая значимость

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

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

Практическая значимость

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

2. Разработанный комплекс программ, использующий модифицированный численный метод вычисления временного отклика произвольных схем из многопроводных линий передачи, позволяет моделировать (в рамках

квазистатического подхода) временной отклик реальных фрагментов многопроводных межсоединений.

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

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

Методология и методы исследования

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

Положения, выносимые на защиту

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

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

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

Достоверность результатов подтверждена их сравнением с результатами теоретическими и в других программных продуктах.

Использование результатов исследований

1. Получено 8 свидетельств о регистрации программ для ЭВМ.

2. Результаты квазистатического моделирования меандровых линий представлены в технических отчетах по ОКР «Разработка комплекса программных и технических средств для контроля информационных магистралей, обеспечения электромагнитной совместимости и исследования надёжности унифицированного ряда электронных модулей на основе технологии «система-на-кристалле» для систем управления и электропитания космических аппаратов связи, навигации и дистанционного зондирования Земли с длительным сроком активного существования», тема «УЭМ-ТУСУР», хоздоговор 95/10 от 24.11.2010 в рамках реализации Постановления 218 Правительства РФ.

3. Разработанное программное обеспечение и результаты исследований шины печатной платы системы автономной навигации использованы в ходе выполнения ОКР «Разработка принципов построения и элементов системы автономной навигации с применением отечественной специализированной элементной базы на основе наногетероструктурной технологии для космических аппаратов всех типов орбит», тема «САН», хоздоговор 96/12 от 16.11.2012 в рамках реализации Постановления 218 Правительства РФ. (Акт внедрения)

4. Оптимизация с помощью генетического алгоритма (ГА) использована в НИР «Разработка новых программных и аппаратных средств для моделирования и обеспечения электромагнитной совместимости радиоэлектронной аппаратуры» по проектной части государственного задания в сфере научной деятельности 8.1802.2014/К, 2014–2016 гг.

5. Исследования выявления экстремумов сигнала в шине печатной платы и результаты ее оптимизации использованы в НИР «Выявление новых подходов к совершенствованию обеспечения электромагнитной совместимости радиоэлектронной аппаратуры и моделирования систем активного зрения

роботов» по базовой части государственного задания Минобрнауки Российской Федерации №8.9562.2017/8.9, ТУСУР, Томск, 2017–2019 гг.

6. Разработанная математическая модель и модифицированный численный метод для выявления и локализации экстремумов сигнала в МПЛП и результаты их использования представлены в отчете о прикладных научных исследованиях (ПНИ) «Теоретические и экспериментальные исследования по синтезу оптимальной сети высоковольтного электропитания для космических аппаратов» (федеральная целевая программа (ФЦП) «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технического комплекса России на 2014–2020 годы», соглашение №14.574.21.0172 от 26.09.2017, 2017–2019 гг.).

7. Разработанное программное обеспечение использовано в НИР «Разработка программного модуля для динамической визуализации токов и электромагнитного поля печатной платы» по программе УМНИК, грант №3914ГУ1/2014 от 13.11.2014 г. и №10033ГУ2/2015 от 05.04.2016 г.

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

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

Использование результатов подтверждено 3-я документами.

Апробация результатов

Результаты исследований автора позволили подготовить заявки, победившие в следующих конкурсах:

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

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

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

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

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

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

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

Результаты докладывались и представлялись в материалах симпозиумов и конференций:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Публикации. По результатам исследований опубликовано 38 работ: 6 статей в журналах из перечня ВАК; 2 статьи в рецензируемом журнале; 9 докладов в трудах конференций, индексируемых WoS и Scopus; 8 свидетельств о регистрации программы для ЭВМ; 12 докладов и 1 тезисы в материалах

отечественных конференций. Без соавторов опубликовано 10 работ, в т.ч. 1 статья в журнале из перечня ВАК, 1 доклад в трудах конференции, индексируемой WoS и Scopus, 6 докладов и 1 тезисы в трудах отечественных конференций, 1 свидетельство о регистрации программы для ЭВМ.

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

Личный вклад. Результаты, сформулированные в положениях, выносимых на защиту, и составляющие научную новизну работы, получены автором лично. Вклад автора состоит в непосредственном участии в обработке и интерпретации данных численного моделирования, подготовке основных публикаций по тематике кандидатской диссертации. Разработка математических моделей и алгоритмов выполнена совместно с *Александром Михайловичем Заболоцким*. Программная реализация квазистатических моделей для вычисления временного отклика выполнена совместно с *Евгением Владимировичем Лежниным*. Исследования и моделирование экстремумов напряжения в меандровых линиях и шине печатной платы, в том числе с применением оптимизации, выполнены совместно с *Тимуром Тальгатовичем Газизовым* и *Антоном Олеговичем Белоусовым*. Некоторые результаты исследований получены совместно с соавторами опубликованных работ.

Краткое содержание работы. В гл. 1 выполнен обзор исследований и средств моделирования для обеспечения ЭМС РЭА, рассмотрены основные аналоги, приведен и обоснован выбор метода моделирования, представлены математические модели вычисления временного отклика, а также обоснование выбора метода оптимизации, сформулированы конкретные задачи и цель работы. В гл. 2 представлена разработанная математическая модель и алгоритмы для выявления и локализации экстремумов сигнала, приведены блок-схемы алгоритмов проведения вычислительного эксперимента, определения пути распространения импульса и поиска. В гл. 3, представлено описание модифицированного численного метода, блок-схема его алгоритма, а также его

применение для моделирования экстремумов сигнала в витке меандровой линии, и шине ПП радиоприемного устройства (РПУ) системы автономной навигации (САН), в т. ч. с использованием оптимизации с помощью ГА и эволюционной стратегии (ЭС). В гл. 4 представлено описание и структура комплекса программ и тестирование его возможностей. В заключении сделаны выводы по работе. Далее приведён список литературы. В приложении приведены копии подтверждающих документов.

1. ОБЗОР ПРОБЛЕМЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ В МНОГОПРОВОДНЫХ ЛИНИЯХ ПЕРЕДАЧИ

1.1. Актуальность моделирования

В настоящее время РЭА занимает важное место в нашей жизни. Она находит применение в самых различных сферах общества, а особенно, в управлении критичными системами, например в военной, атомной, транспортной и космической отраслях. Человечество становится все более зависимым от РЭА, что довольно опасно из-за уязвимости аппаратуры к воздействию электромагнитных помех, поскольку их уровни непрерывно возрастают (с ростом плотности размещения, компоновки и трассировки, а также ростом уровней и частот воздействия [1]), а уровни восприимчивости компонентов имеют тенденцию снижаться (с уменьшением запаса помехоустойчивости из-за снижения напряжения питания интегральных схем) [2]. Бесперебойное функционирование особенно важно для критичных систем, поскольку это связано с риском больших потерь, как материальных, так и человеческих. Все более расширяющееся использование цифровой аппаратуры и рост её быстродействия обострили проблему ЭМС на уровне ПП [3–7]. Примечательно, что она во многом определяется взаимовлияниями проводников ПП. Эти взаимовлияния довольно трудно контролировать, поскольку проводники, в общем случае, расположены произвольно. Однако существуют отдельные элементы ПП (например, многопроводные шины, спиральные индуктивности, линии задержки), которые отличаются спецификой трассировки, позволяющей контроль взаимовлияний и даже их усиление для улучшения характеристик этих элементов [8–12]. Тем не менее, из-за большого числа таких элементов на плате, большой площади отдельного элемента, а также сложной и протяженной формы, могут появиться их паразитные взаимовлияния с другими элементами [13].

Помимо помех, создаваемых полезными сигналами, следует уделить внимание и мощным преднамеренным электромагнитным импульсам

наносекундного и субнаносекундного диапазонов, поскольку они способны проникать в различную РЭА [14–16] и выводить ее из строя. Это, несомненно, важно как для ЭМС, так и для информационной безопасности (ИБ), поэтому рассматривать эти два раздела науки надо в комплексе: для оценки ситуации при проявлениях электромагнитного терроризма [17], при мощных электромагнитных воздействиях по сети электропитания [18] или для защиты специальных технических зданий от внешних электромагнитных воздействий [19]. Распространение таких сигналов в МПЛП хорошо исследовано [20]. Однако особенности распространения СКИ вдоль проводников с высокой плотностью межсоединений ПП изучены недостаточно, что может приводить к их неконтролируемому распространению [21, 22]. Выявление и локализация экстремумов сигнала важны, поскольку их результаты могут быть полезны для определения мест возможных паразитных взаимовлияний и излучений, чтобы своевременно принять меры по их устранению, для обеспечения ЭМС [23]. Кроме того, это может быть полезно для выявления более точных мест установки датчиков контроля полезных и мониторинга помеховых сигналов, что также важно для повышения помехозащищенности и надежности РЭА [24]. В частности, известны работы, где рассматривается подобная проблема: а именно исследовано соотношение наихудшего случая перекрестных помех в сети питания [25], а также выполнен анализ уровней перекрестных помех для устранения ложных срабатываний [26].

Для таких исследований целесообразно использовать не измерения, а компьютерное моделирование, поскольку необходимо получение форм сигнала в большом числе точек вдоль каждого проводника сложных структур [27–31]. Помимо этого, искажение сигнала импедансом измерителя сказывается на точности определения амплитуд напряжений [32, 33]. Большинство исследований проведено в частотной области, тогда как временной уделено меньше внимания. Между тем изучение процессов во временной области позволит усовершенствовать защиту от СКИ [34, 35]. Поэтому при проектировании РЭА

все более важной становится проблема обеспечения ЭМС, для чего необходимо предварительное моделирование целостности сигнала [36–39].

1.2. Аналоги

Активно развивается зарубежное ПО для моделирования ЭМС:

1. CST MICROWAVE STUDIO (CST MWS) [40]: представляет собой программу, предназначенную для быстрого и точного численного моделирования высокочастотных устройств (антенн, фильтров, ответвителей мощности, планарных и многослойных структур), а также анализа проблем целостности сигналов и ЭМС во временной и частотных областях с использованием прямоугольной или тетраэдральной сеток разбиения. Программа CST MWS использует метод конечного интегрирования (FIT) – достаточно общий подход, который сначала описывает уравнения Максвелла на пространственной сетке, с учетом закона сохранения энергии, а затем по ним формирует систему специфических дифференциальных уравнений, таких как волновое уравнение или уравнение Пуассона. Метод может быть реализован как во временной, так и в частотной областях. Кроме того, не накладываемся никаких ограничений на тип используемой сетки разбиения, наряду со структурированной сеткой в декартовой системе координат поддерживаются неортогональные сетки. Помимо этого, программный комплекс CST MWS обладает многофункциональной графической оболочкой, позволяющей визуализировать моделируемые физические процессы, для их более полного понимания пользователем.

2. FEKO [41]: представляет собой многофункциональную программную среду для численного электромагнитного моделирования, основанную на современных вычислительных технологиях и позволяющую решать широкий круг задач. FEKO основан на методе моментов (MoM) и был самым первым коммерческим пакетом, реализовавшим многоуровневый быстрый метод многополюсников (MLFMM) для решения задач большой размерности (Suite 4.2 в июне 2004 г.). В FEKO метод моментов используется совместно со следующими

технологиями моделирования: метод конечных элементов (FEM); методы физической оптики (PO); методы геометрической оптики (GO), основанные на лучевом распространении; универсальная теория дифракции. В FEKO реализовано графическое отображение диаграммы направленности излучения, форм токов и напряжений с возможностью частичной анимации.

3. AWR Microwave Office [42]: представляет собой универсальное решение для разработки всех видов радиочастотных и СВЧ-устройств, начиная от сложных СВЧ-сборок и заканчивая интегральными СВЧ-микросхемами. Обладающая интуитивно понятным пользовательским интерфейсом уникальная архитектура Microwave Office способна полностью интегрировать собственные высокоэффективные и новаторские программные средства со специализированными системами компаний-партнеров. Это способствует быстрому завершению стадии разработки любого высокочастотного продукта. Возможности Microwave Office: интерактивный ввод принципиальных схем и топологических описаний; моделирование линейных и нелинейных схем; электромагнитное моделирование; графическое отображение результатов на 3D модели; синтез, оптимизация и статистический анализ выхода годных; проверка соответствия схемы ее топологическому описанию; контроль топологии на удовлетворение технологическим ограничениям; использование многочисленных специализированных библиотек моделей для продукции ведущих фабрик по изготовлению микросхем.

4. ANSYS Workbench Platform [43]: позволяет объединить задачи вычислительной гидродинамики, теплообмена, механики деформируемого твердого тела и электромагнетизма в один комплексный многодисциплинарный проект. В платформу также интегрированы все современные технологии и инструменты для взаимодействия с CAD-системами, исправления дефектной геометрии, создания высококачественных сеток, пре- и пост-процессинга, что значительно облегчает работу специалиста и делает её максимально эффективной. В свою очередь, архитектура ANSYS Workbench является открытой, что

позволяет пользователю интегрировать собственные разработки в расчетную среду, тем самым расширяя ее возможности.

5. Empire XPU [44]: программный продукт основан на методе конечных разностей во временной области. Для создания структуры, в пакет EMPIRE XPU включен графический редактор, который поддерживает несколько форматов импорта и экспорта 3D-структур. Симулятор EMPIRE XPU можно применять для анализа планарных, многослойных и поверхностных схем, компонентов и антенн, многовыводных корпусов, волноводов, а также решения проблем целостности сигналов и ЭМС, с учетом внешней среды, в которой находится прибор. Сигналы во временной области, параметры распространения и анимированные картины полей генерируются с высокой точностью для широкого диапазона частот в рамках одного прогона симуляции. EMPIRE XPU имеет мощную графическую оболочку для понятного отображения результатов моделирования в удобном для пользователя виде.

Представленные программные продукты помимо своих возможностей моделирования ЭМС включают в себя многофункциональные графические оболочки, большое внимание уделяется визуализации и анимации процессов, протекающих внутри исследуемых конструкций, что дает пользователю максимально полную информацию о характере происходящих в них явлений. В частности, в некоторых программных комплексах (CST MWS, AWR Microwave office, FEKO) реализована динамическая визуализация, отображающая изменение диаграммы направленности в зависимости от частоты. Однако динамической визуализации результатов моделирования сигналов во временной области, распространяющихся вдоль проводников, не реализовано. А она необходима для более ясного понимания причин возникновения, выявления мест и способов уменьшения электромагнитных помех. Кроме того, ни в одном из этих программных комплексов не реализована возможность выявления и локализации экстремумов сигнала вдоль проводников МПП. Во всех рассмотренных выше программных продуктах используется электродинамический анализ, тогда как продукты, использующие квазистатический анализ, не обнаружены.

1.3. Подходы к моделированию

Рассмотрим общие подходы к моделированию межсоединений [45]. В общем случае распространение электрических сигналов в межсоединениях описывается уравнениями Максвелла. Поэтому строгое решение задачи вычислительного моделирования межсоединений требует численного решения уравнений Максвелла для граничных условий, определяемых конфигурацией межсоединений, при начальных значениях, задаваемых электрическими сигналами в межсоединениях. Такой анализ называется электродинамическим и используется при анализе межсоединений, как правило, только на высоких частотах [46], поскольку необходимые для этого вычислительные затраты оказываются крайне высокими даже для относительно простых конфигураций.

При статическом подходе делается упрощение, что в межсоединениях отсутствуют потери, дисперсия и высшие типы волн, и может распространяться только основная, поперечная волна. Тем самым уравнения Максвелла сводятся к телеграфным уравнениям, решение которых гораздо проще, но весьма точно для большинства практических межсоединений. Существует квазистатический подход, который допускает наличие небольших потерь в межсоединениях, и при распространении только поперечной волны получаются довольно точные результаты. В этом случае уравнения Максвелла сводятся к уравнению Пуассона для электростатического поля, из которого получают емкостные матрицы, затем с помощью телеграфных уравнений выражают токи и напряжения через эти матрицы. При таком подходе произвольная схема межсоединений представляется обобщенной схемной моделью, напряжения и токи в любой точке которой определяются из телеграфных уравнений для каждого отрезка МПЛП с учётом граничных условий на концах отрезка, задаваемых окончаниями. В результате, благодаря квазистатическому подходу, моделирование распространения электрических сигналов в межсоединениях делится на три задачи, решение которых можно искать независимо друг от друга:

1. Определение матриц параметров отрезков МПЛП.

2. Определение параметров неоднородностей.
3. Определение отклика схемы МПЛП на заданное воздействие.

Для анализа межсоединений ПП квазистатический подход имеет преимущество, поскольку схмотехнический анализ не всегда позволяет получить результаты достаточной точности, а электродинамический требует значительных вычислительных затрат. Теоретические основы квазистатического вычисления отклика для произвольной схемы из отрезков МПЛП описаны в работах [47, 48]. На основе данной теории разработаны алгоритмы вычисления временного отклика [49], которые позволяют вычислить значения токов и напряжений только в узлах схемы.

1.4. Математические модели для вычисления временного отклика произвольных схем многопроводных межсоединений

В данном разделе [49] рассматриваются основные уравнения, которые необходимы для анализа МПЛП, и приводятся алгоритмы двух моделей по вычислению временного отклика в МПЛП [47–50]. В работе рассмотрены линии передачи регулярные по длине при произвольном поперечном сечении. В таких линиях передачи с неоднородным диэлектрическим заполнением, а также при учете влияния потерь и их частотной зависимости, считается, что вдоль их проводников распространяются смешанные или гибридные волны (т.е. волны, которые представляют собой некоторую комбинацию ТЕ- и ТМ-волн). Однако при соответствующих размерах линии (т.е. при максимальных поперечных размерах, достаточно малых по сравнению с длиной волны для представляющей интерес составляющей наивысшей частоты) продольные составляющие напряженности поля будут много меньше поперечных составляющих [51]. Такие гибридные волны можно аппроксимировать ТЕМ-волнами, которые для большей точности следует называть квази-ТЕМ волнами. Поэтому далее всегда будет считаться, что в линии передачи распространяются квази-ТЕМ волны.

1.4.1. Решение волновых уравнений

Согласно теории цепей, напряжения и токи линии передачи при распространении ТЕМ-волн связаны телеграфными уравнениями [52]:

$$\frac{d}{dx} \mathbf{V} = -\mathbf{Z}\mathbf{I}, \quad (1.1)$$

$$\frac{d}{dx} \mathbf{I} = -\mathbf{Y}\mathbf{V}, \quad (1.2)$$

где \mathbf{I} и \mathbf{V} – матрицы-столбцы размера $N \times 1$ токов и напряжений в линиях, N – количество сигнальных проводников,

$$\mathbf{Z} = \mathbf{R} + j\omega\mathbf{L}, \quad (1.3)$$

$$\mathbf{Y} = \mathbf{G} + j\omega\mathbf{C}, \quad (1.4)$$

где j – мнимая единица, ω – угловая частота, \mathbf{C} – матрица размера $N \times N$ погонных коэффициентов электростатической индукции, \mathbf{L} – матрица размера $N \times N$ погонных коэффициентов электромагнитной индукции, \mathbf{G} – матрица размера $N \times N$ погонных проводимостей, \mathbf{R} – матрица размера $N \times N$ погонных сопротивлений. Из телеграфных уравнений получаем волновое уравнение

$$\frac{d^2}{dx^2} \mathbf{V} = (\mathbf{Z}\mathbf{Y})\mathbf{V}; \quad 0 < x < l. \quad (1.5)$$

Его решение ищется в виде

$$\mathbf{V}^m(x) = \mathbf{V}_0^m \exp(\pm \gamma_m x), \quad \mathbf{I}^m(x) = \mathbf{I}_0^m \exp(\pm \gamma_m x), \quad m=1, \dots, N. \quad (1.6)$$

Знак минус в (1.6) соответствует моде, распространяющейся вдоль оси x (падающая волна), а знак плюс соответствует моде, распространяющейся в противоположном направлении (отраженная волна) [52].

После подстановки (1.6) в уравнение (1.5) получаем систему относительно напряжений в линиях передачи [52]

$$(\mathbf{Z}\mathbf{Y} - \gamma_m^2 \mathbf{U})\mathbf{V}_0^m = 0, \quad (1.7)$$

нетривиальное решение которой возможно при условии

$$|\mathbf{Z}\mathbf{Y} - \gamma_m^2 \mathbf{U}| = 0, \quad (1.8)$$

где \mathbf{U} – единичная матрица размера $N \times N$, γ_m – значение погонной задержки для m -й моды.

Решением для (1.10) является N комплексных чисел γ_m^2 , которые называются собственными значениями [52]. Каждое собственное значение имеет соответствующий собственный вектор \mathbf{V}_0^m , который является решением для (1.7) и является уникальным для γ_m^2 . Вычисляя квадратный корень из γ_m^2 , получают коэффициент распространения для каждой m -ой моды, которые записываются в виде диагональной матрицы $\mathbf{\Gamma}$. Вычисленные собственные вектора \mathbf{V}_0^m записываются в столбцы матрицы \mathbf{S}_V , которая называется матрицей модальных напряжений, а \mathbf{S}_I – матрица модальных токов, столбцы которой являются векторами \mathbf{I}_0^m . Эти модальные матрицы связаны уравнением

$$\mathbf{S}_I = \mathbf{Z}^{-1} \mathbf{S}_V \mathbf{\Gamma}. \quad (1.9)$$

Напряжения и токи линии передачи в любой точке x можно записать как суммы падающей (i) и отраженной (r) волн [52]:

$$\mathbf{V}(x) = \mathbf{V}_i(x) + \mathbf{V}_r(x) = \mathbf{S}_V (\mathbf{E}(x) \mathbf{C}_1 + \mathbf{E}(x)^{-1} \mathbf{C}_2), \quad (1.10)$$

$$\mathbf{I}(x) = \mathbf{I}_i(x) - \mathbf{I}_r(x) = \mathbf{S}_I (\mathbf{E}(x) \mathbf{C}_1 - \mathbf{E}(x)^{-1} \mathbf{C}_2), \quad (1.11)$$

$$\mathbf{E}(x) = \text{diag}(\exp(-\gamma_1 x), \exp(-\gamma_2 x), \dots, \exp(-\gamma_N x)), \quad (1.12)$$

где \mathbf{C}_1 и \mathbf{C}_2 – векторы констант, описывающие величины мод.

Матрица характеристического импеданса \mathbf{Z}_C линии определяется соотношениями:

$$\mathbf{V}_i(x) = \mathbf{Z}_C \mathbf{I}_i(x); \quad \mathbf{V}_r(x) = -\mathbf{Z}_C \mathbf{I}_r(x), \quad (1.13)$$

из которых следует

$$\mathbf{Z}_C = \mathbf{S}_V \mathbf{S}_I^{-1} = \mathbf{S}_V \mathbf{\Gamma}^{-1} \mathbf{S}_V^{-1} \mathbf{Z}. \quad (1.14)$$

Матрицу характеристического адмитанса линии \mathbf{Y}_C можно вычислить как $\mathbf{Y}_C = \mathbf{Z}_C^{-1}$ [52].

1.4.2. Уравнения для отрезка многопроводной линии передачи

Матрицы параметров и выражения, описанные в разделе 1.4.1, используются для формирования системы уравнений для отрезка многопроводной линии передачи. Для моделей Джорджевича [47] и Накхлы [48] используются соотношения для напряжений и токов на ближнем ($x=0$) и дальнем ($x=l$) концах, полученные из (1.10) и (1.11) в виде [52]:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{V}(0) \\ \mathbf{V}(l) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{S}_V & \mathbf{S}_V \\ \mathbf{S}_V \mathbf{E}(l) & \mathbf{S}_V [\mathbf{E}(l)]^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{C}_1 \\ \mathbf{C}_2 \end{bmatrix}, \quad (1.15)$$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{I}(0) \\ \mathbf{I}(l) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{S}_I & -\mathbf{S}_I \\ \mathbf{S}_I \mathbf{E}(l) & -\mathbf{S}_I [\mathbf{E}(l)]^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{C}_1 \\ \mathbf{C}_2 \end{bmatrix}. \quad (1.16)$$

Для вычисления напряжений или токов по модели Джорджевича [51] вначале необходимо вычислить \mathbf{C}_1 и \mathbf{C}_2 , используя матричное соотношение (раздел 1.4.3), которое описывает произвольные соединительные и оконечные цепи в рассматриваемой схеме. Затем, подставляя \mathbf{C}_1 и \mathbf{C}_2 в (1.17)–(1.20), получают напряжения и токи на ближнем и дальнем концах линии передачи [52]:

$$\mathbf{V}(0) = \mathbf{S}_V (\mathbf{C}_1 + \mathbf{E}(l) \mathbf{C}_2); \quad (1.17)$$

$$\mathbf{V}(l) = \mathbf{S}_V (\mathbf{E}(l) \mathbf{C}_1 + \mathbf{C}_2); \quad (1.18)$$

$$\mathbf{I}(0) = \mathbf{Y}_c \mathbf{S}_I (\mathbf{C}_1 - \mathbf{E}(l) \mathbf{C}_2); \quad (1.19)$$

$$\mathbf{I}(l) = \mathbf{Y}_c \mathbf{S}_I (\mathbf{E}(l) \mathbf{C}_1 - \mathbf{C}_2); \quad (1.20)$$

В модели Накхлы [48] константы \mathbf{C}_1 , \mathbf{C}_2 в (1.15) и (1.16) исключаются, в результате получается

$$\begin{bmatrix} \mathbf{I}(0) \\ \mathbf{I}(l) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{S}_I & -\mathbf{S}_I \\ \mathbf{S}_I \mathbf{E}(l) & -\mathbf{S}_I [\mathbf{E}(l)]^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{S}_V & \mathbf{S}_V \\ \mathbf{S}_V \mathbf{E}(l) & \mathbf{S}_V [\mathbf{E}(l)]^{-1} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \mathbf{V}(0) \\ \mathbf{V}(l) \end{bmatrix}, \quad (1.21)$$

Принимая во внимание, что для представления линии передачи в виде \mathbf{Y} -параметров необходимо, чтобы все токи на концах линии втекали в неё, $\mathbf{I}(l)$ умножается на -1 и (1.21) запишется в виде [52]:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{I}(0) \\ -\mathbf{I}(l) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{S}_I \mathbf{E}_1 \mathbf{S}_V^{-1} & \mathbf{S}_I \mathbf{E}_2 \mathbf{S}_V^{-1} \\ \mathbf{S}_I \mathbf{E}_2 \mathbf{S}_V^{-1} & \mathbf{S}_I \mathbf{E}_1 \mathbf{S}_V^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{V}(0) \\ \mathbf{V}(l) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{Y}_{11} & \mathbf{Y}_{12} \\ \mathbf{Y}_{21} & \mathbf{Y}_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{V}(0) \\ \mathbf{V}(l) \end{bmatrix}, \quad (1.22)$$

где

$$\mathbf{E}_1 = \text{diag} \left\{ \frac{1 + e^{-2\gamma_k l}}{1 - e^{-2\gamma_k l}} \right\}; \quad \mathbf{E}_2 = \text{diag} \left\{ \frac{2}{e^{-\gamma_k l} - e^{\gamma_k l}} \right\}, \quad k=1, 2, \dots, N. \quad (1.23)$$

Полученная матрица проводимости в дальнейшем подставляется в уравнение модифицированного узлового метода (раздел 1.4.3), который используется для вычисления отклика схемы [52].

1.4.3. Уравнения схемы для моделирования отклика

Модели, описанные в разделе 1.4.2, позволяют выполнить моделирование для линий передачи, оканчивающихся произвольным образом. Например, проводник линии может быть закорочен на землю, оставлен на холостом ходу, оканчиваться произвольным импедансом, управляться генератором, или он может быть присоединён к проводнику, принадлежащему к этой же или другой линии передачи [52].

В модели Джорджевича [47] узлы соединительных и оконечных цепей разделяются на две группы. Первая охватывает узлы, соединяющие линии передачи, которые называются внешними узлами, вторая группа охватывает все остальные узлы, которые называются внутренними. Число внешних узлов, обозначенное X , для цепи равно общему числу проводников всех линий передачи, присоединённых к этой цепи. Поскольку цепь линейна, то справедливо матричное соотношение [52]:

$$\mathbf{P}\mathbf{V} + \mathbf{Q}\mathbf{I} = \mathbf{E} \quad (1.24)$$

где \mathbf{V} – вектор размера X напряжений между внешними узлами цепи и землей, \mathbf{I} – вектор размера X токов между внешними узлами цепи и землей, \mathbf{P} и \mathbf{Q} – квадратные матрицы размера $X \times X$, \mathbf{E} – вектор размера X . Уравнение (1.24) включает описание цепи Z -параметрами и Y -параметрами. В случае описания Z -параметрами получаем $\mathbf{P}=\mathbf{U}$, $\mathbf{Q}=\mathbf{Z}$ и $\mathbf{E}=\mathbf{V}_0$, где \mathbf{V}_0 – вектор напряжения холостого хода. Это, в сущности, эквивалентное представление схемы по Тевенину. В

случае описания через Y -параметры: $\mathbf{P}=\mathbf{Y}$, $\mathbf{Q}=\mathbf{U}$ и $\mathbf{E}=\mathbf{I}_0$, где \mathbf{I}_0 – вектор токов короткого замыкания, это эквивалентное преобразование Нортонa [52].

Уравнением (1.24) можно описать любой тип цепи, в отличие от Z -параметров и Y -параметров. А именно, Z -параметры не могут быть определены при наличии цепей на холостом ходу, а Y -параметры – для коротко замкнутых цепей [52]. Для цепей, которые не содержат внутренних узлов, уравнение (1.24) получается записью узловых уравнений. Эти уравнения должны включать токи, вытекающие из цепи, а узловые напряжения в этих уравнениях совпадают с элементами вектора \mathbf{V} . Для цепей, не имеющих внутренних контуров (т.е. замкнутых путей по ответвлениям, которые полностью лежат внутри цепи), (1.24) получается из контурных уравнений. В этом случае, контурные токи совпадают (с точностью до знака) с элементами вектора \mathbf{I} . Чтобы вычислить \mathbf{C}_1 и \mathbf{C}_2 , необходимо в вектор \mathbf{V} уравнения (1.24) подставить уравнения (1.17), (1.18), а в \mathbf{I} подставить (1.19), (1.20) и решить эту систему уравнений. (Число неизвестных равно удвоенному общему числу проводников всех линий.) Затем надо подставить \mathbf{C}_1 и \mathbf{C}_2 в (1.17)–(1.20) и вычислить напряжения или токи в начале и конце линий передачи [52].

Для описания элементов схемы в модели Накхлы [48] используется модифицированный метод узловых потенциалов. Уравнение модифицированного узлового метода в частотной области, для линейных элементов схемы и n отрезков МПЛП, имеет вид [52]:

$$\left(s\mathbf{W} + \mathbf{H} + \sum_{k=1}^n \mathbf{D}_k \mathbf{Y}_k \mathbf{D}_k^t \right) \mathbf{V} = \mathbf{E}, \quad (1.25)$$

где $s=j\omega$; \mathbf{W} , \mathbf{H} – матрицы размера $A \times A$, описывающие произвольные оконечные и соединительные схемы из активных и реактивных элементов (A – количество параметров, вычисляемых в модифицированном методе узловых потенциалов); \mathbf{D}_k – матрица-селектор, отображающая токи, входящие в k -ю линию, с элементами $d_{i,j} \in \{0, 1\}$, где $i \in \{1, \dots, A\}$, $j \in \{1, \dots, m_k\}$ с одним ненулевым значением в каждом столбце, $m_k=2N_k$ – количество токов, входящих в k -ю линию, где N_k – число проводников k -й линии; \mathbf{Y}_k – матрица проводимостей для k -й линии из (1.22); \mathbf{V} –

вектор узловых напряжений и токов; \mathbf{E} – вектор, состоящий из независимых источников напряжения или токов.

1.4.4. Алгоритмы для вычисления временного отклика в многопроводных линиях передачи

В разделе приведены алгоритмы для двух моделей, описанных в разделах 1.4.2, 1.4.3, позволяющие выполнять вычисление отклика в частотной и временной областях [49].

Алгоритм по модели Джорджевича [51]:

1. Ввод входных данных: параметров отрезков линий передачи и параметров воздействий, значений элементов матриц \mathbf{P} , \mathbf{Q} и \mathbf{E} для каждой соединительной и оконечной цепи.

2. Вычисление спектров воздействий (прямое быстрое преобразование Фурье (БПФ)).

3. Вычисление для каждого отрезка МПЛП и каждой частоты спектра воздействий диагональной матрицы погонных задержек для каждой моды ($\mathbf{\Gamma}$), матриц \mathbf{S}_I , \mathbf{S}_V , матрицы, состоящей из характеристических импедансов линий передачи (\mathbf{Z}_C), матрицы характеристического адмитанса линии (\mathbf{Y}_C) и вектора $\mathbf{E}(l)$, подстановкой данных из п. 1 в (1.3), (1.4), (1.8), (1.9), (1.12), (1.14).

4. Решение матрично-векторного уравнения

$$\begin{aligned}
\begin{bmatrix} \mathbf{C}_1^1 \\ \mathbf{C}_2^1 \\ \dots \\ \mathbf{C}_1^n \\ \mathbf{C}_2^n \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \mathbf{P}^1 & \vdots & \mathbf{0} \\ \dots & \dots & \dots \\ \mathbf{0} & \vdots & \mathbf{P}^n \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{S}_V^1 & \mathbf{S}_V^1 \mathbf{E}(l)^1 & \vdots & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{S}_V^1 \mathbf{E}(l)^1 & \mathbf{S}_V^1 & \vdots & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \vdots & \mathbf{S}_V^n & \mathbf{S}_V^n \mathbf{E}(l)^n \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \vdots & \mathbf{S}_V^n \mathbf{E}(l)^n & \mathbf{S}_V^n \end{bmatrix} + \\
&+ \begin{bmatrix} \mathbf{Q}^1 & \vdots & \mathbf{0} \\ \dots & \dots & \dots \\ \mathbf{0} & \vdots & \mathbf{Q}^n \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} -\mathbf{Y}_C^1 \mathbf{S}_V^1 & \mathbf{Y}_C^1 \mathbf{S}_V^1 \mathbf{E}(l)^1 & \vdots & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{Y}_C^1 \mathbf{S}_V^1 \mathbf{E}(l)^1 & -\mathbf{Y}_C^1 \mathbf{S}_V^1 & \vdots & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \vdots & -\mathbf{Y}_C^n \mathbf{S}_V^n & \mathbf{Y}_C^n \mathbf{S}_V^n \mathbf{E}(l)^n \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \vdots & \mathbf{Y}_C^n \mathbf{S}_V^n \mathbf{E}(l)^n & -\mathbf{Y}_C^n \mathbf{S}_V^n \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \mathbf{E}^1 \\ \dots \\ \mathbf{E}^n \end{bmatrix}.
\end{aligned}$$

где n – количество отрезков МПЛП.

5. Вычисление напряжения и тока на концах линий ($\mathbf{V}(0)$, $\mathbf{V}(l)$ и $\mathbf{I}(0)$, $\mathbf{I}(l)$), подставляя \mathbf{C}_1^n и \mathbf{C}_2^n в (1.17)–(1.20).

6. Вычисление временной формы отклика (обратное БПФ).

7. Вывод результатов.

Алгоритм по модели Накхлы [48]

1. Ввод входных данных: параметров отрезков линий передачи и параметров источников воздействий; числа узлов схемы и источников сигнала; значений элементов \mathbf{D} (матрицы входных токов) для каждого отрезка линий передачи; значений элементов матриц \mathbf{W} , \mathbf{G} , \mathbf{E} .

2. Вычисление спектра воздействий (прямое БПФ).

3. Вычисление $\mathbf{\Gamma}$, \mathbf{S}_V , \mathbf{S}_I , \mathbf{E}_1 , \mathbf{E}_2 , \mathbf{Y} для каждого отрезка линии передачи, подстановкой данных из п. 1 в (1.3), (1.4), (1.8), (1.9), (1.23), (1.22).

4. Решение матрично-векторного уравнения

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

5. Вычисление временной формы отклика (обратное БПФ).

6. Вывод результатов.

В работе [52] выполнено качественное сравнение представленных моделей, в результате которого для реализации компьютерного моделирования выбрана

модель Накхлы. Поэтому для разработки математической модели, численного метода и комплекса программ решено использовать эту же модель.

1.5. Методы оптимизации

Проблема оптимизации сложных систем, к которой сводятся многие социально-экономические, технические, организационно-управленческие, комбинаторные задачи и задачи теории игр, становится одной из ведущих в мире искусственного интеллекта [53]. Она часто представима в виде целевой функции (ЦФ), которую необходимо оптимизировать (причем она не всегда задана аналитическим путем, а иногда задана и в виде «черного ящика»), и некоторого набора начальных данных и ограничений на решение. Этому представлению соответствуют и задача о путешествующем коммивояжере, и задача об оптимальном размещении, и задачи нахождения динамического баланса, и многие другие задачи из соответствующих областей. Для большинства таких задач детерминированные методы решения неприемлемы или не обеспечивают необходимой степени точности [54]. Поэтому необходим альтернативный подход – использование эволюционных методов глобальной оптимизации [55].

ГА относятся к группе эвристических методов, которые используются для решения проблем поиска и оптимизации. Они сочетают в себе элементы детерминированного и стохастического подходов. В силу этого ГА успешно применяются в комбинациях с аналитическими методами или другими алгоритмами поиска и оптимизации [56–59]. В основе ГА лежит принцип естественного отбора (выживания сильнейшего или наиболее приспособленного). В процессе поиска анализируются сразу несколько ветвей эволюции. Применяя так называемую «функцию приспособленности», определяющую насколько хорошо найденное решение проблемы и выполняющую роль окружающей среды при моделировании эволюционного процесса, ГА «выращивают» новые популяции объектов, генная структура которых более приспособлена к текущей

ситуации. Таким образом, генетическая модель имитирует эволюцию приспособления через механизмы изменчивости объектов [60].

Известно, что использование ГА в задачах электродинамики и распространения радиоволн получило большое распространение среди исследователей. С каждым годом все больше работ, посвященных этой тематике, появляется в высокоцитируемых международных изданиях. Так, поиск в базе Scopus дает 65762 публикации по результатам конференций и 94510 журнальных статьи, связанных с ГА, с 1977 по 2016 год [61], что существенно превышает количество работ, где используются другие эволюционные методы. В этой же работе показано (рисунок 1.1) количество журнальных статей и материалов конференций, найденных по ключевым словам «ГА» и «антенны» [61].

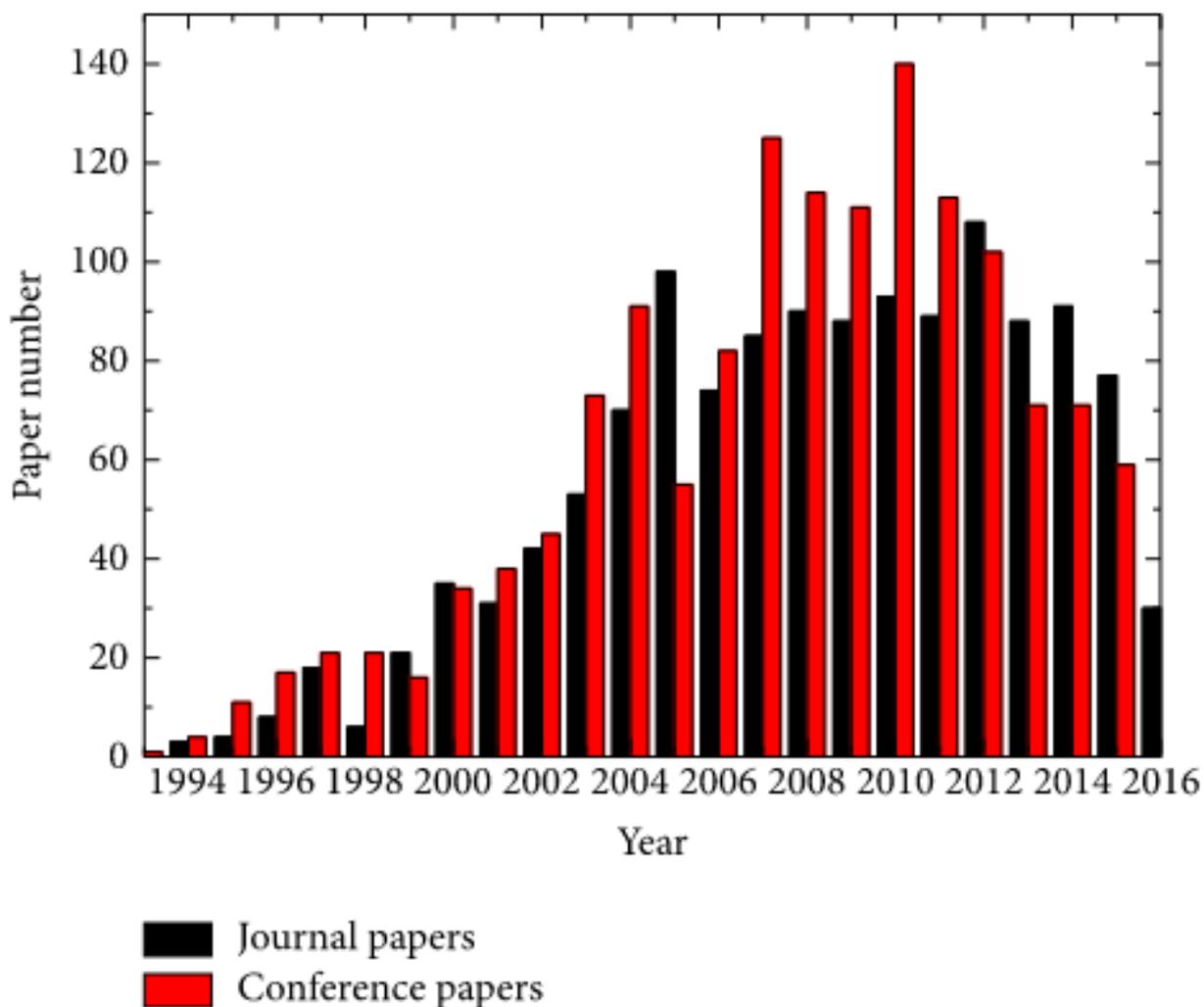


Рисунок 1.1 – Публикации с использованием ГА
в задачах моделирования антенн с 1993 г. по май 2016 г. [61]

На рисунках 1.2 и 1.3 приведена аналогичная информация для других популярных методов оптимизации: метода роя частиц (Practical swarm optimization – PSO) и метода дифференциальной эволюции (Differential evolution – DE) [61].

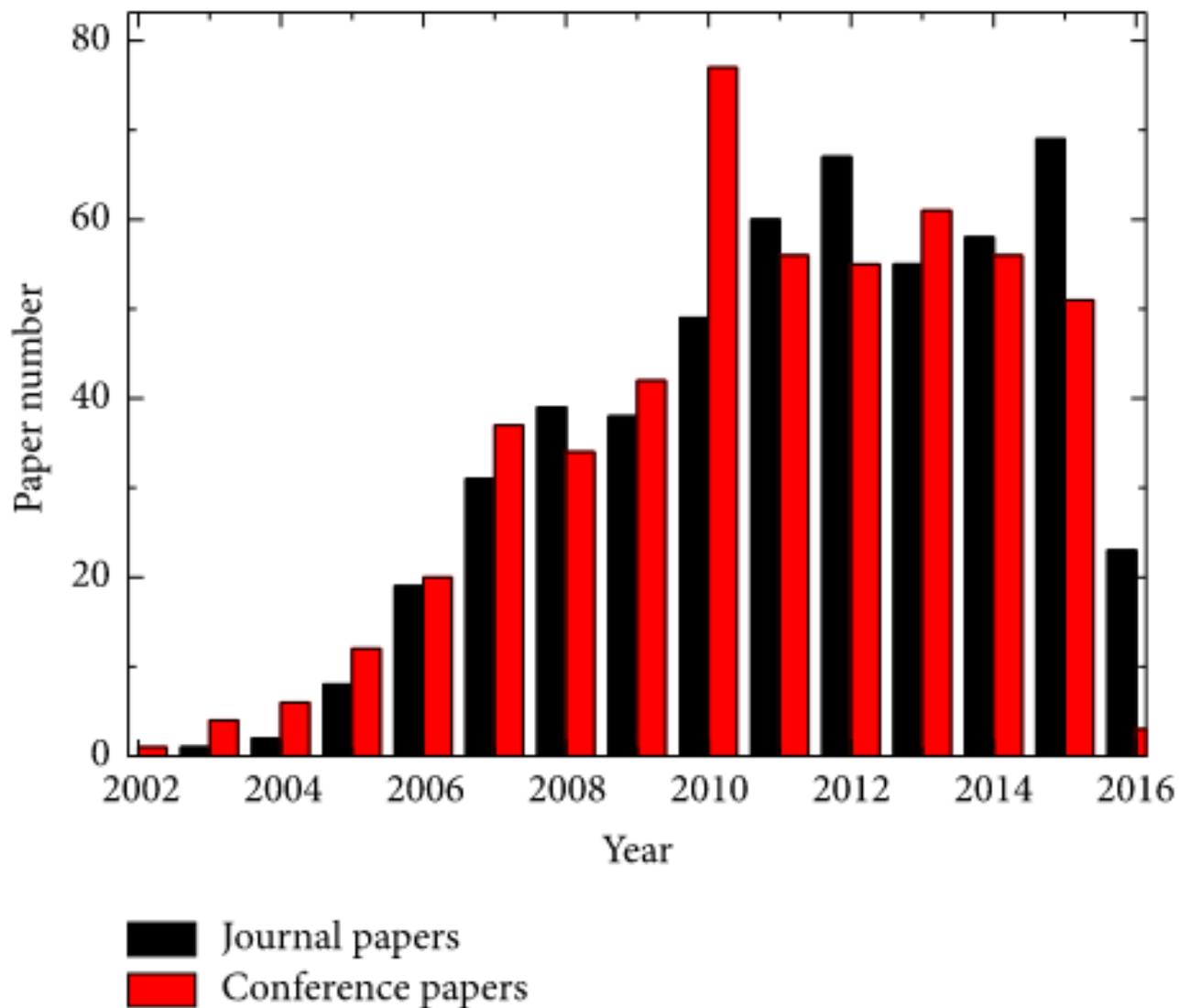


Рисунок 1.2 – Публикации с использованием PSO в задачах моделирования антенн с 2002 г. по май 2016 г. [61]

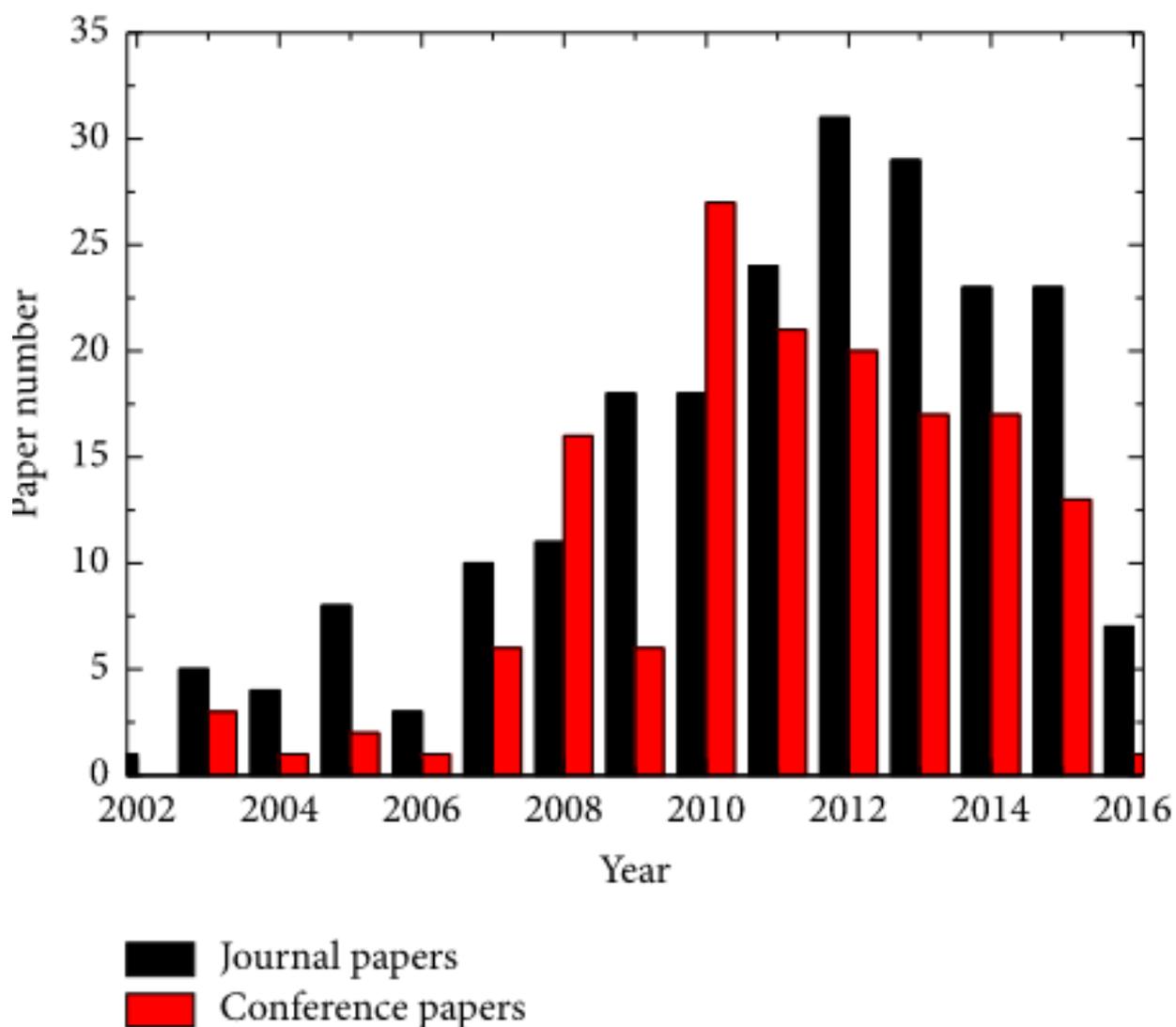


Рисунок 1.3 – Публикации с использованием DE

в задачах моделирования антенн с 2002 г. по май 2016 г. [61]

Как видно из рисунков 1.1–1.3, количество публикаций с использованием ГА значительно больше, чем с другими методами оптимизации, и, соответственно, ГА являются наиболее популярными эволюционными алгоритмами (ЭА). ГА основаны на теории естественного отбора Дарвина. Они могут использовать реальное или двоичное кодирование. В двоичном кодировании каждая хромосома кодируется бинарной строкой [62]. Наиболее часто используемые операторы: кроссовер, мутация и отбор. Оператор отбора выбирает две хромосомы родителей из текущей популяции в соответствии со стратегией отбора. Наиболее популярными стратегиями отбора являются «рулетка» и «турнирный отбор». Оператор кроссовера комбинирует две родительские хромосомы, чтобы получить новую дочернюю хромосому.

Оператор мутации применяется с предустановленной вероятностью к дочерней хромосоме. Известны работы, в которых используется оптимизация с помощью ГА при моделировании целостности сигнала. В частности, выполнена оптимизация формы сверхкоротких импульсных сигналов на основе атомарных функций [63]; рассмотрена оптимизация кольцевой микрополосковой антенны [64]; представлен точный и надежный ГА для оценки частоты сигналов системы электропитания [65]; выполнено проектирование схемы из линий задержки с использованием ГА для минимизации перекрестной наводки [66]; выполнена оптимизация проекционной матрицы для разреженных сигналов в структурированных помехах [67].

Методика оптимизации ЭМС бортовой аппаратуры космических аппаратов (БА КА) [68], на основе которой реализован модуль оптимизации в системе TALGAT, приведена на рисунке 1.4.

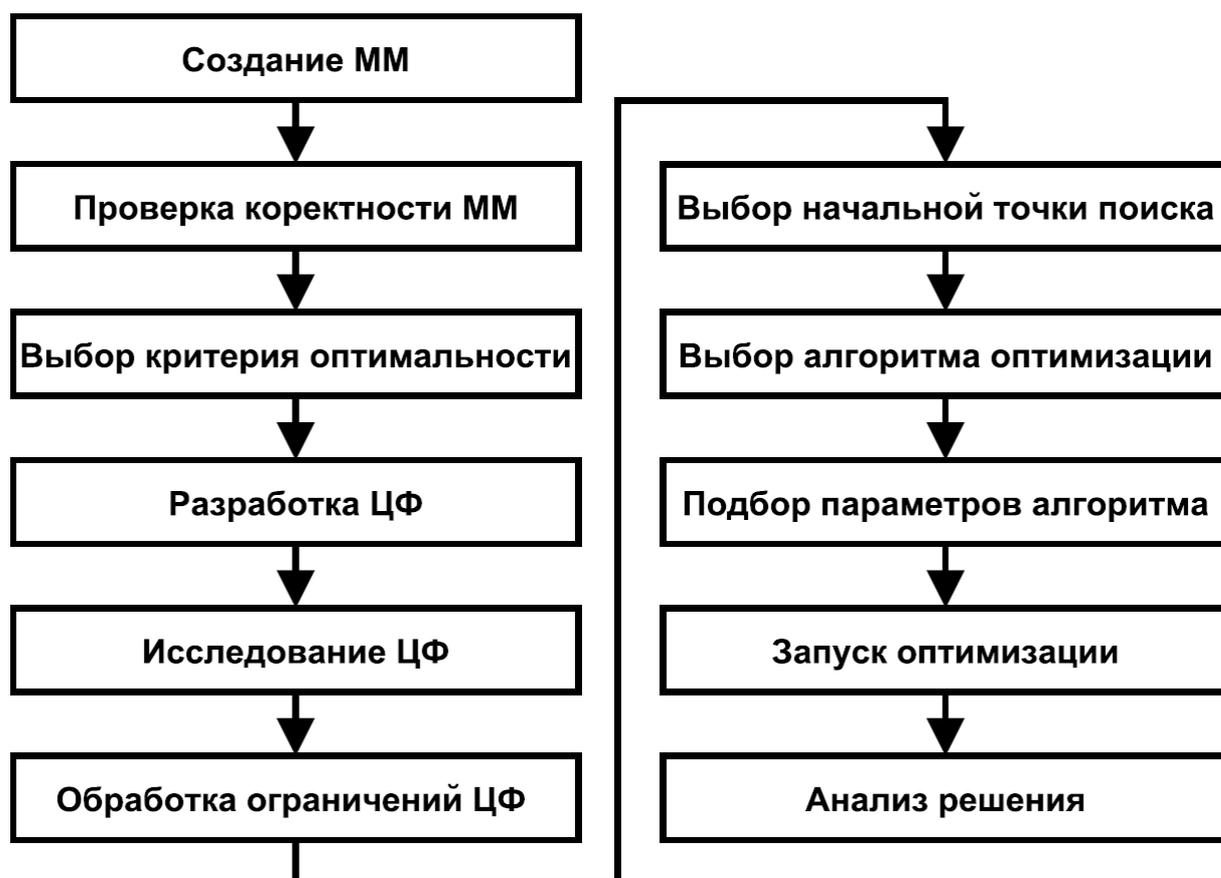


Рисунок 1.4 – Методика оптимизации ЭМС БА КА

Представленная методика включает в себя следующие этапы:

1. Создание математической модели (ММ) составной части унифицированного электронного модуля (описание с помощью языка скриптов, графический ввод средствами визуального клиента системы TALGAT или импорт из формата системы автоматизированного проектирования (САПР)).

2. Проверка корректности ММ путем моделирования в диапазоне параметров и сравнения результатов моделирования с контрольными значениями (в качестве контрольных значений используются результаты измерений, опубликованные данные, результаты моделирования в других программных продуктах, вычисления по аналитическим формулам).

3. Определение критерия оптимальности параметров ММ (в случае нескольких критериев необходимо либо выполнить скаляризацию задачи оптимизации, либо использовать алгоритмы многокритериальной оптимизации).

4. Разработка ЦФ в виде динамической команды языка скриптов системы TALGAT с повторным использованием разработанного на этапе 1 кода ММ (в качестве результата ЦФ должна возвращать вещественное число).

5. Исследование характеристик и оценка сложности ЦФ путем сбора статистических данных о ее свойствах, построения одномерных или двумерных графиков зависимости значений ЦФ от одного или двух параметров при фиксированных остальных параметрах (фиксированные значения параметров выбираются либо на основании экспертных рекомендаций, либо из середины диапазона допустимых значений; при необходимости, в частности в случае большой сложности рельефа ЦФ, большого количества локальных экстремумов, используется несколько наборов фиксированных значений).

6. Обработка ограничений ЦФ. В задачах ЭМС в большинстве случаев параметры имеют двусторонние ограничения, которые могут обрабатываться с помощью штрафных функций или функций-декодеров (если границы значений различных параметров отличаются на несколько порядков, для алгоритмов оптимизации с адаптивным шагом может применяться преобразование значений параметров ЦФ в диапазон $[0, 1]$ с целью ускорения сходимости на

первоначальном этапе оптимизации; в этом случае ЦФ выполняет обратное преобразование параметров из диапазона $[0, 1]$ в исходный диапазон).

7. Выбор начальной точки поиска: использование генераторов случайных чисел, выборки латинского гиперкуба, рекомендаций экспертов, результатов предыдущих запусков алгоритма оптимизации, полученных на этапе 5 сведений о рельефе ЦФ (для таких популяционных алгоритмов оптимизации, как ЭС и ГА, возможен выбор нескольких начальных точек поиска).

8. Выбор алгоритма оптимизации на основании характеристик ЦФ, результатов запусков алгоритмов оптимизации для небольшого количества итераций или упрощенных версий ЦФ (упрощение ЦФ выполняется путем фиксации параметров, снижения точности ММ, использования менее точных алгоритмов моделирования и решения системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ), уменьшения количества рассматриваемых точек в случае применения в ЦФ анализа во временном или частотном диапазоне).

9. Подбор параметров алгоритма оптимизации: использование рекомендованных в литературе значений, выбор значений на основании эмпирических данных, вычисление по аналитическим формулам, автоматический выбор параметров, реализуемый за счет использования эволюционных алгоритмов.

10. Запуск алгоритма оптимизации. Если используемый компьютер имеет многоядерную и/или многопроцессорную архитектуру, то система TALGAT позволяет сократить время оптимизации за счет вычисления ЦФ в несколько потоков.

11. Анализ полученного решения задачи оптимизации: при необходимости, построение графиков изменения значений ЦФ в процессе оптимизации для оценки сходимости алгоритма, статистический анализ чувствительности найденного оптимального решения к отклонениям реальных параметров от расчетных, например, с помощью метода Монте-Карло.

В работе [60] выполнен детальный обзор методов оптимизации, где выделено два наиболее актуальных, применительно к проблеме оптимизации

радиоэлектронных устройств: ГА и ЭС. Поэтому помимо ГА в данной работе будет использована ЭС.

1.5.1. Описание и схема работы генетического алгоритма

ГА использует ЦФ (которую задаёт пользователь), чтобы вычислить степень «приспособленности» каждого индивида к выживанию [60]. Чтобы решить поставленную задачу, используя ГА, необходимо:

- определить представление чисел;
- выбрать операторы и задать параметры ГА;
- задать ЦФ.

ГА определяет, какие индивиды должны выжить, какие – участвовать в скрещивании, а какие – умереть. Также ГА определяет, как долго будет длиться процесс эволюции. Обычно ГА не имеет четкого условия останова. Необходимо задать критерий завершения работы, часто таким критерием является количество поколений или вырождение популяции, т.е. если практически нет разнообразия в генах особей популяции, либо задано время работы. Алгоритм работы ГА представлен на рисунке 1.5.

Каждый геном имеет три основных оператора: инициализация, мутация, кроссовер. Использование этих операторов позволяет влиять на начальную популяцию, определить особенности мутации и кроссовера для задачи, либо изменять части ГА по мере развития популяции.

Оператор инициализации определяет, как будет инициализирован геном. Он вызывается, когда инициализируется популяция или ГА. Этот оператор не создает геном, скорее он «наполняет» геном первоначальным генетическим материалом, из которого будут получены все решения, часто в его основе лежит какой-либо генератор случайных чисел. Класс популяции имеет свой оператор инициализации. По умолчанию, в популяции просто вызывается оператор инициализации генома, но можно вызывать любой оператор инициализации.

Оператор мутации определяет процесс мутации каждого генома. В разных типах данных мутация действует по-разному. Например, типичный оператор мутации, примененный к бинарной строке, проинвертирует биты в строке с заданной вероятностью.

Оператор кроссовера определяет процедуру создания «ребенка» от двух «родителей» генома. Как и у оператора мутации, действие оператора кроссовера зависит от типа данных. В отличие от мутации, кроссовер включает множество геномов.

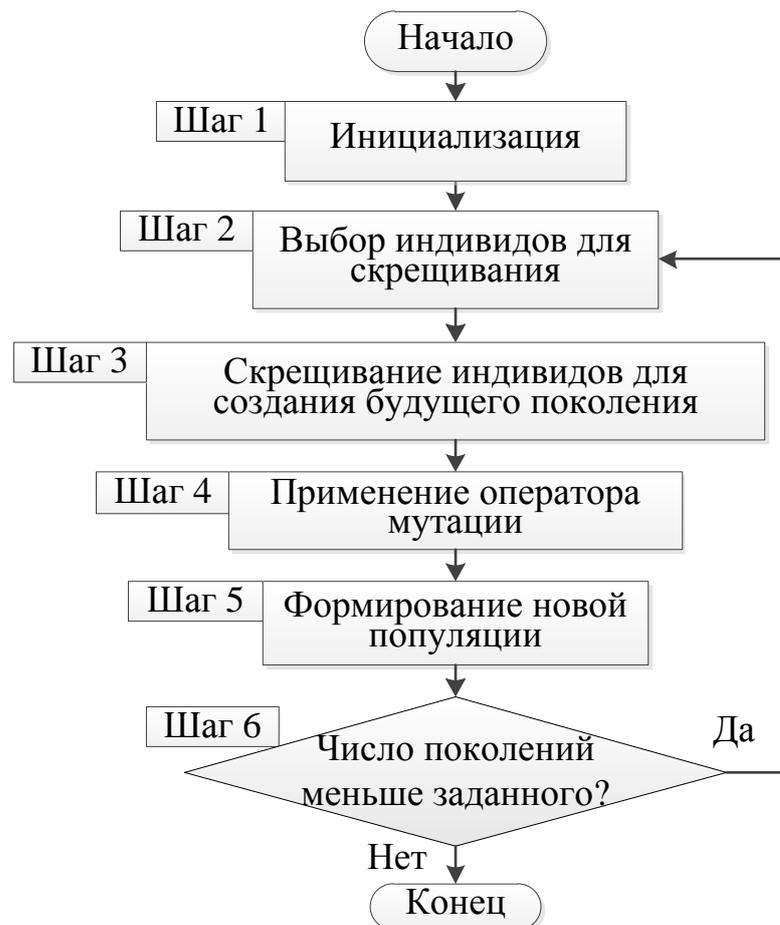


Рисунок 1.5 – Алгоритм работы ГА [60]

1.5.2. Описание и алгоритм эволюционной стратегии

Задачей ЭС является минимизация ЦФ $F(x_1, x_2, \dots, x_n)$, где x_i – вещественные переменные ($i=1, 2, \dots, n$). В ЭС каждая особь характеризуется [69]:

- ЦФ, которая зависит от оптимизационной задачи.

- Строкой-хромосомой, включающей:

1. вектор $\mathbf{X} (x_1, x_2, \dots, x_n)$, который представляет собой некоторое решение оптимизационной задачи;
2. среднеквадратическое отклонение (шаг мутации) $\sigma (\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_m)$, $1 \leq m \leq n$, от которого зависит величина мутации;
3. угол ротации $\alpha (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_k)$, $\alpha_j \in [-\pi, \pi]$, $k = n \cdot \frac{n-1}{2}$, который является необходимым параметром для реализации коррелируемой мутации, позволяющей учитывать ландшафт ЦФ.

В процессе работы алгоритма ЭС происходит адаптация значений шага мутации и угла ротации [70].

Рассмотрим общую схему алгоритма ЭС [71]:

1. *Инициализация.* Задается начальная популяция из μ особей. В большинстве случаев используется случайная генерация популяции по равномерному закону распределения (в работе использовалось значение $4 + 3 \cdot \log(N)$). Значение шага мутации задается, как правило, разработчиком. Значение угла ротации выбирается случайным образом на интервале $[-\pi, \pi]$ с помощью равномерного закона распределения.

2. *Скрещивание.* Результатом данного шага является генерация λ потомков из μ родителей ($\mu = \frac{\lambda}{2}$). Для получения одного потомка сначала происходит случайный выбор двух родителей из популяции с вероятностью $\frac{1}{\mu}$ для каждого. Затем осуществляется рекомбинация, при которой потомок наследует фенотипические признаки родителей.

3. *Мутация.* Реализуется мутация λ потомков. Сначала производится изменение параметров стратегии: шага мутации с помощью логнормального закона распределения и угла ротации с помощью нормального закона распределения. После этого реализуется мутация переменных решения на основе случайного вектора, полученного с помощью измененных параметров ЭС:

$$\sigma'_i = \sigma_i \cdot \exp(\tau' \cdot N(0,1) + \tau \cdot N_i(0,1));$$

$$\alpha'_j = \alpha_j + \beta \cdot N(0,1);$$

$$x' = x + N(0, C');$$

где $N(0,1)$ – значение случайной величины, полученное с помощью нормального закона распределения с математическим ожиданием 0 и среднеквадратическим отклонением 1; τ' – постоянный коэффициент (рекомендуемая величина:

$\tau' \approx \frac{1}{\sqrt{2n}}$; τ – коэффициент, варьируемый при каждой мутации (рекомендуемая

величина: $\tau' \approx \frac{1}{\sqrt{2\sqrt{n}}}$; β^o – постоянный коэффициент (рекомендуемая величина:

$\beta \approx 5^\circ$); C' – ковариационная матрица, полученная после мутации значений σ и α ; $N(0, C')$ – случайный вектор, полученный из ковариационной матрицы n -мерного нормального распределения.

4. *Расчет ЦФ потомков.* Осуществляется расчет ЦФ для λ потомков текущей популяции.

5. *Селекция.* Существует два типа селекции: (μ, λ) -селекция и $(\mu+\lambda)$ -селекция. В случае (μ, λ) -селекции в следующую популяцию выбираются лучшие μ родителей только из множества λ потомков. При $(\mu+\lambda)$ -селекции новая популяция образуется из объединенного множества родителей и потомков. Предпочтительнее (μ, λ) -селекция, поскольку реализует механизм выхода из локальных оптимумов.

6. *Проверка условия останова ЭС.* Применяются классические критерии останова для популяционных алгоритмов, такие как:

- максимальное число итераций (расчетов ЦФ), которое определяется как $10^3 \cdot N^2$, где N – размер пространства поиска;
- число поколений без изменения лучшего значения ЦФ;
- малая разница между лучшим и средним значением ЦФ;
- малое изменение шага мутации и др.

Если условие останова не выполняется, то осуществляется переход к шагу 3 для реализации следующего поколения.

1.6. Выводы по главе

Из выполненного обзора следует, что для моделирования существует несколько подходов. Квазистатический подход занимает центральное место, так как результаты вычислений достаточно точны, при этом не требуется больших затрат времени и вычислительных ресурсов. Тем не менее, представленные в п. 1.4 модели для вычисления временного отклика, позволяют вычислять значения токов и напряжений только на концах отрезков МПЛП. Для получения ПО, использующего квазистатический анализ, позволяющего вычислять значения токов и напряжений вдоль каждого проводника каждого отрезка МПЛП, необходимо разработать математическую модель и модифицировать численный метод.

В рассмотренных программных продуктах по моделированию ЭМС большое внимание уделяется визуализации и анимации процессов, протекающих внутри исследуемых конструкций, что дает пользователю максимально полную информацию о характере происходящих в них явлений. А динамическая визуализация необходима для более ясного понимания причин возникновения, выявления мест и способов уменьшения электромагнитных помех. Во всех рассмотренных выше программных продуктах используется электродинамический анализ, тогда как продукты, использующие квазистатический анализ, не обнаружены. Кроме того, в представленном ПО не имеется возможности динамического отображения форм токов и напряжений вдоль проводников МПЛП, а также выявления и локализации экстремумов сигнала.

На отечественном рынке программных продуктов, предназначенных для моделирования ЭМС, мало, наиболее известным из них является Elcut [72]. В данном продукте также нет возможности динамического отображения форм сигналов, а также выявления и локализации их пиковых значений.

Между тем в Томском государственном университете систем управления и радиоэлектроники в научно-исследовательской лаборатории «Безопасность и

электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств» разрабатывается комплекс программ для моделирования задач ЭМС TALGAT [73]. Комплекс TALGAT позволяет решать с помощью моделирования широкий класс задач ЭМС за счёт выполнения следующих основных функций:

- квазистатический анализ (вычисление матриц) произвольных двумерных и трёхмерных структур проводников и диэлектриков;
- электродинамический анализ произвольных трёхмерных структур проводников;
- вычисление временного и частотного отклика линий передачи;
- структурно-параметрическая оптимизация с указанными видами анализа.

Поскольку в данном программном продукте присутствует возможность выполнения квазистатического анализа, а также в силу того, что автор работает в представленной лаборатории, будет усовершенствован именно комплекс TALGAT.

Наконец, выявление и локализация пиковых значений сигнала позволят пользователю обратить внимание на уязвимые участки изучаемой структуры и своевременно принять меры по их устранению. Кроме того, для повышения быстродействия и помехоустойчивости РЭА актуальны исследования с изменением длительности СКИ. Так, для повышения быстродействия уменьшаются длительности полезных сигналов, тогда как длительности помеховых сигналов также становятся все более короткими. Так как вычисление пиковых значений СКИ может оказаться затратным по времени, а вариантов длительности СКИ может быть весьма большое количество, то целесообразно использование ЭА, а именно ГА. Представляет интерес поиск с помощью ГА таких параметров нагрузок на концах проводников, при которых этот максимум был бы минимальным. Это целесообразно, поскольку у разработчика ПП есть определенная степень свободы выбора параметров нагрузок. Таким образом, важно использовать эту возможность не только для полезных сигналов, но и для уменьшения помех в различных точках ПП.

Наконец, целесообразно выполнить исследования при других типах воздействий, в частности, при электростатическом разряде (ЭСР).

В итоге необходимо решить следующие задачи: разработать математическую модель, модифицировать численный метод и комплекс программ для выявления и локализации экстремумов сигнала в МПЛП, а также выполнить имитационное моделирование тестовых схем, одиночных отрезков связанных линий и конкретных элементов ПП с использованием разработанного программного комплекса.

2. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ И АЛГОРИТМЫ ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ И ЛОКАЛИЗАЦИИ ЭКСТРЕМУМОВ СИГНАЛА

В данной главе представлены разработанные математическая модель и алгоритмы для вычисления форм сигнала вдоль каждого проводника каждого отрезка МПЛП [74–77], для автоматического определения пути распространения импульса по цепи [78], а также для выявления и локализации уязвимых участков на печатной плате [79].

2.1. Описание математической модели

Математические модели для вычисления токов и напряжений в произвольной схеме МПЛП представлены в статье [47] и в монографии [49]. Однако в них реализовано вычисление токов и напряжений лишь на концах МПЛП. Новизна разработанной математической модели заключается в добавлении нового параметра n_{TLS} , отвечающего за число сегментов вдоль отрезка МПЛП, заданного пользователем, а также в объединении двух моделей с разными матрично-векторными уравнениями.

Для реализации вычисления токов и напряжений вдоль отрезка МПЛП по модели Джорджевича модифицированы выражения (1.10) и (1.11). Они приводятся к виду

$$\mathbf{V}(x) = \mathbf{V}_i(x) + \mathbf{V}_r(x) = \mathbf{S}_V(\mathbf{E0} \cdot \mathbf{C}_1 + \mathbf{ED} \cdot \mathbf{C}_2), \quad (2.1)$$

$$\mathbf{I}(x) = \mathbf{I}_i(x) - \mathbf{I}_r(x) = \mathbf{S}_I(\mathbf{E0} \cdot \mathbf{C}_1 - \mathbf{ED} \cdot \mathbf{C}_2), \quad (2.2)$$

где $\mathbf{E0} = \text{diag}(\exp(-\gamma_1 x), \dots, \exp(-\gamma_N x))$, $\mathbf{ED} = \text{diag}(\exp(-\gamma_1 \cdot (l-x)), \dots, \exp(-\gamma_N \cdot (l-x)))$, l – длина отрезка МПЛП, x – координата, вдоль отрезка, в которой необходимо вычислить значение тока или напряжения. Алгоритм вычисления близок к указанному в разделе 1.4.4. Отличия заключаются в следующем: в п. 1 «Ввод входных данных» добавлен новый параметр n_{TLS} и вычисления напряжений и токов выполняются по (2.1), (2.2). Количество значений x определяется параметром n_{TLS} .

Однако, чтобы вычислить токи и напряжения из (2.1), (2.2), необходимо знать значения векторов C_1 и C_2 и значения матрицы распространения $E(l)$. Для вычисления C_1 и C_2 используются (1.17) и (1.18) в виде

$$\begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_V & S_V E(l) \\ S_V E(l) & S_V \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} V(0) \\ V(l) \end{bmatrix}. \quad (2.3)$$

Для вычисления матрицы $E(l)$ используется (1.12), а для напряжений на ближнем $V(0)$ и дальнем $V(l)$ концах МПЛП используется матрично-векторное уравнение из модели Накхлы (1.25).

Разработанная математическая модель используется в модифицированном численном методе, поэтому алгоритм вычисления отклика с использованием приведенных выражений представлен в разделе 3.

2.2. Алгоритм проведения вычислительного эксперимента

Для реализации возможностей новой математической модели разработан алгоритм проведения вычислительного эксперимента. Для более полного понимания процесса выполнения алгоритма, рассмотрим модель «черного ящика», применительно к процессу выполнения вычислительного эксперимента для выявления и локализации экстремумов сигнала. Для этого рассмотрим модель системы, используемой в процессе моделирования одиночной или нескольких МПЛП, для исследования их на выявление и локализацию экстремумов сигнала. Объектами системы S являются:

- N – совокупность параметров принципиальной схемы, с которыми работает система S .
- Φ – совокупность управляющих воздействий (на анимацию отклика).
- X – совокупность параметров моделирования.
- M – совокупность результатов моделирования.

Тогда: $S \subset N \times \Phi \times X \times M$.

Множество $N \times \Phi \times X$ является входным объектом системы, множество M – выходным.

$H = \{Q_1, Q_2, Q_3, Q_4\}$, где Q_1 – множество характеристик принципиальной схемы, Q_2 – местоположение точек A и B , Q_3 – число сегментов вдоль одного проводника одного отрезка МПЛП, Q_4 – скорость анимации вычисленного отклика.

$\Phi = \{O_1, O_2, O_3, O_4, O_5, O_6\}$, где O_1 – нажатие на кнопку «max», O_2 – нажатие на кнопку «min», O_3 – нажатие на кнопку «стоп», O_4 – нажатие на кнопку «старт», O_5 – нажатие на кнопку «следующий кадр», O_6 – нажатие на кнопку «предыдущий кадр».

$X = \{P_1, P_2, P_3\}$, где P_1 – тип выводимых результатов, P_2 – множество параметров переходного анализа, P_3 – граничные значения для откликов.

$M = \{J_1, J_2, J_3\}$, где J_1 – анимированный отклик, J_2 – множество значений экстремумов сигнала, J_3 – локализация экстремума на принципиальной схеме.

Более подробно следует расписать следующие множества:

$Q_1 = \{K_1, K_2, K_3, K_4, K_5\}$, где K_1 – параметры источников воздействия, K_2 – параметры линии передачи, K_3 – параметры активных элементов принципиальной схемы, K_4 – параметры реактивных элементов принципиальной схемы, K_5 – соединения всех элементов принципиальной схемы.

$P_2 = \{L_1, L_2\}$, где L_1 – временной шаг, L_2 – степень двойки, которая используется для вычисления числа временных шагов.

Таким образом, множество $H \times \Phi \times X$ примет вид:

$$H = \{K_1, K_2, K_3, K_4, K_5, Q_2, Q_3, Q_4\}.$$

$$\Phi = \{O_1, O_2, O_3, O_4, O_5, O_6\}.$$

$$X = \{P_1, L_1, L_2, P_3\}.$$

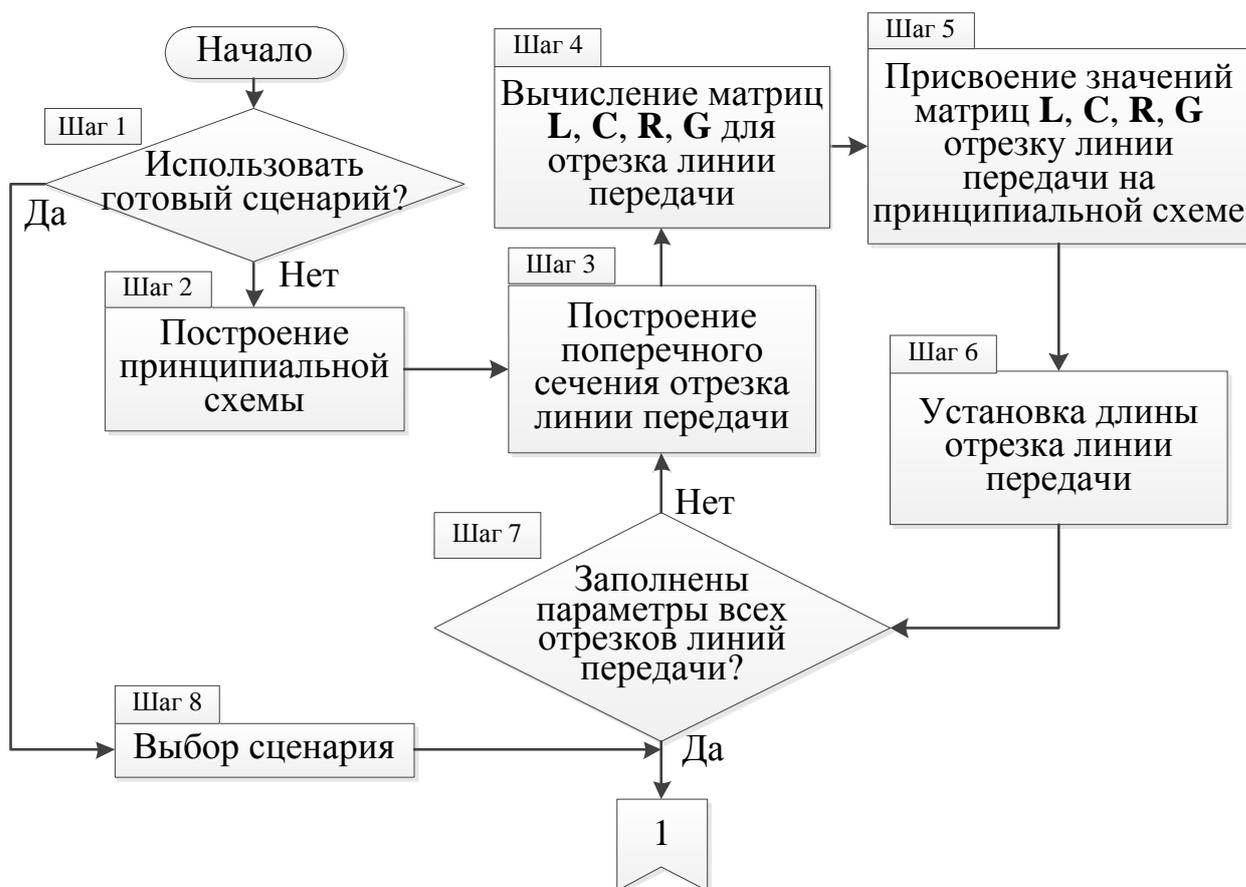
Множество, являющееся выходным объектом, остается прежним.

Алгоритм проведения вычислительного эксперимента по выявлению и локализации экстремумов сигнала в МПЛП приведен на рисунке 2.1.

Последовательность действий вычислительного эксперимента состоит из следующих шагов:

Шаг 1. Проверка использования готового сценария определяется по команде открытия списка сценариев для моделирования. Пользователь может выбрать готовую принципиальную схему и сразу начать вычислительный эксперимент.

Шаг 2. Построение принципиальной схемы выполняется с учетом всех гальванических соединений между ее элементами.



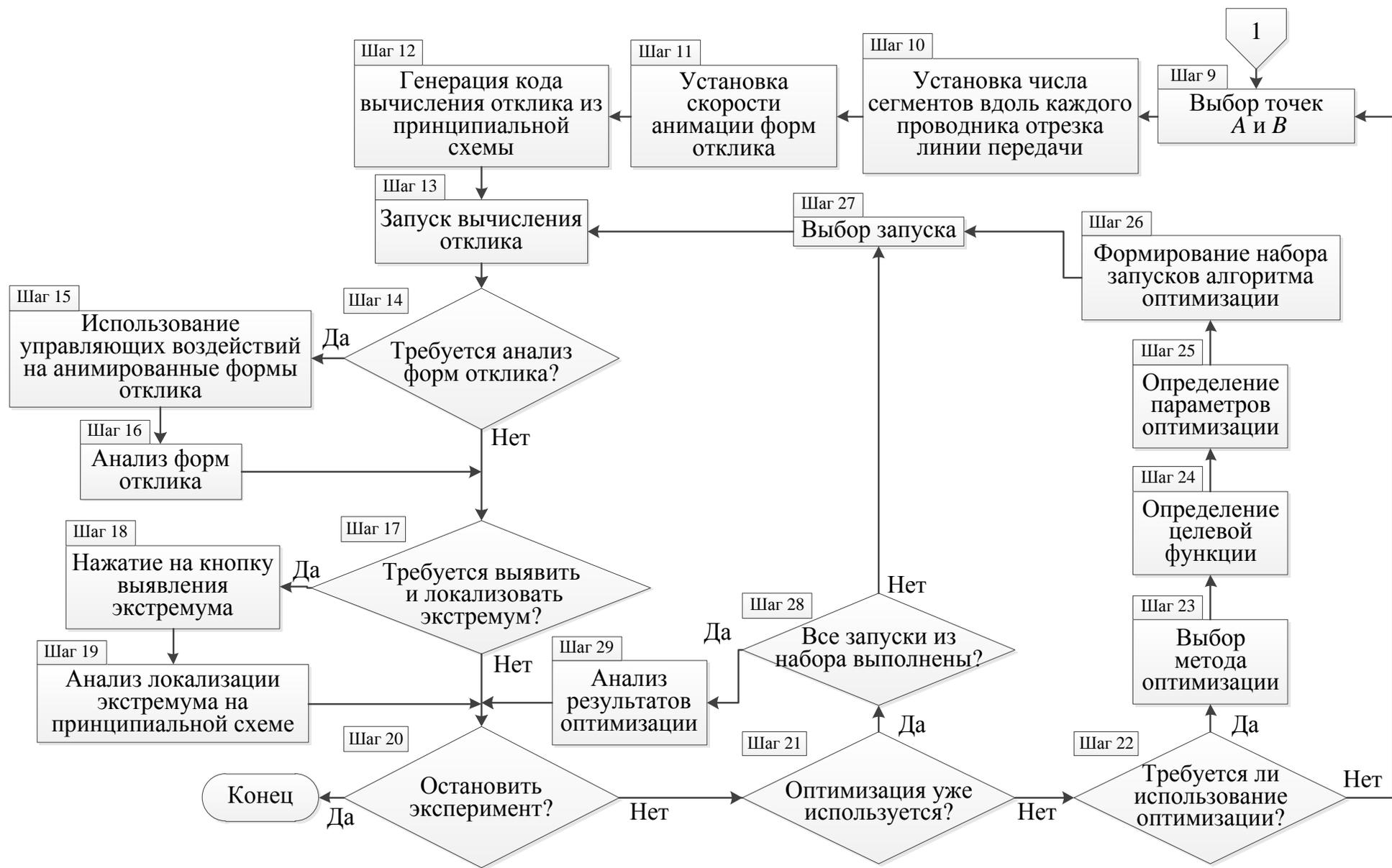


Рисунок 2.1 – Алгоритм проведения вычислительного эксперимента

Шаг 3. Построение поперечного сечения выполняется для отрезка линии передачи на основе заданного значения сегментации.

Шаг 4. Для отрезка линии передачи выполняется вычисление матриц погонных коэффициентов электромагнитной (**L**) и электростатической индукции (**C**), матриц погонных проводимостей (**G**) и сопротивлений (**R**).

Шаг 5. Вычисленные значения матриц **L**, **C**, **R**, **G** необходимо присвоить элементу (отрезку линии передачи) на принципиальной схеме, поперечное сечение которого было использовано для вычисления значений матриц.

Шаг 6. Отрезку линии передачи присваивается длина.

Шаг 7. Выполняется проверка, все ли отрезки линии передачи имеют свои параметры.

Шаг 8. Осуществляется выбор из набора имитационных моделей сценариев (5 сценариев).

Шаг 9. Осуществляется выбор точек *A* и *B*. При этом выполняется алгоритм определения допустимого пути распространения импульса (рисунок 2.2).

Шаг 10. Устанавливается число сегментов вдоль каждого проводника отрезка линии передачи на основе требуемой точности вычисления, заданной пользователем.

Шаг 11. Устанавливается скорость анимации отклика по желанию пользователя.

Шаг 12. Выполняется генерация кода вычисления отклика с учетом всех гальванических связей на принципиальной схеме, с указанием всех параметров каждого ее элемента.

Шаг 13. Осуществляется запуск вычисления отклика с помощью нажатия соответствующей кнопки. На этом шаге выполняется алгоритм визуализации распространения сигнала по цепи (рисунок 2.7).

Шаг 14. Выполняется проверка, требуется ли анализ форм отклика.

Шаг 15. Выполняется управление воздействиями на анимированные формы отклика выполняется с помощью кнопок («старт», «стоп», «следующий кадр», «предыдущий кадр»).

Шаг 16. Выполняется анализ форм отклика (например, оценка изменения его фронтов при прохождении вдоль проводника).

Шаг 17. Выполняется проверка, требуется ли выявить и локализовать экстремум сигнала.

Шаг 18. Нажатие на кнопки выявления экстремума («max», «min») запускает алгоритм выявления и локализации экстремумов сигнала (рисунок 2.8). При этом анимация форм отклика останавливается, и отображается форма отклика, вычисленная в сегменте, в котором выявлен экстремум.

Шаг 19. Выполняется анализ локализации формы отклика с экстремумом на принципиальной схеме.

Шаг 20. Выполняется проверка, требуется ли остановить эксперимент.

Шаг 21. Выполняется проверка, используется ли в текущем эксперименте оптимизация.

Шаг 22. Выполняется проверка, требуется ли использование оптимизации в текущем эксперименте.

Шаг 23. Выполняется выбор метода оптимизации (ГА или ЭС).

Шаг 24. Определяется ЦФ исходя из целей и задач вычислительного эксперимента.

Шаг 25. Определяются параметры оптимизации исходя из целей и задач вычислительного эксперимента.

Шаг 26. Формируются наборы запусков алгоритма оптимизации с учетом требуемой точности результатов. Каждый запуск в наборе отличается от остальных, например, количеством вычислений ЦФ, коэффициентами мутации и кроссовера и др.

Шаг 27. Запускается оптимизация в соответствии со сформированным набором запусков.

Шаг 28. Выполняется проверка, все ли запуски из набора выполнены.

Шаг 29. Выполняется анализ результатов оптимизации.

Далее представлены алгоритмы, которые выполняются в процессе реализации алгоритма из рисунка 2.1.

2.3. Алгоритм определения допустимого пути распространения сигнала по проводникам цепи

Если узел A пользователь может выбрать в любом месте на принципиальной схеме, то местоположение узла B вычисляется алгоритмом определения допустимых путей распространения (блок-схема приведена на рисунке 2.2). Суть его заключается в обеспечении условия сохранения гальванической связи между отрезками МПЛП на пути распространения сигнала. Важно отметить, что гальваническая связь элементов принципиальной схемы задается с помощью соединительной линии. Если соединить два элемента, между ними автоматически установится узел принципиальной схемы. Каждый такой узел имеет свой индекс (номер) (рисунок 2.3). В данном алгоритме используется двусвязный список, а не массив, поскольку изначально неизвестно, какого размера будет список или массив (размер зависит от числа узлов). Можно использовать динамический массив, однако для увеличения его размера потребуется дополнительное время и память. Со списком работать удобнее, поскольку каждый его элемент содержит указатели на предыдущий и следующий элемент, а также есть указатели на первый и последний. Таким образом, чтобы добавить элемент в конец списка требуется всего лишь изменить указатели. Поэтому при выполнении этой задачи связный список будет работать быстрее, кроме того нет необходимости выделять произвольный доступ ко всем элементам. Описание алгоритма:

Шаг 1. В систему поступает индекс узла A , выбранный пользователем.

Шаг 2. Создается двусвязный список пройденных узлов $list$ (сначала пустой), а также текущему узлу a присваивается индекс начального узла A .

Шаг 3. Выполняется нумерация элементов принципиальной схемы, подключенных к узлу a .

Шаг 4. Выполняется проверка, есть ли еще пронумерованные необработанные элементы схемы. Если есть, то переход на шаг 5, если нет – на шаг 7.

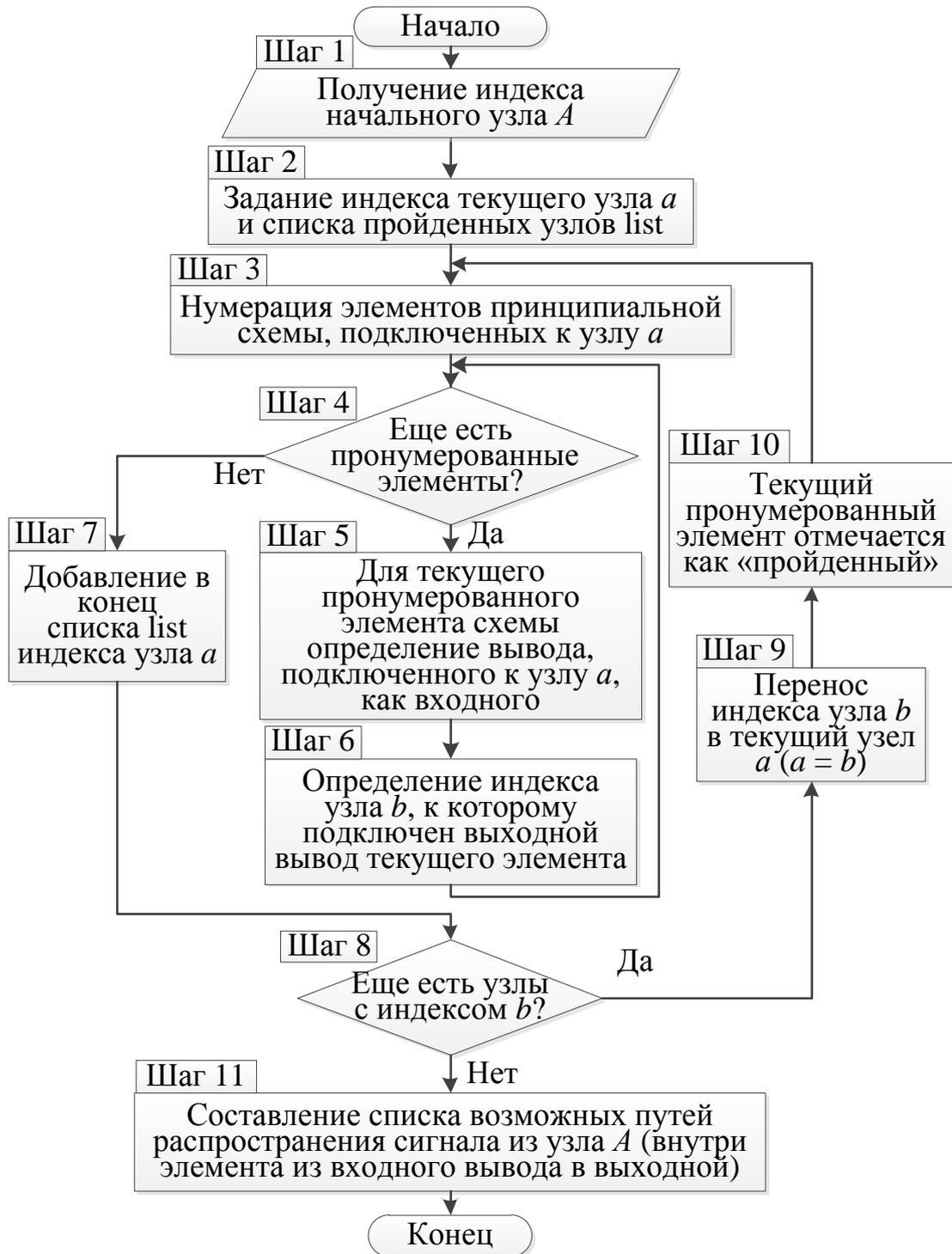


Рисунок 2.2 – Алгоритм определения допустимого пути распространения сигнала по цепи

Шаг 5. Вывод (начало проводника) пронумерованного элемента принципиальной схемы, подключенный к узлу a , определяется как входной, a противоположный вывод (конец проводника) – как выходной.

Шаг 6. Выполняется определение индекса узла b , подключенного к выходному выводу элемента принципиальной схемы.

Шаг 7. В конец двусвязного списка list добавляется индекс узла a .

Шаг 8. Выполняется проверка, есть ли еще узлы с индексом b . Если да, то переход на шаг 9, если нет – на шаг 11.

Шаг 9. Выполняется перенос индекса узла b в текущий узел a .

Шаг 10. Текущий пронумерованный элемент схемы отмечается как «пройденный».

Шаг 11. Составление списка возможных путей распространения сигнала из узла A по двусвязному списку list.

На рисунке 2.3 представлена тестовая схема, а рисунок 2.4 содержит изображение каждого шага алгоритма до окончания обработки первого элемента схемы. Отрезки линии передачи схематично изображаются квадратами. Рассмотрим подробнее этот алгоритм на примере этой тестовой схемы:

Шаг а. Сначала в систему поступает индекс начального узла A (первый узел, который выбирает пользователь). $A=2$.

Шаг б. Создается двусвязный список пройденных узлов list (сначала пустой), а также текущему узлу a присваивается индекс начального узла ($a=A=2$).

Шаг в. Нумеруются элементы принципиальной схемы, подключенные к узлу a . К этому узлу подключен только один отрезок линии передачи, поэтому он получает номер «1».

Шаг г. Выполняется проверка, есть ли еще пронумерованные необработанные элементы схемы. Есть, поэтому переход на шаг 5 алгоритма.

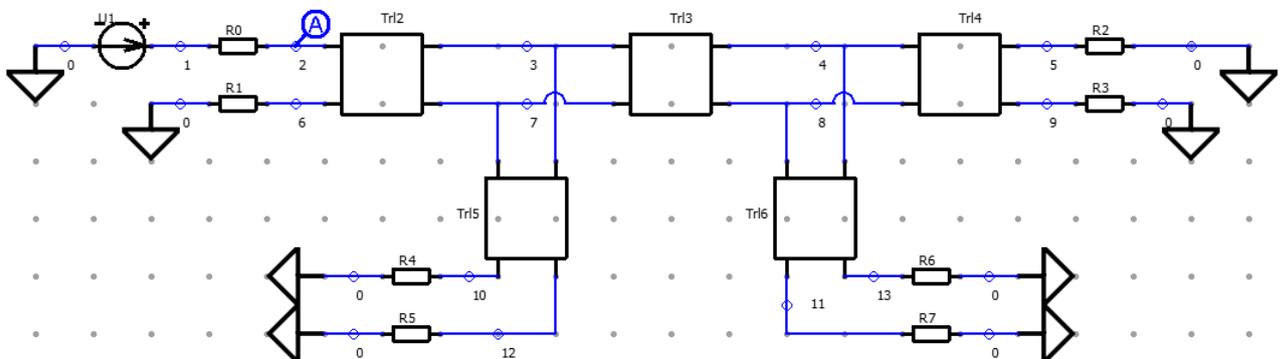


Рисунок 2.3 – Тестовая схема

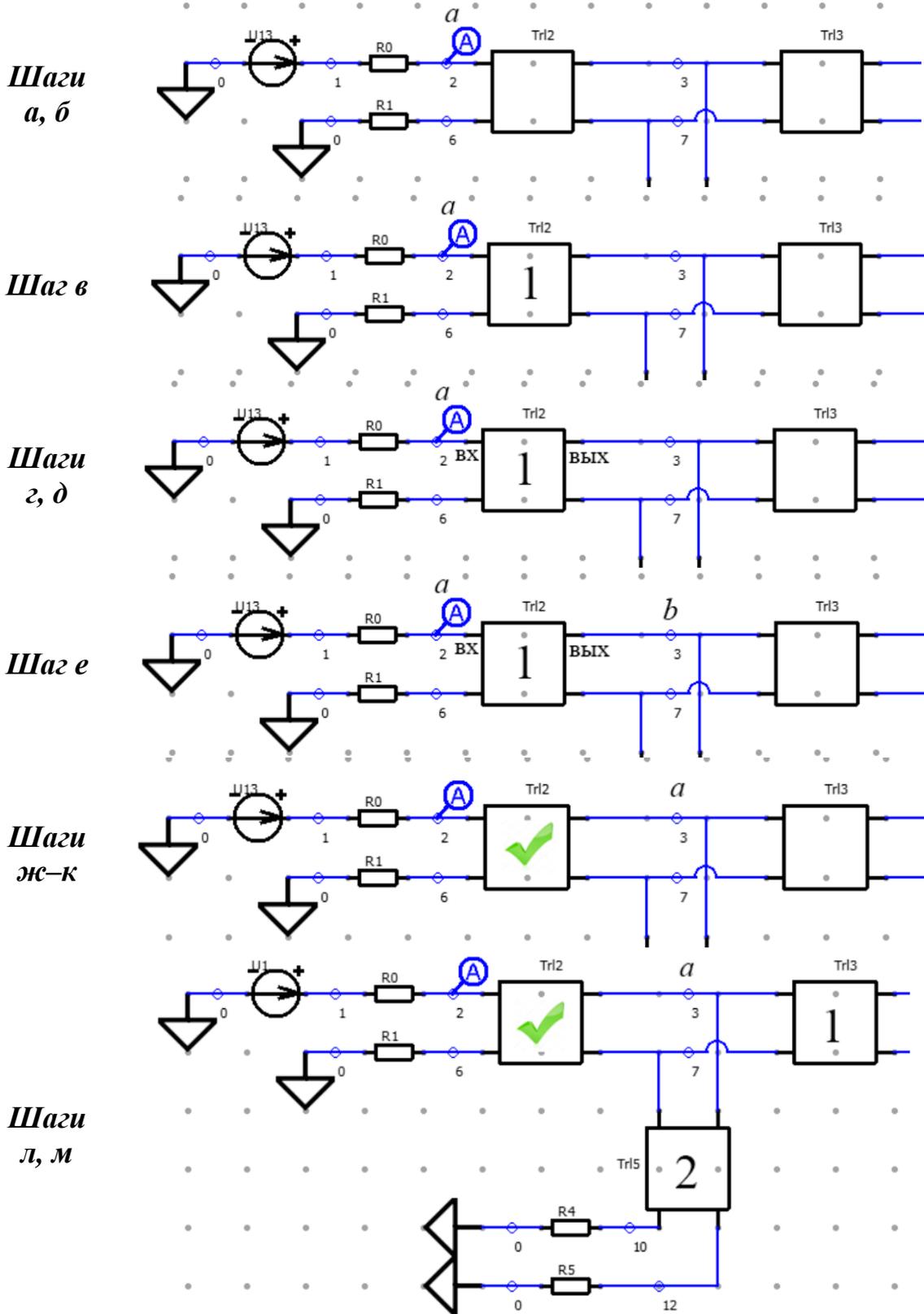


Рисунок 2.4 – Изображение каждого шага алгоритма при обработке первого элемента схемы

Шаг д. Далее поочередно выполняется обработка каждого пронумерованного элемента схемы. Вывод элемента, подключенный к узлу a , определяется как входной, а противоположный вывод – как выходной.

Шаг е. Индекс узла, подключенного к выходному выводу, присваивается узлу b ($b=3$).

Шаг ж. В конец списка list добавляется индекс узла a (в конец list заносится 2).

Шаг з. Выполняется проверка, есть ли еще узлы с индексом b . Есть, поэтому переход на шаг 9 алгоритма.

Шаг и. Переносим индекс узла b в узел a ($a=3$).

Шаг к. Текущий пронумерованный элемент схемы отмечается как «пройденный».

Шаг л. Другие элементы, подключенные к узлу a , снова нумеруются, т.е. выполнен переход на шаг 3 алгоритма. К этому узлу подключено два отрезка линии передачи, поэтому первый получает номер «1», а второй – «2».

Шаг м. Алгоритм будет работать до тех пор, пока не закончатся узлы b .

В результате выполнения алгоритма из рисунка 2.2 у пользователя появляется возможность выбрать конечный узел B , при наведении на узлы мышью (все возможные конечные узлы, полученные для тестовой схемы, представлены на рисунке 2.5).

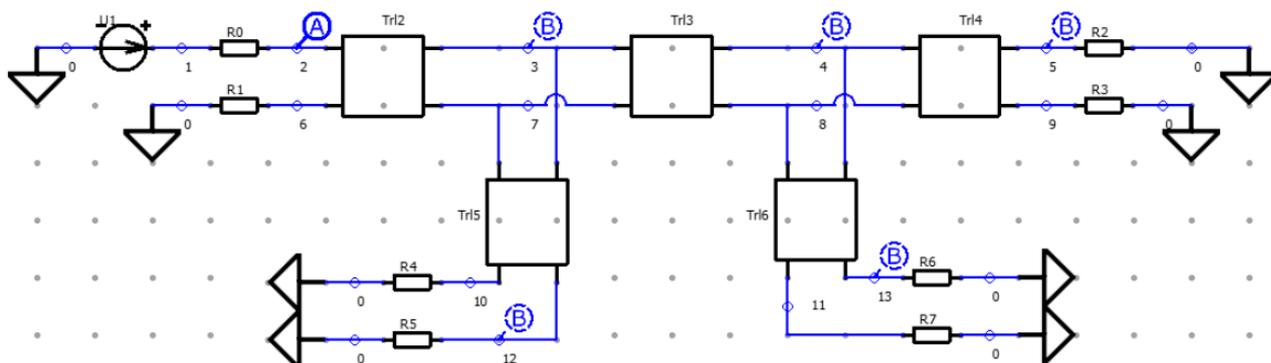


Рисунок 2.5 – Все возможные варианты выбора узла B для тестовой схемы

После выбора точек A и B в системе составляется список узлов и сегментов отрезков МПЛП, в которых необходимо построить формы сигнала. Данный список передается в модуль отображения, который создает кадры динамического

отображения распространения сигнала вдоль проводника. Параллельно с динамическим отображением форм сигнала показывается место на принципиальной схеме, в котором эта форма вычислена. Подсвечивается весь отрезок проводника МПЛП, а точкой указывается конкретное место вдоль этого отрезка. На рисунке 2.6 показан пример локализации сигнала на тестовой схеме.

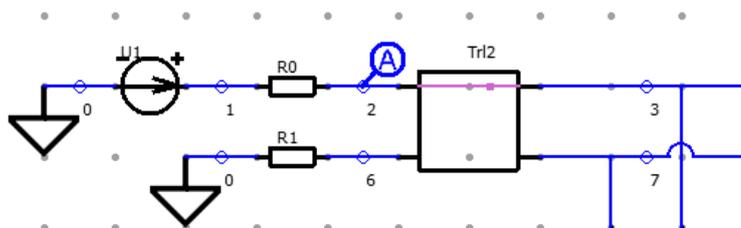


Рисунок 2.6 – Пример локализации сигнала

Для реализации динамической визуализации токов и напряжений предназначено меню «DynaVis» (с англ. Dynamic Visualization – динамическая визуализация), в котором реализован этот алгоритм, основанный на алгоритме поиска в глубину [80], называемом GoThrough. С помощью данного алгоритма программный модуль определяет путь распространения импульса по цепи, который будет отображаться на экране. На вход данного алгоритма поступают координаты узлов A и B и число подсекций, на выходе получается список координат распространения импульса вдоль проводника.

2.4. Алгоритм визуализации распространения сигнала по цепи

Схема алгоритма визуализации распространения сигнала по цепи представлена на рисунке 2.7. Пользователю необходимо выбрать начальный узел A и конечный узел B , между которыми будет распространяться сигнал. С помощью алгоритма, описанного в п. 2.3, система определяет путь распространения сигнала, количество и последовательность отрезков МПЛП, а также последовательность их сегментов для анимированного отображения вычисленных в них откликов. После этого системой создаются необходимые команды, и выполняется динамическое отображение. Описание алгоритма:

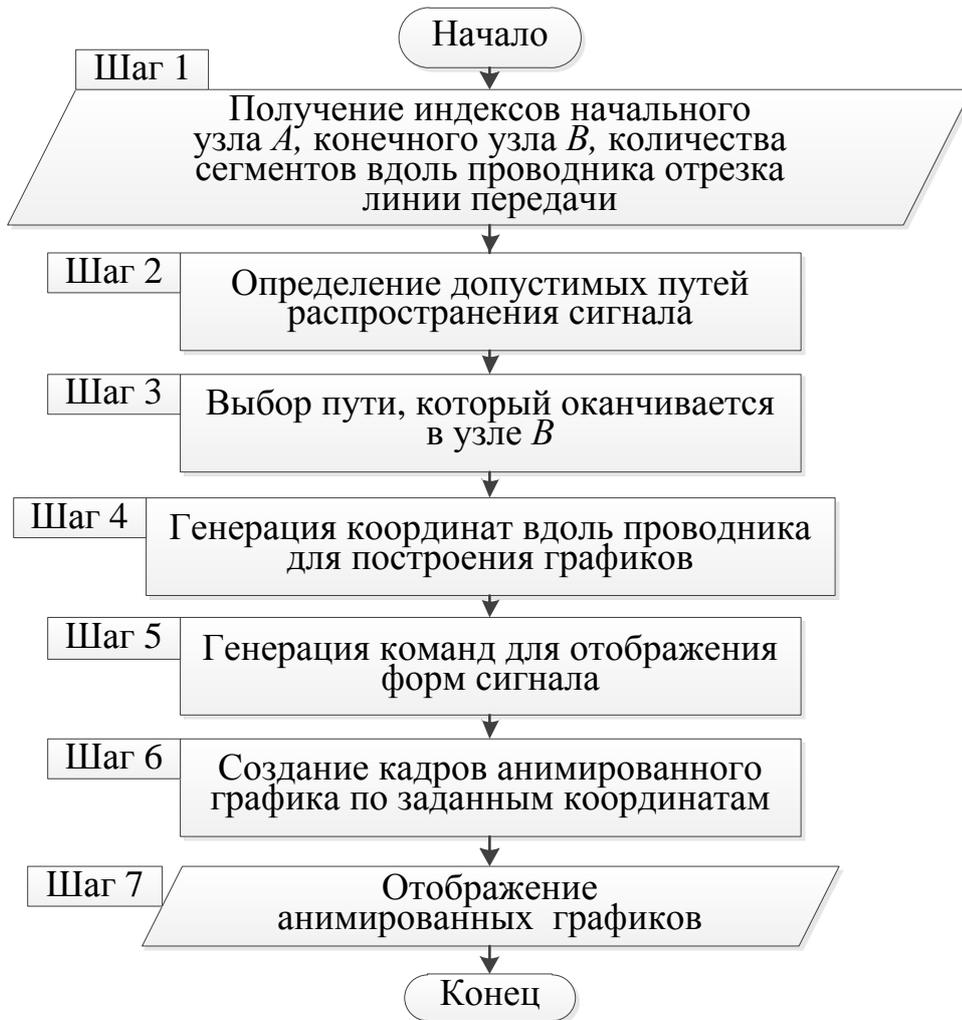


Рисунок 2.7 – Алгоритм визуализации распространения сигнала по цепи

Шаг 1. Получение индексов узлов A и B , количества сегментов вдоль проводника отрезка линии передачи, заданных пользователем.

Шаг 2. Определение допустимых путей распространения сигнала, с помощью алгоритма из п. 2.3.

Шаг 3. Выбор пути, который оканчивается в узле B , из списка $list$, где перечислены все допустимые пути распространения.

Шаг 4. Генерация координат вдоль проводника, в которых будут вычислены формы отклика и команд вычисления отклика.

Шаг 5. Генерация команд для отображения форм сигнала.

Шаг 6. Создание кадров анимированного графика по заданным координатам (каждой координате вдоль проводника отрезка линии передачи присваивается форма отклика).

Шаг 7. Отображение анимированных форм сигнала.

2.5. Алгоритм выявления и локализации экстремумов сигнала

Реализован алгоритм для выявления и локализации экстремумов сигнала. Его можно разделить на две составляющие: алгоритм выявления экстремумов сигнала и сопоставление значения экстремума с координатой на проводнике. Все значения вычисленных напряжений или токов хранятся в одной матрице; программа создает начальное нулевое значение, затем проверяет каждый элемент из матрицы, и если матричное значение больше начального, то записывает в начальное – значение из матрицы. Так продолжается до тех пор, пока все элементы не будут обработаны. Другими словами, результаты вычисления отклика (действительные значения) в одном сегменте хранятся в матрице-векторе, состоящей из одного столбца. Суть данного алгоритма заключается в полном переборе этой матрицы и вывода наибольшего либо наименьшего значения.

На блок-схеме алгоритма выявления, которая представлена на рисунке 2.8, все обозначения приведены для напряжений (аналогичным образом алгоритм выполняется и для токов), где U_{\max} – это максимальное значение напряжения, U_{\min} – минимальное значение напряжения, U_n – текущий элемент матрицы (при первом выполнении алгоритма в блоках 3 и 9 $n=1$); n – количество элементов матрицы. В результате его выполнения выводится значение экстремума сигнала. Так как отклик вычисляется в каждом сегменте отрезка МПЛП, то в результате выполнения алгоритма, известны и номер сегмента проводника и отрезка, где этот сигнал локализован. Каждому элементу из матрицы соответствует своя координата, получаемая в результате работы алгоритма из рисунка 2.7. При выводе значения экстремума сигнала, отображается вычисленная форма сигнала, а также место локализации экстремума на принципиальной схеме.

Описание алгоритма:

Шаг 1. Выполнение проверки, требуется ли поиск U_{\max} . Если да, то переход на шаг 8, если нет – на шаг 2.

Шаг 2. Обнуление значения переменной U_{\min} .

Шаг 3. Выполнение проверки условия: $U_n < U_{\min}$? Если да, то переход на шаг 4, если нет – на шаг 5.

Шаг 4. Присваивание значения переменной U_n переменной U_{\min} .

Шаг 5. Выполнение проверки, есть ли еще необработанные элементы в матрице. Если да, то переход на шаг 6, если нет – на шаг 7.

Шаг 6. Переход к следующему элементу матрицы U_{n+1} .

Шаг 7. Вывод значения переменной U_{\min} .

Шаг 8. Обнуление значения переменной U_{\max} .

Шаг 9. Выполнение проверки условия: $U_n > U_{\max}$? Если да, то переход на шаг 10, если нет – на шаг 11.

Шаг 10. Присваивание значения переменной U_n переменной U_{\max} .

Шаг 11. Выполнение проверки, есть ли еще необработанные элементы в матрице. Если да, то переход на шаг 12, если нет – на шаг 13.

Шаг 12. Переход к следующему элементу матрицы U_{n+1} .

Шаг 13. Вывод значения переменной U_{\max} .

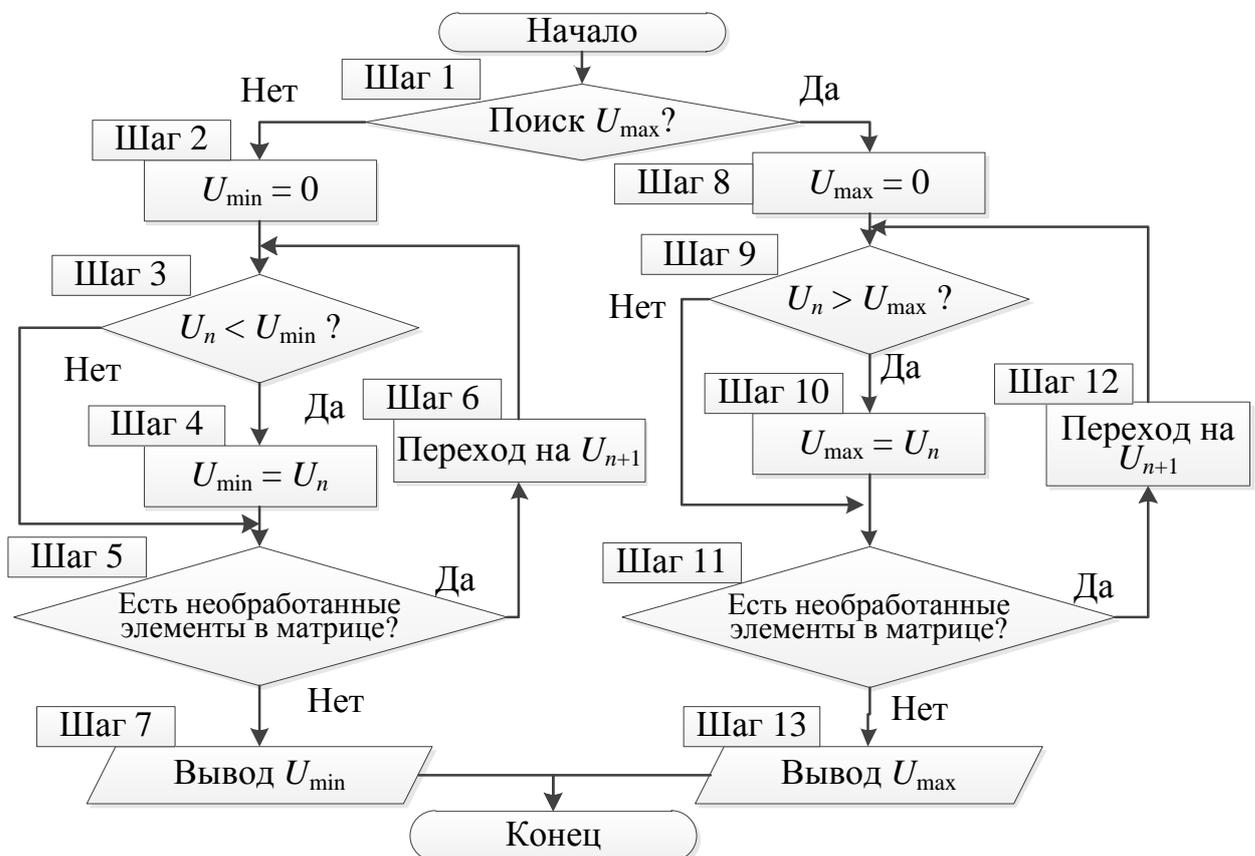


Рисунок 2.8 – Алгоритм выявления экстремумов сигнала

2.6. Основные результаты и выводы

1. Разработана математическая модель, основанная на объединении моделей Джорджевича и Накхлы.

2. Разработан алгоритм проведения вычислительного эксперимента, позволяющий выявить и локализовать экстремумы сигнала в МПЛП и включающий алгоритм поиска и определения допустимых путей распространения импульса.

3. Разработан алгоритм определения пути распространения импульса в гальванически связанных проводниках произвольной схемы из отрезков МПЛП, отличающийся автоматическим определением последовательности промежуточных узлов по заданным начальному и конечному узлам. Алгоритм позволяет реализовать корректное динамическое отображение процесса распространения импульса.

4. Разработан алгоритм поиска, отличающийся определением максимальных и минимальных значений токов и напряжений во всех подсекциях выбранного пути распространения сигнала. Алгоритм позволяет выявить и локализовать критичные участки на печатной плате.

Таким образом, разработанная математическая модель, основанная на объединении моделей Джорджевича и Накхлы, позволяет вычислить формы временного отклика в любой точке вдоль каждого проводника произвольной схемы из отрезков МПЛП. Представлены блок-схемы разработанных алгоритмов, а также описание каждого шага. На основе представленной математической модели и алгоритмов модифицирован численный метод, описанный и используемый в главе 3.

3. МОДИФИЦИРОВАННЫЙ ЧИСЛЕННЫЙ МЕТОД ДЛЯ ВЫЧИСЛЕНИЯ ТОКОВ И НАПРЯЖЕНИЙ В МНОГОПРОВОДНЫХ ЛИНИЯХ ПЕРЕДАЧИ

В главе представлено описание модифицированного численного метода для вычисления токов и напряжений вдоль проводников отрезков МПЛП, и его алгоритм. Кроме того, представлены результаты локализации пиковых значений напряжения в шине ПП РПУ САН КА при воздействии заданного СКИ [81–83], а также при изменении длительности СКИ [84, 85] и с использованием оптимизации с помощью ГА [86–92] и ЭС [93, 94], а также при воздействии ЭСР [95].

3.1. Описание численного метода

Модификация численного метода заключается в объединении двух доработанных (раздел 2) моделей: Джорджевича и Накхлы, а также в делении отрезка МПЛП на число сегментов. Вычисление отклика в этом случае выполняется не на концах отрезка МПЛП, а на концах его сегментов. Таким образом, для получения форм отклика в любой точке, необходимо рассчитать такое количество сегментов отрезка МПЛП, при котором один из концов сегмента совпал с заданной точкой.

Алгоритм вычисления токов и напряжений вдоль проводника отрезка МПЛП

На рисунке 3.1 представлен новый алгоритм вычисления токов и напряжений вдоль проводника отрезка МПЛП. В частности, в данном алгоритме шаги 1–4, 7 и 8 основаны на модели Накхлы, а шаги 5 и 6 взяты из модели Джорджевича. Описание алгоритма:

Шаг 1. Ввод входных данных: параметров отрезков линий передачи и параметров источников воздействий; числа узлов схемы и источников сигнала;

значений элементов \mathbf{D} (матрицы входных токов) для каждого отрезка линий передачи; значений элементов матриц \mathbf{W} , \mathbf{G} , \mathbf{E} .

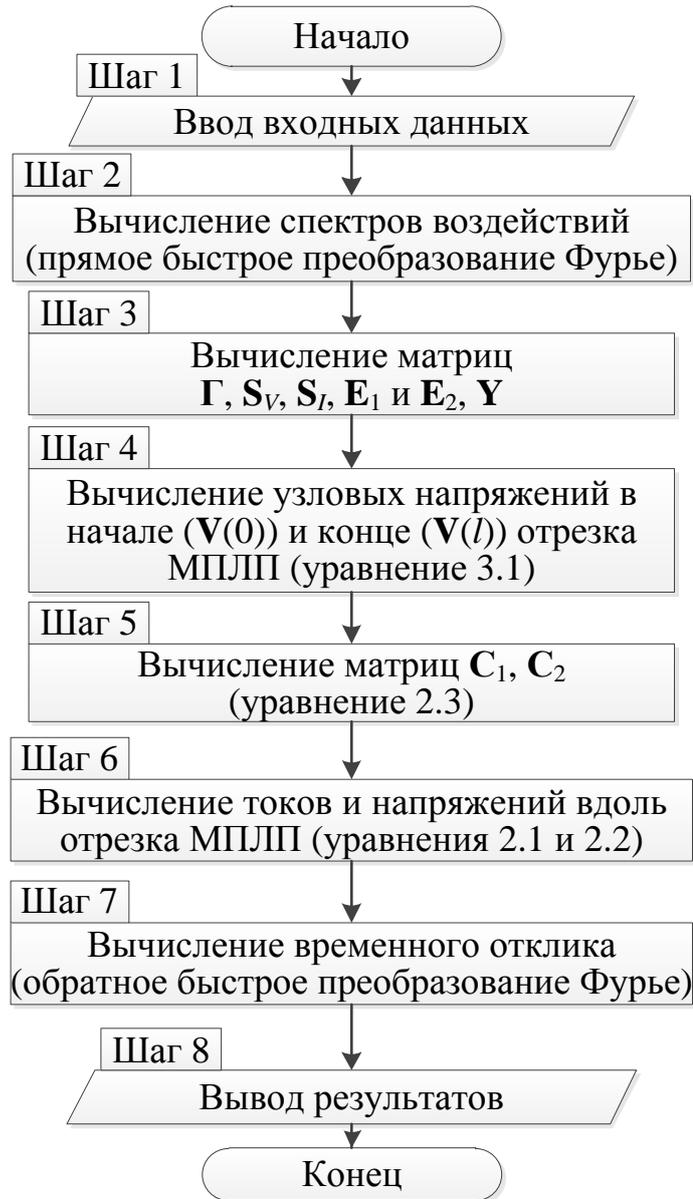


Рисунок 3.1 – Алгоритм вычисления токов и напряжений вдоль проводника отрезка МПЛП

Шаг 2. Вычисление спектров воздействий (прямое быстрое преобразование Фурье).

Шаг 3. Вычисление диагональной матрицы погонных задержек для каждой моды (\mathbf{G}), матриц модальных напряжений (\mathbf{S}_V) и токов (\mathbf{S}_I), матриц распространения (\mathbf{E}_1 , \mathbf{E}_2) и матрицы проводимости (\mathbf{Y}) для каждого отрезка линии передачи, подстановкой данных из шага. 1 в (1.3), (1.4), (1.8), (1.9), (1.23), (1.22).

Шаг 4. Решение матрично-векторного уравнения

$$\mathbf{V} = \left(s\mathbf{W} + \mathbf{H} + \sum_{k=1}^n \mathbf{D}_k \mathbf{Y}_k \mathbf{D}_k^t \right)^{-1} \mathbf{E}. \quad (3.1)$$

Шаг 5. Решение уравнения (2.3), с подстановкой $\mathbf{V}(0)$ и $\mathbf{V}(l)$, полученные из (3.1).

Шаг 6. Решение выражений (2.1) или (2.2) с подстановкой \mathbf{C}_1 и \mathbf{C}_2 , полученных из шага 5.

Шаг 7. Вычисление временного отклика (обратное быстрое преобразование Фурье).

Шаг 8. Вывод результатов.

3.2. Тестовое вычисление отклика

Далее приведены результаты тестирования вычисления форм токов вдоль проводников МПЛП. Для вычислений выбрана восьмипроводная шина длиной 74 мм реальной ПП радиотехнического блока аппаратуры радионавигации космического аппарата. Каждый проводник разделен на 10 сегментов, в каждом из которых вычислены формы токов. Эквивалентная схема представлена на рисунке 3.2, где $R_1=R_2=\dots=R_{16}=50$ Ом, параметры источника воздействия E_2 : $E_0=1$ В, длительность вершины импульса $t_d=6$ нс, длительность фронта и спада импульса $t_r=t_f=1,5$ нс.

Результаты вычислений (только для 5-и точек вдоль шины, чтобы они были различимы) представлены на рисунке 3.3.

Из полученных результатов видно, как меняется спектр тока вдоль проводника, а также в различных проводниках (сначала заметно резкое падение значения амплитуды тока, но при каждом следующем проводнике разница амплитуд токов становится менее заметной). Примечательно также резкое сужение спектра тока с удалением от начала к ее концу.

В результате выполнено квазистатическое вычисление токов вдоль каждого проводника отрезка МПЛП на частотах из спектра сигнала. Это позволяет проводить вычисления напряженности электрического поля в заданной точке

дальней зоны, а значит, диаграммы направленности суммарного уровня излучаемых эмиссий от печатной платы при заданных воздействиях в трассах.

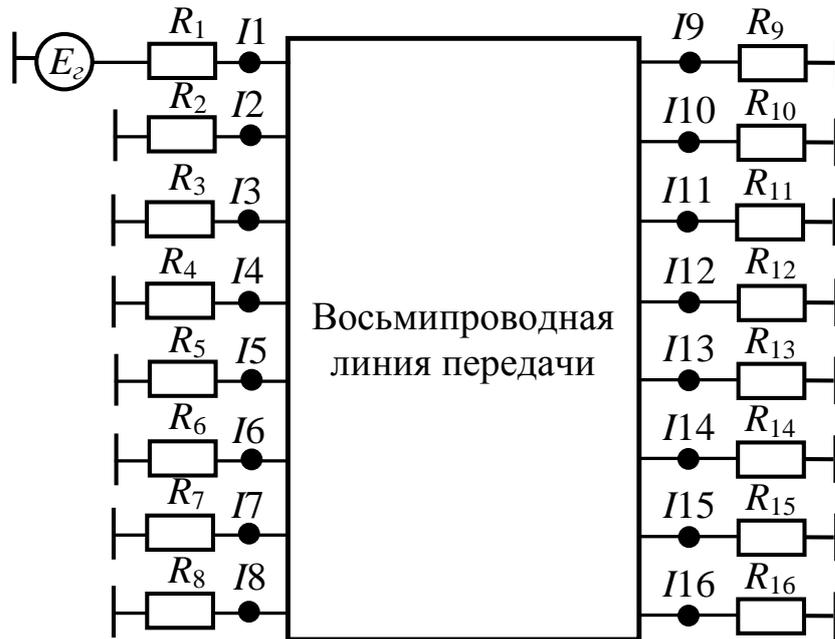


Рисунок 3.2 – Схема восьмипроводной линии передачи

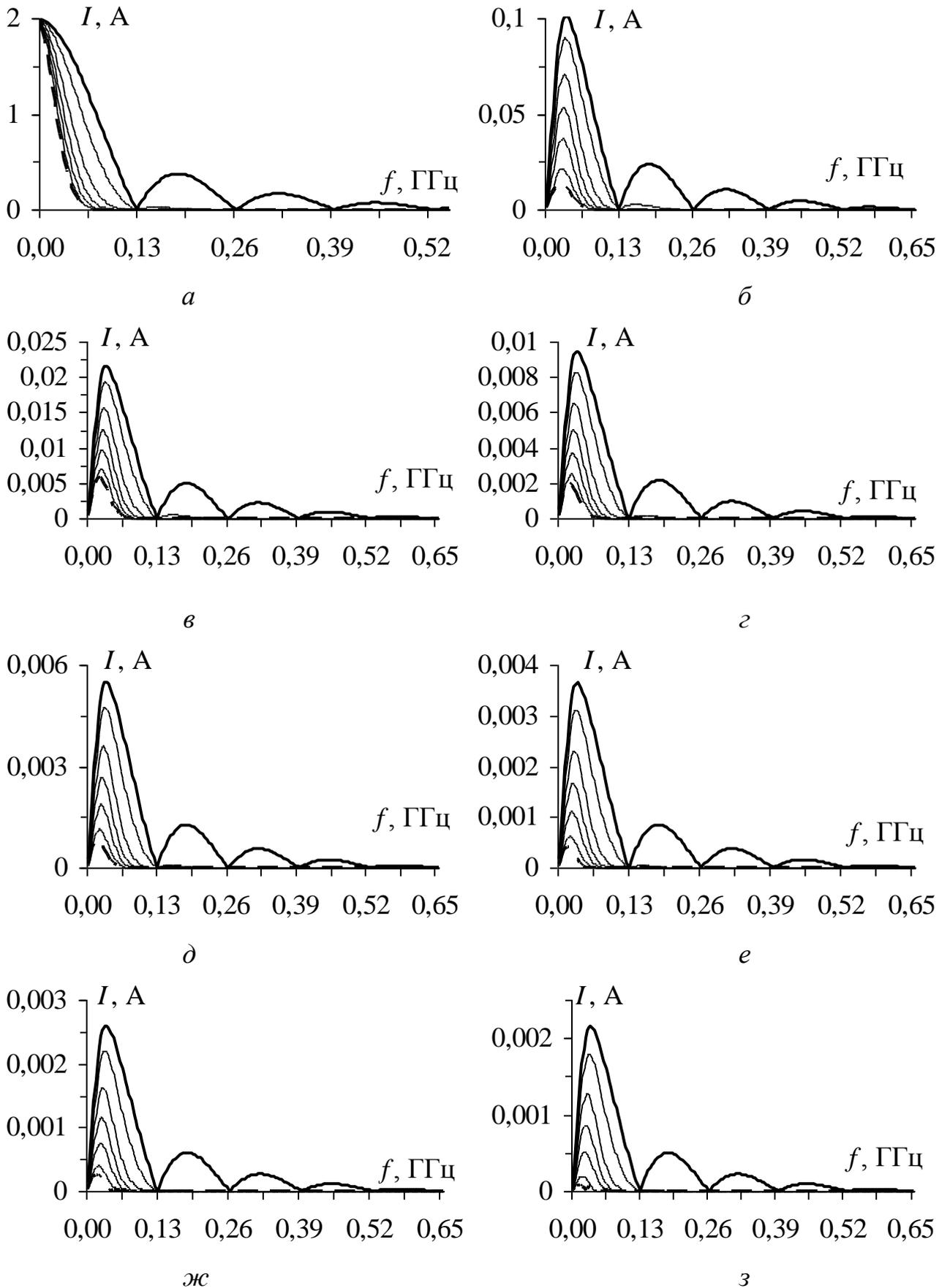


Рисунок 3.3 – Спектры модуля токов вдоль активного (а) и пассивных (б–з) проводников (начало (—), конец (- - -))

3.3. Моделирование шины печатной платы системы автономной навигации космического аппарата

После подробного исследования относительно простых схем из одиночных отрезков МПЛП выбрана настоящая шина ПП РПУ САН космического аппарата, фрагмент которой приведен на рисунке 3.4. Изгиб проводника приближенно моделировался параллельной емкостью 1 пФ, а переходное отверстие – последовательной индуктивностью 1 нГн. Согласно параметрам стека ПП построены геометрические модели поперечного сечения каждого отрезка линий передачи. Эта ПП ранее исследовалась, но лишь на уровень перекрестных помех [96]. На рисунке 3.5 приведена геометрическая модель поперечного сечения пятипроводной линии передачи. Для каждого построенного поперечного сечения вычислены матрицы \mathbf{L} и \mathbf{C} .

3.3.1. Вычисление максимумов сигнала

В качестве первого шага в применении разработанного численного метода для исследования шины ПП РПУ САН целесообразно смоделировать самые худшие ситуации, которые могут возникнуть при работе, а именно, наличие на шине таких случаев, как холостой ход (ХХ) и короткое замыкание (КЗ). Принципиальная схема всей шины представлена на рисунке 3.6. При выполнении исследования изменялись граничные условия и количество активных проводников. В качестве воздействия использовался СКИ в форме трапеции амплитудой ЭДС 1 В, с длительностью фронта, вершины и спада по 0,1 нс. Для моделирования ХХ принято сопротивление 50 кОм, а КЗ – 50 мОм. Потери в отрезках МПЛП не учитывались.

Выполнены вычисления для 40 случаев с различными комбинациями активных проводников (источник сигнала U_1 подключался к проводникам с R_1 – R_5), ХХ и КЗ, однако приведены результаты лишь для 6-и случаев с наиболее интересными результатами. На рисунке 3.6 представлен случай с первым

активным проводником. Параметры вычислений для каждого из 6-и случаев указаны в таблице 3.1. На рисунках 3.7 и 3.8 представлены вычисленные формы временного отклика. Для каждого случая представлены формы напряжений в начале (U_b) и конце (U_e) проводника, а также формы с максимальным значением напряжения (U_{max}).

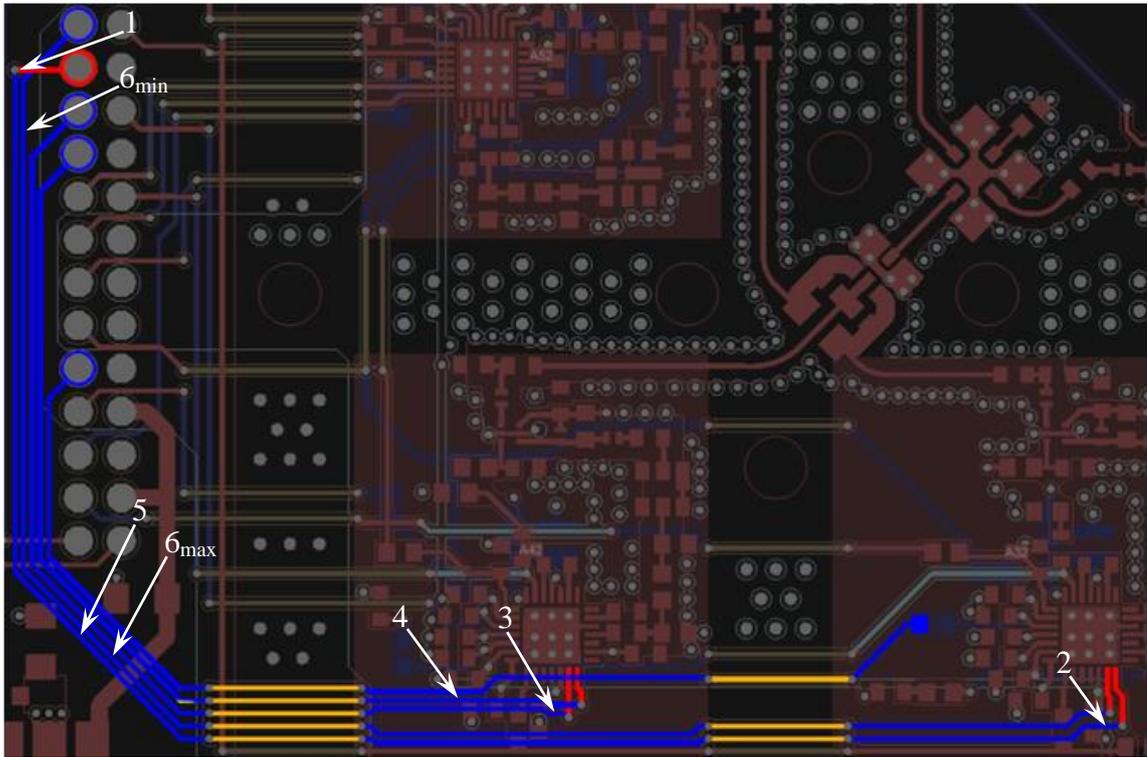


Рисунок 3.4 – Локализация пиковых значений сигнала на фрагменте печатной платы



Рисунок 3.5 – Поперечное сечение пятипроводной линии передачи

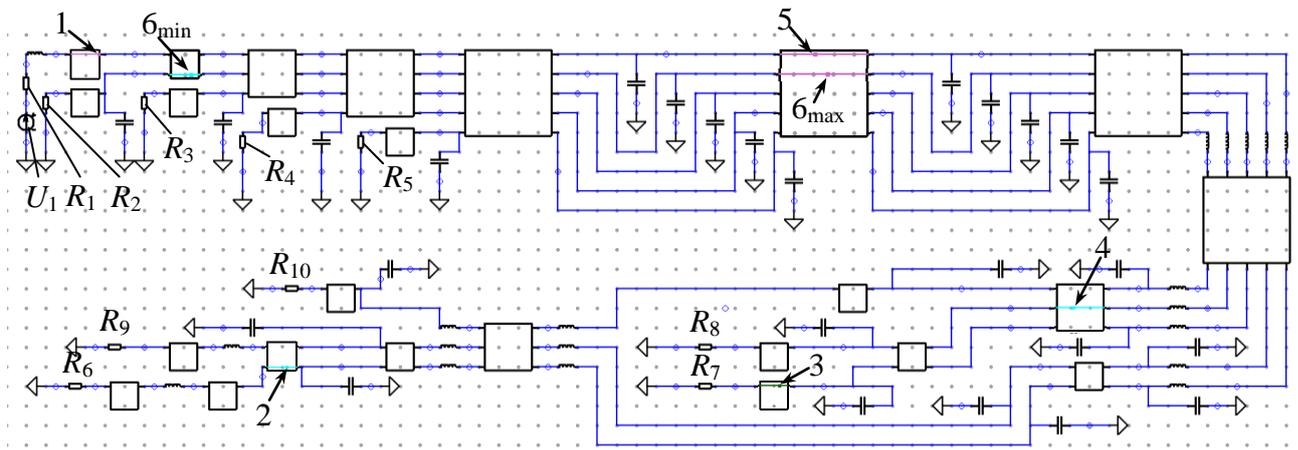


Рисунок 3.6 – Принципиальная схема, которой моделировалась
шина печатной платы

Как видно, сигнал представляет собой последовательность импульсов, обусловленных многократными отражениями из-за ХХ и КЗ на концах проводников. На принципиальной схеме из рисунка 3.6 указаны точки на проводниках, в которых локализованы пиковые значения.

Таблица 3.1 – Параметры вычислений

Случай	ХХ	КЗ	Активные проводники	Проводник с пиковым напряжением	Пиковое напряжение	Сегмент
1	R_1-R_5	R_6-R_{10}	1, 5	1	3,67 мВ	19
2	R_4, R_5, R_6-R_8	R_1-R_3, R_9, R_{10}	1, 2, 4, 5	1	-2,7 В	14
3	R_4, R_5, R_6-R_8	R_1-R_3, R_9, R_{10}	1, 2, 4, 5	3	-1,21 В	7
4	R_1-R_3, R_9, R_{10}	R_4, R_5, R_6-R_8	1	4	-1,8 мВ	14
5	R_1-R_3, R_9, R_{10}	R_4, R_5, R_6-R_8	1, 2, 4, 5	1	0,21 В	9
6	R_1-R_3, R_9, R_{10}	R_4, R_5, R_6-R_8	1, 2, 4, 5	2	0,41 В	11
					-0,37 В	14

Отметим, что каждый проводник делился на 20 сегментов, в каждом из которых вычислялась форма напряжения, и анализировалось его пиковое значение. Цифры на рисунке 3.6 означают номер случая из таблицы 3.1. Во всех остальных случаях максимумы или минимумы не были ярко выражены, либо находились на концах отрезка линии передачи.

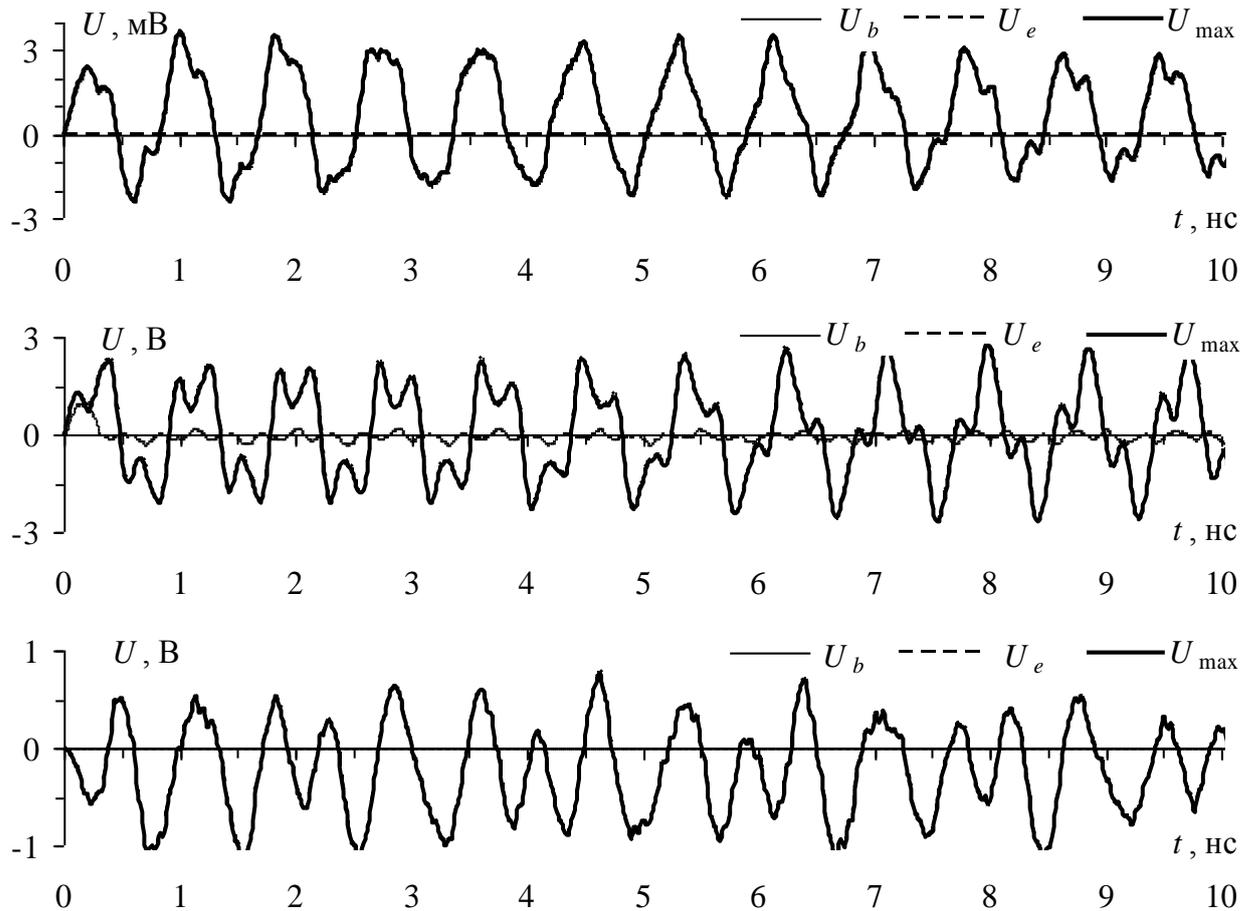


Рисунок 3.7 – Формы сигнала для случаев 1–3 (сверху вниз) из таблицы 3.1

В случаях 2 и 3 наблюдается самое значительное превышение напряжения по сравнению со всеми остальными: в случае 2 максимум превышает напряжение на входе в 2,7 раза, а в случае 3 наблюдается отрицательный импульс, по модулю превышающий амплитуду сигнала на входе в 1,2 раза. Отметим, что максимумы из случаев 5 и 6 находятся в непосредственной близости от шины, проходящей слоем ниже (указано стрелками на рисунке 3.4), и связь с ней может оказаться критичной. В случае 6 присутствует сразу два пиковых значения: максимальное (0,41 В) и минимальное (минус 0,37 В). Локализация пиковых значений непостоянна, а зависит как от значений резисторов, так и от возбуждаемых проводников.

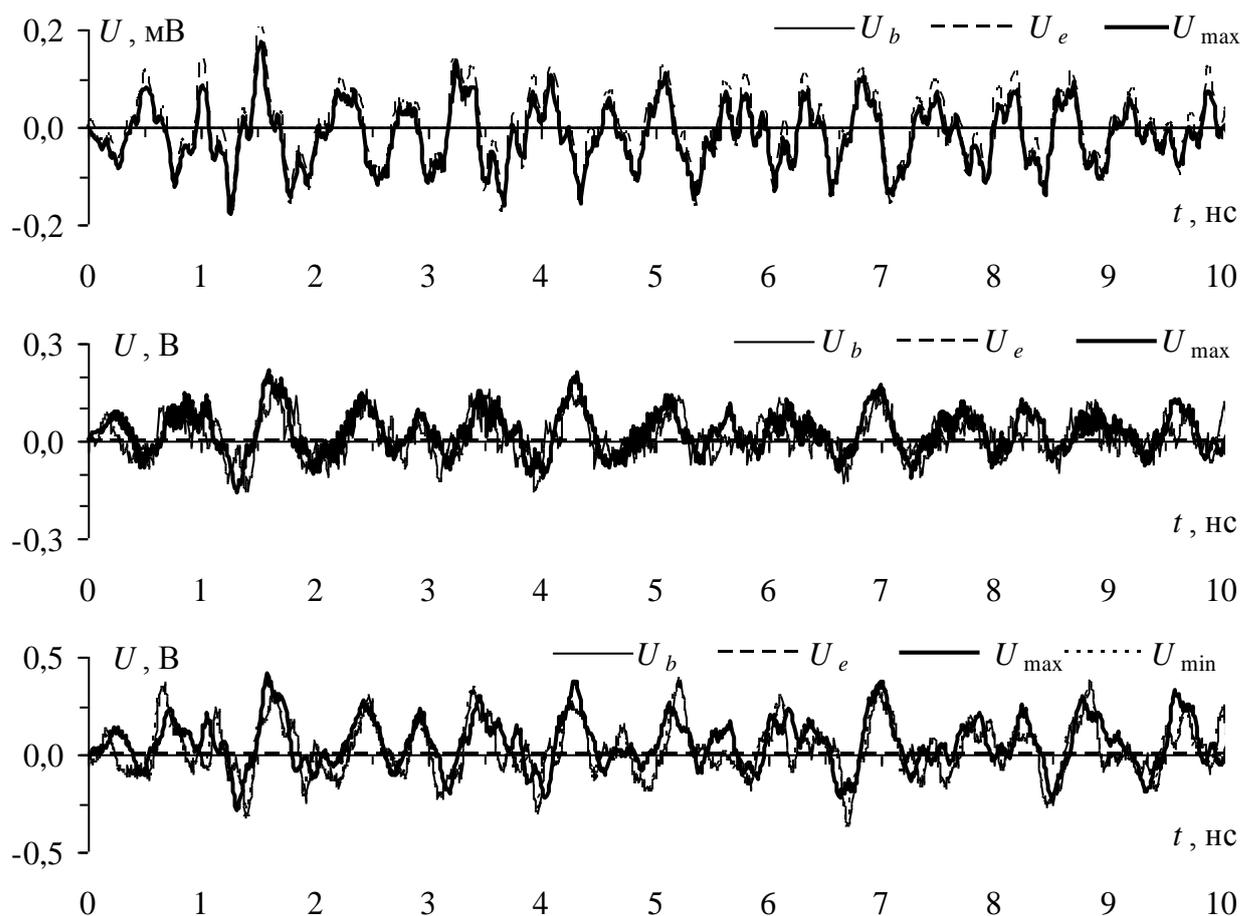


Рисунок 3.8 – Формы сигнала для случаев 4–6 (сверху вниз) из таблицы 3.1

Таким образом, в результате данного исследования шины ПП РПУ САН выявлены параметры граничных условий и варианты воздействия, при которых наблюдаются пиковые значения напряжений, в 1,5–2 раза превышающие сигнал от источника воздействия, что может быть причиной различных паразитных эффектов во время работы.

3.3.2. Влияние длительности сверхкороткого импульса на локализацию пиковых значений напряжения

3.3.2.1. В активном проводнике

Далее целесообразно выполнить исследование более приближенное к действительности, в частности, выявить значения экстремумов напряжения и их

местоположение в шине ПП РПУ САН при воздействии импульсов с разной длительностью (как полезных, так и помеховых). В первую очередь представлены результаты выявления и локализации экстремумов напряжения в активном проводнике, поскольку в нем наблюдаются более высокие амплитуды сигнала. В качестве исследуемой структуры выбрана та же шина ПП РПУ САН, фрагмент платы изображен на рисунке 3.9, а ее принципиальная схема – на рисунке 3.10.

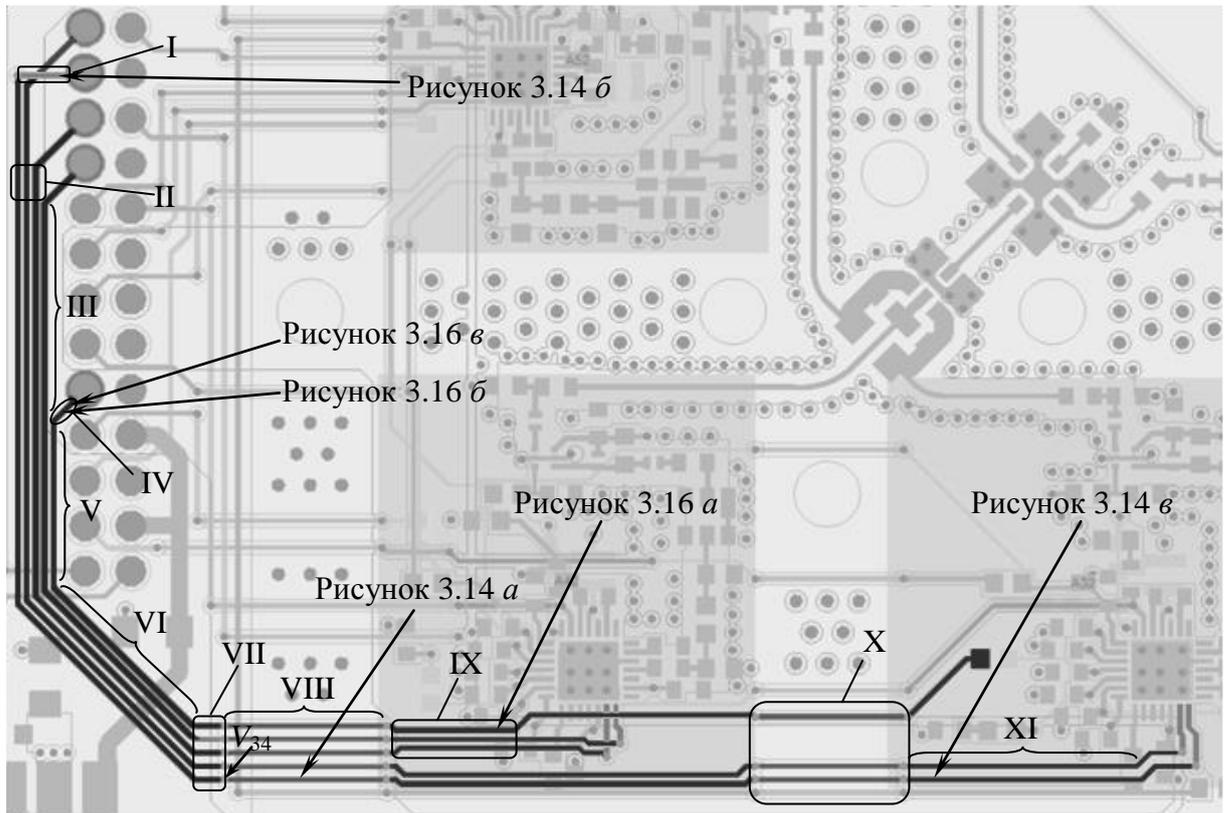


Рисунок 3.9 – Фрагмент ПП РПУ САН с исследуемой шиной и местами пиковых значений

Рассмотрено два случая, отличающихся количеством и расположением генераторов напряжений. В первом использован один генератор, подключенный к первому (верхнему на схеме) проводнику (рисунок 3.11 а), а во втором – два генератора, подключенных к крайним проводникам (рисунок 3.11 б). На данных рисунках генераторы указаны стрелками. В обоих случаях выполнены вычисления и получены формы сигналов вдоль каждого из пяти проводников при разных воздействиях, однако представлены результаты только для активных линий, поскольку они представляют первоочередной интерес.

Чтобы получить формы сигнала вдоль определенного проводника, на нем надо указать точки А и В, между которыми будет выполняться вычисление. На рисунке 3.12 представлены эти точки для обоих случаев.

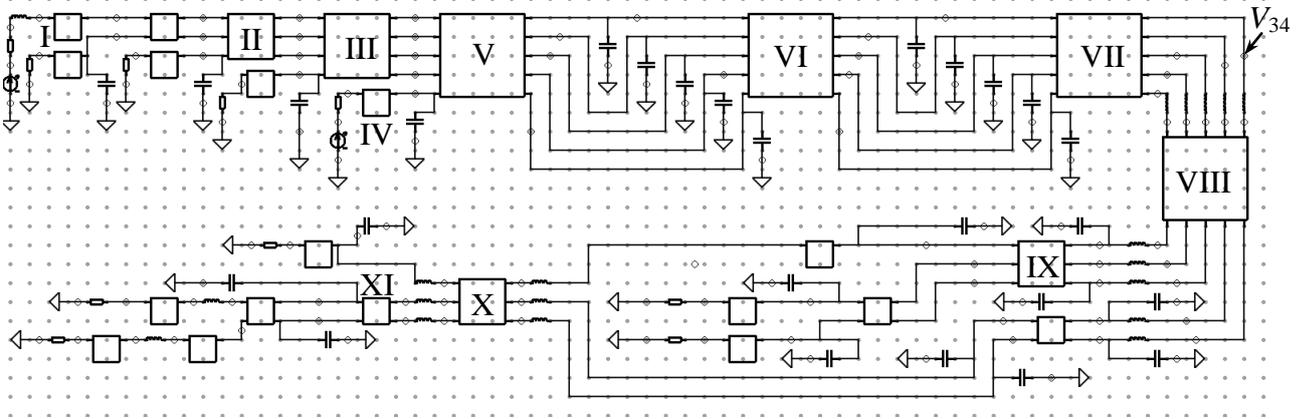


Рисунок 3.10 – Принципиальная схема шины ПП РПУ САН
(с двумя генераторами)

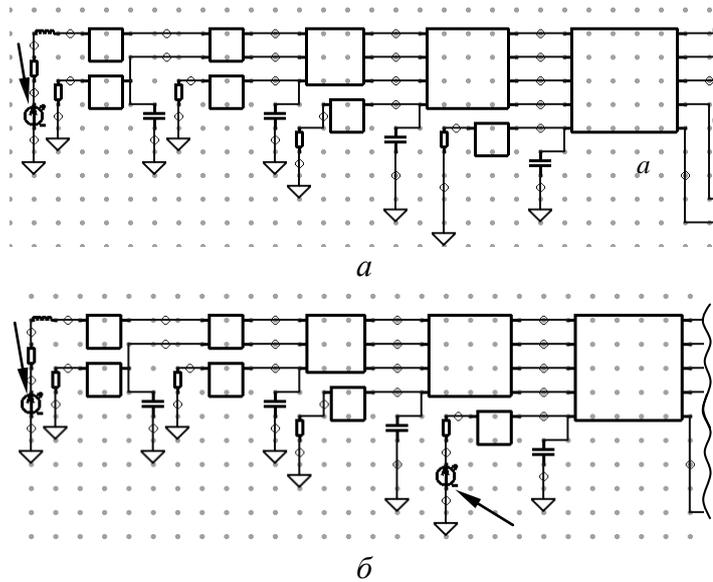


Рисунок 3.11 – Фрагмент схемы для случаев с одним (а) и двумя (б) генераторами

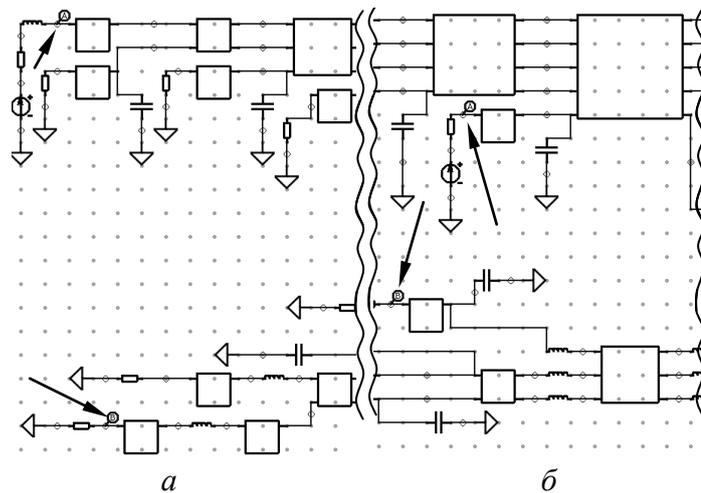


Рисунок 3.12 – Точки А и В для одного (а) и двух (б) генераторов

В данной работе в качестве воздействий выбраны три вида СКИ, каждый амплитудой ЭДС 1 В. Формы каждого импульса представлены на рисунке 3.13. Первый импульс (U_1) имеет длительности фронта, спада и вершины по 1 нс, второй (U_2) – по 100 пс, а третий (U_3) – по 10 пс, так что общая длительность импульсов полагается 3; 0,3; 0,03 нс. Выбор именно таких параметров импульса обусловлен тем, что таким образом рассматриваются не только полезные сигналы, но и помеховые. На каждый генератор поочередно подавались каждый из импульсов. В случае с двумя генераторами, на обоих импульсы были одинаковы.

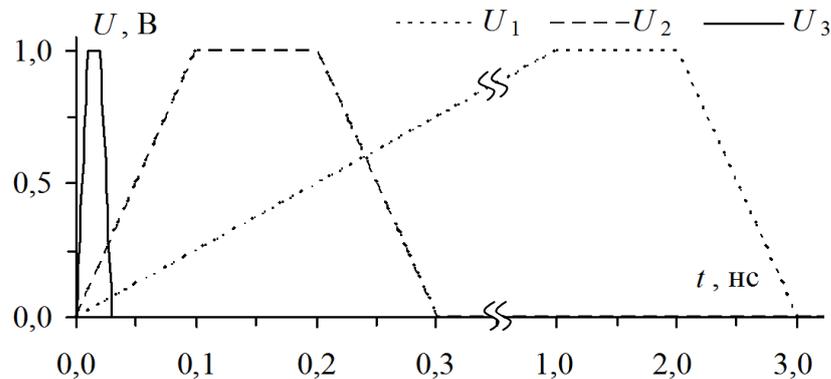


Рисунок 3.13 – Формы импульсов воздействий

В случаях с одним и двумя генераторами вычислены по 20 форм напряжений на последовательно расположенных сегментах вдоль каждого проводника каждого отрезка линии передачи из рисунка 3.10. Однако представлены только формы в начале (U_b) и конце (U_e) проводника, а также с максимальными (U_{\max}) и минимальными (U_{\min}) значениями напряжений, возникающих при каждом из воздействий.

Рассмотрим первый случай: с одним генератором на первом проводнике. На рисунке 3.14 показаны формы сигналов вдоль исследуемого проводника, а на рисунке 3.15 – места пиковых значений этих сигналов.

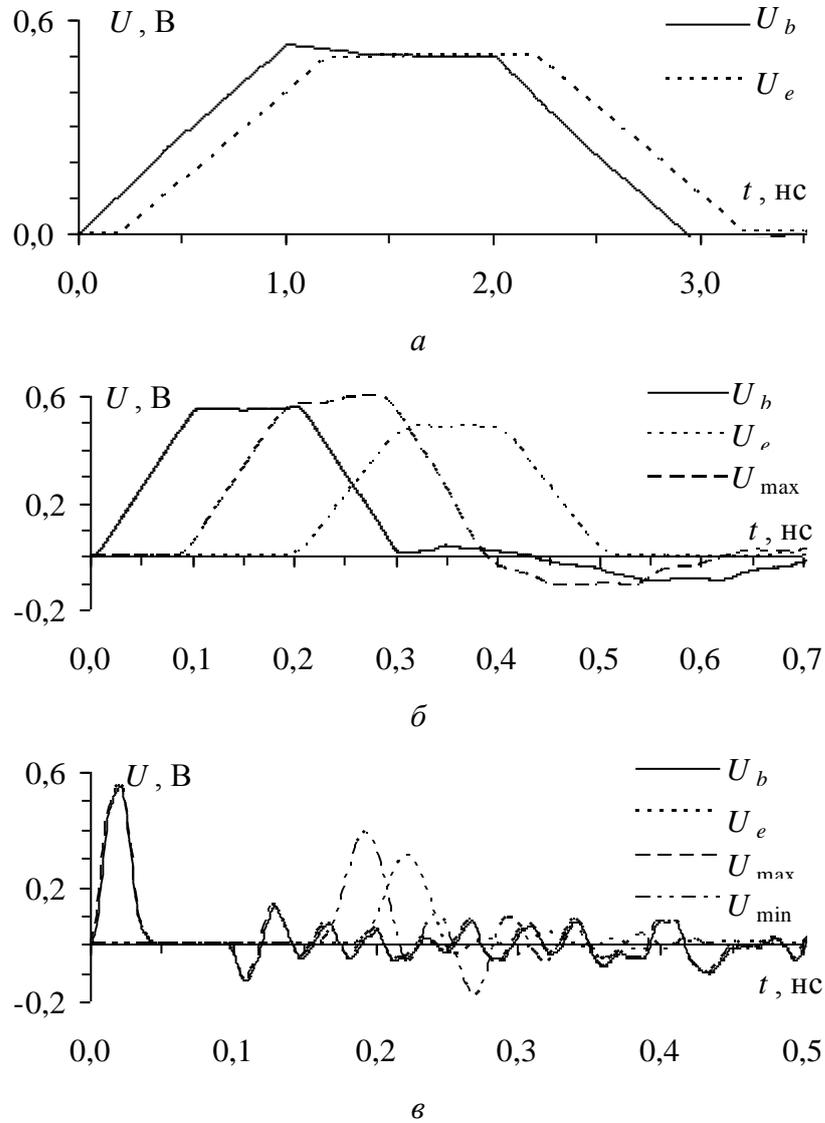


Рисунок 3.14 – Формы сигналов для случая 1
при воздействиях U_1 (а), U_2 (б) и U_3 (в)

Максимум сигнала совпадает с формой сигнала в узле при воздействии U_1 , а минимумы – при U_1 и U_2 . Поэтому их формы и локализация не указаны на рисунках 3.14 и 3.15.

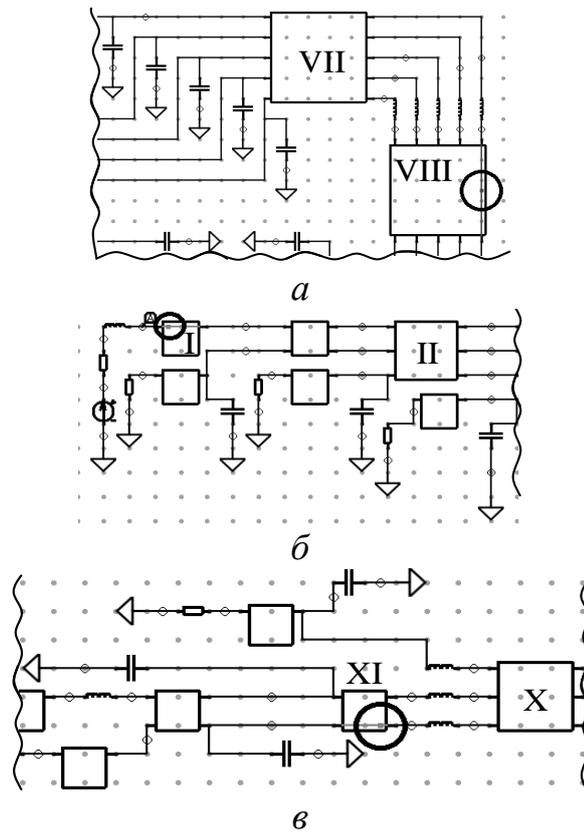


Рисунок 3.15 – Локализация максимумов (*а* и *б*) для сигналов из рисунка 3.14 *б* и *в*, соответственно, а также минимума (*в*) для сигнала из рисунка 3.14 *в*

Результаты моделирования для второго случая представлены на рисунке 3.16, а места пиковых значений – на рисунке 3.17. В таблице 3.2 сведены пиковые значения напряжений, а также номера сегментов, в которых они локализованы.

Рассмотрим воздействие полезного сигнала (U_1). Для случая с одним генератором выявлены пиковые значения, представленные на рисунке 3.14 *а*, однако их уровни и места совпадают с сигналами на концах проводника. Для случая с двумя генераторами ситуация сравнима с первым, поскольку выявленные формы пиковых значений напряжения, представленные на рисунке 3.16 *а*, также совпадают с сигналами на концах проводника и локализованы в узлах схемы.

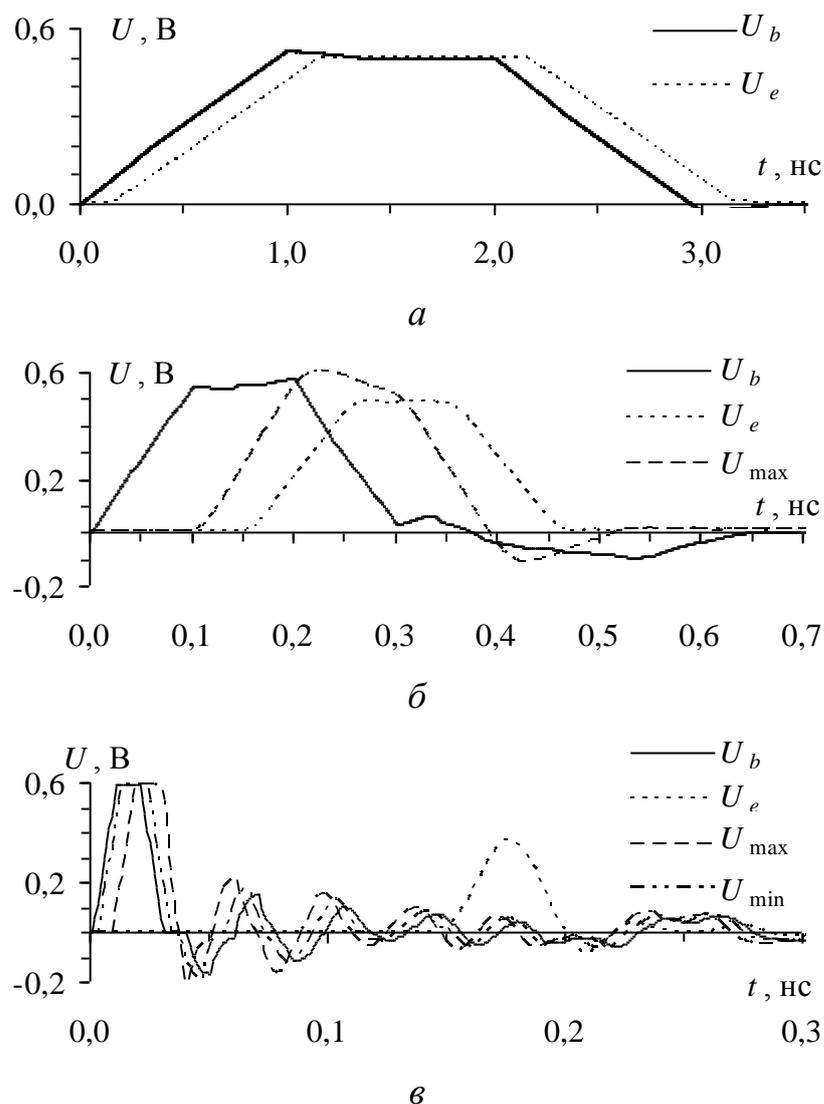


Рисунок 3.16 – Формы сигналов для случая 2
при воздействиях U_1 (а), U_2 (б) и U_3 (в)

Рассмотрим помеховые сигналы, к которым можно отнести воздействия U_2 и U_3 , длительность которых меньше, чем у полезных. При одном источнике напряжения наблюдается следующее: при воздействии U_2 выявлен максимум напряжения, равный 0,59 В (рисунок 3.14 б), что на 18% больше установившегося уровня 0,5 В, причем он локализован в сегменте 10 (таблица 3.2) на одной из пятипроводных линий передачи, находящейся на другом слое (рисунок 3.15 а). При воздействии U_3 выявлен не только максимум напряжения, равный 0,552 В, что примерно на 10% превышает уровень 0,5 В, но и минимум, равный минус 0,18 В (рисунок 3.14 в), что на минус 36% (от 0,5 В) ниже оси абсцисс.

Причем локализованы они совершенно в других местах, как это видно из таблицы 3.2 и рисунка 3.15 б и в.

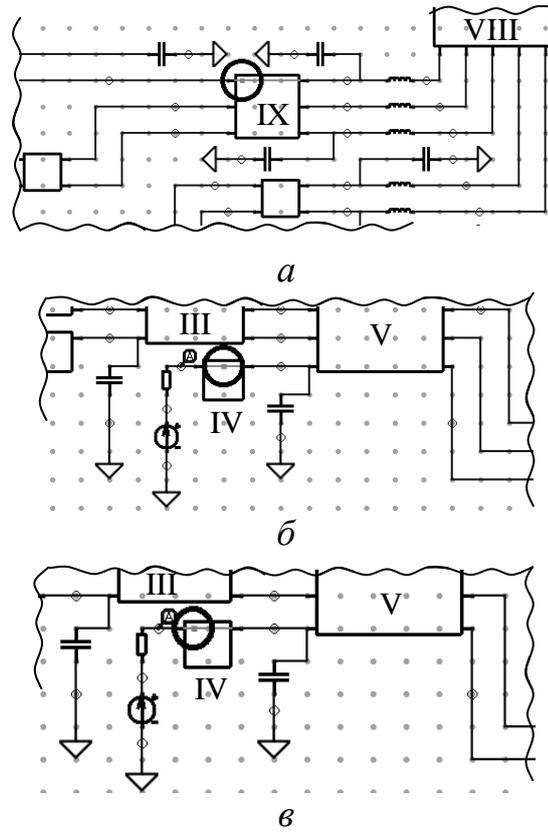


Рисунок 3.17 – Локализация максимумов (а и б) для сигналов из рисунка 3.16 б и в, соответственно, а также минимума (в) для сигнала из рисунка 3.16 в

Таблица 3.2 – Пиковые значения напряжений и параметры их локализации

Число источников	Сигнал	Рисунок	U_{\max}		U_{\min}	
			Значение, В	Сегмент (рисунок)	Значение, В	Сегмент (рисунок)
1	U_1	3.14 а	0,530	1	-0,05	1
1	U_2	3.14 б	0,597	10 (3.15 а)	-0,11	20
1	U_3	3.14 в	0,552	5 (3.15 б)	-0,18	3 (3.17 в)
2	U_1	3.16 а	0,540	1	-0,05	1
2	U_2	3.16 б	0,604	17 (3.17 а)	-0,12	20
2	U_3	3.16 в	0,593	11 (3.17 б)	-0,20	15 (3.17 в)

При наличии двух генераторов для воздействия U_2 выявлен максимум напряжения, равный 0,6 В (рисунок 3.16 б), что на 20% превышает уровень 0,5 В. Он локализован в сегменте 17 (таблица 3.2) в трехпроводной линии передачи,

находящейся во второй половине шины ПП РПУ САН. А при воздействии U_3 аналогично выявлено два пиковых значения: максимальное, равное 0,593 В, что на 18% превышает уровень 0,5 В, и минимальное, равное минус 0,2 В, что на 40% (от уровня 0,5 В) ниже оси абсцисс. Оба значения локализованы в одном отрезке линии передачи, ближайшей к источнику напряжения (рисунок 3.17 б и в). Отличия состоят только в номере сегмента: минимальное значение локализовано в сегменте 5, а максимальное – в сегменте 11.

Рассмотрим оба случая для воздействия U_3 . Помимо появления пиковых значений напряжения, наблюдаются многократные отражения. Также наблюдается снижение амплитуды сигнала на выходе линии. На рисунке 3.14 в она составляет 0,3 В, а на рисунке 3.16 в – 0,4 В, что на 40% и 20% меньше уровня 0,5 В.

Проведенное исследование показывает особенности появления и локализации пиковых значений СКИ с разными длительностями. Так, судя по таблице 3.2, наибольшее значение максимума (около 0,6 В) наблюдается при воздействии U_2 в обоих случаях. Однако если амплитуды сигналов ведут себя примерно одинаково для обоих случаев, то про их места этого сказать нельзя: они локализованы в разных отрезках линий передачи и в разных сегментах вдоль этих линий (т.е. в разных участках ПП). Можно сделать вывод о том, что для комплексного исследования ПП полезно рассматривать не только полезные сигналы, но и помеховые, поскольку при таких воздействиях наблюдаются более сильные изменения формы сигнала и их амплитуды. Это позволит повысить производительность и безотказность проектируемой радиоэлектронной аппаратуры.

3.3.2.2. В пассивных проводниках

Фрагмент исследуемой платы изображен на рисунке 3.18, а ее принципиальная схема – на рисунке 3.19.

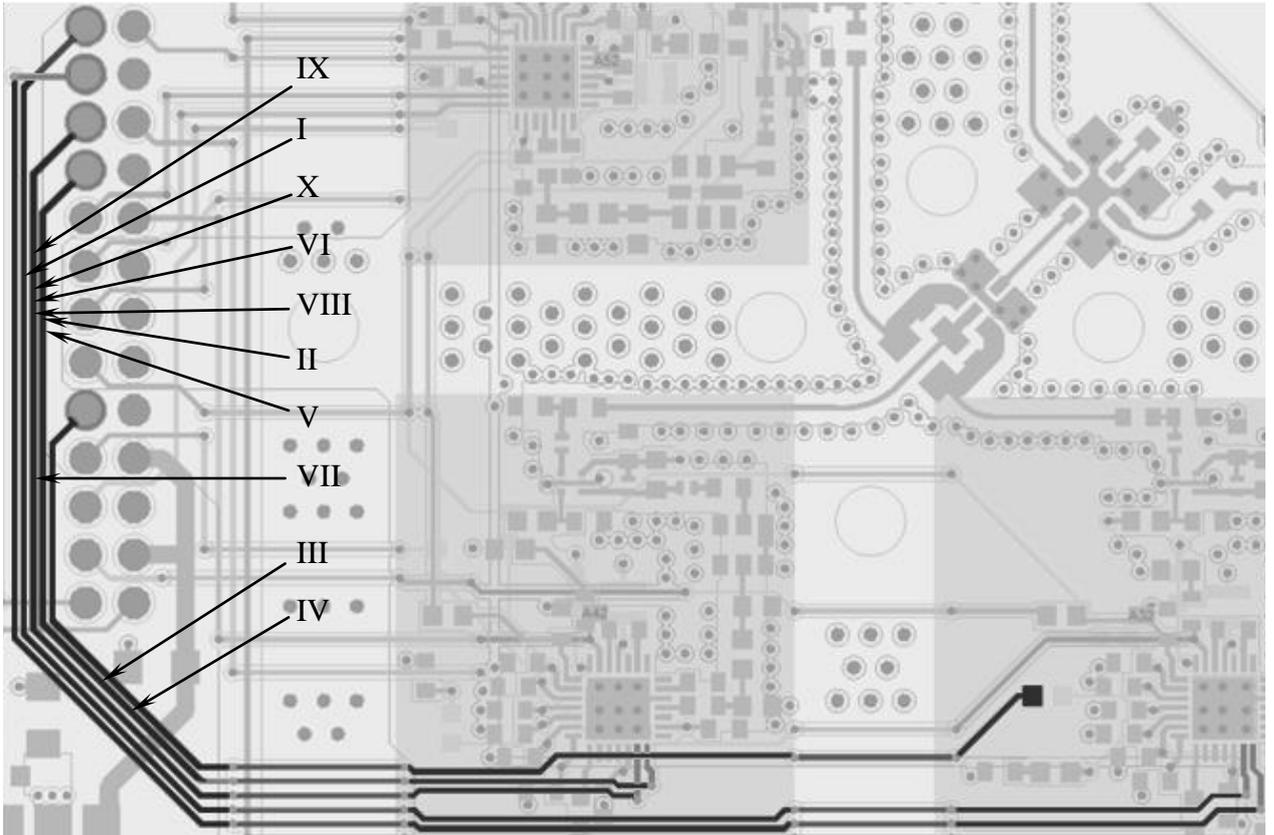


Рисунок 3.18 – Фрагмент ПП РПУ САН с исследуемой шиной
и местами пиковых значений

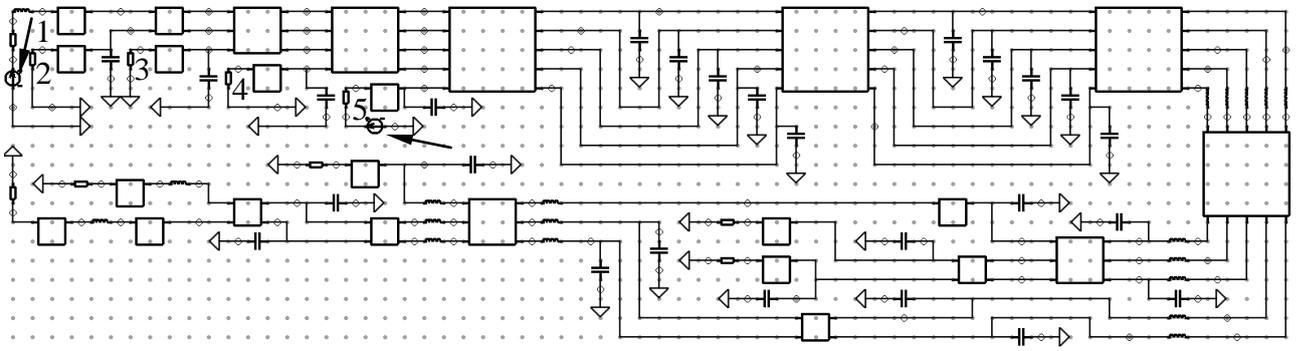


Рисунок 3.19 – Принципиальная схема шины ПП РПУ САН
(с 2-я генераторами, указанными стрелками)

Рассмотрено два случая, отличающихся количеством генераторов напряжений. В первом использовано два генератора, подключенных к проводникам 1 и 5 (крайним) (рисунок 3.19), а во втором – четыре генератора, проводник 3 (центральный) был пассивным (рисунок 3.20). На данных рисунках генераторы указаны стрелками, а проводники пронумерованы. В обоих случаях выполнены вычисления и получены формы сигналов вдоль каждого из пяти проводников при разных воздействиях, однако представлены результаты только

для пассивных линий, поскольку представляет интерес уровень перекрестных наводок и места локализации. Чтобы получить формы сигнала вдоль определенного проводника, на нем надо указать точки А и В, между которыми будет выполняться вычисление. На рисунке 3.21 представлены эти точки для случая с 2-я генераторами, когда отклик вычисляется вдоль проводника 2.

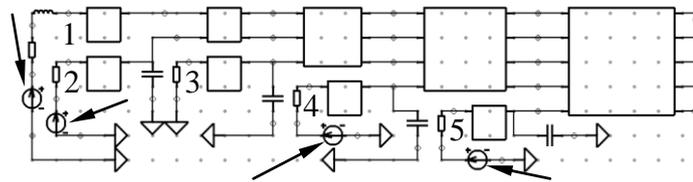


Рисунок 3.20 – Фрагмент схемы для случая с 4-я генераторами

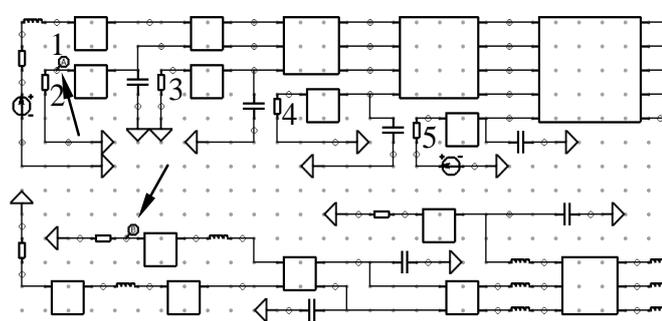


Рисунок 3.21 – Точки А и В при 2-х генераторах

В качестве воздействий выбраны три СКИ амплитудой ЭДС 1 В. Формы каждого импульса представлены на рисунке 3.13. Каждый из импульсов поочередно подавался на генераторы так, что одновременно на каждом генераторе импульсы были одинаковы.

В случаях с 2-я и 4-я генераторами вычислены по 20 форм напряжений на последовательных сегментах вдоль каждого пассивного проводника каждого отрезка линии передачи из рисунка 3.19. Однако представлены только формы в начале (U_b) и конце (U_e) проводника, а также с максимальными (U_{max}) и минимальными (U_{min}) значениями напряжений, возникающих при каждом из воздействий. Таким образом, для первого случая представлены формы напряжений вдоль проводников 2, 3 и 4, а для второго – только вдоль проводника 3. На рисунке 3.22 показаны формы сигналов вдоль проводника 2 для случая с 2-я генераторами при каждом из воздействий. Максимум сигнала совпадает с формой сигнала в начальном узле при воздействии U_1 , а минимумы – при U_1 и U_2 . Поэтому их формы не указаны на рисунке 3.22. На рисунке 3.23

указано место минимального значения для сигнала U_3 , остальные не приведены, поскольку они локализованы в узлах схемы.

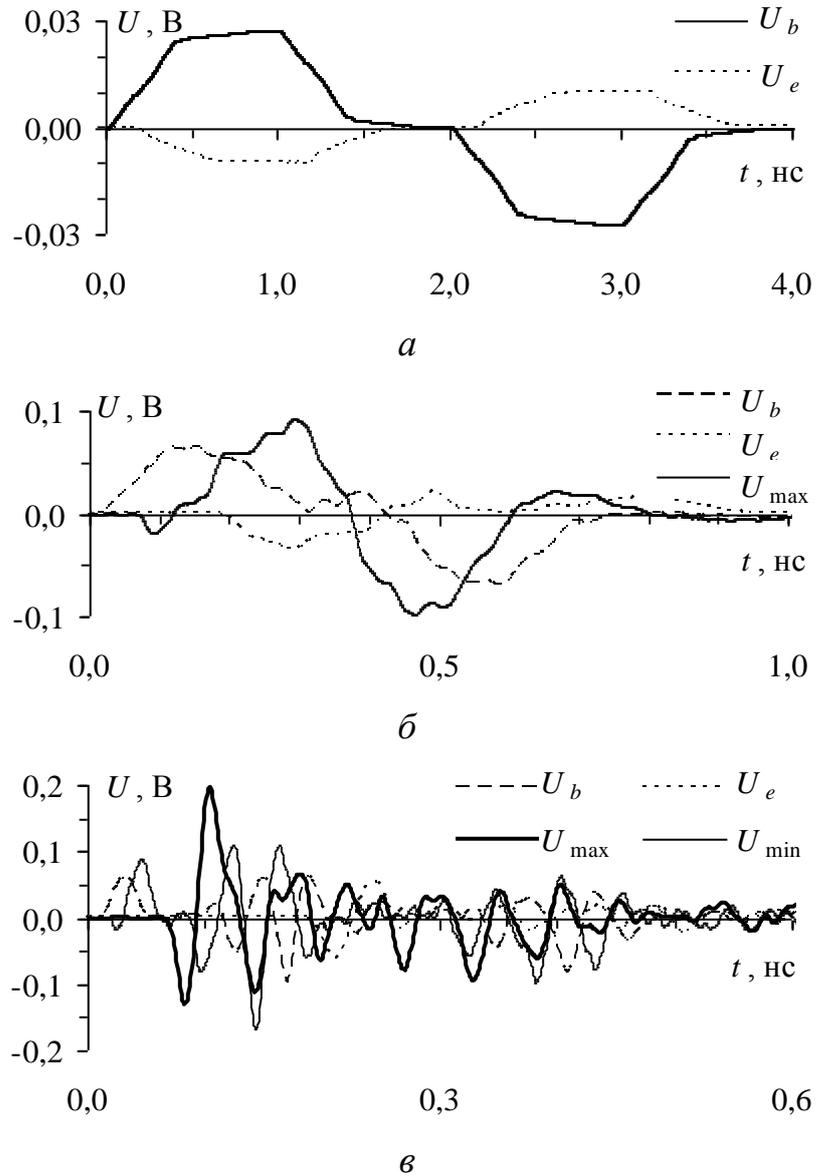


Рисунок 3.22 – Формы сигналов вдоль проводника 2 при воздействиях U_1 (а), U_2 (б), U_3 (в)

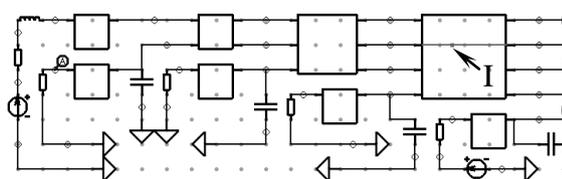
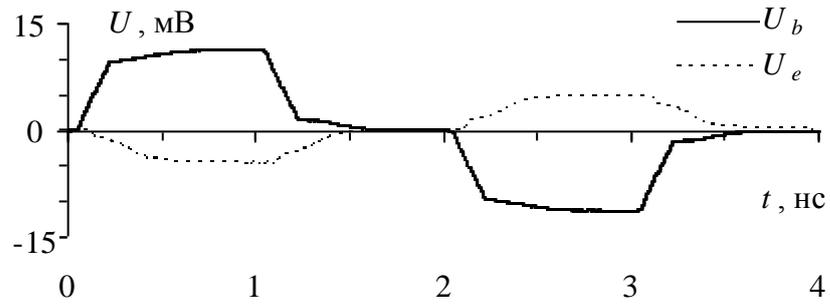
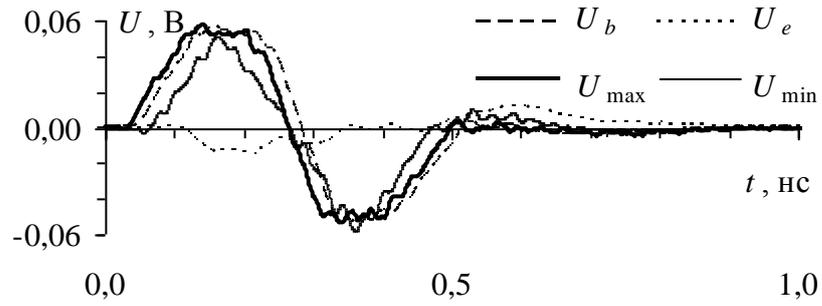


Рисунок 3.23 – Локализация минимума для сигнала из рисунка 3.22 в

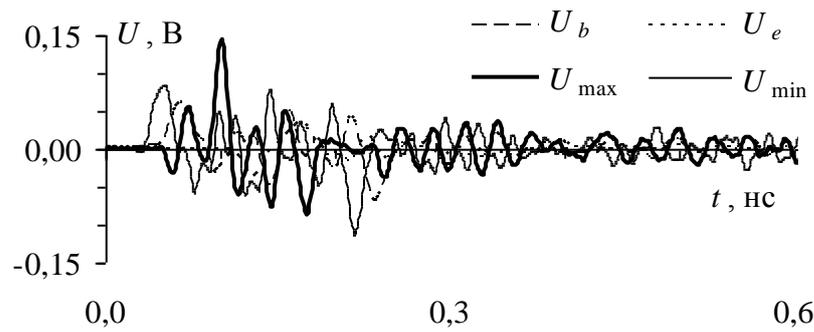
Результаты моделирования для этого же случая, но для проводника 4 представлены на рисунке 3.24, а места пиковых значений – на рисунке 3.25 и 3.26. Аналогично, если пиковое значение локализовано в узле, его место не указано.



a



б



в

Рисунок 3.24 – Формы сигналов вдоль проводника 4 при воздействиях U_1 (a), U_2 (б), U_3 (в)

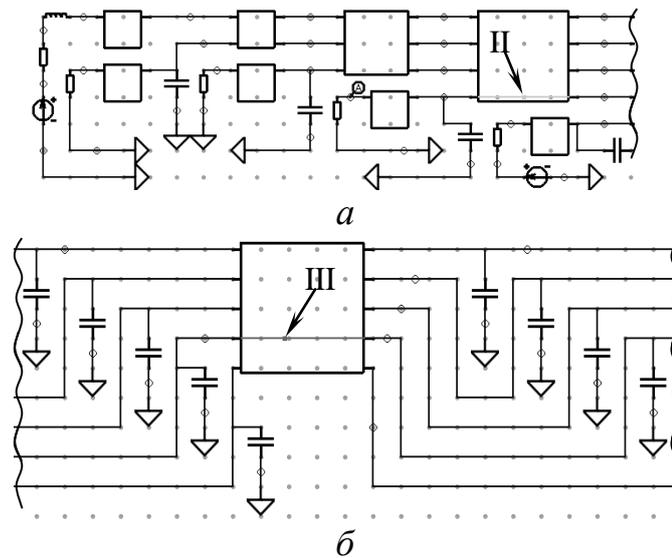


Рисунок 3.25 – Локализация максимума (а) и минимума (б)
для сигнала из рисунка 3.24 б

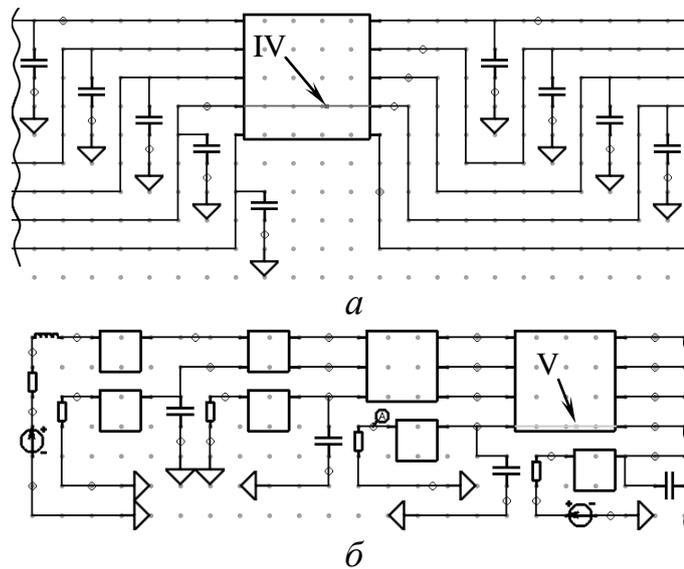


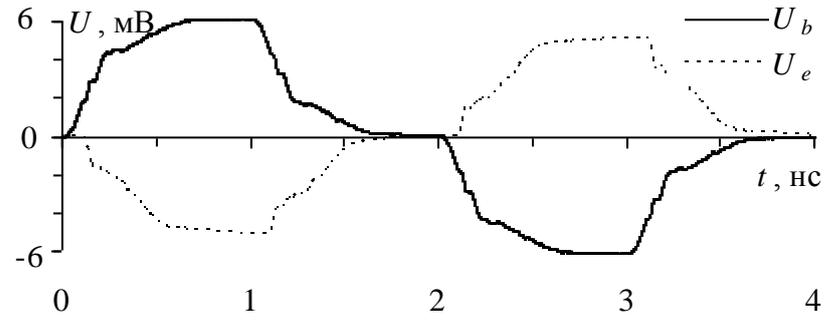
Рисунок 3.26 – Локализация максимума (а) и минимума (б)
для сигналов из рисунка 3.24 в

На рисунке 3.27 представлены результаты моделирования для проводника 3 (центрального) при 2-х генераторах, а на рисунках 3.28 и 3.30 места их пиковых значений. Результаты моделирования при 4-х генераторах для проводника 3 представлены на рисунке 3.29, а места их пиковых значений – на рисунке 3.30. В таблице 3.3 сведены пиковые значения напряжений, а также номера сегментов, в которых они локализованы.

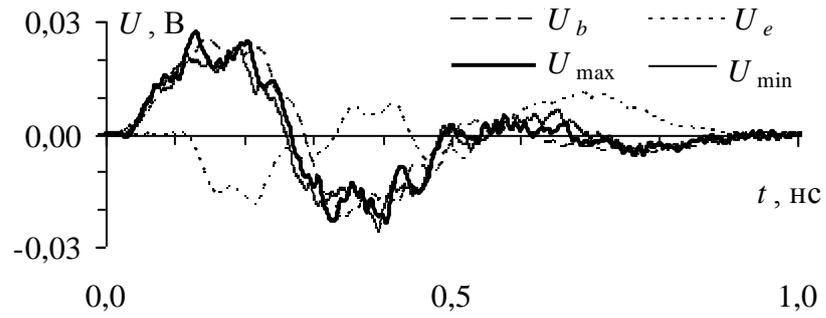
Таблица 3.3 – Пиковые значения напряжений и параметры их локализации

Число источников	Проводник	Сигнал	Рисунок	U_{\max}		U_{\min}	
				Значение, В	Сегмент (рисунок)	Значение, В	Сегмент (рисунок)
2	2	U_1	3.22 а	0,027	20	-0,027	1
2	2	U_2	3.22 б	0,092	20	-0,110	1
2	2	U_3	3.22 в	0,197	1	-0,167	7 (3.23)
2	4	U_1	3.24 а	0,011	1	-0,011	20
2	4	U_2	3.24 б	0,058	10 (3.25 а)	-0,057	7 (3.25 б)
2	4	U_3	3.24 в	0,145	13 (3.26 а)	-0,112	12 (3.26 б)
2	3	U_1	3.27 а	0,006	1	-0,006	1
2	3	U_2	3.27 б	0,027	9 (3.28 а)	-0,025	3 (3.28 б)
2	3	U_3	3.27 в	0,090	1	-0,120	10 (3.28 в)
4	3	U_1	3.29 а	0,031	1	-0,031	1
4	3	U_2	3.29 б	0,139	1	-0,126	5 (3.30 а)
4	3	U_3	3.29 в	0,292	1	-0,199	8 (3.30 б)

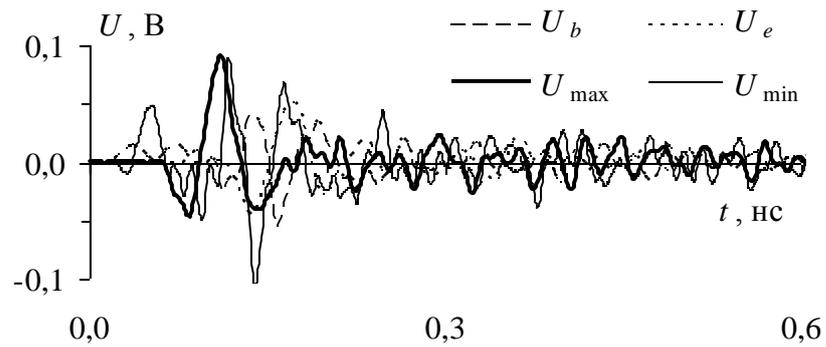
Рассмотрим воздействие полезного сигнала (U_1). Для проводника 2 выявлены пиковые значения, представленные на рисунке 3.22 а, однако их уровни и места совпадают с сигналами на концах проводника. Для проводника 4 в случае с двумя генераторами ситуация аналогична, поскольку выявленные формы пиковых значений напряжений, представленные на рисунке 3.24 а, также совпадают с сигналами на концах проводника и локализованы в узлах схемы. Аналогичная ситуация наблюдается для проводника 3, как с 2-я генераторами (рисунок 3.27 а), так и с 4-я (рисунок 3.29 а). Отличия заключаются только в абсолютных значениях амплитуд. Так, наибольшее значение напряжения (35 мВ или 7% от установившегося уровня 0,5 В в активном проводнике) в вышеописанных случаях наблюдается в проводнике 3 при включенных 4-х генераторах (рисунок 3.29 а).



a



б



в

Рисунок 3.27 – Формы сигналов вдоль проводника 3 при воздействиях U_1 (a), U_2 (б), U_3 (в) с 2-я генераторами

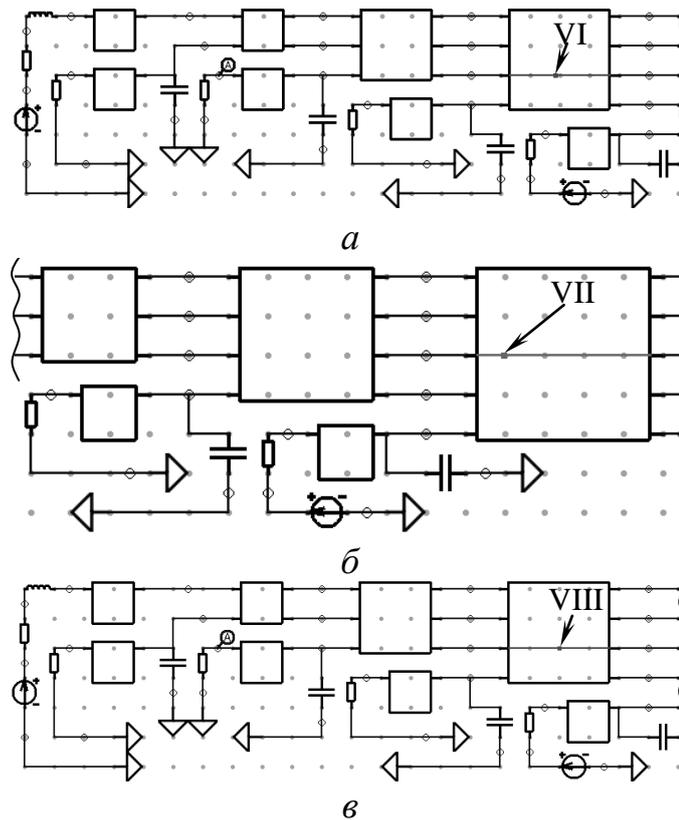


Рисунок 3.28 – Локализация максимума (а), минимума (б)

для сигнала из рисунка 3.27 б и минимума для сигнала из рисунка 3.27 в (в)

Рассмотрим воздействие полезного сигнала (U_1). Для проводника 2 выявлены пиковые значения, представленные на рисунке 3.22 а, однако их уровни и места совпадают с сигналами на концах проводника. Для проводника 4 в случае с двумя генераторами ситуация аналогична, поскольку выявленные формы пиковых значений напряжений, представленные на рисунке 3.24 а, также совпадают с сигналами на концах проводника и локализованы в узлах схемы. Аналогичная ситуация наблюдается для проводника 3 как с 2-я генераторами (рисунок 3.27 а), так и с 4-я (рисунок 3.29 а). Отличия заключаются только в абсолютных значениях амплитуд. Так, наибольшее значение напряжения (35 мВ или 7% от установившегося уровня 0,5 В в активном проводнике) в вышеописанных случаях наблюдается в проводнике 3 при включенных 4-х генераторах (рисунок 3.29 а).

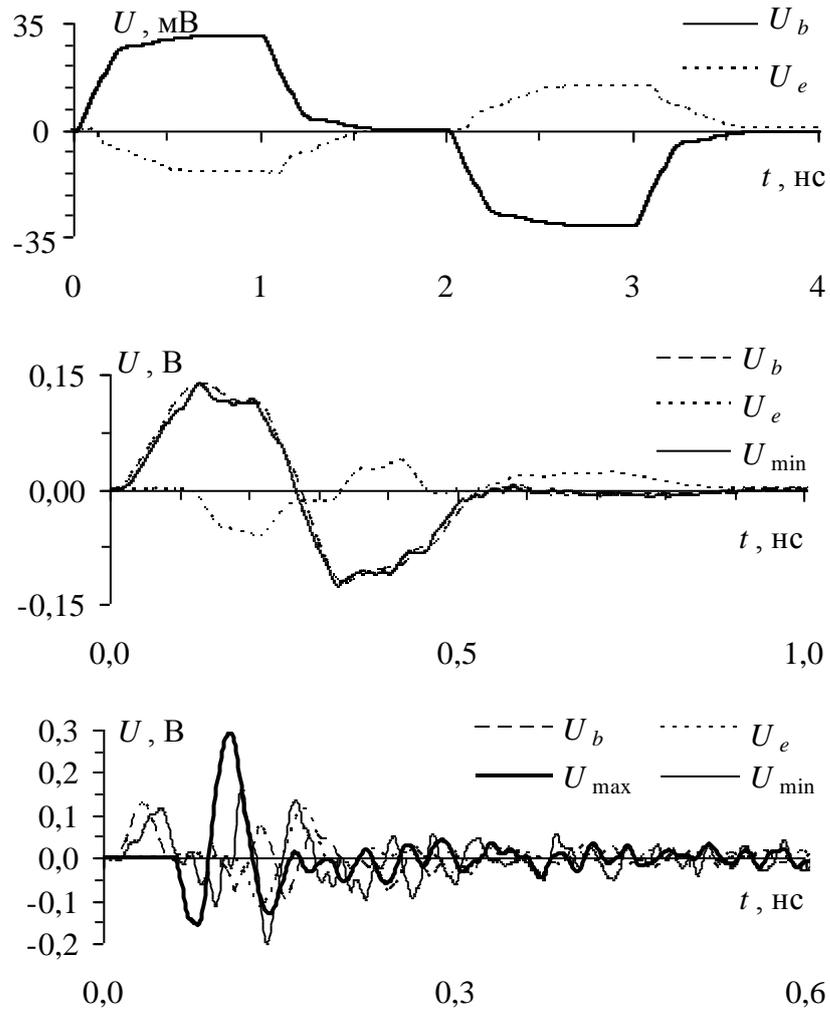


Рисунок 3.29 – Формы сигналов вдоль проводника 3 при воздействиях U_1 (а), U_2 (б), U_3 (в) с 4-я генераторами

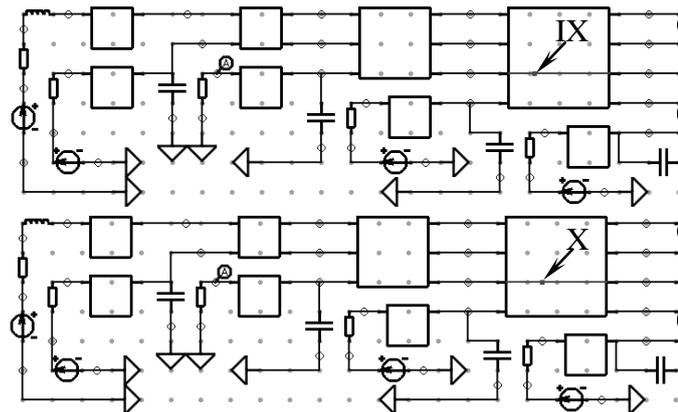


Рисунок 3.30 – Локализация минимумов для сигналов рисунка 3.29 б (а) и рисунка 3.29 в (б)

Рассмотрим помеховые сигналы, к которым можно отнести воздействия U_2 и U_3 , длительность которых меньше, чем у полезных. Для проводника 2 при воздействии U_2 выявлены максимум, равный 0,092 В (рисунок 3.22 б), что

составляет 18,4% от установившегося уровня 0,5 В, и минимум, равный минус 0,11 В, что составляет 22% от уровня 0,5 В, однако они локализованы в узле. При воздействии U_3 выявлен максимум, равный 0,197 В или 39,4% от уровня 0,5 В, локализованный в узле, а также минимум, равный минус 0,167 В (рисунок 3.22 в) или 33,4% от уровня 0,5 В, локализованный в сегменте 7 (таблица 3.3).

Рассмотрим формы напряжений вдоль 4-го проводника при тех же воздействиях. При воздействии U_2 выявлен максимум напряжения, равный 0,058 В (рисунок 3.24 б), что составляет 11,6% от 0,5 В, и локализованный в сегменте 10 (таблица 3.3). Также выявлен минимум, равный минус 0,057 В (11,4% от 0,5 В), локализованный в сегменте 7. При воздействии U_3 выявлен максимум напряжения, равный 0,145 В (рисунок 3.24 в), или 29% от 0,5 В и локализованный в сегменте 13 (таблица 3.3), а также минимум, равный минус 0,112 В, или 22,4% от 0,5 В, локализованный в сегменте 12.

Рассмотрим формы напряжений вдоль проводника 3. При 2-х генераторах и воздействии U_2 выявлен максимум напряжения, равный 0,027 В (рисунок 3.27 б), что составляет 5,4% от уровня 0,5 В, локализованный в сегменте 9, и минимум, равный минус 0,025 В (5% от 0,5 В), локализованный в сегменте 3. При воздействии U_3 выявлен минимум, равный минус 0,12 В (рисунок 3.27 в) или 24% от 0,5 В и локализованный в сегменте 10. При 4-х генераторах все выявленные максимумы напряжений локализованы в узлах, а минимумы: при воздействии U_2 , равный минус 0,126 В (25,2% от 0,5 В) – в сегменте 5, а при воздействии U_3 , равный минус 0,199 В (39,8% от 0,5 В) – в сегменте 8.

Проведенное исследование показывает особенности появления и локализации пиковых значений перекрестных наводок от СКИ с разными длительностями. Так, судя по таблице 3.3, наибольшее значение максимума (0,145 В – 29% от уровня 0,5 В), локализованного не в узле, выявлено на проводнике 4 с 2-я источниками при общей длительности СКИ 0,03 нс. Наибольшее значение минимума (минус 0,199 В – 39,8% от 0,5 В) выявлено на проводнике 3 при такой же общей длительности СКИ, но с 4-я источниками.

Однако почти все места локализации пиковых значений (за исключением III, IV и VII) находятся на одном отрезке МПЛП (рисунок 3.18). Если считать, что максимально допустимый уровень перекрестных наводок в трассах печатных плат САН должен составлять не более 10% от амплитуды сигнала в активном проводнике, все выявленные пиковые значения (за исключением выявленных на проводнике 3 при воздействии U_2) не удовлетворяют этому условию. Кроме того, если рассматривать максимумы в узлах, то для случая с 2-я генераторами наибольшее значение максимума (0,197 В – 39,4% от уровня 0,5 В) выявлено на проводнике 2, а для случая с 4-я генераторами наибольший максимум (0,292 В – 58,4% от 0,5 В) выявлен на проводнике 3. Эти максимумы также не удовлетворяют условию не более 10% и превышают его почти в 4 и 6 раз, соответственно.

Из анализа результатов следует, что при длительностях СКИ, которые можно отнести к полезным, вдоль проводников отрезков МПЛП не выявлено пиковых значений. Выявлено, что отклик вычислять целесообразно не только вдоль активных проводников, но и вдоль пассивных, поскольку в них наблюдаются значительные перекрестные наводки.

3.3.3. Воздействие электростатического разряда

После моделирования импульсов в виде трапеции выполнено моделирование с использованием ЭСР, форма которого задана по стандарту IEC 61000-4-2 [97]. Фрагмент исследуемой платы изображен на рисунке 3.31. На концах каждого проводника шины полагаются сопротивления 50 Ом.

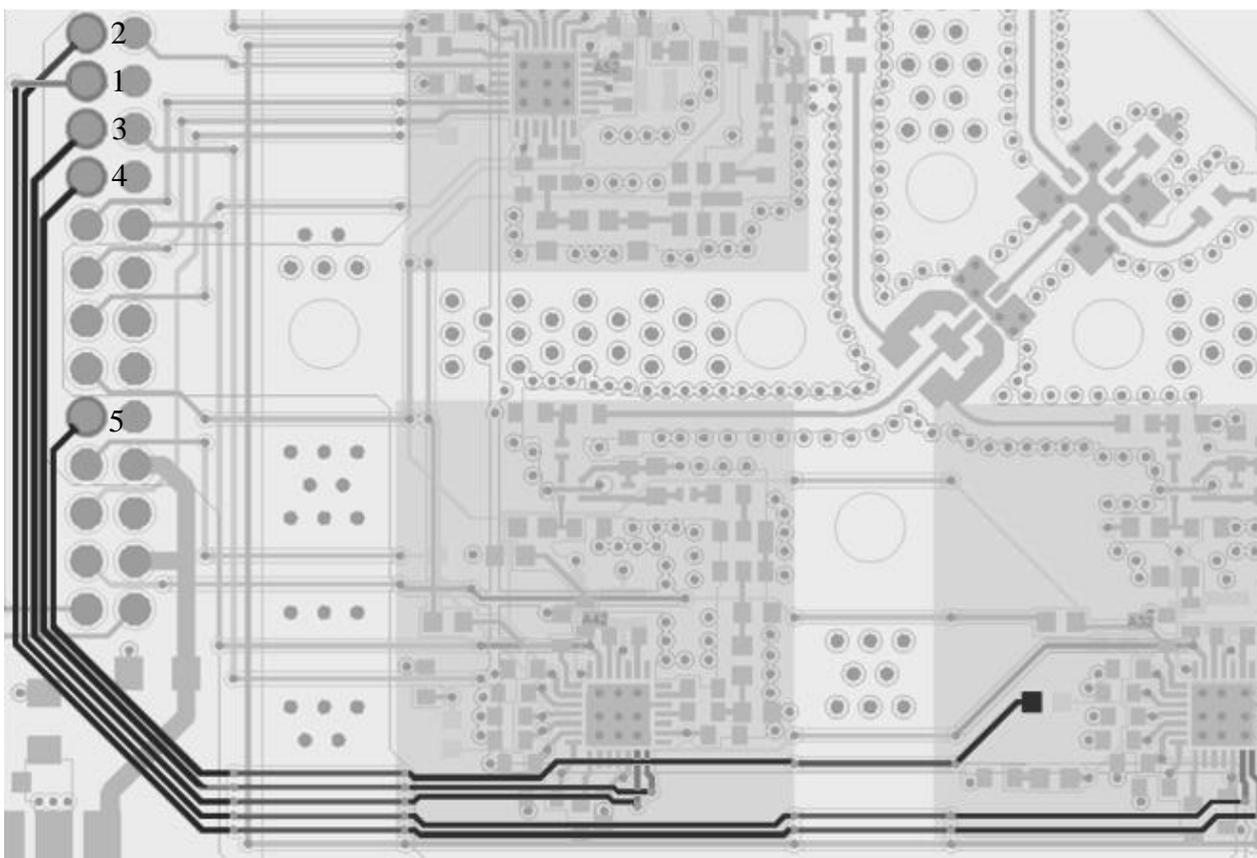


Рисунок 3.31 – Фрагмент ПП РПУ САН с исследуемой шиной

В качестве воздействия выбран ЭСР, параметры которого, а также обоснование их выбора, приведены в работе [98]. Воздействие подавалось поочередно на каждый проводник, и вычислялись формы напряжений вдоль каждого из проводников. Затем рассмотрен случай, когда все проводники, кроме центрального, были под воздействием ЭСР.

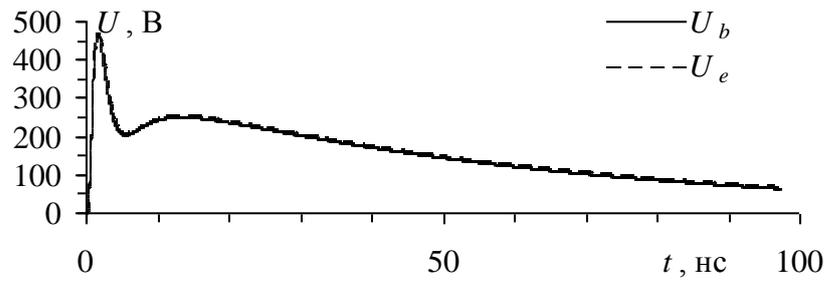
Результаты моделирования для первого активного проводника приведены на рисунке 3.32, второго – на рисунке 3.33, третьего – на рисунке 3.34, четвертого – на рисунке 3.35 и пятого – на рисунке 3.36. Результаты моделирования при четырех активных проводниках и пассивном центральном проводнике приведены на рисунке 3.37. Для последнего случая приведены только формы перекрестной наводки в центральном проводнике, поскольку она представляет наибольший интерес, формы сигнала в активных проводниках практически не отличаются друг от друга и предыдущих случаев.

Рассмотрим формы сигналов при активном проводнике 1. Амплитуда напряжения в активном проводнике составляет 470 В (рисунок 3.32 *a*), что весьма

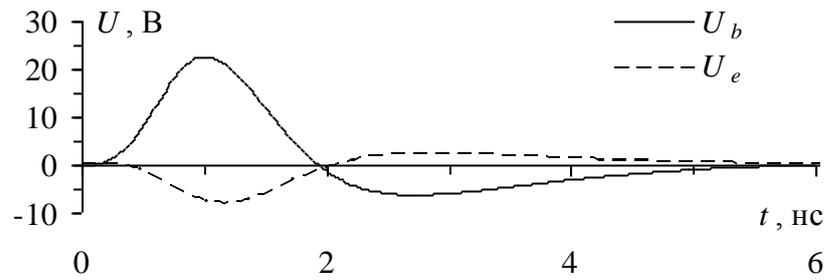
опасно для интегральных схем. Пиковые значения напряжений совпадают с напряжениями в начале, либо конце, поэтому они не указаны на графиках. Самая большая амплитуда перекрестной наводки наблюдается на проводнике 2 (рисунок 3.32 б). Она составляет только 5% от амплитуды сигнала в активном проводнике, но равна 24 В, что довольно опасно. В этом же проводнике наблюдается и значительное отрицательное напряжение (минус 7 В). На проводниках 3–5 амплитуда перекрестной наводки уменьшается с 3 В до 1 В.

Рассмотрим формы сигналов при активном проводнике 2. Амплитуда сигнала в активном проводнике совпадает со случаем 1 (около 470 В). Самая большая амплитуда перекрестной наводки выявлена в проводнике 1 (рисунок 3.33 а). Она равна 23 В, что составляет 4,8% от уровня сигнала в активном проводнике. На проводнике 3 (рисунок 3.33 в) также наблюдается большая амплитуда перекрестной наводки (13 В), что составляет 2,7% от уровня сигнала в активном проводнике. В проводниках 4 и 5 амплитуды перекрестных наводок приблизительно одинаковы и равны 3 и 3,2 В соответственно. Но примечательно, что на дальнем проводнике наводка несколько больше, чем на ближнем.

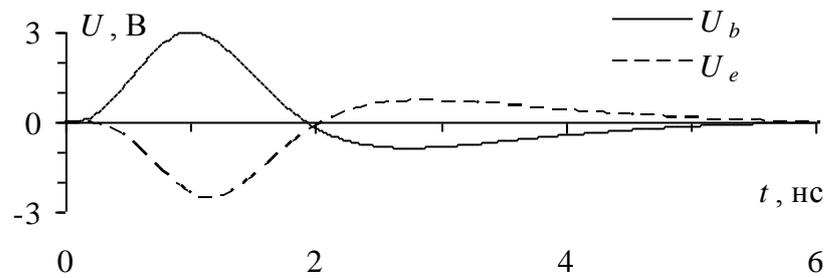
Рассмотрим формы сигналов при активном проводнике 3. Амплитуда сигнала в активном проводнике аналогична вышеперечисленным. Самая большая амплитуда перекрестной наводки выявлена на проводнике 4 (рисунок 3.34 з) и равна 14 В, что составляет 2,9% от уровня сигнала в активном проводнике. Также следует отметить, что и в проводнике 2 выявлена амплитуда перекрестной наводки, равная 11 В. В крайних проводниках амплитуды перекрестных наводок равны 3 В в обоих случаях.



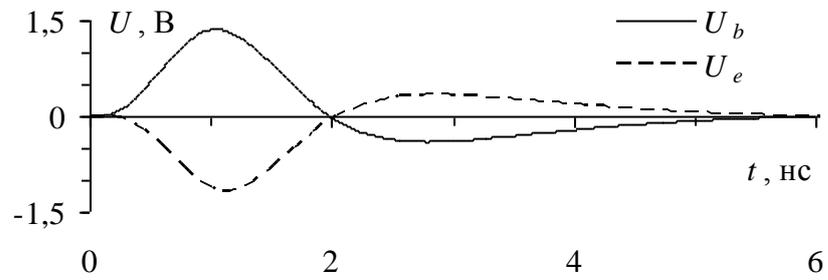
а



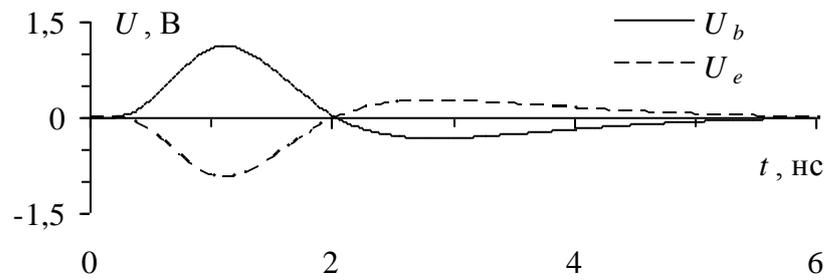
б



в

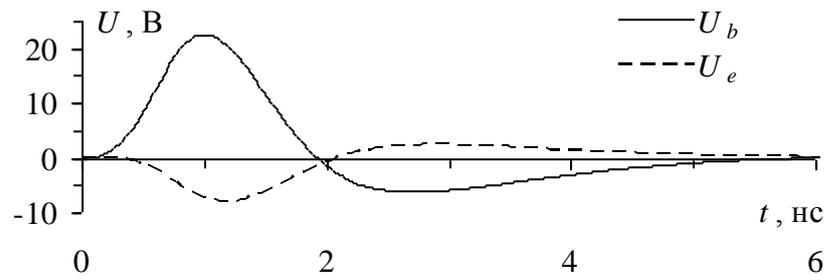


г

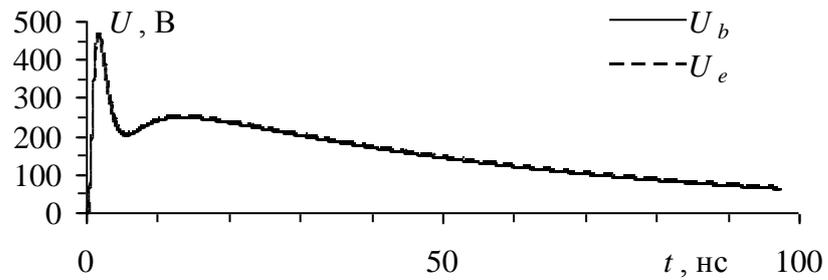


д

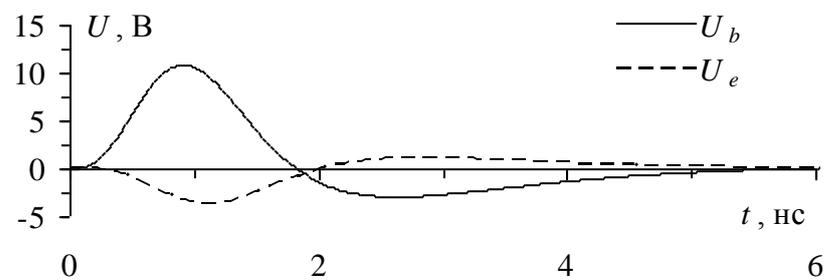
Рисунок 3.32 – Формы сигналов вдоль проводников 1 (а), 2 (б), 3 (в), 4 (г) и 5 (д) при активном проводнике 1



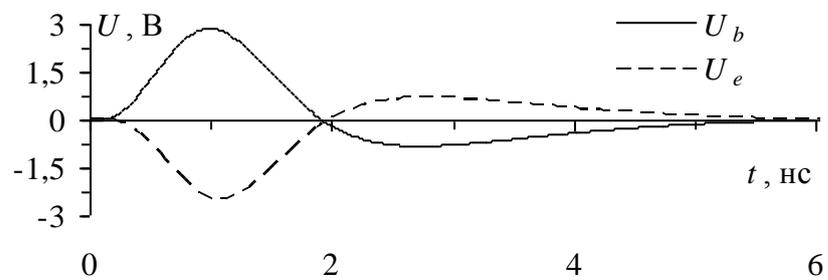
а



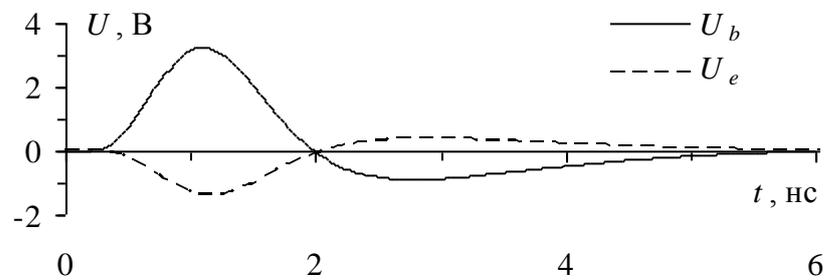
б



в

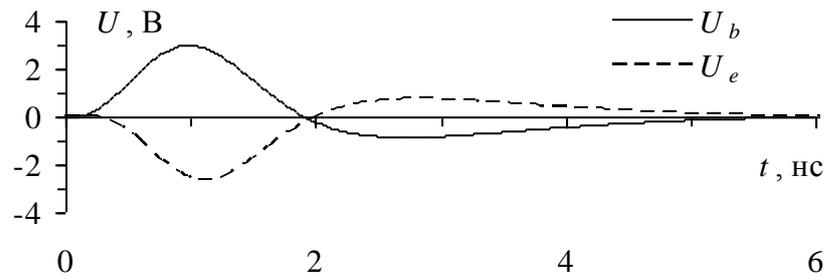


г

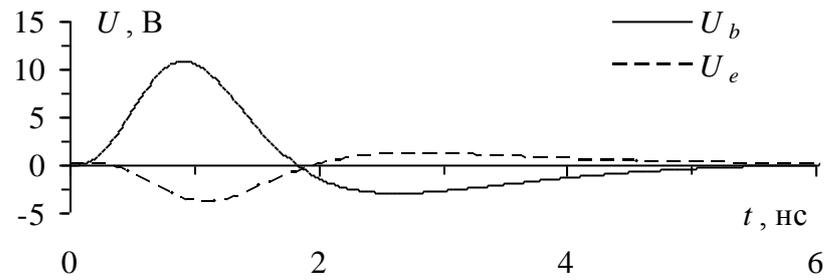


д

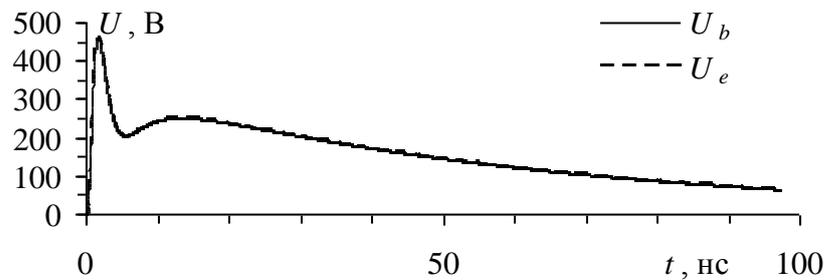
Рисунок 3.33 – Формы сигналов вдоль проводников 1 (а), 2 (б), 3 (в), 4 (г) и 5 (д) при активном проводнике 2



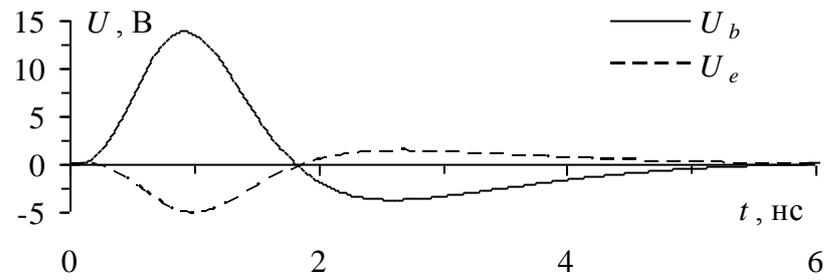
a



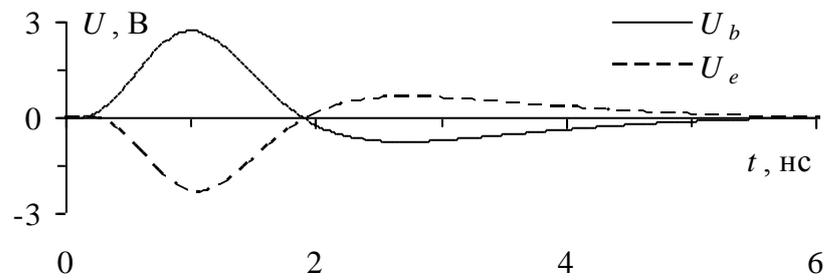
б



в

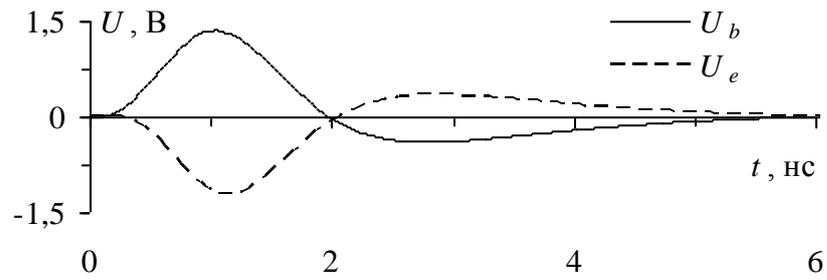


г

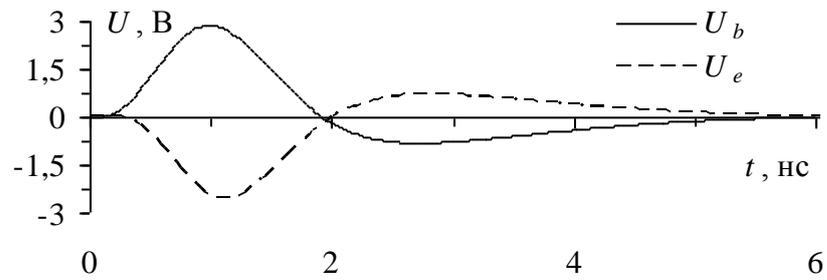


д

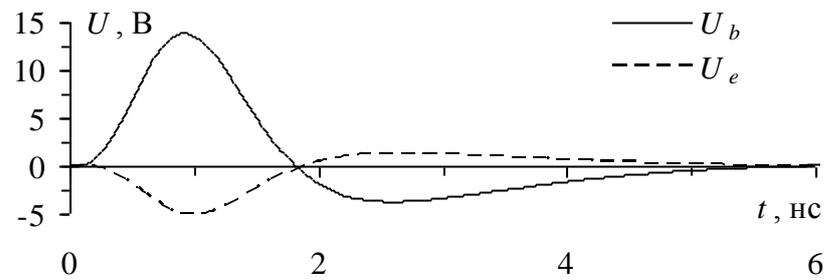
Рисунок 3.34 – Формы сигналов вдоль проводников 1 (а), 2 (б), 3 (в), 4 (г) и 5 (д) при активном проводнике 3



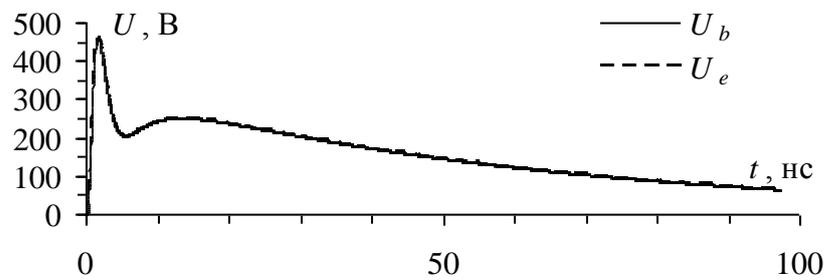
а



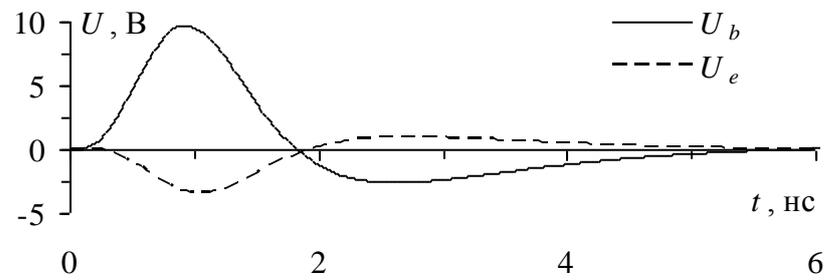
б



в

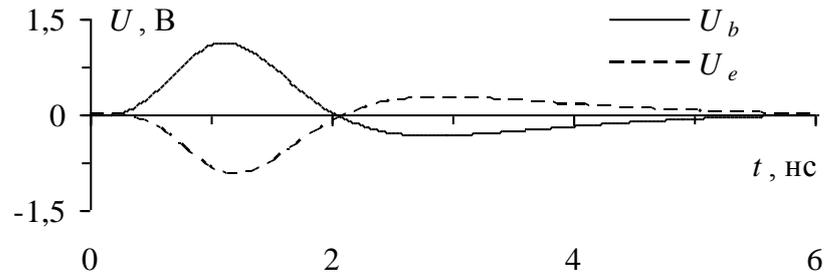


г

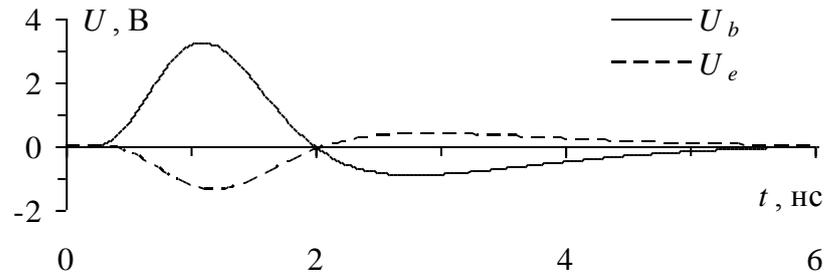


д

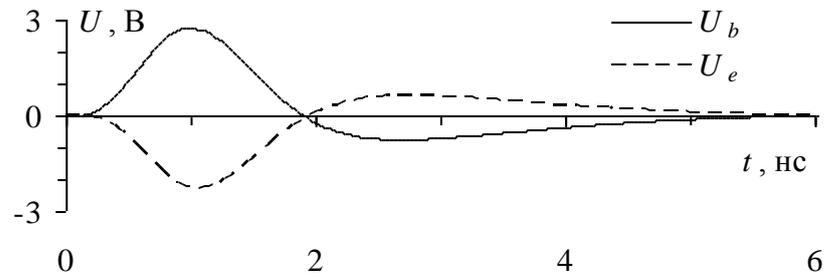
Рисунок 3.35 – Формы сигналов вдоль проводников 1 (а), 2 (б), 3 (в), 4 (г) и 5 (д) при активном проводнике 4



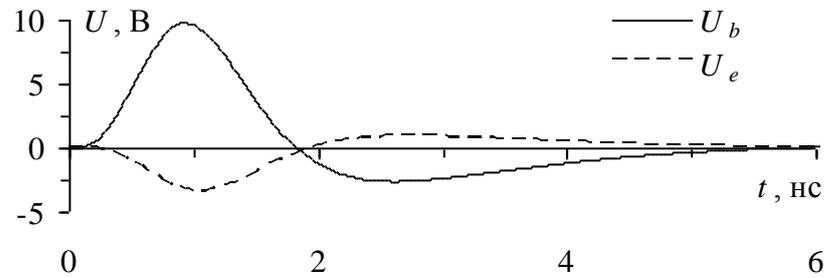
а



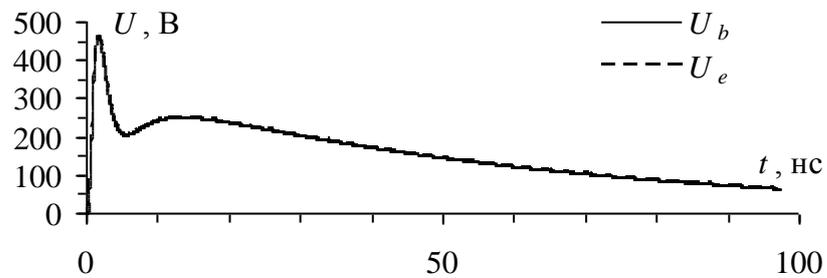
б



в



г



д

Рисунок 3.36 – Формы сигналов вдоль проводников 1 (а), 2 (б), 3 (в), 4 (г) и 5 (д) при активном проводнике 5

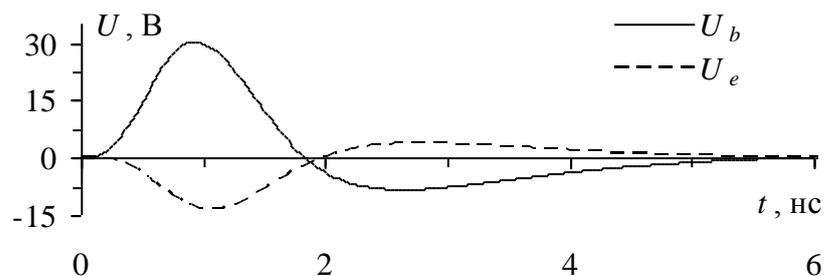


Рисунок 3.37 – Формы сигналов вдоль проводника 3 при активных проводниках 1, 2, 4, 5

В случае с активным проводником 4 ситуация аналогична: соседние проводники имеют перекрестные наводки с амплитудой 14 В и 10 В (рисунок 3.35 в, д). Дальние проводники имеют амплитуды перекрестной наводки 3 В и 1,5 В (по мере удаления от активного проводника).

При активном проводнике 5 наибольшая амплитуда перекрестной наводки также находится на ближнем проводнике и равна 10 В (рисунок 3.36 з), на остальных проводниках амплитуды уменьшаются с 4 В до 1,5 В.

Рассмотрим случай с 4-я активными проводниками, когда центральный проводник пассивный (рисунок 3.37). В этом случае амплитуда перекрестной наводки равна 32 В, что составляет 6,8% от уровня сигнала в активных проводниках. Также наблюдается и значительное отрицательное напряжение (минус 14 В). Если сравнить этот случай с первым, то положительное напряжение оказалось больше на треть, а отрицательное – в 2 раза.

Таким образом, наибольшая амплитуда перекрестной наводки наблюдается в последнем случае (при четырех активных проводниках), а самая малая амплитуда перекрестной наводки в проводнике, соседнем с активным, наблюдается в случае, когда активным был проводник 5.

Проведенное исследование показывает актуальность исследования шины ПП РПУ САН под воздействием ЭСР. Проведено моделирование воздействия ЭСР на разные проводники шины, в том числе, сразу на несколько проводников. Прежде всего, оно показало, что в отличие от СКИ [82, 84, 85], ЭСР не вызывает пиковых напряжений вдоль проводников рассмотренной шины, больших чем на концах этих проводников. Кроме того, важно, что амплитуда напряжения в

активном проводнике может быть около 0,5 кВ и вывести ИС из строя. Опасными могут оказаться и перекрестные наводки, поскольку они могут восприниматься во многих схемах как полезный импульсный сигнал (1–2 нс, 1,5–24 В) и привести к сбою работы схемы. Действительно, наибольшие амплитуды перекрестных наводок составили 32 В (рисунок 3.37), 24 В (рисунок 3.32), 23 В (рисунок 3.33), 14 В (рисунки 3.34, 3.35), 10 В (рисунок 3.36). Отметим, что эти результаты получены для нагрузок 50 Ом, тогда как высокоомный входной импеданс реальных ИС может удвоить эти значения. Подобные амплитуды могут негативно сказаться на работоспособности РЭА критического назначения или привести к выводу ее из строя. Поэтому следует уделять особое внимание обеспечению ЭМС в таком оборудовании, в частности космического аппарата. И для этого вполне применима использованная методология.

3.3.4. Оптимизация эволюционными алгоритмами

3.3.4.1. Оптимизация генетическим алгоритмом

В системе TALGAT реализован простой ГА с бинарным кодированием в виде подключаемого модуля (количество бит на каждый параметр задается по умолчанию равным 16). Далее приведены результаты использования данного модуля вместе с разработанным численным методом.

3.3.4.1.1 Длительности сверхкороткого импульса по критерию максимизации пикового значения напряжения

Фрагмент исследуемой платы изображен на рисунке 3.38, а ее принципиальная схема – на рисунке 3.39. В качестве воздействия выбран СКИ в форме трапеции с амплитудой ЭДС 1 В, изменяемый в диапазоне длительностей. Исследование разделено на две части: в первой изменялась общая длительность

СКИ (t_{Σ}) в диапазоне от 3 до 0,03 нс, а во второй – длительности фронта (t_r), плоской вершины (t_d) и спада (t_f) от 1 до 0,01 нс по отдельности. Для примера, формы трех импульсов из первой части исследования (два импульса из границ, а один внутри диапазона) представлены на рисунке 3.13.

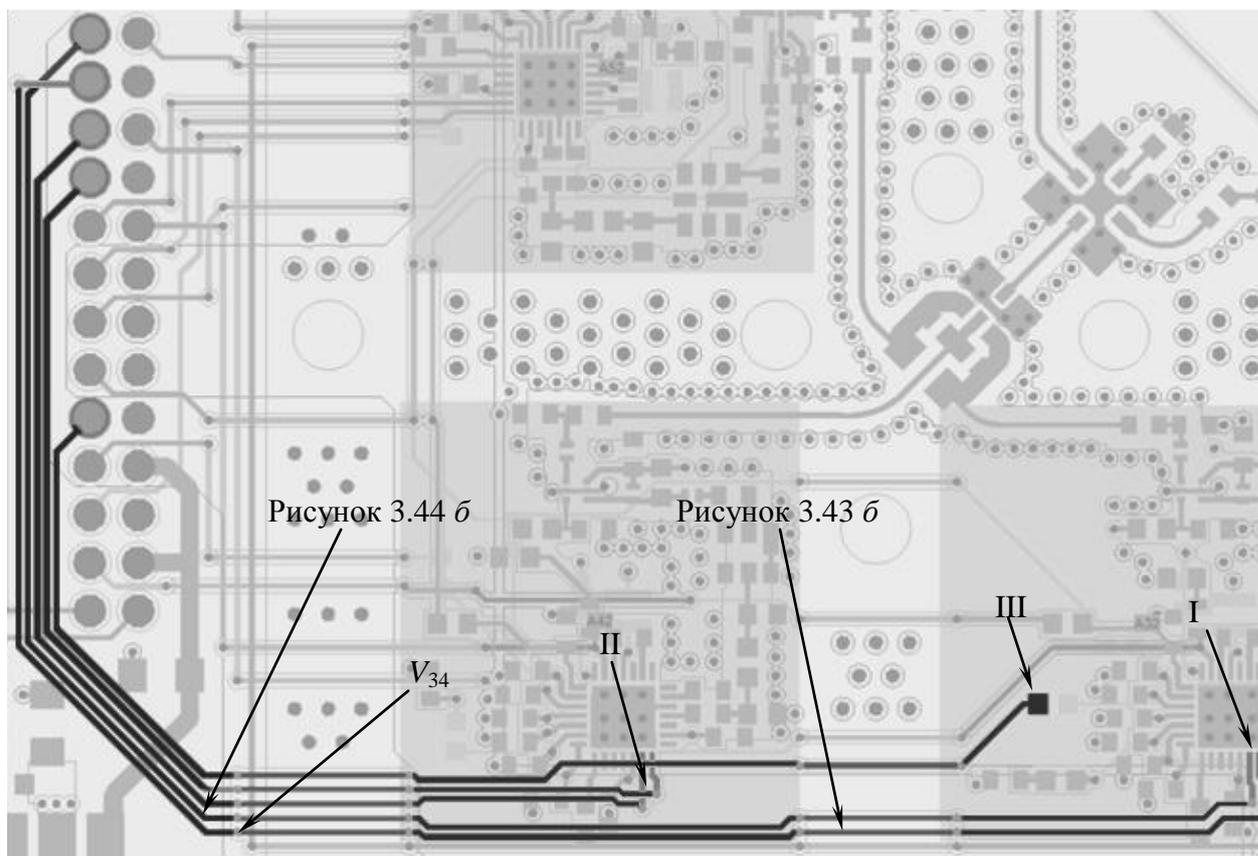


Рисунок 3.38 – Фрагмент ПП РПУ САН с исследуемой шиной

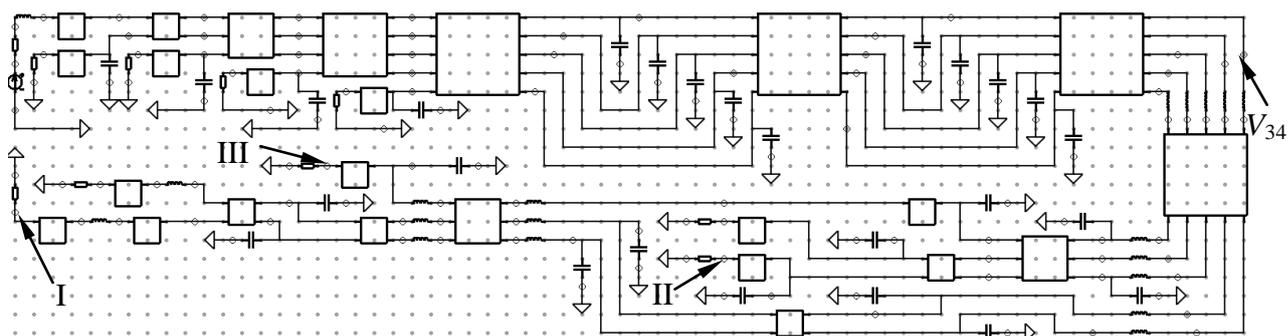


Рисунок 3.39 – Принципиальная схема ПП РПУ САН с исследуемой шиной

ГА запускался со следующими параметрами: коэффициент мутации – 0,1; коэффициент кроссовера – 0,5. В первой части оптимизировался один параметр – общая длительность СКИ в диапазоне от 3 нс до 30 пс, при числе особей в поколении – 5 и количестве поколений – 5, 25, 50. Максимизировалось пиковое значение напряжения в заданном узле шины ПП РПУ САН. Таким образом, цель

оптимизации в первой части заключалась в том, чтобы определить такую общую длительность СКИ, при которой пиковое значение напряжения в произвольно выбранном для примера узле V_{34} (указан стрелками на рисунках 3.38 и 3.39) шины ПП будет максимальным. Тем самым, имитировался поиск наихудшего, по длительности СКИ, случая для критичного узла ПП. ЦФ этой задачи выглядит следующим образом:

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

где V_{34} – максимальное значение напряжения в узле 34, t_{Σ} – общая длительность СКИ.

Во второй части исследования по отдельности оптимизировали длительности фронта, плоской вершины и спада в диапазоне от 1 нс до 10 пс, при числе особей в поколении – 3, 5 и количестве поколений – 5, 10, 50, 75. Максимизировалась сумма пиковых значений напряжений на концах проводников шины ПП в точках I, II, III (указаны стрелками на рисунках 3.38 и 3.39), в месте их подключения к другим элементам ПП. Целью оптимизации во второй части было определение значений длительности фронта, плоской вершины и спада СКИ, при которых сумма напряжений в указанных точках будет максимальна. Тем самым имитировался наихудший случай по трем параметрам СКИ для трех критичных узлов ПП. ЦФ этой задачи выглядит следующим образом:

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

где U_i – максимальное значение напряжения в узле, i – узел, находящийся в точке I, II или III, t_r, t_d, t_f – длительности фронта, плоской вершины и спада соответственно.

Результаты работы ГА в первой части исследования представлены в таблице 3.4. Формы сигнала для последней строки из этой таблицы с наибольшим значением максимума напряжения (0,58 В) показаны на рисунке 3.40, где U_b – напряжение на входе линии, а U_{\max} – максимум.

Таблица 3.4 – Результаты работы ГА для t_{Σ}

Число поколений	t_{Σ} , нс	U_{\max} , В
5	1,936	0,530
10	1,913	0,537
50	0,128	0,580

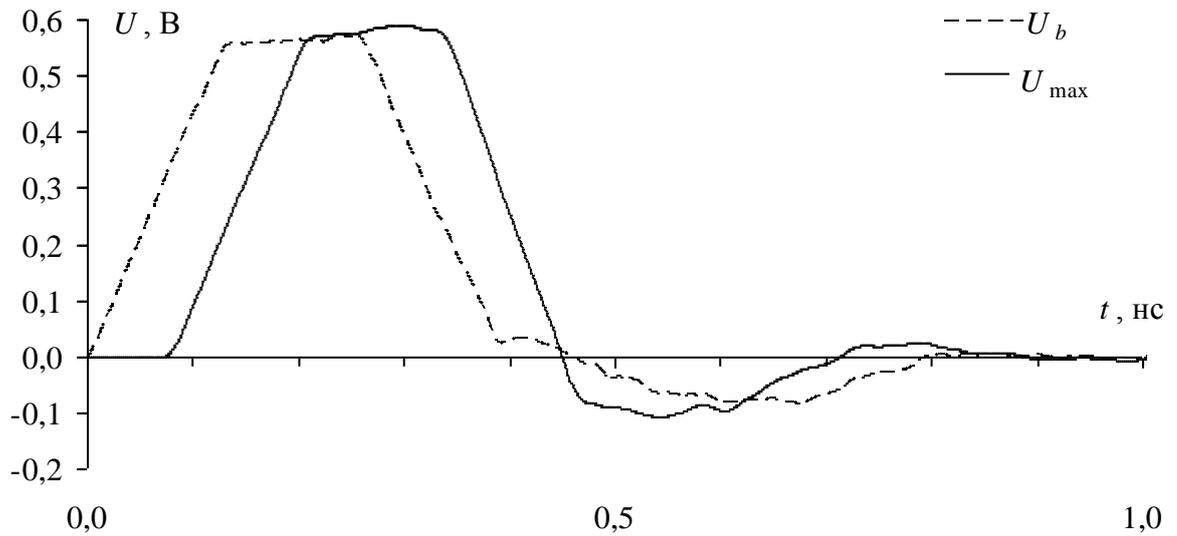


Рисунок 3.40 – Формы напряжений для последней строки из таблицы 3.4

Результаты работы ГА, в т.ч. время вычисления (t), по определению длительностей фронта, плоской вершины и спада СКИ приведены в таблице 3.5 (для числа особей 3) и в таблице 3.6 (для числа особей 5).

Таблица 3.5 – Результаты работы ГА для 3 особей

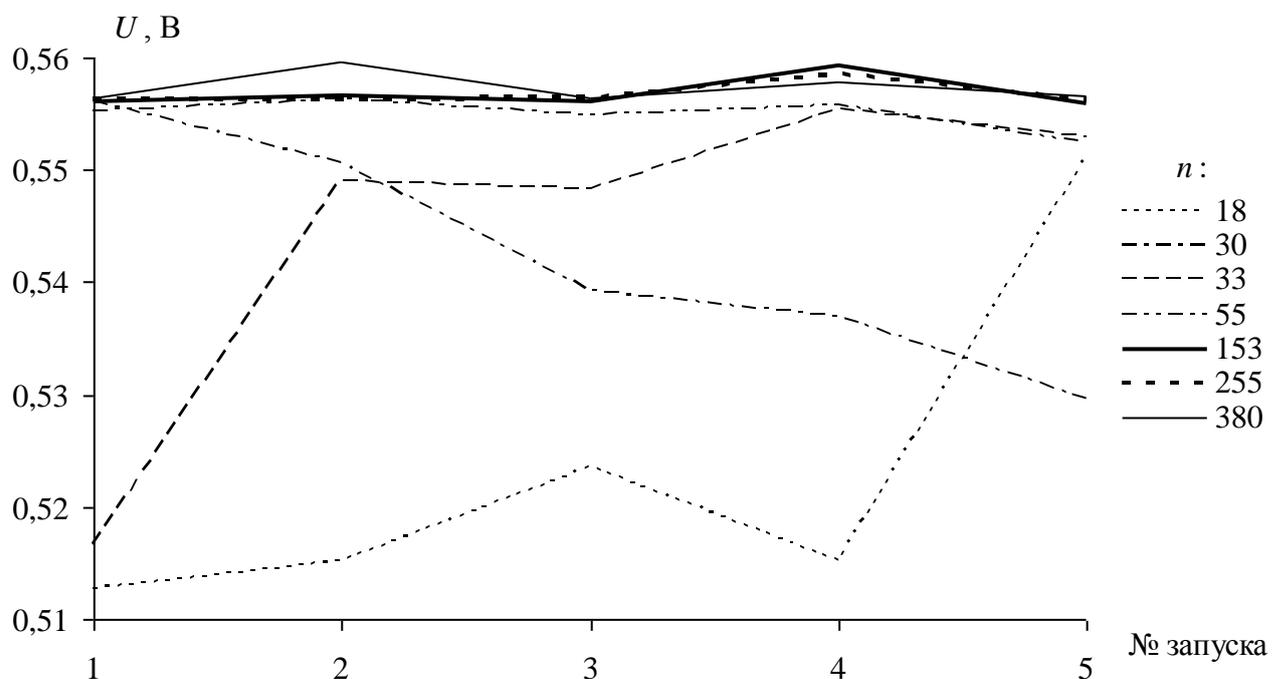
Число поколений	Запуск ГА	t , с	t_r , нс	t_d , нс	t_f , нс	U_{\max} , В
5	1	301,827	0,692	0,699	0,3340	0,507710
	2	374,913	0,745	0,690	0,1960	0,510236
	3	374,016	0,291	0,999	0,0727	0,518469
	4	333,273	0,972	0,713	0,2090	0,510192
	5	391,764	0,747	0,327	0,0101	0,546158
10	1	648,345	0,4830	0,750	0,1440	0,511593
	2	425,569	0,4220	0,482	0,0207	0,543905
	3	439,833	0,5110	0,814	0,0240	0,543271
	4	448,875	0,6980	0,937	0,0129	0,550312
	5	465,82	0,0651	0,829	0,0163	0,547927
50	1	2078,44	0,6920	0,938	0,0106	0,550997
	2	2385,75	0,1810	0,996	0,0102	0,551670
	3	2073,93	0,9620	0,826	0,0111	0,551141
	4	2380,27	0,0129	0,974	0,0115	0,554244
	5	2076,47	0,7270	0,865	0,0114	0,550982
75	1	3220,33	0,0200	0,7522	0,01104	0,553684
	2	3017,33	0,8927	0,7844	0,01122	0,551010
	3	3232,79	0,0111	0,5440	0,02232	0,554159
	4	4454,49	0,6021	0,9595	0,01034	0,551760
	5	3245,76	0,4864	0,9259	0,01004	0,551706

Для каждой комбинации числа особей и количества поколений выполнено по 5 запусков ГА. На рисунке 3.41 представлены значения U_{\max} для 5-и запусков при разном количестве (n) вычислений ЦФ (равном произведению числа особей и числа поколений).

Зависимости максимальных значений напряжения и среднего (из 5 запусков) времени вычислений от количества вычислений приведены на рисунке 3.42.

Таблица 3.6 – Результаты работы ГА для 5 особей

Число поколений	Запуск ГА	t , с	t_r , нс	t_d , нс	t_f , нс	U_{\max} , В
5	1	441,407	0,989	0,0114	0,800	0,551147
	2	452,437	0,500	0,0199	0,879	0,545629
	3	486,692	0,447	0,0356	0,582	0,534152
	4	486,508	0,707	0,0251	0,127	0,531801
	5	510,564	0,111	0,0550	0,954	0,524602
10	1	983,87	0,663	0,0119	0,925	0,550284
	2	1045,06	0,487	0,0100	0,772	0,551331
	3	1133,29	0,429	0,0102	0,652	0,549775
	4	1204,64	0,894	0,0111	0,923	0,550668
	5	1280,82	0,951	0,0184	0,719	0,547373
50	1	3679,8	0,9160	0,0108	0,874	0,551185
	2	3689,23	0,3980	0,0114	0,938	0,551207
	3	3686,37	0,7300	0,0103	0,761	0,551353
	4	3649,92	0,0135	0,0104	0,820	0,553568
	5	3673,96	0,6580	0,0103	0,789	0,551315
75	1	5951,78	0,7402	0,01123	0,931	0,551358
	2	5707,05	0,0123	0,01214	0,549	0,554590
	3	5479,93	0,6261	0,01045	0,785	0,551505
	4	5818,87	0,0108	0,01432	0,658	0,552927
	5	5880,29	0,8017	0,01031	0,870	0,551700

Рисунок 3.41 – Значения U_{\max} для 5-и запусков при разных n

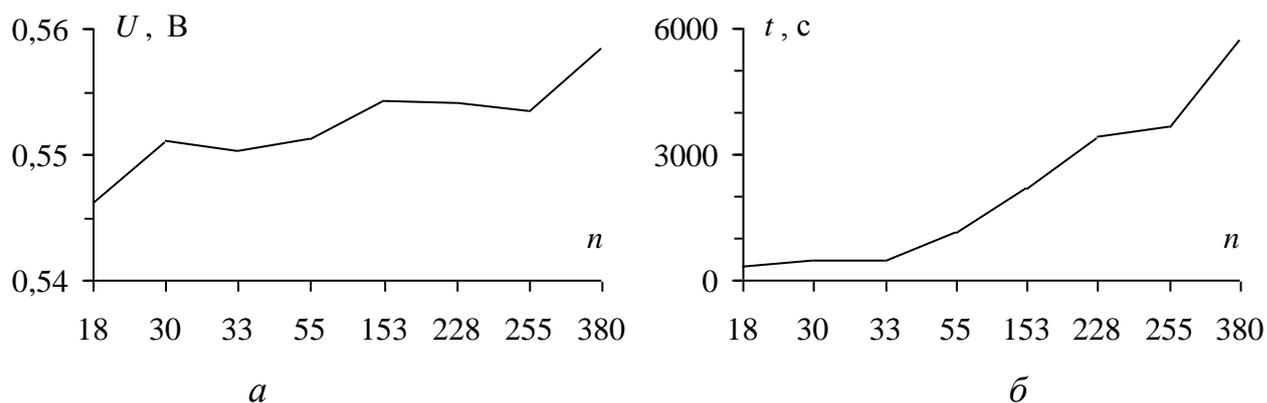


Рисунок 3.42 – Зависимости максимальных значений напряжения (a) и среднего времени вычислений (b) от n

Используя полученные параметры при наибольшем значении ЦФ (запуск 2 из таблицы 3.6 при количестве поколений 75), вычислены по 20 форм напряжений на последовательных сегментах вдоль каждого проводника каждого отрезка МПЛП из рисунка 3.39. Однако представлены только формы в начале (U_b) и конце (U_e) проводника, а также с максимальными (U_{\max}) значениями напряжений, причем только для активного проводника и одного пассивного (с наибольшей амплитудой перекрестной наводки).

На рисунке 3.43 a показаны формы напряжений вдоль активного проводника, а на рисунке 3.43 b – место локализации максимума СКИ. На рисунке 3.44 a показаны формы напряжений вдоль пассивного проводника, а на рисунке 3.44 b – место локализации максимума перекрестной наводки.

Рассмотрим результаты оптимизации в первой части исследования. Видно, что при увеличении числа вычислений увеличивается значение ЦФ (таблица 3.4). Выявлен максимум напряжения (рисунок 3.40), равный 0,58 В, что на 16% превышает установившийся уровень, при общей длительности СКИ около 0,13 нс.

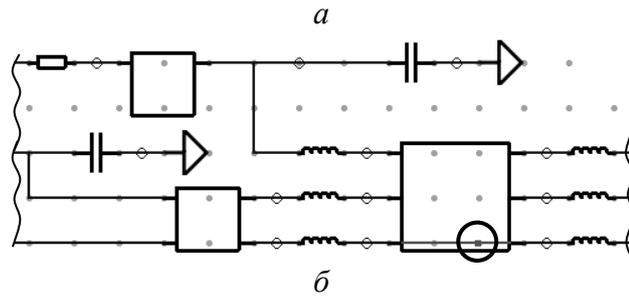
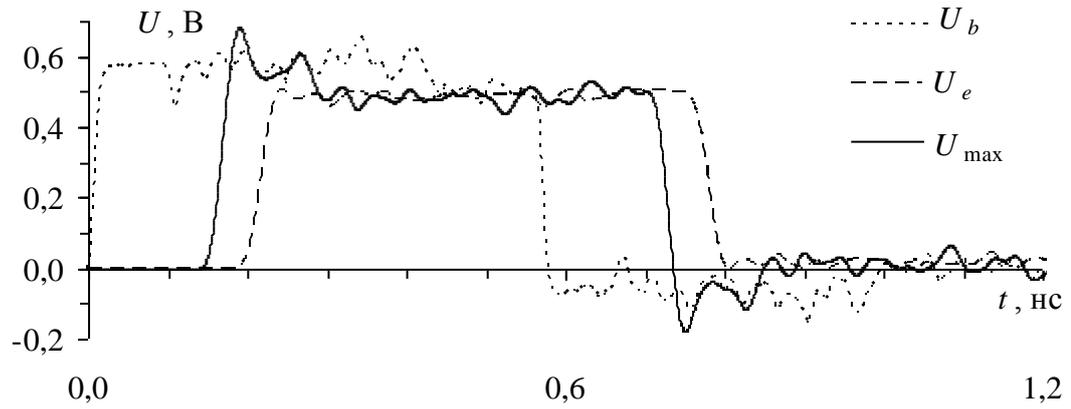


Рисунок 3.43 – Формы напряжений вдоль активного проводника (а)
и локализация максимума напряжения (б)

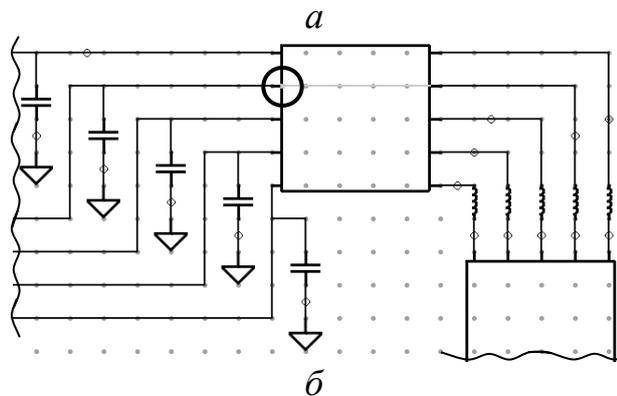
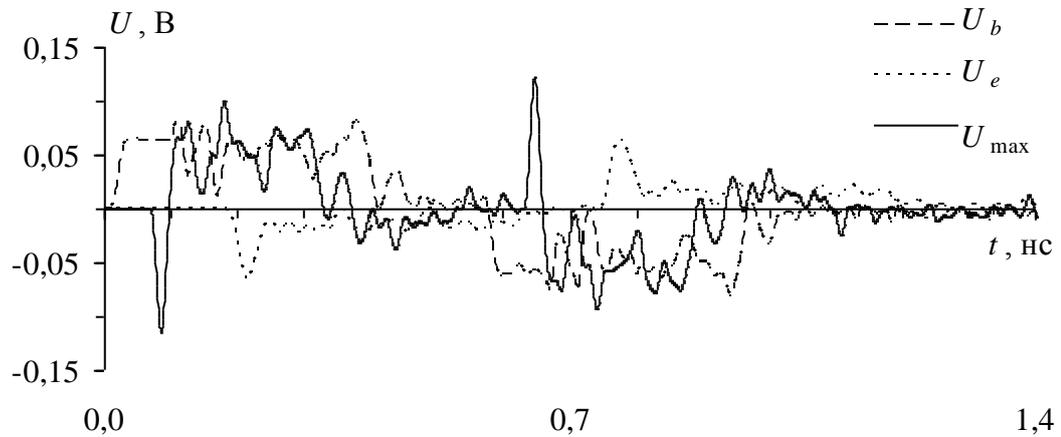


Рисунок 3.44 – Формы напряжений вдоль пассивного проводника (а)
и локализация максимума напряжения (б)

Рассмотрим результаты оптимизации во второй части исследования. Так же, как и в первой части, видно, что при увеличении числа вычислений увеличивается значение ЦФ (рисунок 3.42 *а*), однако при этом увеличивается и общее время вычисления (рисунок 3.42 *б*). Так, при наибольшем количестве вычислений максимальное значение ЦФ равно 0,55459 В (таблица 3.6), а общее время вычислений в среднем (из 5 запусков) составило 5767,5 с. Результаты ЦФ показывают хорошую сходимость, а именно при количестве вычислений 255 и 380 они различаются только в третьем знаке после запятой.

При использовании оптимизированных параметров (малое время нарастания и спада и максимальная длительность плоской вершины), полученных во время запуска 2 с числом особей 5 и количестве поколений 75 (таблица 3.6), выявлен и локализован максимум напряжения в активном проводнике, равный 0,68 В (рисунок 3.43 *а*), что на 36% превышает установившийся уровень, причем он локализован в сегменте 6, на отрезке МПЛП из другого слоя ПП (рисунок 3.43 *б*). Кроме того, выявлен и локализован максимум перекрестной помехи, равный 0,12 В, что составляет 24% от установившегося уровня, локализованный в сегменте 1 одной из пятипроводных линий передачи.

Проведенное исследование показывает актуальность применения оптимизации на основе ГА для выявления и локализации пиковых значений сигнала или суммы нескольких сигналов при воздействии СКИ с разными длительностями. Так, в таблице 3.4 наибольшее значение ЦФ равно 0,58 В, в таблице 3.5 – 0,5543 В, а в таблице 3.6 – 0,5546 В.

3.3.4.1.2 Оптимизация параметров нагрузок шины по критерию минимизации пикового значения напряжения

Фрагмент исследуемой платы изображен на рисунке 3.45, а ее принципиальная схема – на рисунке 3.46.

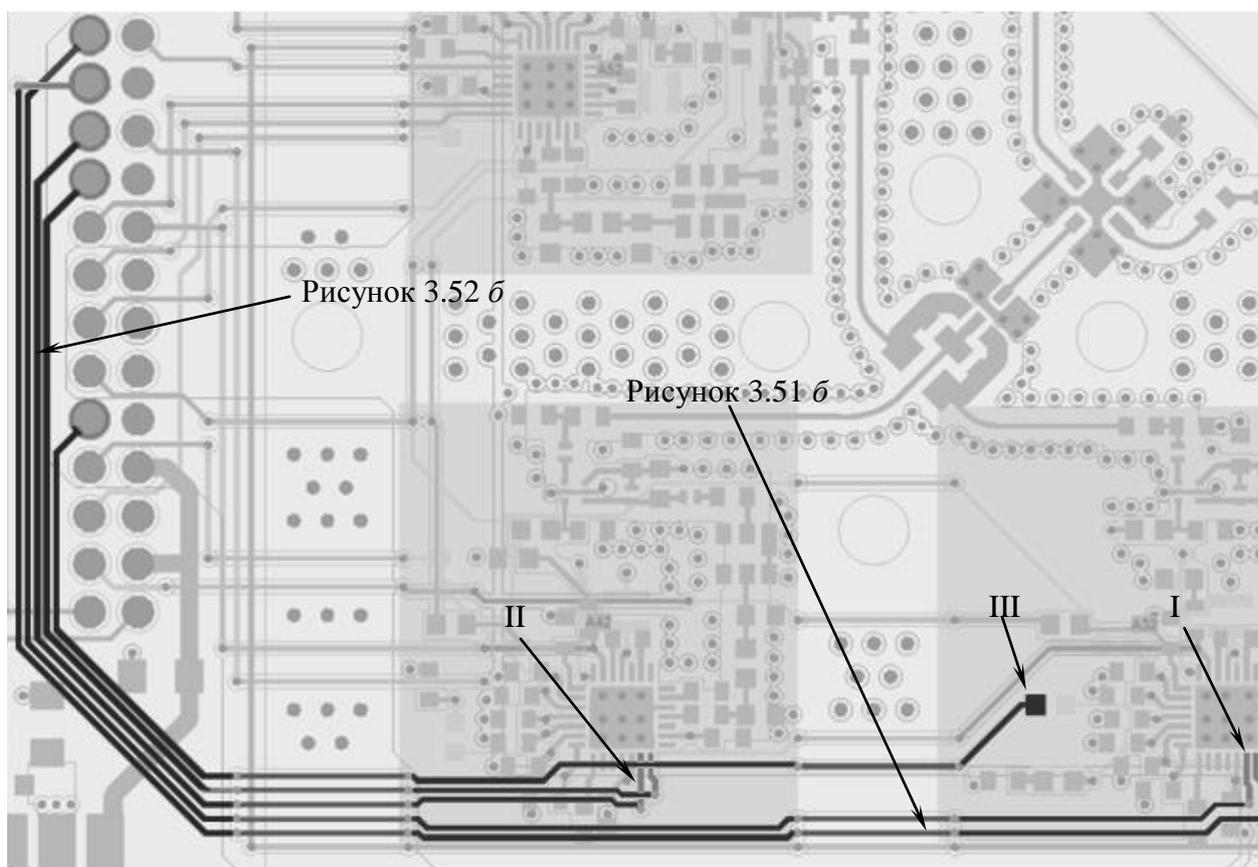


Рисунок 3.45 – Исследуемая шина на фрагменте ПП РПУ САН

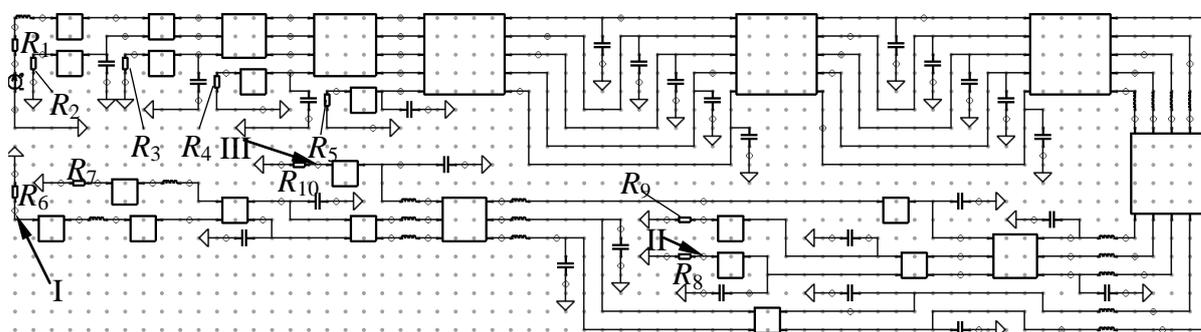


Рисунок 3.46 – Принципиальная схема шины ПП РПУ САН

В качестве воздействия выбран СКИ в форме трапеции, полученный в [86]. Длительность фронта равна 12,3 пс, вершины – 0,549 нс, спада – 12,14 пс. Амплитуда ЭДС равна 1 В.

ГА запускался со следующими параметрами: коэффициент мутации – 0,1; коэффициент кроссовера – 0,5. Оптимизировались значения 10-ти сопротивлений в диапазоне от 1 до 200 Ом, при числе особей в поколении – 3, 5, 7, 10; количество поколений – 6, 8, 11, 26. Минимизировалась максимальная сумма пиковых значений напряжений в заданных узлах шины ПП РПУ САН, в месте подключения проводников шины к другим элементам ПП. Таким образом, цель

оптимизации заключалась в том, чтобы определить такие значения сопротивлений, при которых сумма напряжений в узлах I, II и III (указаны на рисунках 3.45 и 3.46) будет минимальна. Тем самым, имитировался поиск возможности уменьшения напряжения в критичных узлах III за счет выбора элементной базы и режимов ее работы. ЦФ этой задачи выглядит следующим образом:

$$\sum_{i=1}^3 U_i = f(R_1, R_2, R_3, R_4, R_5, R_6, R_7, R_8, R_9, R_{10}) \rightarrow \min ,$$

$$\text{при } 10\text{м} \leq R_j \leq 200\text{нс}, 1 \leq j \leq 10 ,$$

где U_i – максимальное значение напряжения в узле, i – узел, находящийся в точке I, II или III, R_j – значение сопротивления в резисторе j .

Результаты работы ГА (U_{\min} – минимальное значение суммы пиковых напряжений в узлах I, II и III) при разных запусках и количестве (n) вычислений ЦФ (равном произведению числа особей и числа поколений) представлены в таблице 3.7.

Таблица 3.7 – U_{\min} , В при разных запусках и n

Запуск	n							
	18	30	33	55	56	60	110	260
1	0,428003	0,061105	0,052782	0,049948	0,077410	0,044938	0,043614	0,040659
2	0,081837	0,087071	0,282994	0,052152	0,153742	0,046894	0,765032	0,035245
3	0,584048	0,169733	0,077932	0,046553	0,094259	0,046491	0,084093	0,023072
4	0,120383	0,234133	0,059084	0,052289	0,072007	0,187201	0,059112	0,021620
5	0,356240	0,180381	0,046233	0,044385	0,085584	0,081958	0,061886	0,035501
6	0,104887	0,236146	0,046894	0,059200	0,143357	0,052289	0,043614	0,026478
7	0,130032	0,077144	0,043614	0,031226	0,059527	0,087968	0,046894	0,028024
8	0,114778	0,131745	0,052152	0,053707	0,071204	0,051224	0,059084	0,018190
9	0,413427	0,049128	0,187201	0,087968	0,054136	0,076503	0,059527	0,016395
10	0,122400	0,144220	0,153742	0,037011	0,037666	0,072007	0,054136	0,035083

Для каждой комбинации числа особей и числа поколений выполнено по 10 запусков ГА. На рисунке 3.47 представлены значения U_{\min} для 10-и запусков при разных n . Зависимости (усредненных по 10-и запускам) минимальных значений напряжения от количества вычислений приведены на рисунке 3.48.

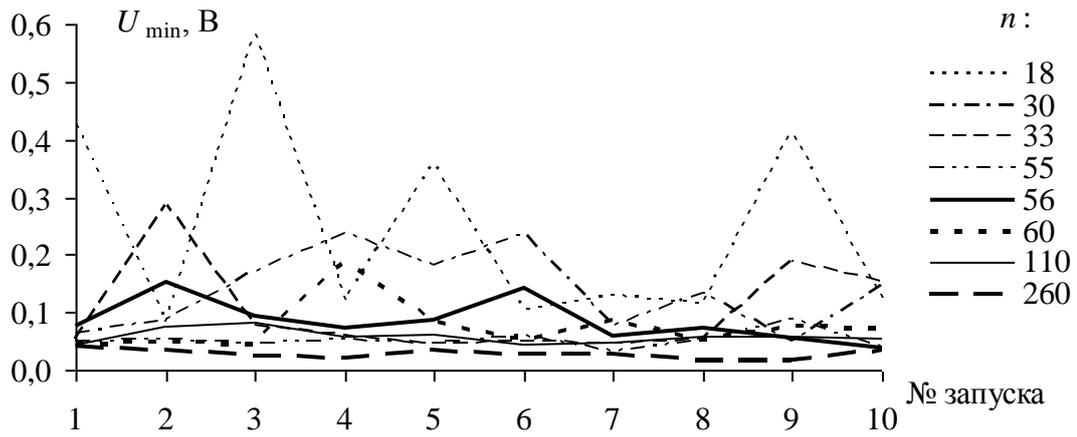


Рисунок 3.47 – Значения U_{\min} для 10-и запусков при разных n

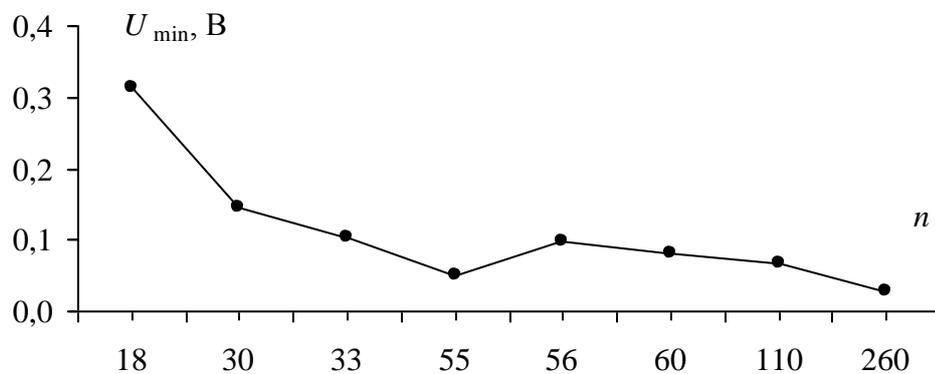


Рисунок 3.48 – Зависимость U_{\min} от n

Для наилучшего значения результата ЦФ (запуск 9 при $n=260$) приведены полученные сопротивления в таблице 3.8, а также получена форма сигнала в заданных точках с использованием этих параметров (рисунок 3.49). Кроме того, на рисунке 3.50 приведена форма сигнала в этих же точках, но с использованием параметров до оптимизации.

Таблица 3.8 – Значения сопротивлений для наилучшего результата ЦФ

Сопротивление	Значение, Ом
R_1	123,345
R_2	131,854
R_3	101,057
R_4	59,0162
R_5	30,9100
R_6	1,01822
R_7	74,8943
R_8	2,69743
R_9	174,438
R_{10}	3,61447

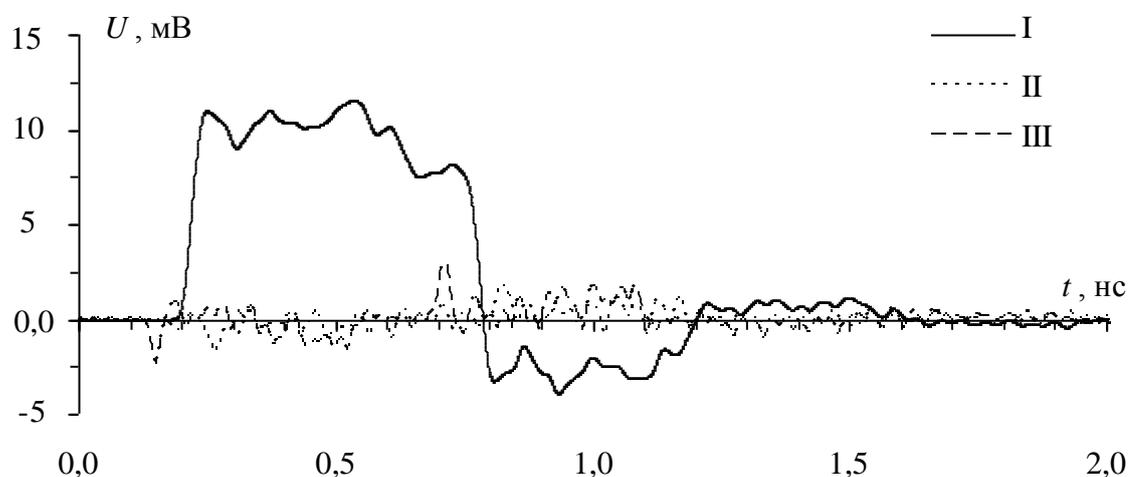


Рисунок 3.49 – Формы сигналов в точках I, II и III для наилучшего результата

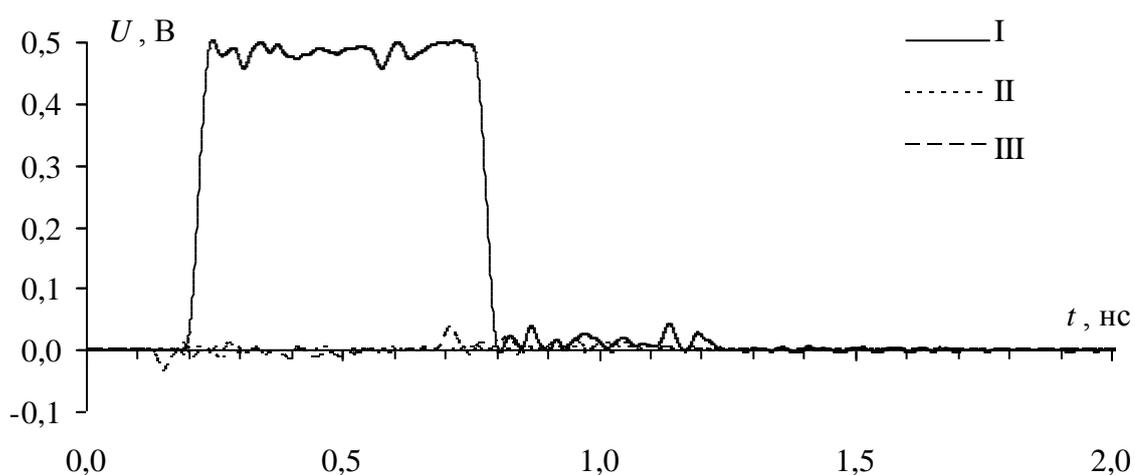


Рисунок 3.50 – Формы сигналов в точках I, II и III до оптимизации

Представляет интерес, что будет происходить с сигналом на протяжении всего проводника при полученных параметрах. Поэтому, используя эти

параметры при наилучшем значении ЦФ, вычислены по 20 форм напряжений на последующих сегментах вдоль каждого проводника каждого отрезка МПЛП из рисунка 3.46. Однако представлены только формы в начале (U_b) и конце (U_e) проводника, а также с максимальными (U_{\max}) значениями напряжений. Приведены результаты только для активного проводника и одного пассивного (с наибольшей амплитудой перекрестной наводки). На рисунке 3.51 *а* показаны формы напряжений вдоль активного проводника, а на рисунке 3.51 *б* – место локализации максимума СКИ. На рисунке 3.52 показаны аналогичные результаты для перекрестной наводки.

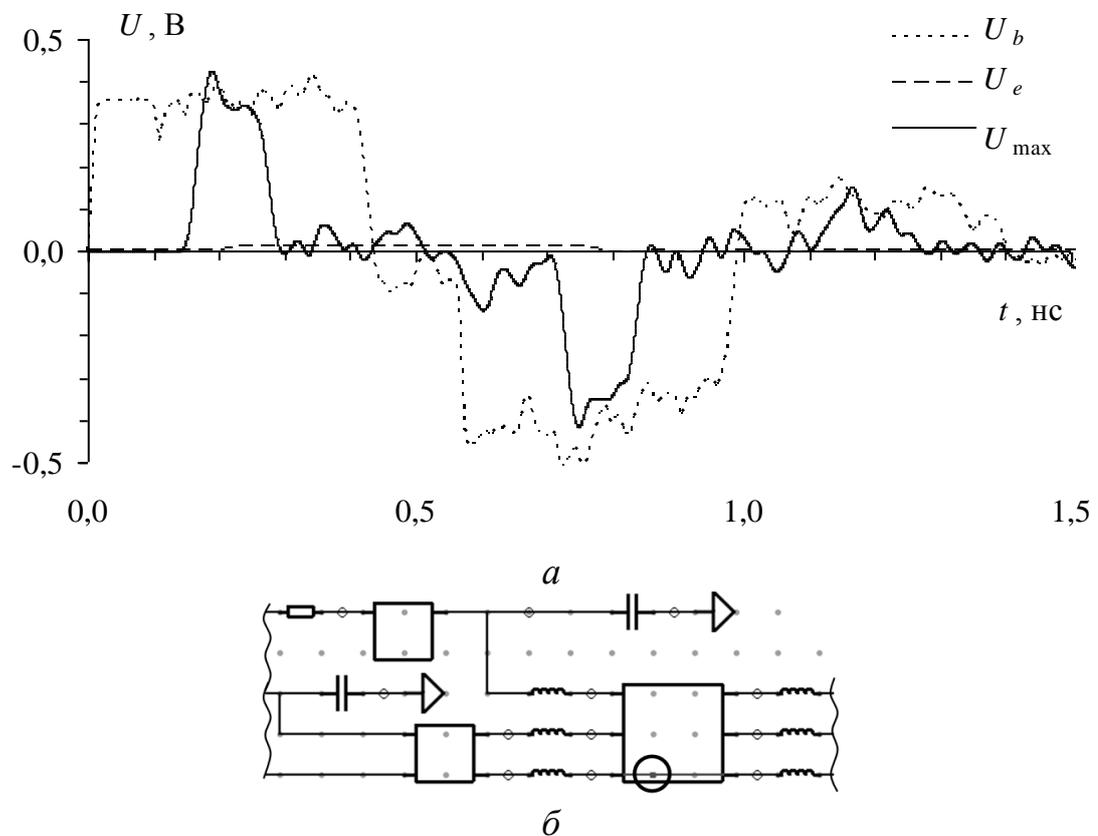


Рисунок 3.51 – Формы напряжений вдоль активного проводника (*а*) и локализация максимума напряжения (*б*)

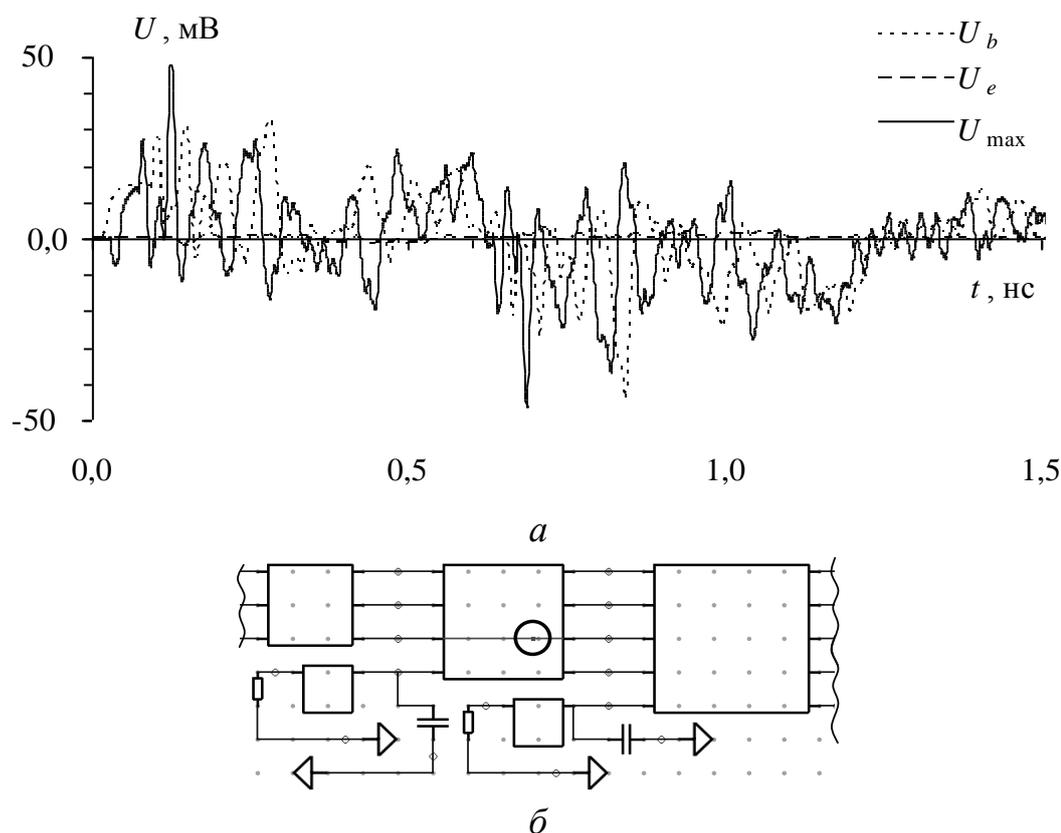


Рисунок 3.52 – Формы напряжений вдоль пассивного проводника (а) и локализация максимума напряжения (б)

Рассмотрим результаты оптимизации в таблице 3.7. Видно, что при увеличении числа вычислений значение ЦФ уменьшается, что также показано на рисунке 3.48. Так, при наибольшем количестве вычислений сумма максимальных напряжений равна 16,395 мВ (Запуск 9 из таблицы 3.7), что в 30 раз меньше амплитуды сигнала 0,5 В в активной линии до использования оптимизации (рисунок 3.50). Графики рисунка 3.47 показывают хорошую сходимость результатов, начиная со 110-и вычислений.

Рассмотрим изменение форм напряжений вдоль проводников шины. Видно, что максимум напряжения в активной линии локализован в сегменте 15 шины, проходящей на другом слое, однако амплитуда этого сигнала составляет 0,48 В, что не превышает амплитуду установившегося уровня 0,5 В (до оптимизации). Следует заметить, что в этом проводнике после использования оптимизации появилось существенное отрицательное напряжение, составляющее минус 0,41 В. Максимум перекрестной наводки, локализованный в сегменте 14, равен 50 мВ, что составляет 10% от уровня 0,5 В в активной линии (до оптимизации).

Таким образом, проведенное исследование показывает актуальность применения оптимизации на основе ГА для выявления и локализации пиковых значений суммы нескольких сигналов при изменении параметров нагрузок. Так использование оптимизации позволило уменьшить сумму пиковых значений амплитуд в 30 раз.

3.3.4.1.3 Влияние коэффициентов кроссовера и мутации на оптимизацию длительности сверхкороткого импульса по критерию максимизации пикового значения напряжения в шине

Фрагмент исследуемой платы изображен на рисунке 3.53. В качестве воздействия выбран СКИ в форме трапеции с амплитудой ЭДС 1 В, изменяемый в диапазоне длительностей (также использованный в работе [86]). В данном исследовании изменялись длительности фронта (t_r), плоской вершины (t_d) и спада (t_f) СКИ от 1 до 0,01 нс. Место воздействия указано на рисунке 3.53.

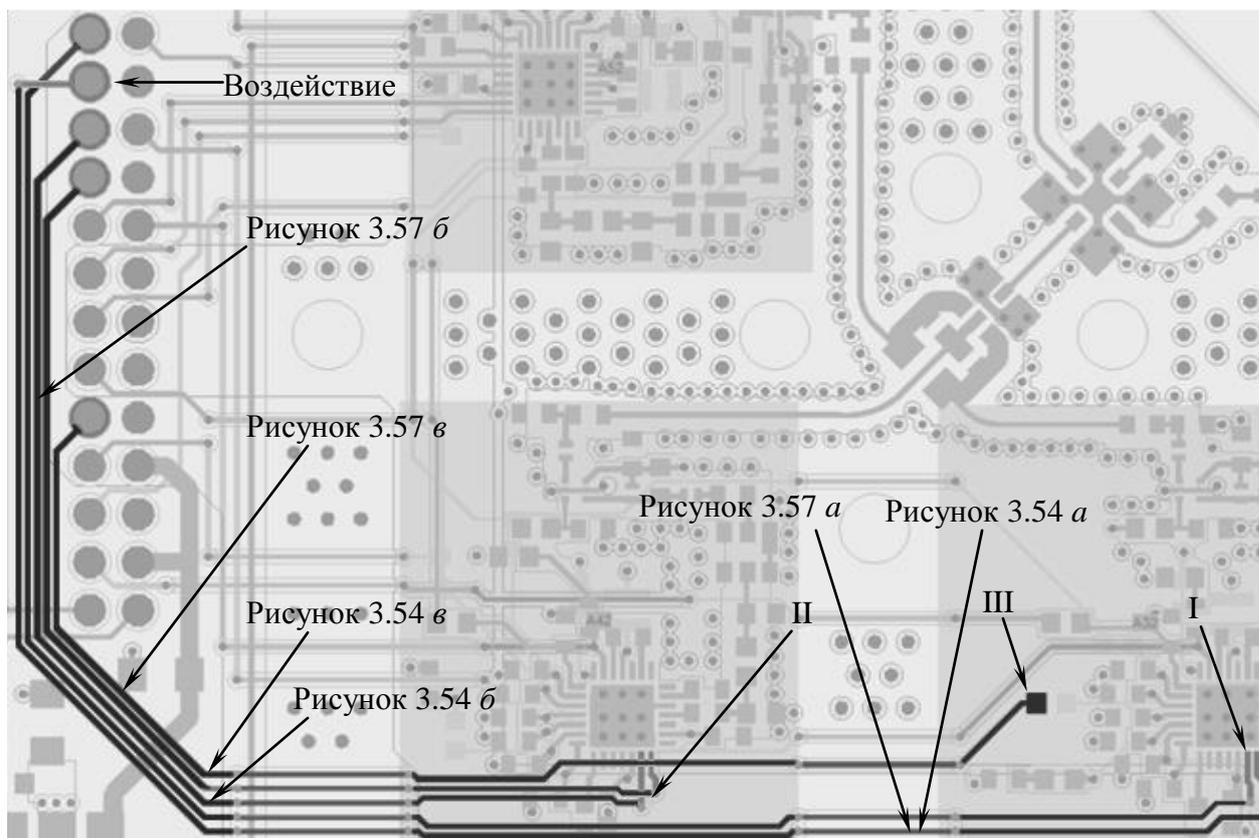


Рисунок 3.53 – Фрагмент ПП РПУ САН с исследуемой шиной

Исследование состояло из двух частей: в первой части изменялся коэффициент мутации (k_m) от 0,01 до 0,08, а во второй – коэффициент кроссовера (k_c) от 0,1 до 0,8. В первой части $k_c=0,5$, а во второй $k_m=0,1$. Оптимизировались три параметра: длительность фронта, плоской вершины и спада в диапазоне от 1 нс до 0,01 нс, при числе особей в поколении – 5 и количестве поколений – 26 (таким образом, общее количество вычислений ГА равно 130). Максимизировалась сумма пиковых значений напряжений на концах проводников шины ПП в узлах I, II, III (указаны стрелками на рисунке 3.53), в месте их подключения к другим элементам ПП. Целью оптимизации было определение значений длительности фронта, плоской вершины и спада СКИ, при которых сумма напряжений (U_{SUM}) в указанных точках будет максимальна. ЦФ в обеих частях исследования выглядела одинаково:

$$U_{SUM} = f(t_r, t_d, t_f) \rightarrow \max ,$$

$$\text{при } U_{SUM}=U_I+U_{II}+U_{III}, 0,01\text{нс} \leq t_r, t_d, t_f \leq 1\text{нс},$$

где U_i – максимальное значение напряжения в узле, i – узел, находящийся в точке I, II или III, t_r, t_d, t_f – длительности фронта, плоской вершины и спада соответственно.

Для более комплексного исследования требуется гораздо большее число вычислений ГА, и целесообразно моделировать воздействия сразу от нескольких источников. Однако для первого исследования влияния коэффициентов кроссовера и мутации выбрано небольшое количество вычислений и один источник напряжения.

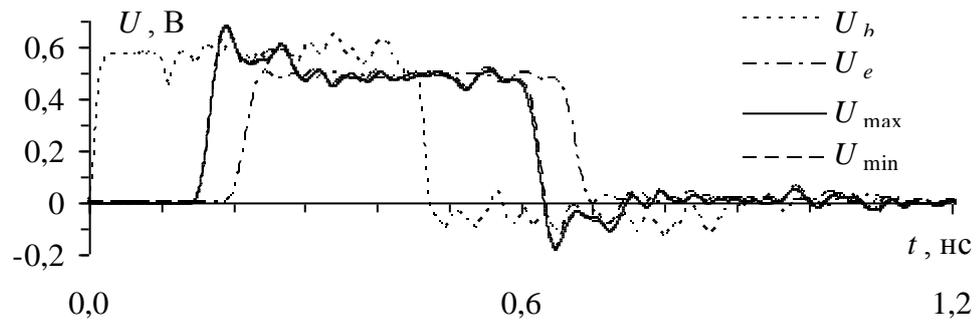
Для первой части исследования в таблице 3.9 приведены значения максимальной суммы напряжений в заданных узлах при $k_c=0,1$ и разных k_m для 10 запусков ГА. Формы сигнала для наибольшего значения суммы напряжений (запуск 3 при $k_m=0,03$), вычисленные вдоль исследуемых проводников, показаны на рисунке 3.54, где U_b – напряжение в начале проводника, U_e – в конце, U_{max} – максимум напряжения, а U_{min} – минимум

напряжения. Полученные параметры СКИ для лучших результатов ЦФ из таблицы 3.9 приведены в таблице 3.10.

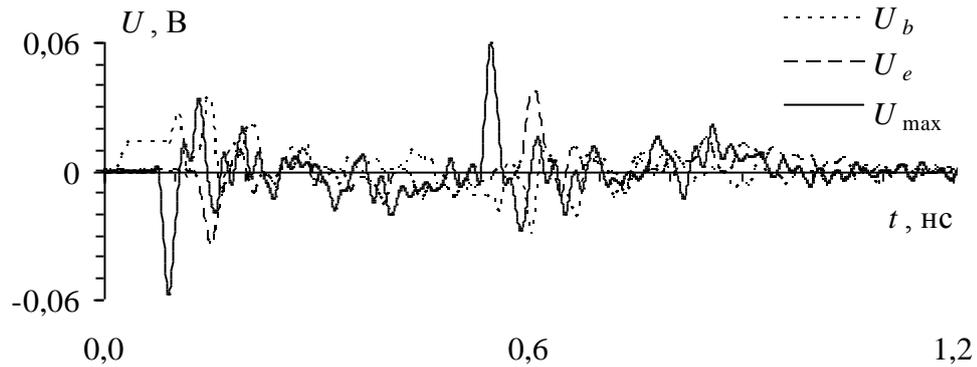
Таблица 3.9 – Значения U_{SUM} , В при разных k_m для 10-и запусков ГА

Запуск	k_m			
	0,01	0,03	0,05	0,08
1	0,50819	0,55159	0,55108	0,54131
2	0,51607	0,55122	0,55196	0,55146
3	0,54913	0,55704	0,55005	0,54974
4	0,55094	0,55081	0,55100	0,55503
5	0,50799	0,55284	0,55043	0,55127
6	0,53153	0,54920	0,55317	0,55092
7	0,52685	0,55092	0,55079	0,54232
8	0,53983	0,55271	0,55272	0,55108
9	0,54009	0,55110	0,55128	0,54909
10	0,54309	0,55132	0,55120	0,55041

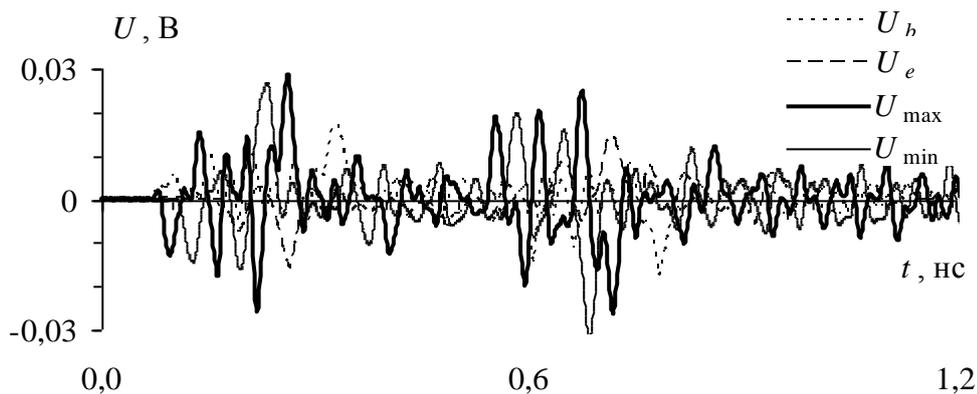
На рисунке 3.55 представлены формы сигналов, вычисленные после оптимизации для разных k_m . При каждом изменении k_c и k_m выполнено по 10 запусков ГА. На рисунке 3.56 а представлены графики сходимости лучших результатов ЦФ, полученные при разных запусках, для $k_m=0,03$ (поскольку при таком k_m получено наибольшее значение U_{max} в таблице 3.9), где N_C – число вычислений ЦФ, а N_R – номер запуска. На рисунке 3.56 б приведены графики сходимости среднего арифметического из 10 запусков при разных k_m .



а



б



в

Рисунок 3.54 – Формы сигналов для лучшего значения U_{SUM} из таблицы 3.9, полученные вдоль активного (а), пассивного среднего (б) и пассивного крайнего (в) проводников

Таблица 3.10 – Параметры СКИ для лучших U_{SUM} при разных k_m

Параметр СКИ	k_m			
	0,01	0,03	0,05	0,08
t_r , нс	0,716	0,011	0,021	0,013
t_{db} , нс	0,696	0,443	0,969	0,805
t_f , нс	0,010	0,014	0,011	0,013
U_{SUM} , В	0,55094	0,55704	0,55317	0,55503

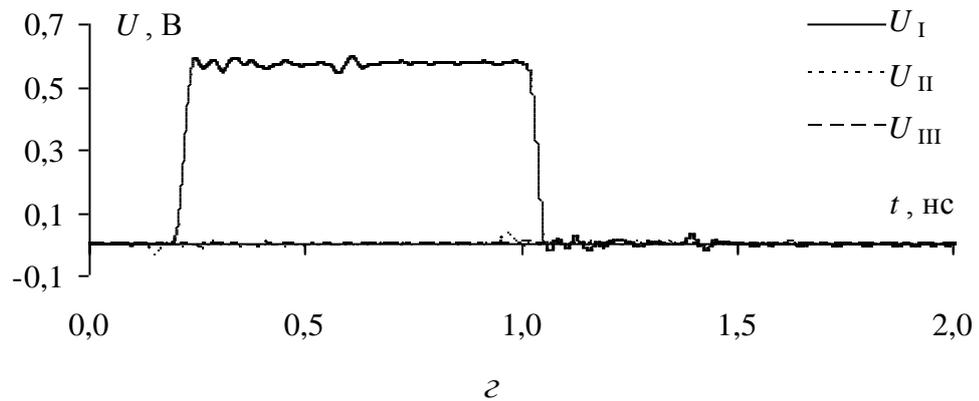
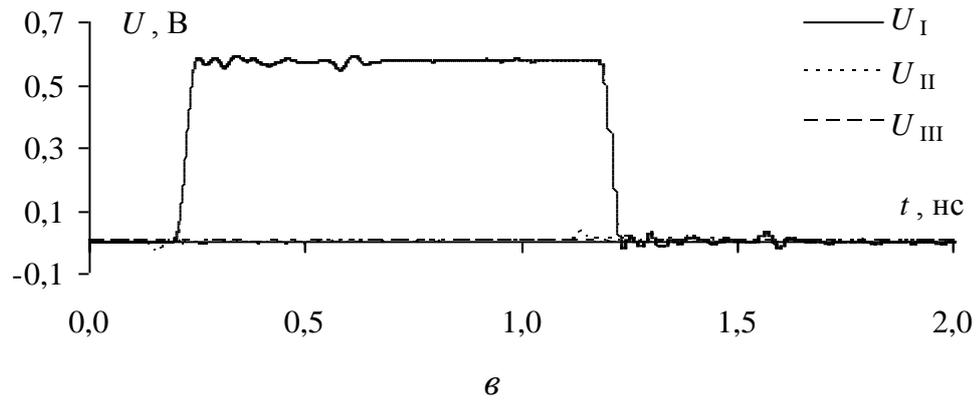
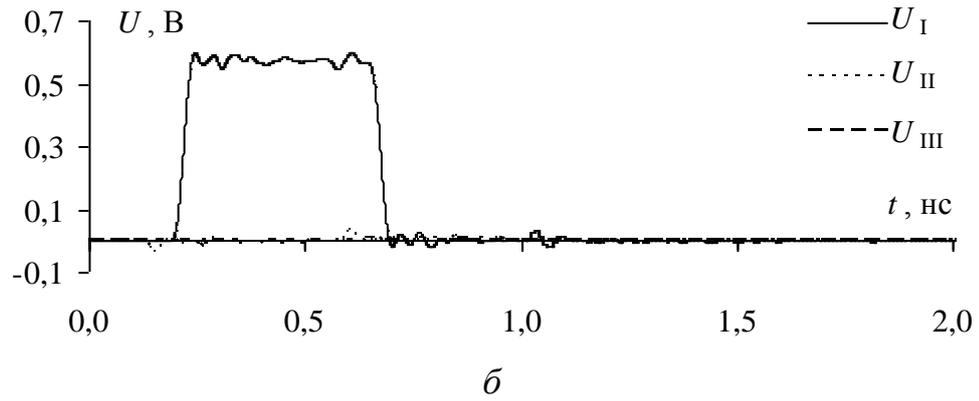
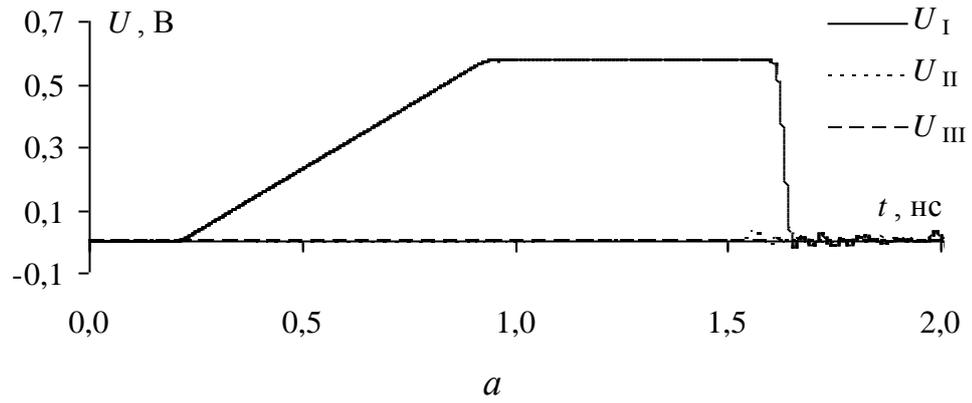


Рисунок 3.55 – Формы сигналов в узлах I, II, III

для $k_m = 0,01$ (а), 0,03 (б), 0,05 (в), 0,08 (г)

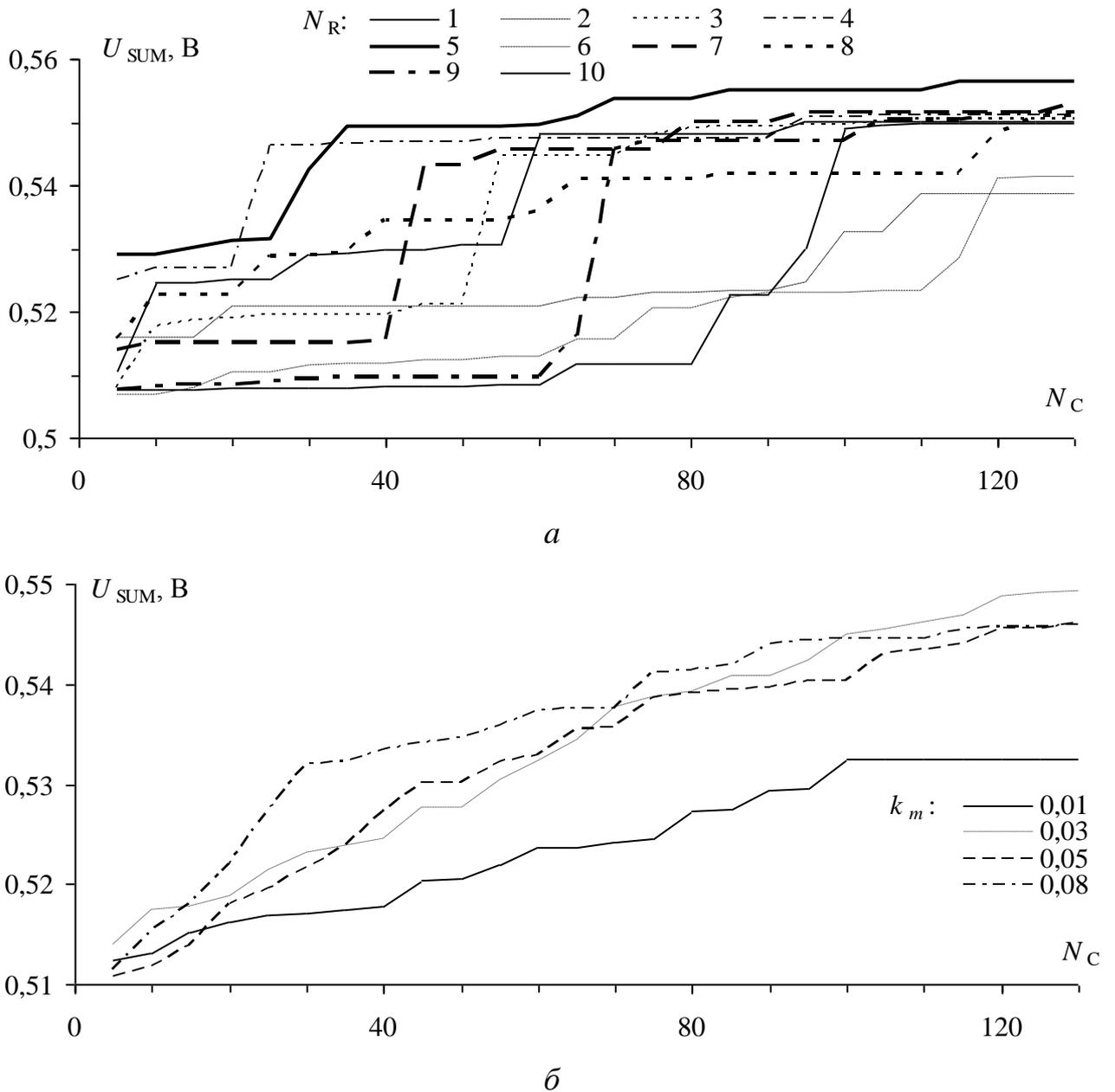


Рисунок 3.56 – Графики сходимости значений ЦФ для каждого запуска при $k_m=0,03$ (а) и среднего арифметического по запускам при разных k_m (б)

Результаты работы ГА для второй части исследования (сумма максимальных напряжений в узлах I, II, III при $k_m=0,1$ и разных k_c) представлены в таблице 3.11. Формы сигнала для наибольшего значения суммы напряжений (запуск 7 при $k_c=0,8$), вычисленные вдоль исследуемых проводников, показаны на рисунке 3.57. На рисунке 3.58 а представлены графики сходимости лучших результатов ЦФ, полученные при разных запусках, для $k_c=0,8$, поскольку при таком k_c получено наибольшее значение U_{max} в таблице 3.11.

Таблица 3.11 – Значения U_{SUM} , В при разных k_c для 10-и запусков ГА

Запуск	k_c			
	0,1	0,3	0,5	0,8
1	0,55444	0,55214	0,55166	0,55072
2	0,53083	0,55013	0,55177	0,55128
3	0,55169	0,54860	0,55027	0,55167
4	0,55041	0,54996	0,55092	0,52187
5	0,55279	0,54988	0,55121	0,55254
6	0,55102	0,55165	0,55180	0,55118
7	0,55150	0,55182	0,54766	0,55448
8	0,55120	0,55060	0,55040	0,55024
9	0,55191	0,55052	0,55122	0,55142
10	0,55058	0,55116	0,55173	0,55012

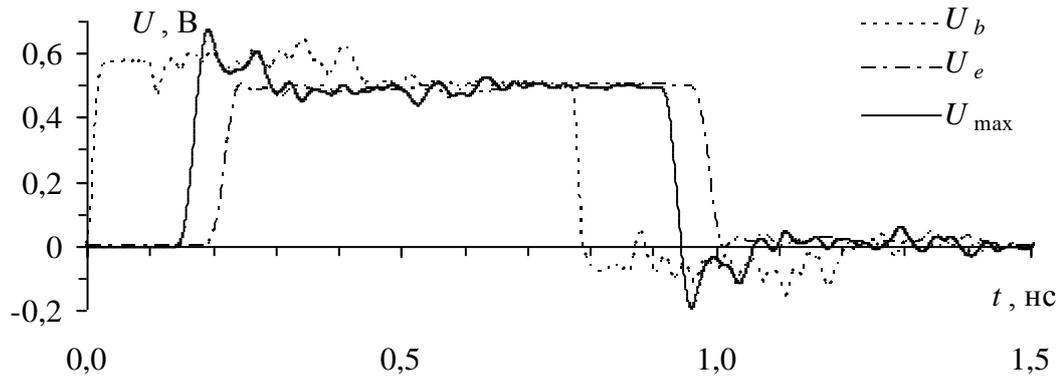
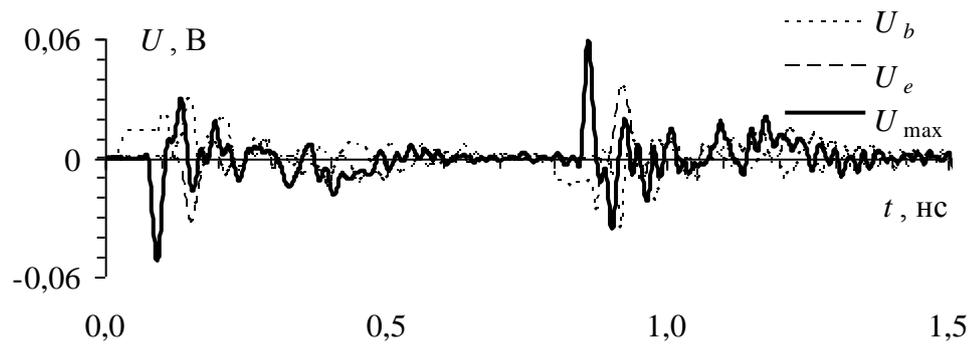
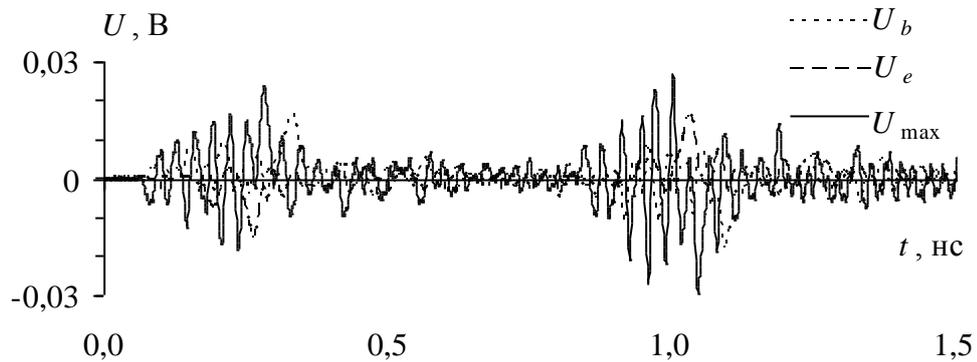
*a**б**в*

Рисунок 3.57 – Формы сигналов для лучшего значения U_{SUM} из таблицы 3.11, полученные вдоль активного (*a*), пассивного среднего (*б*) и пассивного крайнего (*в*) проводников

На рисунке 3.58 *б* приведены графики сходимости среднего из 10 запусков при разных k_c .

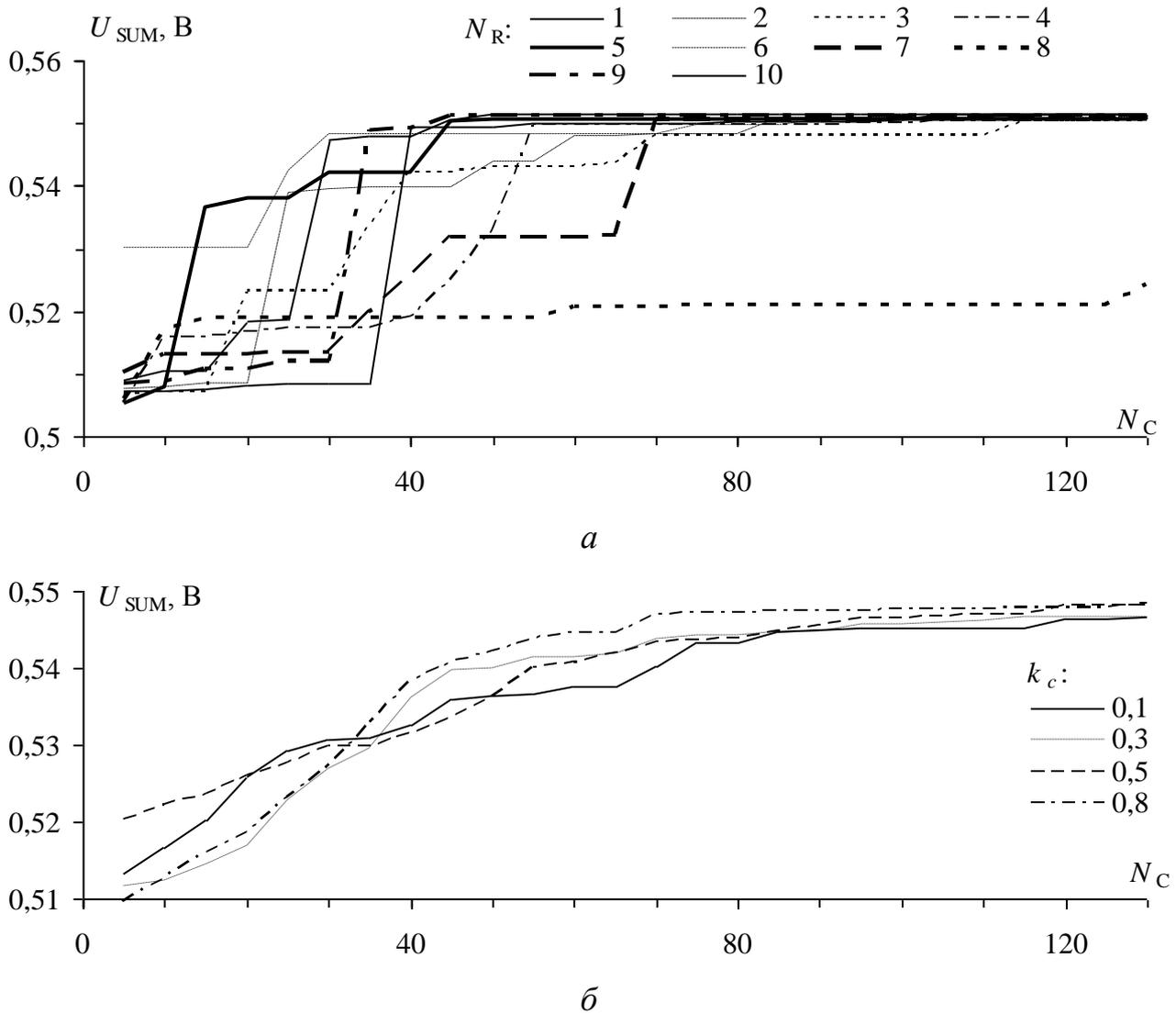


Рисунок 3.58 – Графики сходимости значений ЦФ для каждого запуска при $k_c=0,8$ (а) и среднего арифметического по запускам при разных k_c (б)

Полученные параметры СКИ для лучших результатов ЦФ из таблицы 3.11 приведены в таблице 3.12. На рисунке 3.59 представлены формы сигналов, вычисленные после оптимизации в заданных узлах, для разных k_c .

Таблица 3.12 – Параметры СКИ для лучших U_{SUM} при разных k_c

Параметр СКИ	k_c			
	0,1	0,3	0,5	0,8
t_r , нс	0,011	0,035	0,015	0,016
t_d , нс	0,264	0,901	0,909	0,754
t_f , нс	0,011	0,01	0,015	0,011
U_{SUM} , В	0,55444	0,55214	0,5518	0,55448

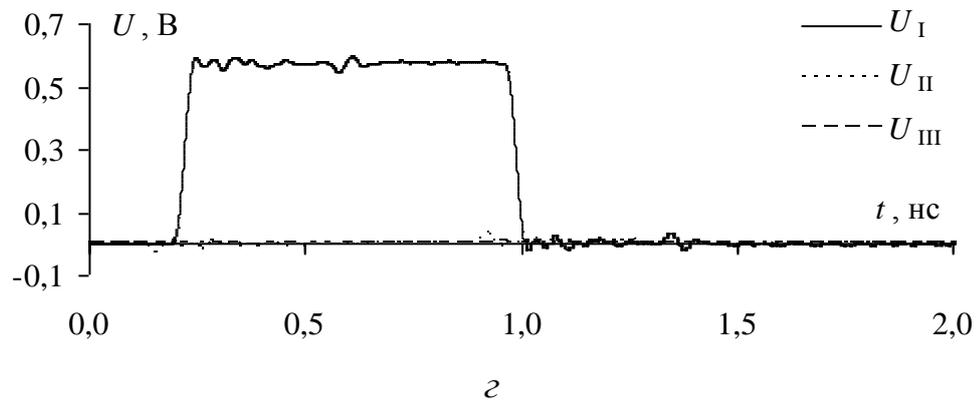
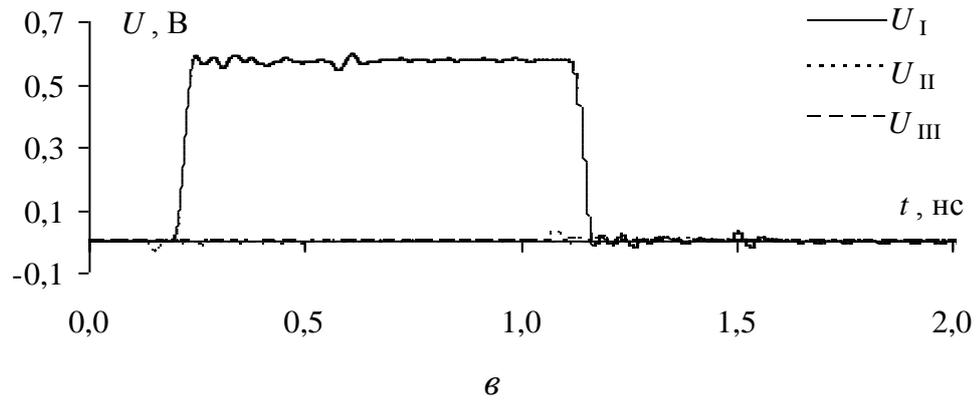
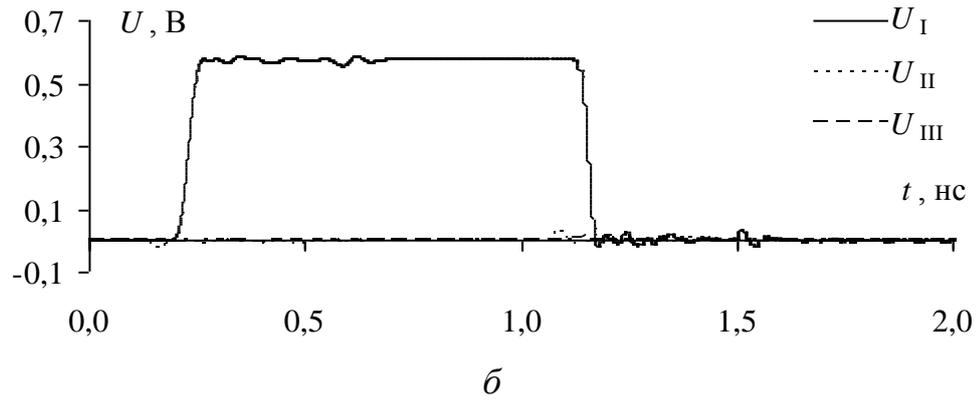
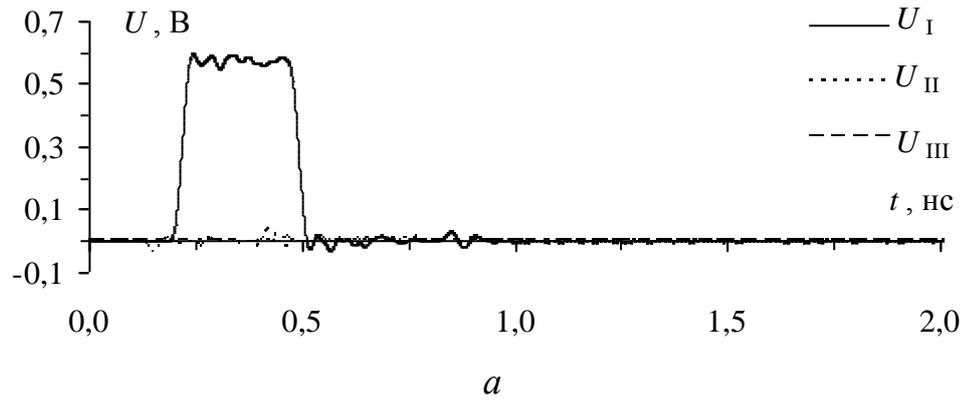


Рисунок 3.59 – Формы сигналов в узлах I, II, III
для $k_c=0,1$ (a), $0,3$ (б), $0,5$ (в), $0,8$ (г)

Рассмотрим результаты первой части исследования. Видно, что в зависимости от коэффициента мутации изменяется получаемая форма сигнала.

Так, при $k_m=0,01$ длительности фронта и вершины намного больше, чем длительность спада, и равны 0,71, 0,69 и 0,01 нс соответственно (рисунок 3.55 а). Однако при увеличении k_m форма получаемых импульсов становится примерно одинаковой, а именно, наблюдаются короткие фронты и долгая вершина, различия состоят лишь в ее длительностях. К примеру, самая долгая длительность вершины наблюдается для $k_m=0,05$ (рисунок 3.55 в). Что касается наилучшего результата ЦФ, то все полученные значения схожи и отличаются только в 3-м знаке после запятой. Тем не менее, наибольший результат (0,55704 В) получен при $k_m=0,03$ (таблица 3.10).

Рассмотрим формы сигналов с пиковыми значениями напряжений, полученные после оптимизации. В активном проводнике выявлен максимум напряжения (рисунок 3.54 а), равный 0,69 В, что на 38% превышает установившейся уровень 0,5 В, а также минимум напряжения, равный минус 0,18 В. Максимум и минимум напряжения локализованы в сегменте 16 и 17, соответственно, поэтому место локализации указано только для максимума (на рисунке 3.53). В первом пассивном (центральном) проводнике выявлен максимум напряжения (рисунок 3.54 б), равный 60 мВ, что составляет 12% от уровня 0,5 В. Он локализован в сегменте 3 (также указано на рисунке 3.53). Во втором пассивном (крайнем) проводнике выявлен максимум напряжения (рисунок 3.54 в), равный 29 мВ, что составляет 5,8% от уровня 0,5 В. Он локализован в сегменте 2.

Рассмотрим графики сходимости результатов для каждого запуска при $k_m=0,03$ (рисунок 3.56 а). Видно, что даже при одинаковых параметрах, результаты значительно отличаются. Так, при запуске 5 получено наилучшее значение ЦФ, которое достигается на 115-м вычислении. Рассмотрим графики сходимости среднего арифметического значений ЦФ при изменении k_m (рисунок 3.56 б). Графики для $k_m=0,03, 0,05, 0,08$ находятся вблизи друг друга на всем протяжении вычислений, хотя при $k_m=0,08$ сходимость достигается быстрее, чем при остальных. Однако при $k_m=0,01$ результаты отличаются от

остальных и наилучшего значения не достигается (наибольшее среднее $U_{\max}=0,53$ В).

Рассмотрим результаты второй части исследования. Формы получаемых сигналов отличаются только длительностями вершины, причем при $k_c=0,3$ и $0,5$ длительности вершины практически одинаковы и равны около $0,9$ нс (таблица 3.12 и рисунок 3.59). Что касается наилучшего результата ЦФ, ситуация аналогична первой части: все полученные значения схожи и отличаются только в 3-м знаке после запятой. Тем не менее, наибольший результат ($0,55448$ В) получен при $k_c=0,8$.

Рассмотрим формы сигналов с пиковыми значениями напряжений, полученные после оптимизации. В активном проводнике выявлен максимум напряжения (рисунок 3.57 а), равный $0,67$ В, что на 34% превышает установившейся уровень $0,5$ В (локализован в сегменте 12), а также минимум напряжения, равный минус $0,19$ В (на рисунке указан как U_{\max} , поскольку они локализованы в одном сегменте). В первом пассивном (центральном) проводнике выявлен максимум перекрестной наводки (рисунок 3.57 б), равный 60 мВ, что составляет 12% от уровня $0,5$ В (сегмент 15). Во втором пассивном (крайнем) проводнике выявлен максимум перекрестной наводки (рисунок 3.57 в), равный 29 мВ, что составляет $5,8\%$ от уровня $0,5$ В (сегмент 8).

Таким образом, изменение коэффициентов мутации или кроссовера практически не повлияло на значения максимума и минимума напряжения. Это касается как СКИ в активном проводнике, так и перекрестной наводки в пассивных.

Рассмотрим графики сходимости результатов для каждого запуска при $k_c=0,8$ (рисунок 3.58 а). Практически во всех запусках наблюдается сходимость на 70 -м вычислении, однако запуск 8 совершенно выбивается из общей картины. Связано это, вероятнее всего, с тем, что ГА выявил локальный максимум и не смог из него выйти. Рассмотрим графики сходимости среднего арифметического значений ЦФ при изменении k_m (рисунок 3.58 б). Графики для всех k_c находятся вблизи друг друга на всем протяжении вычислений, однако при $k_c=0,8$ сходимость

достигается быстрее (на 70-м вычислении), чем при остальных. Таким образом, при изменении коэффициента кроссовера сходимость достигается быстрее, чем при изменении коэффициента мутации.

Проведенное исследование показывает актуальность применения оптимизации на основе ГА для выявления и локализации пиковых значений сигнала или суммы нескольких сигналов при воздействии СКИ с разными длительностями. Так, судя по таблицам 3.9 и 3.11, наибольшее значение ЦФ, при изменении коэффициентов мутации и кроссовера, равно около 0,55 В (в таблице 3.9 – 0,55132 В, а в таблице 3.11 – 0,55173 В).

Выявлено, что изменение коэффициента мутации сильно влияет на сходимость результатов. Так, при изменении коэффициента мутации сходимость замедляется, и наблюдаются графики, выбивающиеся из общей группы. Изменение коэффициентов кроссовера дает самую быструю сходимость (при $k_c=0,8$ на 70-м вычислении). Однако на выявленные пиковые напряжения СКИ и перекрестных наводок изменения этих коэффициентов практически не влияют: пиковые напряжения имеют одинаковые или очень близкие амплитуды.

3.3.4.2. Использование эволюционной стратегии при выявлении наихудших случаев

Для выполнения оптимизации с помощью ЭС использовалась библиотека `barectmaes2.py` [99], встроенная в систему компьютерного моделирования TALGAT. В данной библиотеке реализован алгоритм адаптации ковариационной матрицы. Поскольку этот алгоритм используется для минимизации значения ЦФ, то для поиска максимального значения экстремума результат ЦФ умножался на -1 .

3.3.4.2.1 Распространения сверхкороткого импульса

Оптимизировалась общая длительность СКИ с целью получения наибольшего пикового напряжения в узле V_{34} (указан на рисунке 3.38). Шаг изменения общей длительности СКИ в ЭС $\sigma=10$ пс. ЭС запускалась по 10 раз для каждого начального решения (3 нс, 300 пс, 30 пс). Таким образом, целью оптимизации было получить такие параметры общей длительности СКИ, при которых пиковое напряжение в узле V_{34} будет максимальным. В качестве воздействия выбран СКИ с амплитудой ЭДС 1 В, изменяемый в диапазоне длительностей. На рисунке 3.13 представлены длительности (U_1 , U_2 , U_3), соответствующие каждому начальному решению ЭС. ЦФ этой задачи выглядит следующим образом:

$$-V_{34} = f(t_{\Sigma}) \rightarrow \min ,$$

где V_{34} – максимальное значение напряжения в узле 34, t_{Σ} – общая длительность СКИ.

Параметры ЭС: $t_{\Sigma 1} = 3$ нс, $t_{\Sigma 2} = 300$ пс, $t_{\Sigma 3} = 30$ пс, где $t_{\Sigma 1}$, $t_{\Sigma 2}$, $t_{\Sigma 3}$ – начальные решения для случаев 1, 2, 3 соответственно, $\sigma = 10$ пс.

В таблице 3.13 приведены пиковые напряжения (U_{\max}) в заданном узле (для 10-и запусков ЭС) для разных начальных решений ЭС, а также лучшие решения ЭС для наибольшего U_{\max} . В таблице цветом выделены ячейки с наибольшим U_{\max} для каждого начального решения. На рисунке 3.60 представлены формы напряжения, вычисленные при начальном решении, равном 3 нс, 300 пс и 30 пс, для наибольшего U_{\max} . Графики изменения среднего арифметического (по 10 запускам) U_{\max} для разных начальных решений (3 нс, 300 пс, 30 пс) в зависимости от номера итерации ЭС (N_I) приведены на рисунках 3.61–3.63 соответственно.

Таблица 3.13 – Значения U_{SUM} , В для 10-и запусков ЭС для разных начальных решений

Запуск	Начальное решение		
	3 нс	300 пс	30 пс
1	0,59792	0,59787	0,59789
2	0,59789	0,59784	0,59785
3	0,59787	0,59759	0,59786
4	0,59768	0,59760	0,59786
5	0,59775	0,59755	0,59788
6	0,59786	0,59774	0,59785
7	0,59780	0,59774	0,59783
8	0,59779	0,59773	0,59759
9	0,59785	0,59774	0,59770
10	0,59791	0,59768	0,59784
Лучшее решение	325,53 пс	330,06 пс	325,59 пс

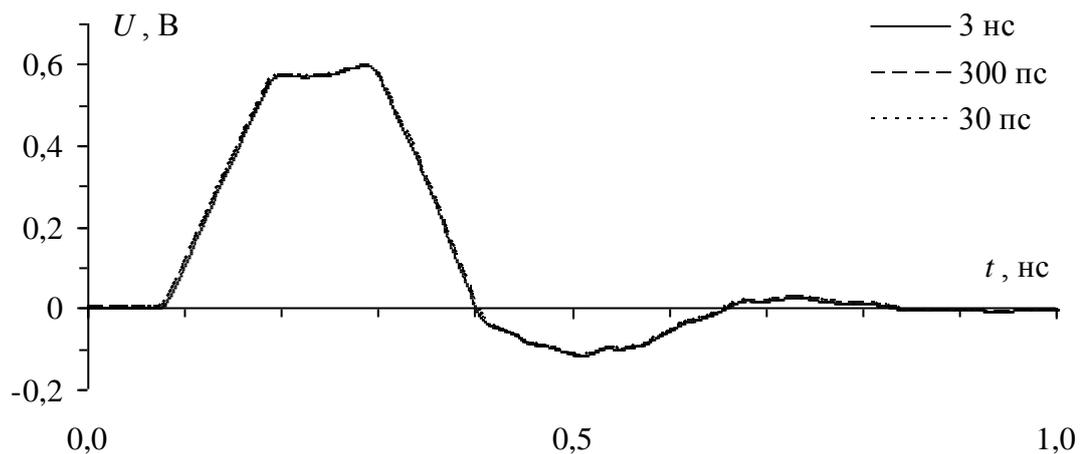


Рисунок 3.60 – Формы напряжения для наибольшего U_{max} , вычисленные при начальном решении 3 нс, 300 пс и 30 пс

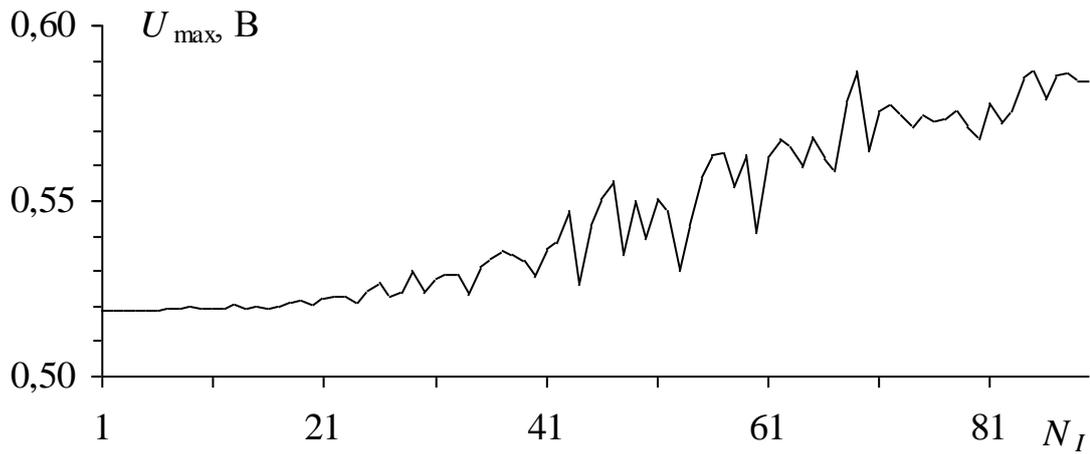


Рисунок 3.61 – Зависимость среднего арифметического U_{\max} от N_I при начальном решении 3 нс

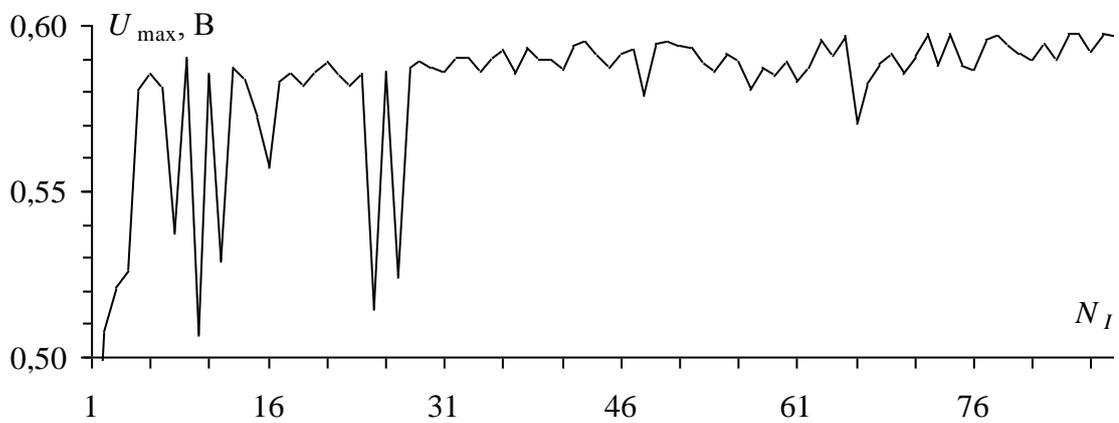


Рисунок 3.62 – Зависимость среднего арифметического U_{\max} от N_I при начальном решении 300 пс

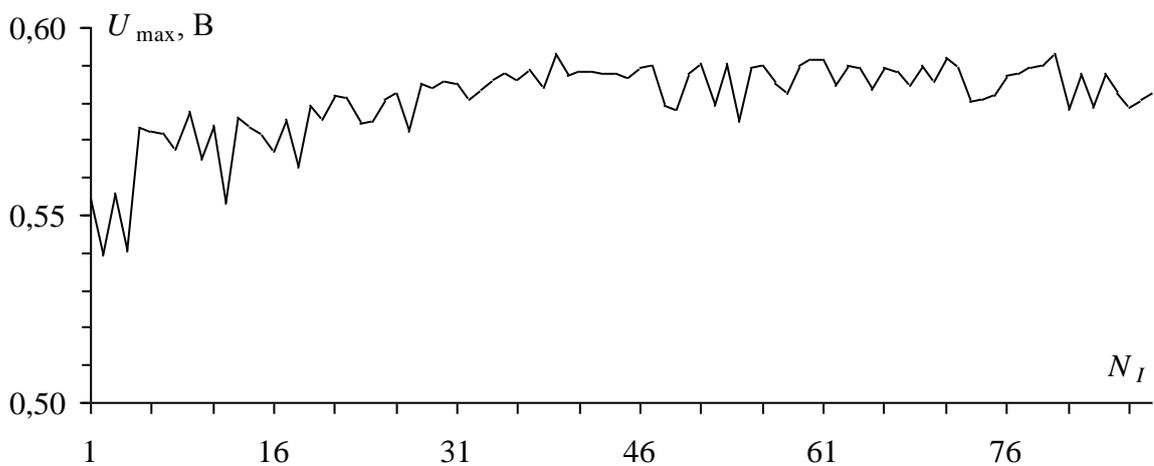


Рисунок 3.63 – Зависимость среднего арифметического U_{\max} от N_I при начальном решении 30 пс

Далее целесообразно проверить, где появятся экстремумы сигнала вдоль всего проводника шины ПП САН при использовании параметров воздействия, полученных после оптимизации. На рисунке 3.64 *а* представлены формы напряжения в активном проводнике, где U_b – в начале, U_e – в конце, U_{\max} – с максимальным пиковым значением напряжения, а на рисунке 3.64 *б* – локализация максимума напряжения. На рисунке 3.65 аналогично представлены формы сигнала вдоль пассивного проводника (ближайшего к активному) с наибольшей амплитудой перекрестной наводки и локализация ее максимума.

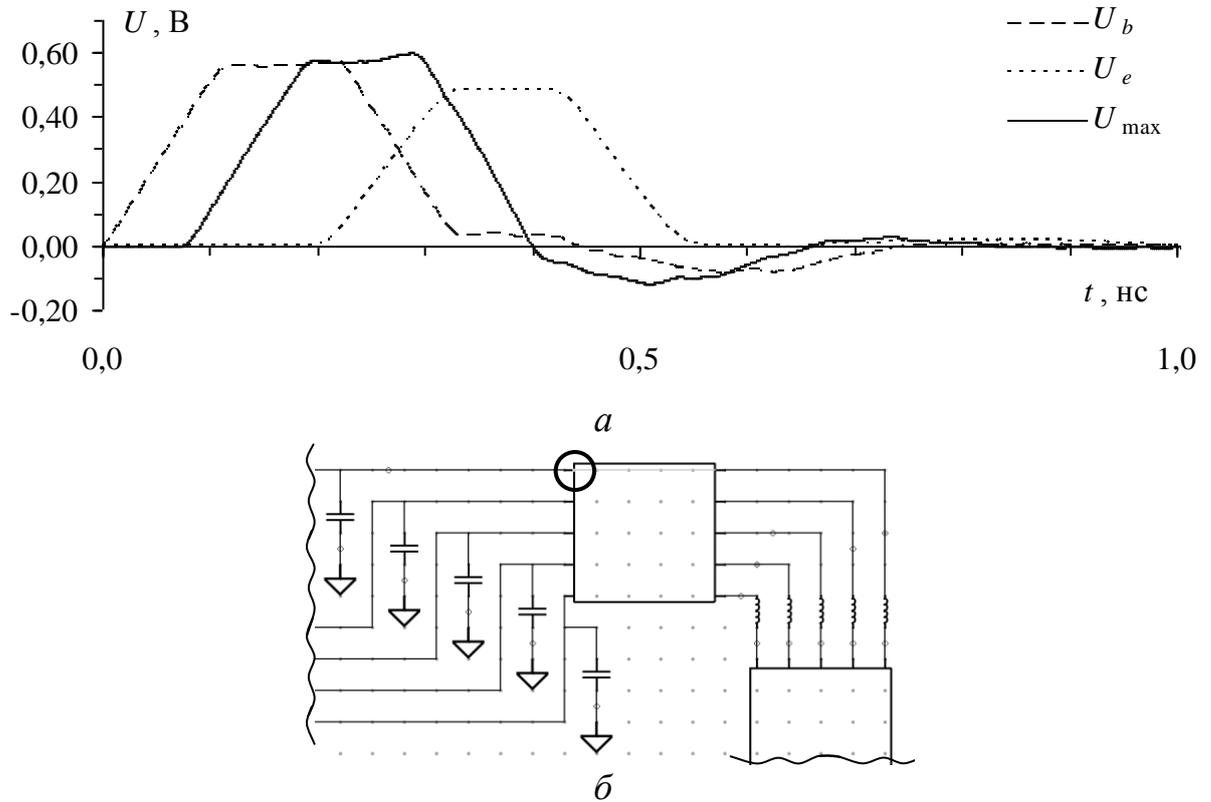


Рисунок 3.64 – Формы напряжения в активном проводнике (*а*)
и локализация его максимума (*б*)

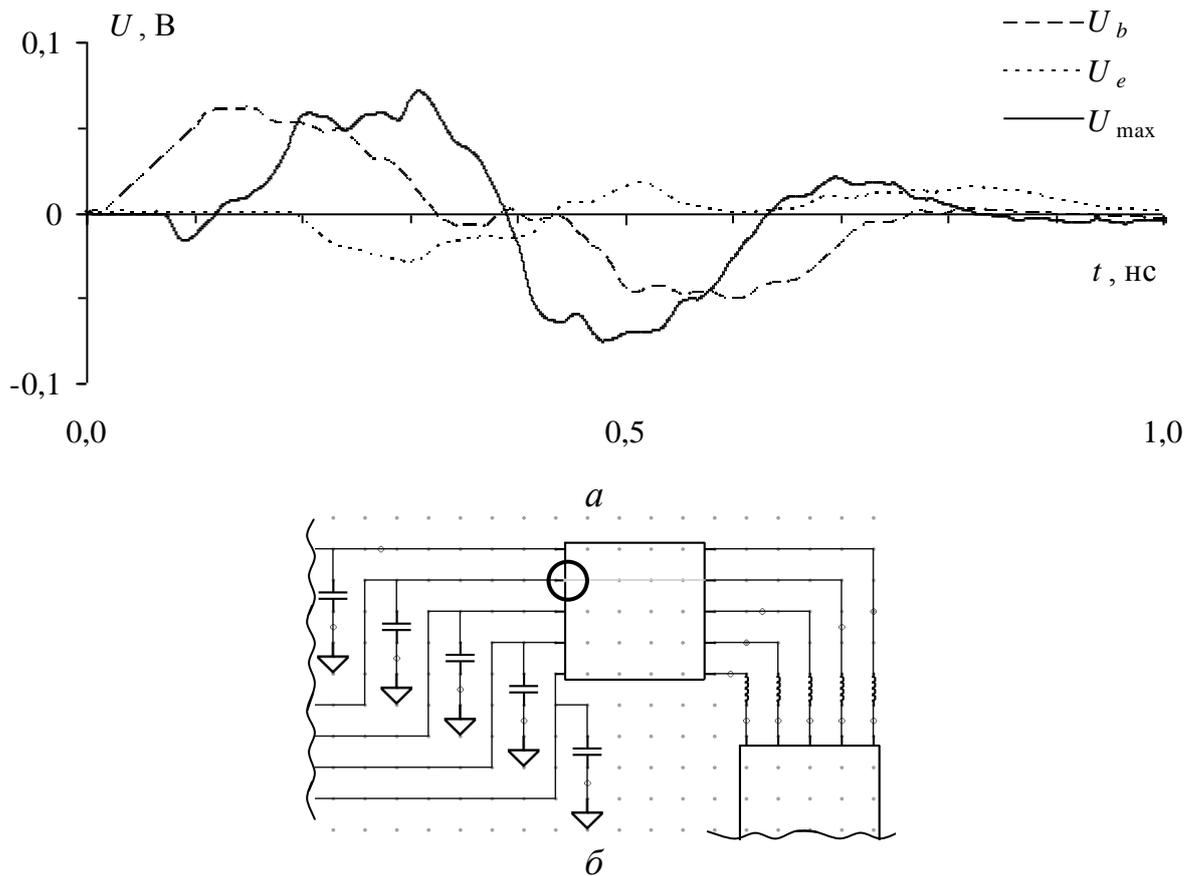


Рисунок 3.65 – Формы напряжения в пассивном проводнике (а)
и локализация его максимума (б)

Рассмотрим результаты оптимизации из таблицы 3.13. Видно, что все значения U_{max} очень близки, и отличаются только в 4-м знаке после запятой. Аналогично и с лучшими решениями, полученными в результате выполнения каждого цикла ЭС – отличия около 5 пс. Самое большое значение U_{max} получено при первом запуске ЭС для всех начальных решений. Малые отличия в полученных результатах почти не изменяют форму напряжений, вычисленных в узле V_{34} , как видно из рисунка 3.60, они совпадают.

Рассмотрим изменения среднего арифметического U_{max} , вычисленного для каждого значения начального решения. Самое сильное изменение U_{max} наблюдается при 300 пс, начинаясь с 0,5 В (рисунок 3.62). Однако после 30-го вычисления достигается значение, близкое к наибольшему, и дальнейшие изменения лежат в пределах 30 мВ. До 30-го вычисления наблюдаются резкие скачки, вызванные, вероятнее всего, сильной мутацией дочерней особи на итерации ЭС. При 3 нс (рисунок 3.61), изменение среднего арифметического

имеет плавный нарастающий характер, без сильных всплесков (разброс до 30 мВ), начинаясь с 0,52 В и достигая максимума на 69-м вычислении. При 30 пс (рисунок 3.63), U_{\max} изменяется меньше всего – начинается с 0,55 В и достигает максимума на 39-м вычислении.

Рассмотрим формы сигналов с локализованными максимумами напряжения. В активном проводнике (рисунок 3.64), как и в пассивном (рисунок 3.65) максимум локализован в одной и той же линии передачи в первом сегменте. Максимум в активном проводнике составляет 598 мВ, превышая амплитуду сигнала на входе на 20%. Максимум в пассивном проводнике равен 0,07 В, что составляет 14% от установившегося уровня 0,5 В в активном проводнике.

Выполненное исследование показывает актуальность применения оптимизации на основе ЭС для выявления и локализации экстремумов сигнала при воздействии СКИ с разными длительностями. Так, судя по таблице 3.13, наибольшее значение ЦФ равно 0,598 В. Кроме того, показано, что изменение начального решения на порядок от наилучшего решения, не влияет на конечный результат оптимизации.

3.3.4.2.2 Перекрестной помехи

В приведенном разделе представлены результаты использования оптимизации с помощью ЭС для выявления худших случаев перекрестной помехи, в том числе при сравнении с результатами оптимизации с помощью ГА. Фрагмент платы изображен на рисунке 3.66. Центральный проводник пассивный, а остальные являются активными.

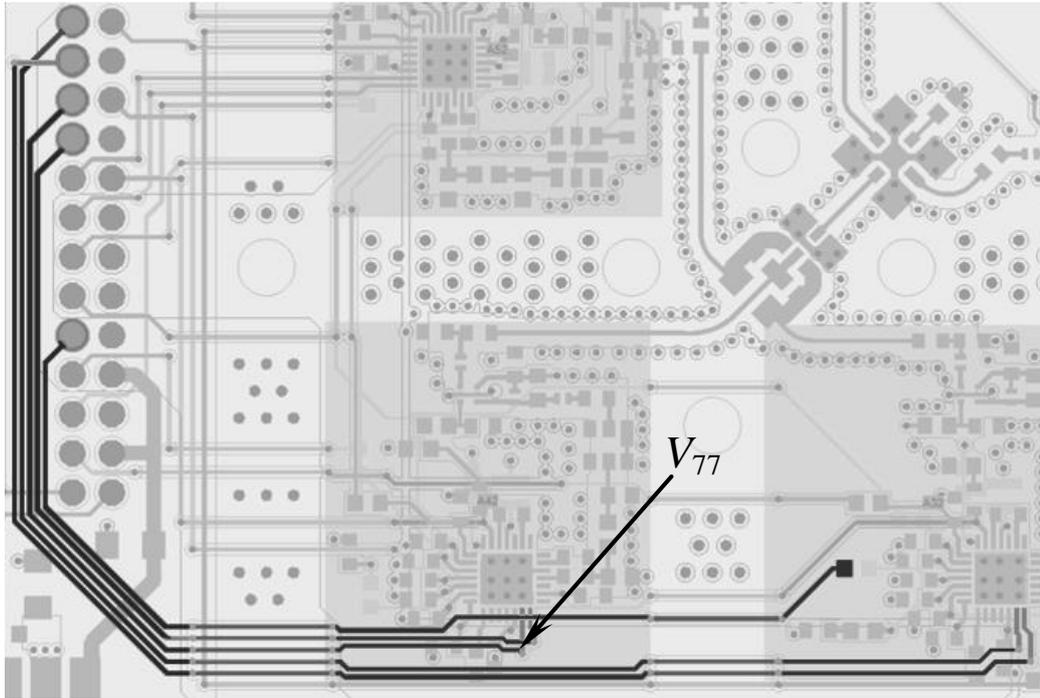


Рисунок 3.66 – Узел исследуемой шины на фрагменте ПП

Шаг изменения общей длительности СКИ в ЭС 10 пс. ЭС запускалась по 20 раз при начальном решении 300 пс. ГА запускался со следующими параметрами: коэффициент мутации – 0,1 и коэффициент кроссовера – 0,5. Число особей было 5 и 10, а число поколений 5, 7, 10 и 15.

Оптимизировалась общая длительность СКИ, а целью оптимизации было получить такие параметры его общей длительности, при которых пиковое напряжение в узле V_{77} (показан на рисунке 3.66) будет максимальным. Полагается, что этот узел является критичным, когда все остальные проводники являются активными. Четыре проводника были активными, когда центральный был пассивным. ЦФ функция этой задачи для ГА выглядит так:

$$V_{77} = f(t_{\Sigma}) \rightarrow \max, \text{ при } 30 \text{ пс} \leq t_{\Sigma} \leq 3 \text{ нс},$$

где V_{77} – максимальное значение напряжения в узле 77, t_{Σ} – общая длительность СКИ.

ЦФ для ЭС выглядит так:

$$-V_{77} = f(t_{\Sigma}) \rightarrow \min,$$

где V_{77} – максимальное значение напряжения в узле 77, t_{Σ} – общая длительность СКИ.

Параметры ЭС: $t_{\Sigma 1} = 300$ пс, $\sigma = 10$ пс, где $t_{\Sigma 1}$ – начальное решение, σ – шаг мутации.

Результаты выполнения оптимизации с помощью ЭС приведены в таблице 3.14, где N_R – это номер запуска и N – число вычислений ЦФ.

Результаты выполнения оптимизации с помощью ГА (U_{\max} – максимальное значение амплитуды напряжения перекрестной помехи в узле V_{77}) для разных запусков и числа вычислений ЦФ представлены в таблице 3.15. Число вычислений ЦФ (в случае с ГА) определяется произведением числа особей на число поколений. ГА запускался 10 раз для каждой комбинации числа особей и поколений. Это сделано для того, чтобы подтвердить сходимость полученных результатов.

Таблица 3.14 – Результаты работы ЭС

N_R	U_{\max}	N
1	0,1774	56
2	0,1751	48
3	0,1779	44
4	0,1779	76
5	0,1778	60
6	0,1773	68
7	0,1770	52
8	0,1772	44
9	0,1662	64
10	0,1779	52
11	0,1749	60
12	0,1235	40
13	0,1773	44
14	0,1777	100
15	0,1778	52
16	0,1777	48
17	0,1779	76
18	0,1693	52
19	0,1779	44
20	0,1737	68
Лучшее решение ЭС	159,33 пс	

Таблица 3.15 – Значения U_{\max} , В для разных N_R и N у ГА

N_R	N				
	20	50	70	100	150
1	0,1256	0,1092	0,1261	0,1177	0,1256
2	0,0373	0,1188	0,0964	0,1255	0,1265
3	0,0331	0,1218	0,1254	0,1250	0,1262
4	0,0817	0,1249	0,1249	0,1220	0,1259
5	0,0378	0,0415	0,1264	0,1259	0,1259
6	0,1027	0,1261	0,1250	0,1173	0,1194
7	0,1047	0,1216	0,1135	0,1252	0,1249
8	0,1242	0,1244	0,1261	0,1256	0,1255
9	0,0974	0,1248	0,1252	0,1256	0,1258
10	0,1148	0,1266	0,1216	0,1216	0,1239
Лучшее решение ГА		47,49 пс			

Зависимости U_{\max} от N_R для ЭС приведены на рисунке 3.67. Значения U_{\max} для 10 запусков ГА для разных N приведены на рисунке 3.68.

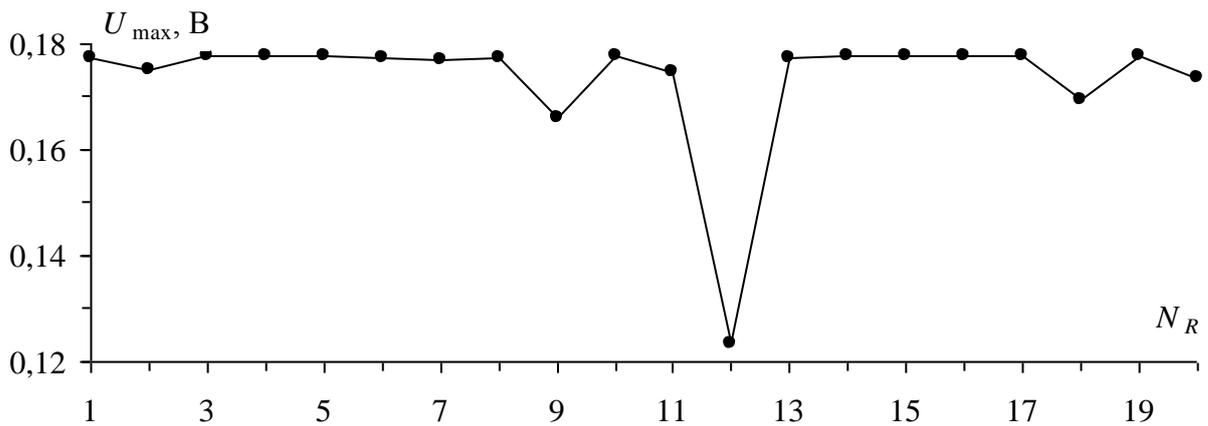


Рисунок 3.67 – Зависимости максимальных значений перекрестных помех от N_R для ЭС

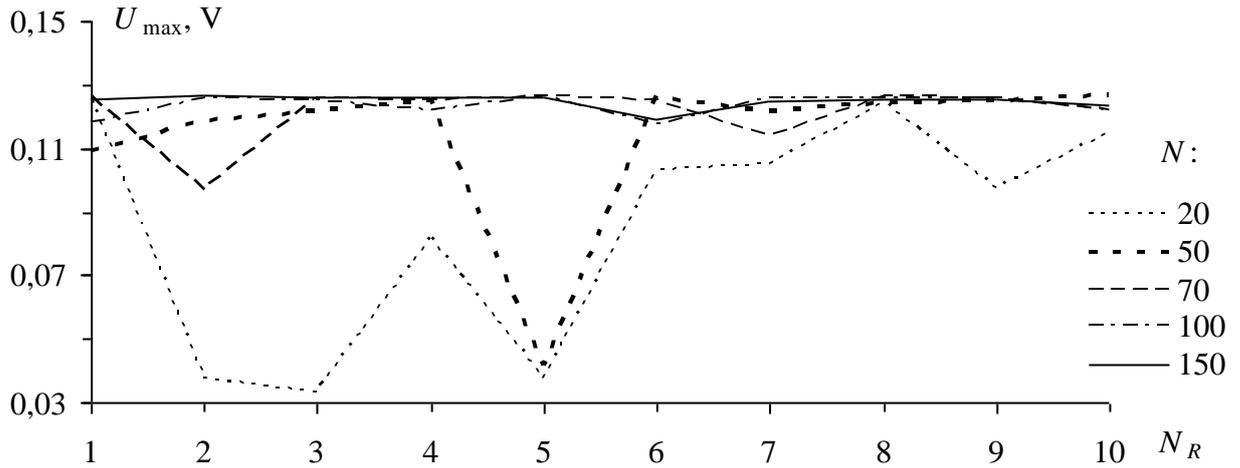


Рисунок 3.68 – Значения U_{\max} для 10 запусков ГА для разных N

Длительности СКИ, полученные после оптимизации, показаны на рисунке 3.69. Целесообразно проверить, где будут выявлены максимумы перекрестных наводок при использовании этих длительностей. Вычислено по 20 форм напряжений в каждом сегменте вдоль каждого отрезка МПЛП из рисунка 3.66 для наилучшего значения ЦФ, полученного с помощью ГА и ЭС. Однако представлены только результаты для начала проводника (U_b), конца (U_e), а также с максимальным значением напряжения (U_{\max}).

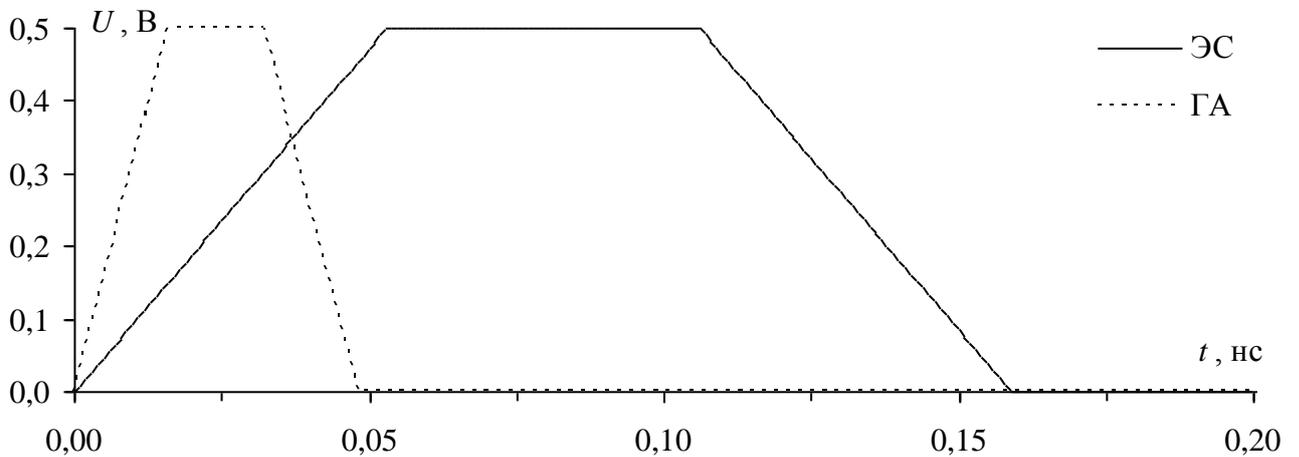


Рисунок 3.69 – Длительности сверхкороткого импульса после оптимизации

Формы перекрестных помех, вычисленные вдоль пассивного проводника после оптимизации ЭС, представлены на рисунке 3.70 а, а локализация их максимума – на рисунке 3.70 б. Аналогичные результаты для ГА приведены на рисунке 3.71.

Рассмотрим результаты оптимизации с помощью ЭС из таблицы 3.14. Видно, что значения ЦФ почти одинаковы (около 0,177 В) для каждого запуска ЭС. Получено только одно значение ЦФ, равное 0,1235 В. Лучшее решение в этом случае равно 54 пс, однако в остальных случаях оно находится в диапазоне 150–160 пс. Наибольшее значение ЦФ получено при лучшем решении, равном 159,33 пс.

Рассмотрим результаты оптимизации с помощью ГА из таблицы 3.15. Видно, что с увеличением числа вычислений улучшается результат ЦФ. Наибольшее значение ЦФ (0,12 В) получено при $N=50$, когда лучшее решение ЭС составляет 47,49 пс. Следует заметить, что результаты оптимизации, полученные при ГА, меньше, чем при ЭС.

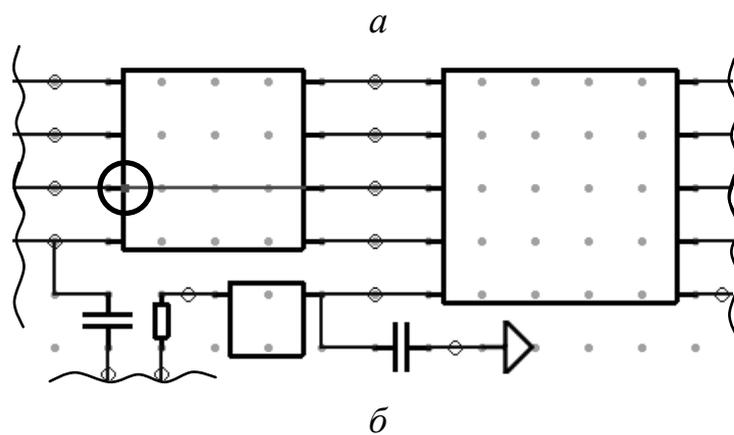
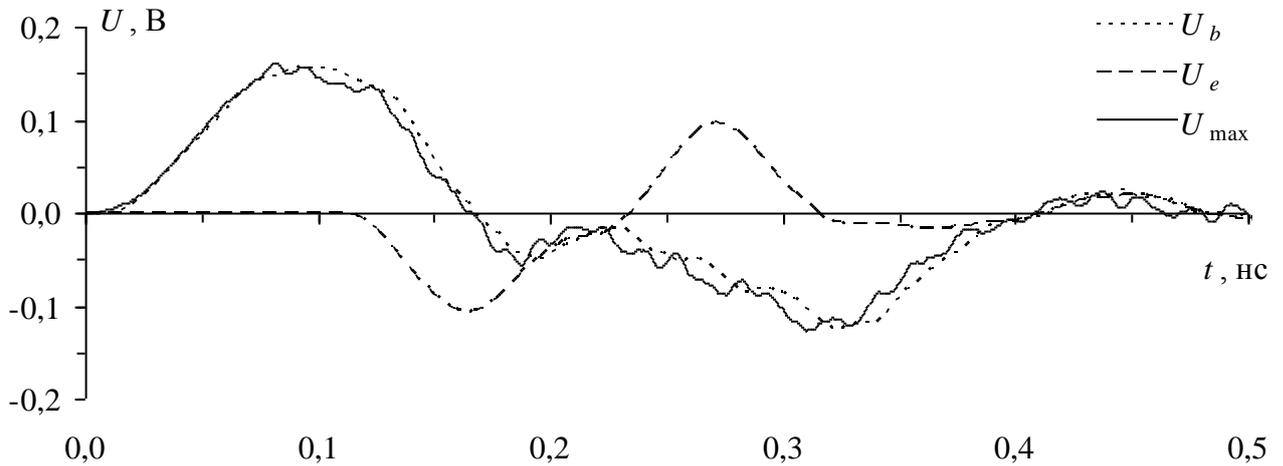


Рисунок 3.70 – Формы перекрестных помех (а) и локализация их максимумов (б) после оптимизации ЭС

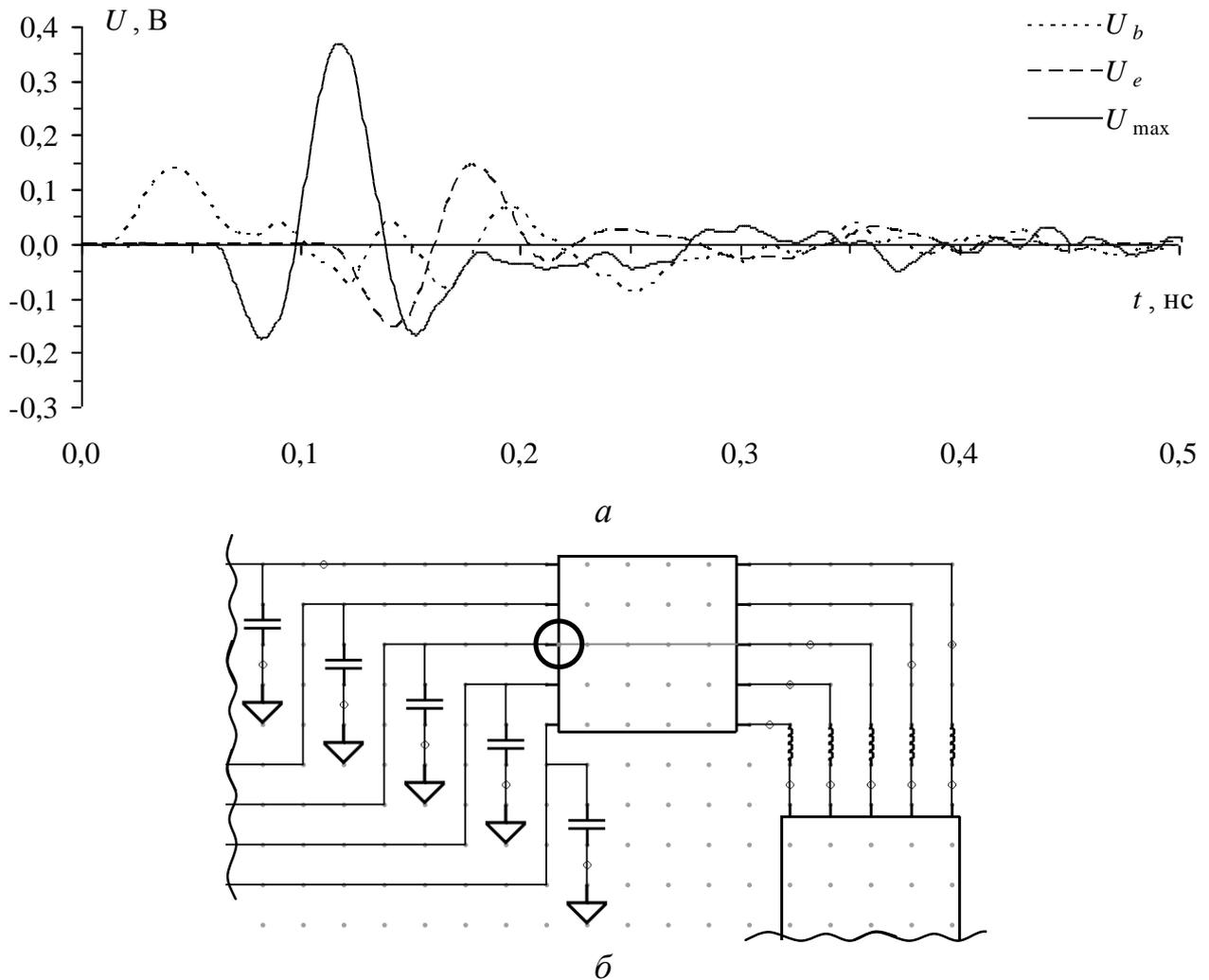


Рисунок 3.71 – Формы перекрестных помех (а) и локализация их максимумов (б) после оптимизации ГА

Рассмотрим формы перекрестных помех, вычисленные после оптимизации. После оптимизации с помощью ЭС максимальная амплитуда перекрестной помехи равна 0,16 В, что составляет 32% от установившегося уровня в активных проводниках. Максимум локализован в сегменте 1 отрезка МПП. После оптимизации с помощью ГА пиковое значение перекрестной помехи выше, чем в предыдущем случае, и равно 0,39 В. Этот максимум перекрестной помехи составляет 78% от установившегося уровня в активных проводниках.

Исследование показывает актуальность использования оптимизации различными методами для выявления и локализации максимумов перекрестных наводок в сложной структуре. Несмотря на то, что результаты оптимизации с помощью ГА имеют значения ниже, чем у ЭС, амплитуда выявленной

перекрестной наводки выше. Поэтому можно сказать, что ГА справляется с задачей выявления и локализации максимумов перекрестных наводок лучше, чем ЭС.

3.4. Основные результаты и выводы

1. Представлено описание модификации численного метода на основе квазистатического анализа МПЛП. Показан алгоритм и основные выражения для вычисления значений токов и напряжений вдоль проводников отрезков МПЛП. Предложенная модификация численного метода, позволяет вычислить токи и напряжения в любой точке вдоль проводников отрезков МПЛП.

2. Представлены результаты тестового вычисления отклика. Вычисление выполнено на основе 8-мипроводной шины. Представлены результаты токов, вычисленные в частотной области вдоль проводников шины.

3. Представлено исследование локализации максимумов напряжения в шине ПП РПУ САН, отличающееся использованием различных комбинаций нагрузок и активных проводников. При воздействии СКИ в форме трапеции (время нарастания, вершины и спада по 0,1 нс) с амплитудой ЭДС 1 В выявлены и локализованы максимумы напряжения, в 1,2 и 2,7 раза превышающие амплитуду сигнала на входе. Показано, что в двух случаях максимумы критично локализованы вблизи шины, проходящей слоем ниже.

4. Представлено исследование влияния длительности СКИ на локализацию его пиковых значений в шине ПП РПУ САН, отличающееся использованием разного количества активных проводников, а также при общей длительности СКИ, изменяемой дискретно (3, 0,3, 0,03 нс), и оптимизируемой с помощью ГА. При дискретной длительности СКИ выявлены значения максимумов напряжения, на 18% и 20% превышающие амплитуду СКИ на входе, а также минимумов, составляющие минус 36% и минус 40% от уровня 0,5 В. Показано, что с уменьшением длительности СКИ наблюдаются значительные превышения сигнала, как по максимуму, так и по минимуму, причем их локализация

непостоянна: пиковые значения появляются в разных местах шины ПП, в том числе на разных ее слоях. При оптимизации общей длительности СКИ, для ее значения около 0,13 нс, в заданном узле линии выявлен максимум напряжения, на 16% превышающий уровень 0,5 В.

5. Представлено исследование влияния длительности СКИ на локализацию пиковых значений перекрестных помех в шине ПП РПУ САН, отличающееся использованием разного количества активных проводников и изменением общей длительности СКИ (3, 0,3 0,03 нс). Для 2-х возбуждаемых проводников выявлено значение максимума перекрестной наводки, составляющее 29% от установившегося уровня 0,5 В, а также наибольшее (по модулю) значение минимума, составляющее 33,4% от уровня 0,5 В. Для 4-х проводников выявленные максимумы локализованы в узлах, а наибольший минимум составляет 39,8% от уровня 0,5 В. Показано, что с уменьшением длительности СКИ наблюдаются значительные превышения сигнала, как по максимуму, так и по минимуму, но они появляются в одном отрезке линии передачи шины ПП.

6. Представлены результаты оптимизации, отличающейся использованием ГА, общей длительности СКИ, а также длительности фронта, вершины и спада по отдельности, по критерию максимизации пикового напряжения в шине ПП. При оптимизации общей длительности (около 0,13 нс) выявлено максимальное значение напряжения, на 16% превышающее установившийся уровень при общей длительности СКИ. При оптимизации длительностей фронта, вершины и спада СКИ выявлено и локализовано значение максимума напряжения, на 36% превышающее установившийся уровень, а также максимальное значение перекрестной помехи в шине ПП, составляющее 24% от установившегося уровня при общей длительности СКИ около 1 нс для обоих случаев. Показана хорошая сходимость полученных результатов.

7. Представлены результаты оптимизации параметров нагрузок шины ПП с помощью ГА по критерию минимизации пикового напряжения, отличающейся использованием в качестве оптимизируемых параметров 10-и нагрузок на концах проводников шины ПП по критерию минимизации суммы пиковых напряжений в

заданных узлах. С помощью оптимизации удалось уменьшить амплитуду сигнала в активном проводнике в 30 раз, при этом выявленные вдоль проводников максимумы не превышали значений до оптимизации. Показана хорошая сходимость полученных результатов.

8. Представлено исследование влияния коэффициентов кроссовера и мутации на оптимизацию с помощью ГА длительности СКИ по критерию максимизации пикового напряжения в шине ПП, отличающееся различными комбинациями коэффициентов мутации и кроссовера (коэффициенты мутации – 0,01, 0,03, 0,05, 0,08 при коэффициенте кроссовера – 0,5; коэффициенты кроссовера – 0,1, 0,3, 0,5, 0,8 при коэффициенте мутации – 0,1). При оптимизации длительностей фронта, вершины и спада СКИ (при общей длительности СКИ около 1,5 нс) выявлено максимальное значение напряжения, на 38% превышающее установившийся уровень. Показано влияние коэффициентов мутации и кроссовера на сходимость полученных результатов.

9. Представлено имитационное моделирование распространения вдоль проводников шины ПП сигналов из-за ЭСР, отличающееся использованием в качестве воздействия ЭСР с формой тока по стандарту IEC 61000-4-2. Показано, что в активном проводнике шины с окончаниями 50 Ом получено пиковое напряжение 471 В. В пассивных проводниках пиковое напряжение находится в диапазоне 1–32 В.

10. Проведено моделирование распространения СКИ в форме трапеции вдоль проводников шины ПП. С помощью ЭС оптимизировалась общая длительность СКИ по критерию максимизации пикового напряжения в шине ПП. ЭС запускалась по 10 раз при разных начальных решениях – 3 нс, 300 пс, 30 пс. Показано, что изменение начального решения в диапазоне, близком к наилучшему решению, не влияет на результат оптимизации. Выявлены максимальное значение напряжения, на 20% превышающее амплитуду сигнала на входе, а также максимум перекрестной наводки, составляющий 14% от установившегося уровня в активном проводнике.

11. Проведено моделирование распространения СКИ в форме трапеции вдоль проводников шины ПП и оптимизация с помощью ЭС и ГА его длительности, по критерию максимизации пикового напряжения в критичной точке шины ПП. ЭС запускалась по 20 раз при начальном решении 300 пс. ГА запускался 10 раз для параметров: число особей – 5, 10; число поколений – 5, 7, 10, 15; коэффициент мутации – 0,1; кроссовера – 0,5. После оптимизации двумя методами выявлены и локализованы максимумы перекрестных наводок, составляющие 32% и 78% от установившегося уровня в активных проводниках. Показано, что ГА справляется с задачей выявления и локализации максимумов перекрестных наводок лучше, чем ЭС.

Таким образом, модифицирован численный метод, что дало возможности вычисления форм сигнала вдоль проводников произвольных схем из отрезков МПЛП, а также выявления и локализации экстремумов сигнала. С помощью данных возможностей выполнено имитационное моделирование шины реальной ПП при использовании различных параметров (40 комбинаций ХХ и КЗ на концах проводников; 3 длительности воздействия, как полезные, так и помеховые, а также ЭСР). Исследовано распространение сигнала в активном проводнике, а также перекрестной помехи в пассивных проводниках. С помощью оптимизации эволюционными алгоритмами ГА и ЭС получены параметры воздействия и нагрузок, что помогло выявить и локализовать экстремумы сигнала при использовании достигнутых оптимальных параметров. В результате выполненного имитационного моделирования выявлены уязвимые места, а также условия, при которых они возникают, что позволило разработчику шины ПП учесть их при выполнении ОКР.

4. КОМПЛЕКС ПРОГРАММ ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ И ЛОКАЛИЗАЦИИ ЭКСТРЕМУМОВ СИГНАЛА В МНОГОПРОВОДНЫХ ЛИНИЯХ ПЕРЕДАЧИ

Представлен усовершенствованный комплекс программ для выявления и локализации экстремумов сигнала в МПЛП. Описаны структура и интерфейс комплекса программ и тестирование его возможностей [100]: оценка форм сигнала; выявление и локализация максимумов напряжений и токов в тестовых схемах и меандровых линиях из одного и двух витков [101–105]. Приведены результаты выявления и локализации экстремумов сигнала в микрополосковой С-секции при изменении ширины зазора между проводниками [106, 107] и длины проводников [108].

4.1. Назначение и структура комплекса программ

На основе алгоритмов, представленных в разделе 2, усовершенствован комплекс программ (система компьютерного моделирования ЭМС TALGAT), предназначенный для выявления и локализации экстремумов сигнала в МПЛП. Усовершенствованный комплекс программ позволяет:

- строить принципиальную схему, состоящую из отрезков МПЛП;
- вычислять токи вдоль каждого проводника каждого отрезка МПЛП;
- вычислять напряжения вдоль каждого проводника каждого отрезка МПЛП;
- выбирать значение числа сегментов вдоль проводника отрезка МПЛП;
- выполнять динамическое отображение отклика;
- выбирать значение скорости анимации отклика;
- выявлять экстремумы сигнала, отображая значение экстремума;
- локализовать экстремумы сигнала на принципиальной схеме.

На рисунке 4.1 представлена структура комплекса программ для выявления и локализации экстремумов сигнала в МПЛП.

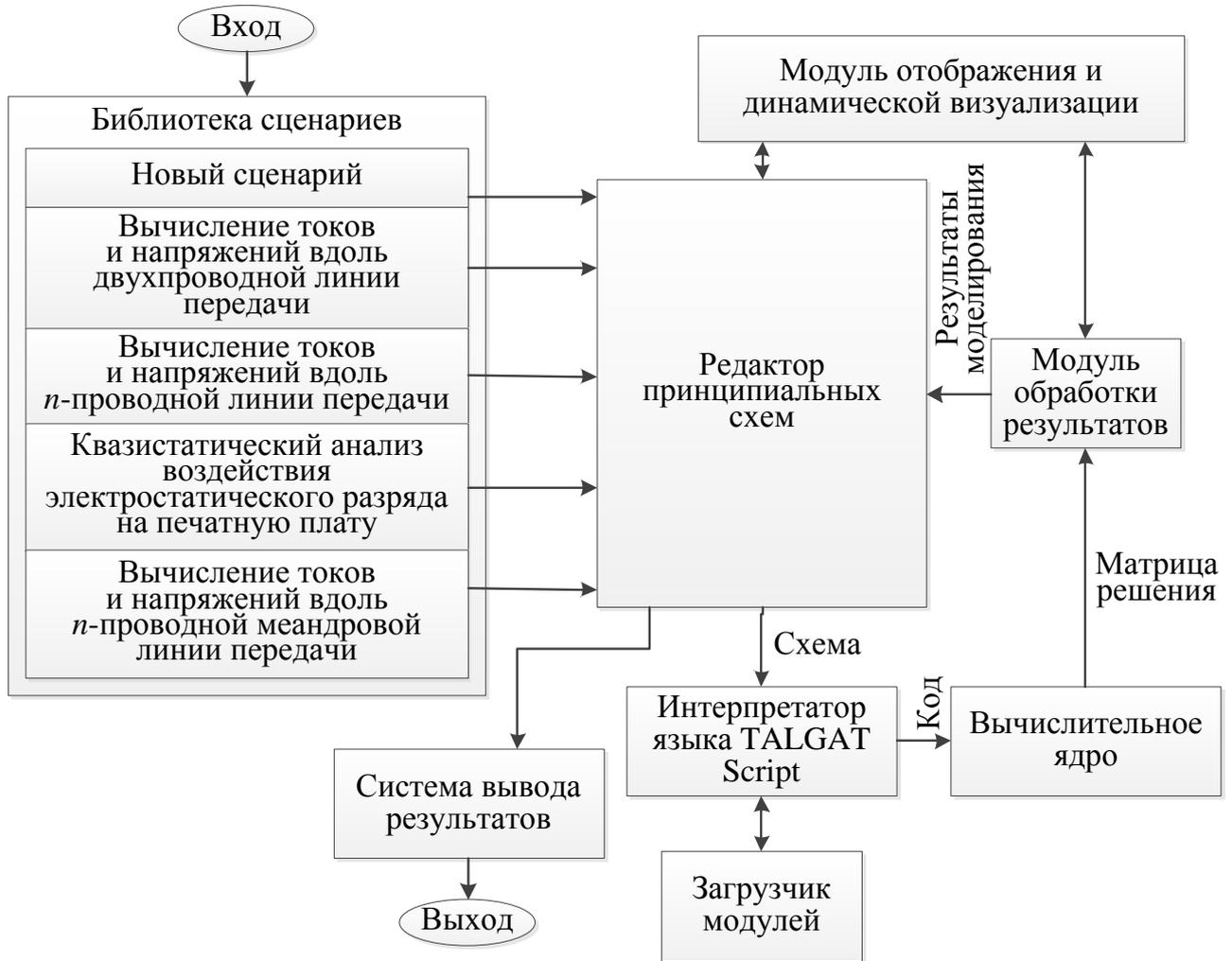


Рисунок 4.1 – Структура программного комплекса

Каждый сценарий из библиотеки сценариев представляет собой программу для ЭВМ. Два сценария («вычисление токов и напряжений вдоль двухпроводной линии передачи» и «квазистатический анализ воздействия электростатического разряда на печатную плату») имеют свидетельства о регистрации программы для ЭВМ (см. Приложение). Таким образом, выбрав готовый сценарий, в котором все необходимые параметры в схеме уже прописаны, пользователю остается только запустить вычисление. Тем не менее, в случае необходимости, у пользователя так же есть возможность изменить любой параметр так, как ему требуется.

Схема работы разработанного комплекса программ представлена на рисунке 4.2.

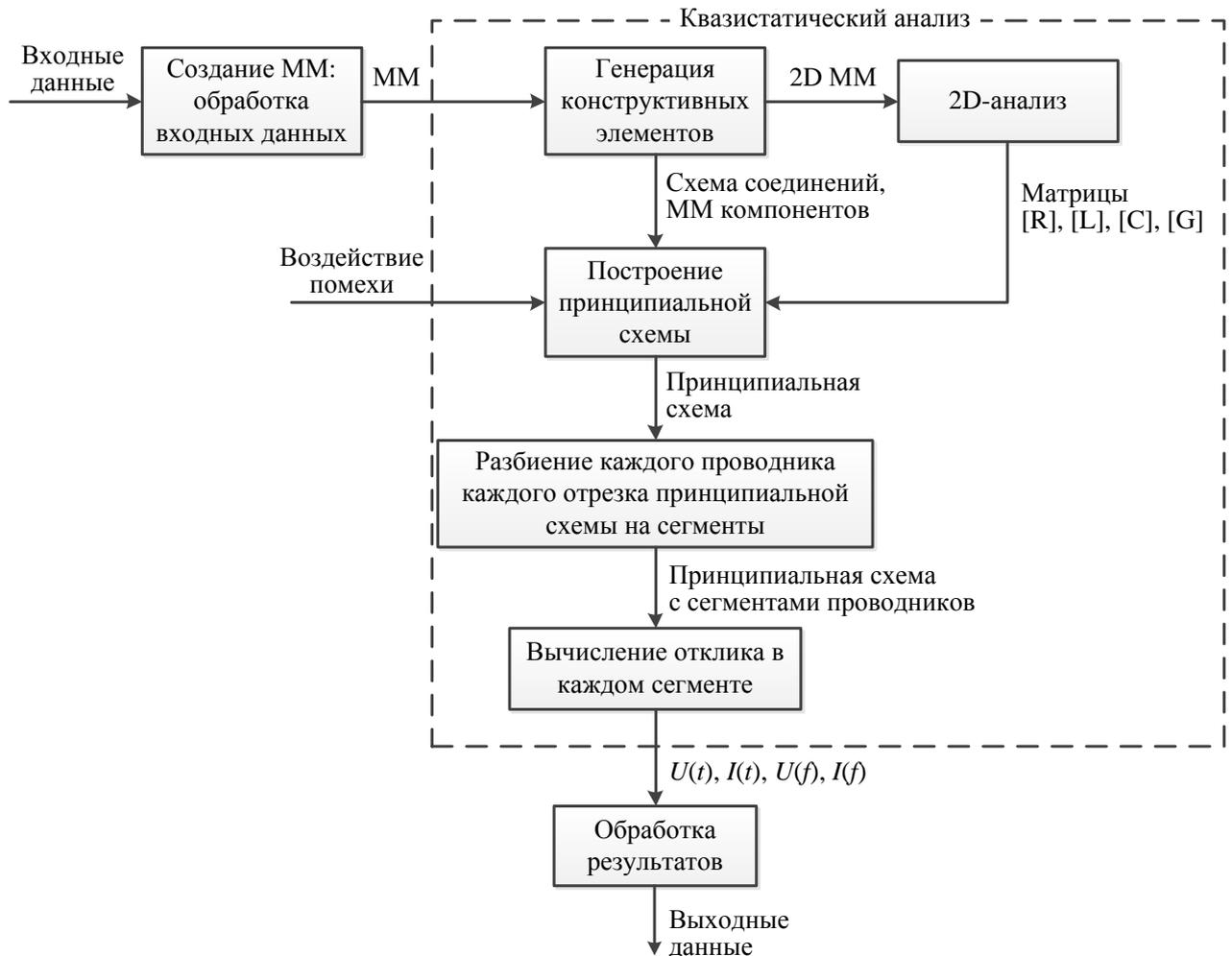


Рисунок 4.2 – Схема работы комплекса программ для выявления и локализации экстремумов сигнала

Для реализации возможности вычисления токов и напряжений вдоль проводников отрезков МПЛП разработан модуль, называемый RESPONSEX.tlm, для которого добавлены специальные команды. В таблице 4.1 приведены имена добавленных команд, их атрибуты и описание.

Для реализации графического интерфейса используется кроссплатформенный инструментарий Qt для разработки элементов графического интерфейса на языке программирования QML [109], особенностью которого является разделение декларативного способа описания дизайна интерфейса и императивной логики программирования. Для этого разработаны специальные классы, взаимодействие объектов которых внутри программного комплекса отображено на диаграмме последовательности UML (рисунок 4.3).

Таблица 4.1 – Разработанные команды для системы TALGAT

№	Имя команды	Атрибуты	Описание
1.	T_RESPONSEX	f_0 – частота, на которой выполняется вычисление	Запускает алгоритм вычисления временного отклика для напряжений.
2.	T_RESPONSEX_I	f_0 – частота, на которой выполняется вычисление	Запускает алгоритм вычисления временного отклика для токов.
3.	F_RESPONSEX	f_0 – частота, на которой выполняется вычисление	Запускает алгоритм вычисления частотного отклика для напряжений.
4.	F_RESPONSEX_I	f_0 – частота, на которой выполняется вычисление	Запускает алгоритм вычисления частотного отклика для токов.
5.	SET «nTransmissionLine-Subsections»	n – число сегментов на отрезке проводника	Задаёт число сегментов на отрезке проводника (количество точек, в которых будут вычисляться формы сигнала).
6.	ADD_XY_DATA_ _c_animation	m_x – матрица по x ; m_y – матрица по y ; start_segm – номер начального сегмента; end_segm – номер конечного сегмента; plot_command – команда для построения графиков (уже встроенные в TALGAT); color1, color2, color3 – параметры для цвета линии; name – имя линии на графике.	Создаёт анимацию для графиков.
7.	SET_PLOT_FPS	m – число кадров/с	Задаёт скорость анимации графиков

Класс :MainWindow отвечает за работу окна редактора принципиальных схем. Содержит окно работы с принципиальной схемой, а также панель управления элементами. Класс :WindowScheme отвечает за саму принципиальную схему, её конфигурацию, содержит параметры всех элементов, а также информацию об их связи между собой. Класс :QwtQMLWindow отвечает за

взаимодействие между всеми элементами программного комплекса, а также пользовательского интерфейса. Работа пользователя с анимацией форм сигнала, выявлением и локализацией экстремумов сигнала происходит с помощью методов этого класса. Класс `:WindowQwt` отвечает за все вычисления, а также отображение анимированных графиков.

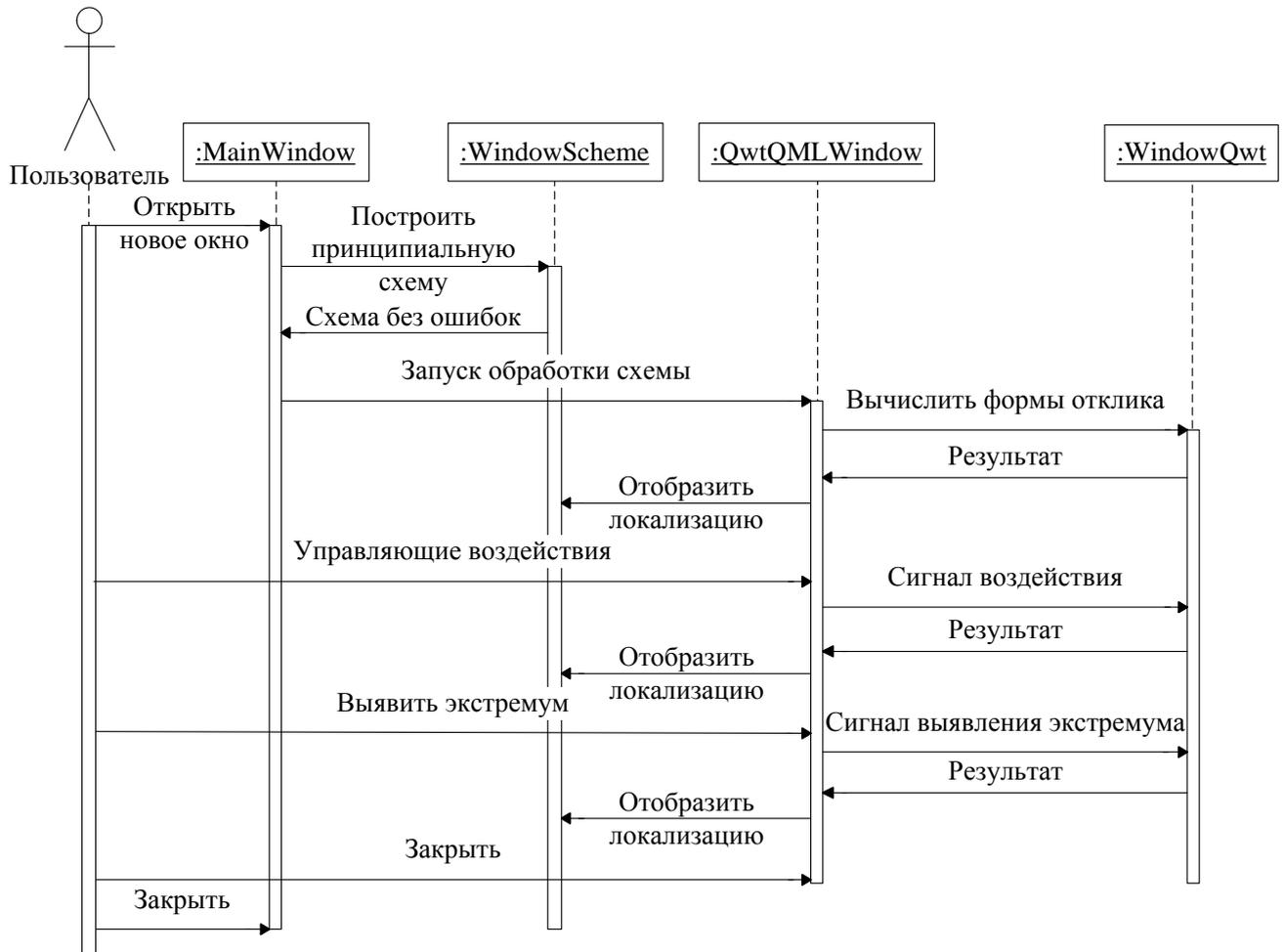


Рисунок 4.3 – Взаимодействие объектов программного комплекса на диаграмме последовательности UML

При запуске программного комплекса создается окно редактора принципиальных схем, которое представляет собой объект класса `:MainWindow`. Как только пользователь начинает построение принципиальной схемы, создается объект класса `:WindowScheme`, который содержит в себе все параметры принципиальной схемы. При нажатии кнопки запуска алгоритма вычисления открывается окно настройки вычисления, что представляет собой объект класса

:QwtQMLWindow. Для вычисления форм сигнала используются методы класса :WindowQwt.

Все взаимодействия пользователя с анимированным отображением форм сигнала осуществляется с помощью методов класса :QwtQMLWindow. Например, если пользователю требуется управлять анимацией форм сигнала, т.е. использовать управляющие воздействия (кнопки «старт», «стоп», «следующий кадр», «предыдущий кадр»), ему необходимо нажать на соответствующие кнопки интерфейса. Окно с этими кнопками является объектом класса :QwtQMLWindow и при нажатии отправляет сигнал в класс :WindowQwt для выполнения задачи. Объекты класса :WindowQwt, выполнив требование, возвращают результат в :QwtQMLWindow, где происходит отображение действия над графиками (пауза, старт и т.д.). Кроме того, сразу после получения сообщения от :WindowQwt в экземпляр класса :WindowScheme (принципиальная схема) отправляется информация об изменении локализации сигнала. Аналогичным образом выполняется взаимодействие классов при выявлении экстремумов сигнала.

4.2. Описание интерфейса программного комплекса

Работа начинается с главного окна редактора принципиальных схем. Чтобы начать работу, необходимо создать принципиальную схему, нажав соответствующую кнопку. Откроется окно работы с принципиальной схемой (рисунок 4.4). В нем необходимо построить исследуемую схему из графических элементов (рисунок 4.5), указать их параметры, путем выделения элементов и нажатия кнопки «Параметры», после чего нажать кнопку запуска алгоритма. Откроется окно настроек алгоритма (рисунок 4.6), где можно выбрать тип анализа (временной или частотный), а также меню динамической визуализации «DynaVis».

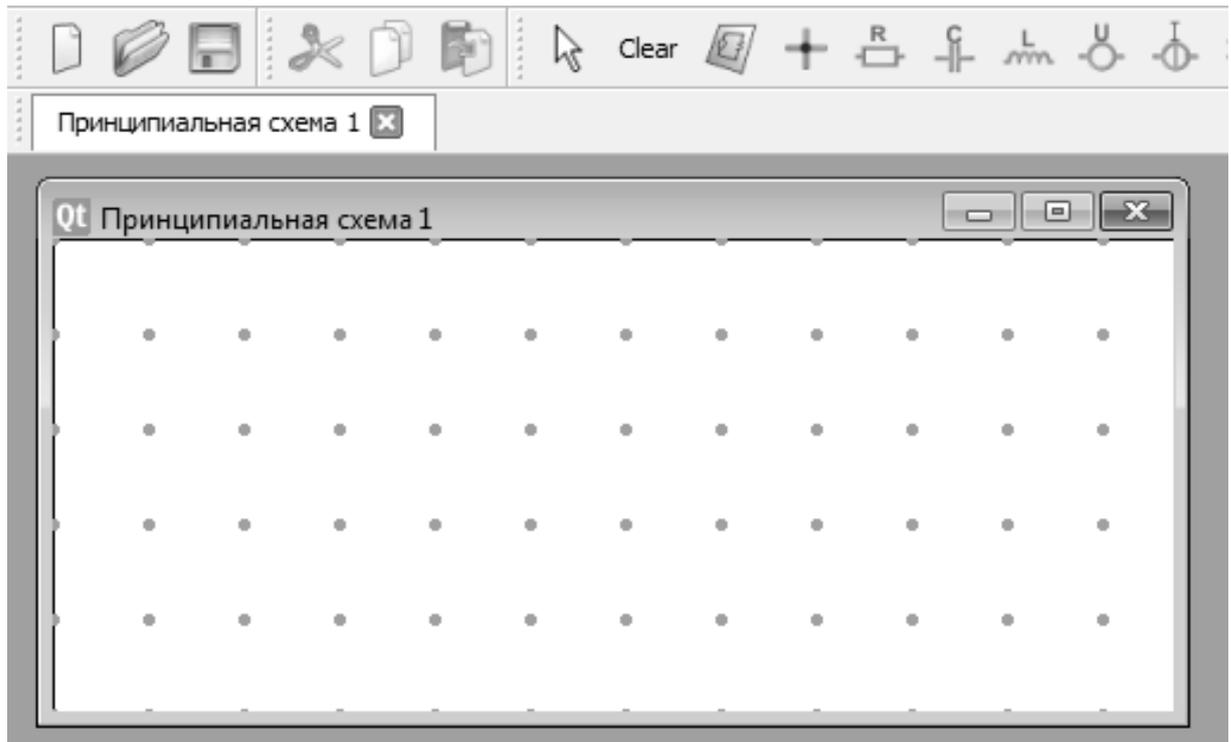


Рисунок 4.4 – Окно работы с принципиальной схемой

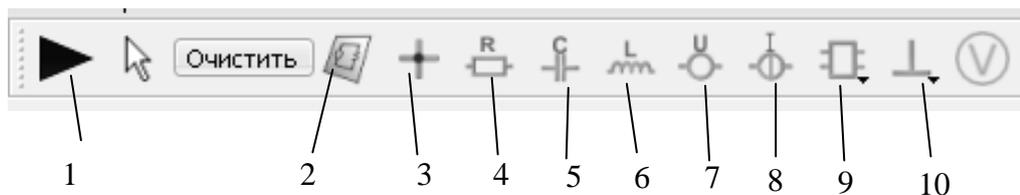


Рисунок 4.5 – Панель элементов. 1 – кнопка запуска алгоритма, 2 – кнопка «создать принципиальную схему», 3 – соединительная линия, 4 – резистор, 5 – конденсатор, 6 – катушка индуктивности, 7 – источник напряжения, 8 – источник тока, 9 – линия передачи, 10 – заземление

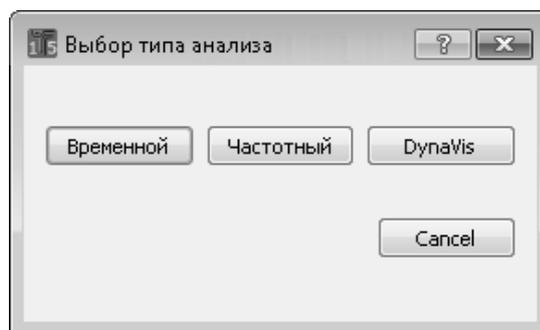


Рисунок 4.6 – Окно настроек алгоритма

В меню динамической визуализации (рисунок 4.7) есть возможность выбора числа подынтервалов (это число координат вдоль каждого отрезка каждого проводника МПЛП, в каждой из которых будет отображаться форма сигнала),

количества кадров в секунду (отвечает за скорость анимации), а также номера начального узла *A* и конечного узла *B* (при нажатии на поле осуществляется переход на окно с принципиальной схемой). После выбора всех необходимых параметров необходимо нажать кнопку «ОК».

Затем генерируется код, в соответствии с построенной принципиальной схемой (выполняется переход от схемного представления МПЛП к представлению в виде кода), который автоматически компилируется и открывается окно с формами сигнала в заданных узлах (*A* и *B*), после чего открывается новое окно, с динамическим отображением распространения сигнала (рисунок 4.8). В окне с динамическим отображением распространения сигнала пользователь видит: формы сигнала в узлах *A* и *B* (статические), а также анимированную форму сигнала, которая плавно переходит из формы для узла *A* в форму для узла *B*. В легендах к графику отображаются узлы, между которыми находится отрезок проводника, а в скобках координата внутри этого отрезка.

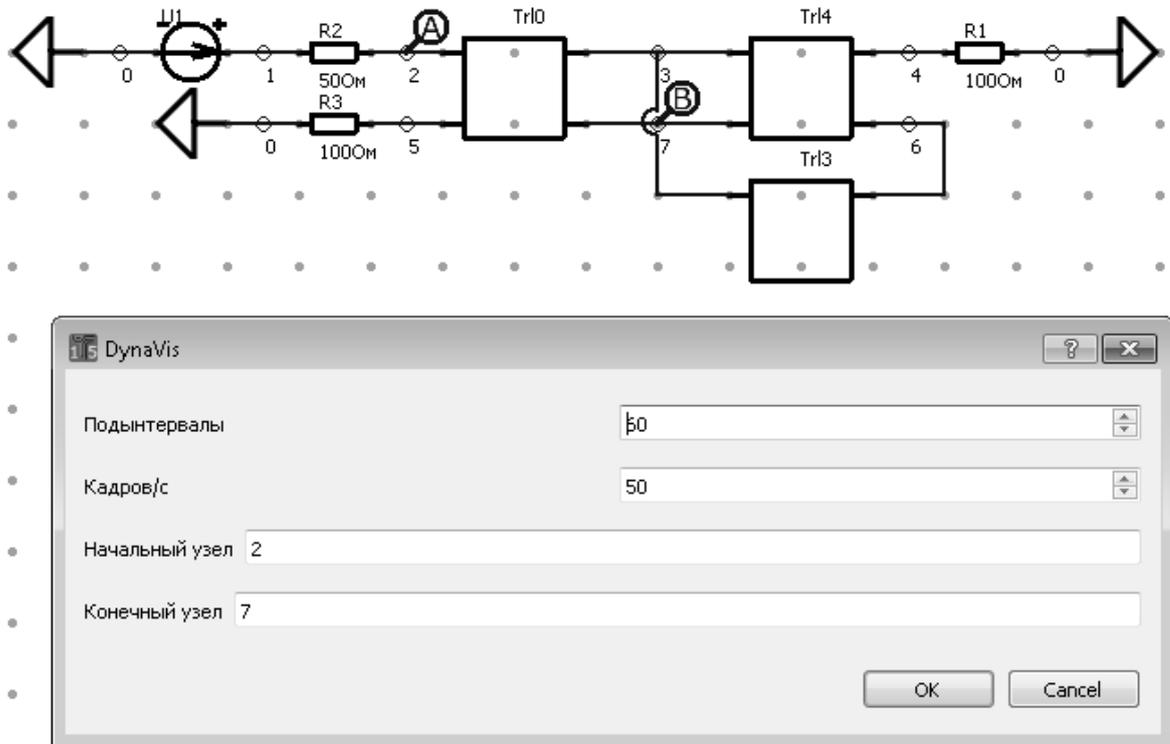


Рисунок 4.7 – Меню «DynaVis»

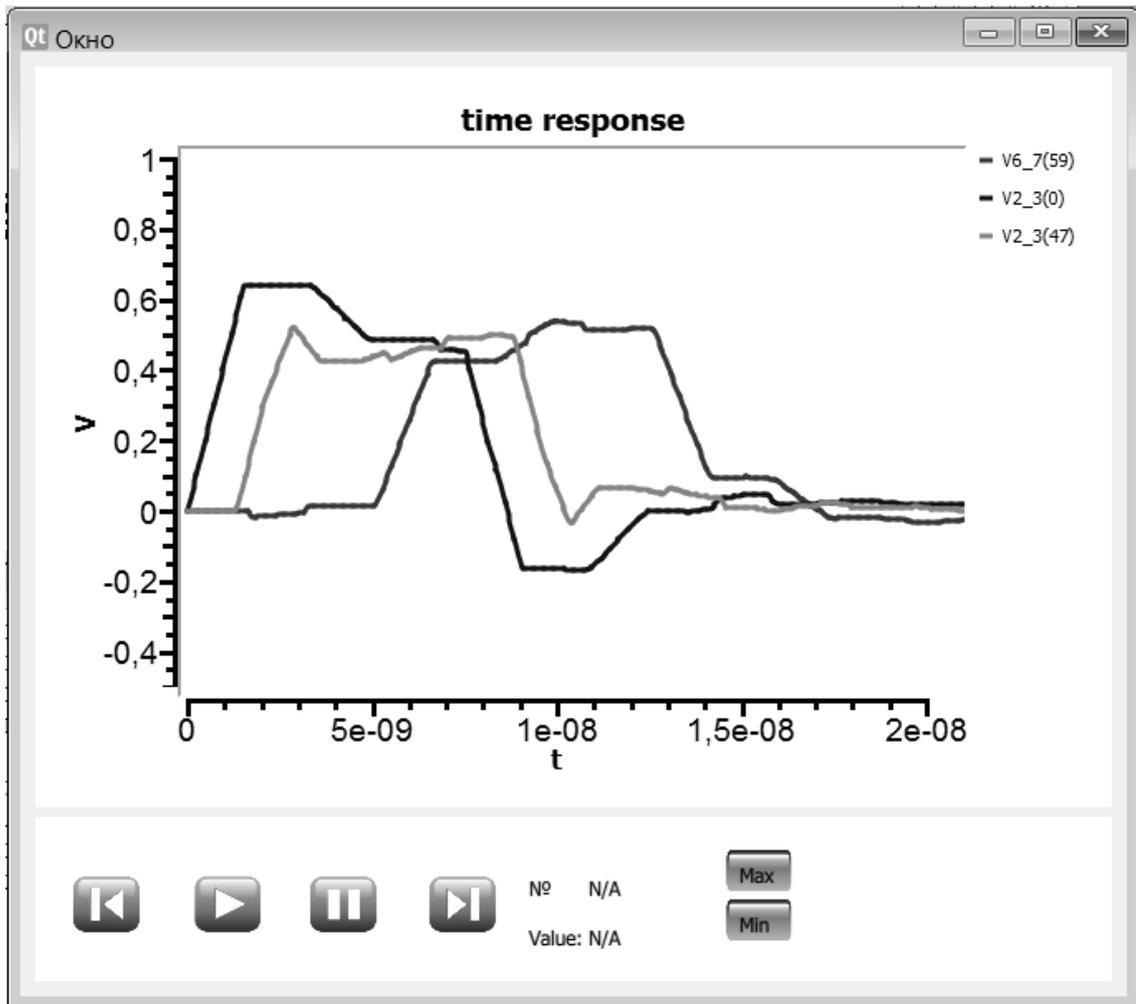


Рисунок 4.8 – Окно с динамической визуализацией

У пользователя есть возможность остановить динамическое отображение, нажав кнопку «Пауза», и перемещать кадры на шаг назад или вперед, нажимая стрелки влево и вправо, а также снова запустить анимацию, нажав кнопку «Старт». В правой части окна есть две кнопки «Max» и «Min», отвечающие за отображение экстремумов сигнала. При нажатии на эти кнопки анимация останавливается, вместо нее отображается форма сигнала с экстремумом, а на принципиальной схеме отображается координата вдоль проводника отрезка МПЛП, в которой локализован экстремум сигнала (рисунок 4.9). Слева от кнопок отображения экстремумов расположено поле, в котором отображается значение экстремума сигнала, номер отрезка МПЛП и координата вдоль его проводника.

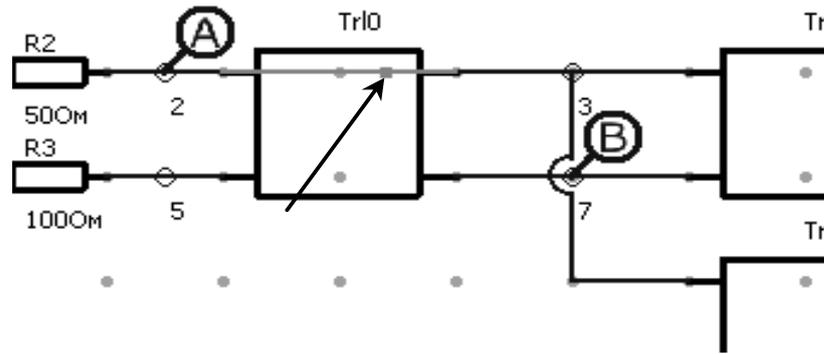


Рисунок 4.9 – Увеличенное изображение принципиальной схемы, на которой отображается локализация сигнала

4.3. Тестирование вычисления отклика и динамического отображения

Работа модуля выполнима на примере любой сложности, начиная от простых случаев с одной линией передачи, до целых печатных плат. С помощью программного модуля получены формы сигнала, распространяющегося в активной и пассивной линиях, для структур, описанных в работе [47]. На рисунке 4.10 представлены принципиальные схемы для 4-х структур со значениями параметров из данной работы. Для всех схем в качестве воздействия использовался импульс ЭДС в форме трапеции амплитудой 1 В, с длительностью фронта и спада по 1,5 нс, длительностью вершины 6 нс.

Параметры схемы на рисунке 4.10 а: $R_1 = 50 \text{ Ом}$, $R_2 - R_4 = 100 \text{ Ом}$, $l = 0,3048 \text{ м}$, $\mathbf{L} = \begin{bmatrix} 494,6 & 63,3 \\ 63,3 & 494,6 \end{bmatrix} \text{ нГн/м}$, $\mathbf{C} = \begin{bmatrix} 62,8 & -4,9 \\ -4,9 & 62,8 \end{bmatrix} \text{ пФ/м}$.

Параметры схемы на рисунке 4.10 б: $R_1, R_4 = 50 \text{ Ом}$; $R_2, R_3 = 100 \text{ Ом}$; $\mathbf{L}_1 = \mathbf{L}$, $\mathbf{L}_2 = 2 \text{ мкГн/м}$, $\mathbf{C}_1 = \mathbf{C}$, $\mathbf{C}_2 = 0,15 \text{ пФ/м}$.

Параметры схемы на рисунке 4.10 в: $R_1 = 50 \text{ Ом}$, $R_2 = 100 \text{ Ом}$, $R_3 - R_6 = 200 \text{ Ом}$, $l_1 = 0,3048 \text{ м}$, $l_2 = 0,4572 \text{ м}$, $l_3 = 0,6096 \text{ м}$.

Параметры схемы на рисунке 4.10 г: $R_1 = 50 \text{ Ом}$; $R_2, R_3 = 100 \text{ Ом}$, $\mathbf{L}_1 = \mathbf{L}$, $\mathbf{L}_2 = 494,6 \text{ нГн/м}$, $\mathbf{C}_1 = \mathbf{C}$, $\mathbf{C}_2 = 62,8 \text{ пФ/м}$.

Вычисленные формы сигналов для каждой из структур представлены на рисунках 4.11–4.15. Взяты именно такие примеры принципиальных схем, поскольку рассматриваются одиночные отрезки связанных линий, отрезки, состоящие из разного количества проводников, а также разные подключения между отрезками линий передачи. Кроме того, для этих примеров в работе [47] приведены и формы сигналов, с которыми ранее было выполнено сравнение получаемых результатов (для разработанных алгоритмов вычисления в узлах цепи).

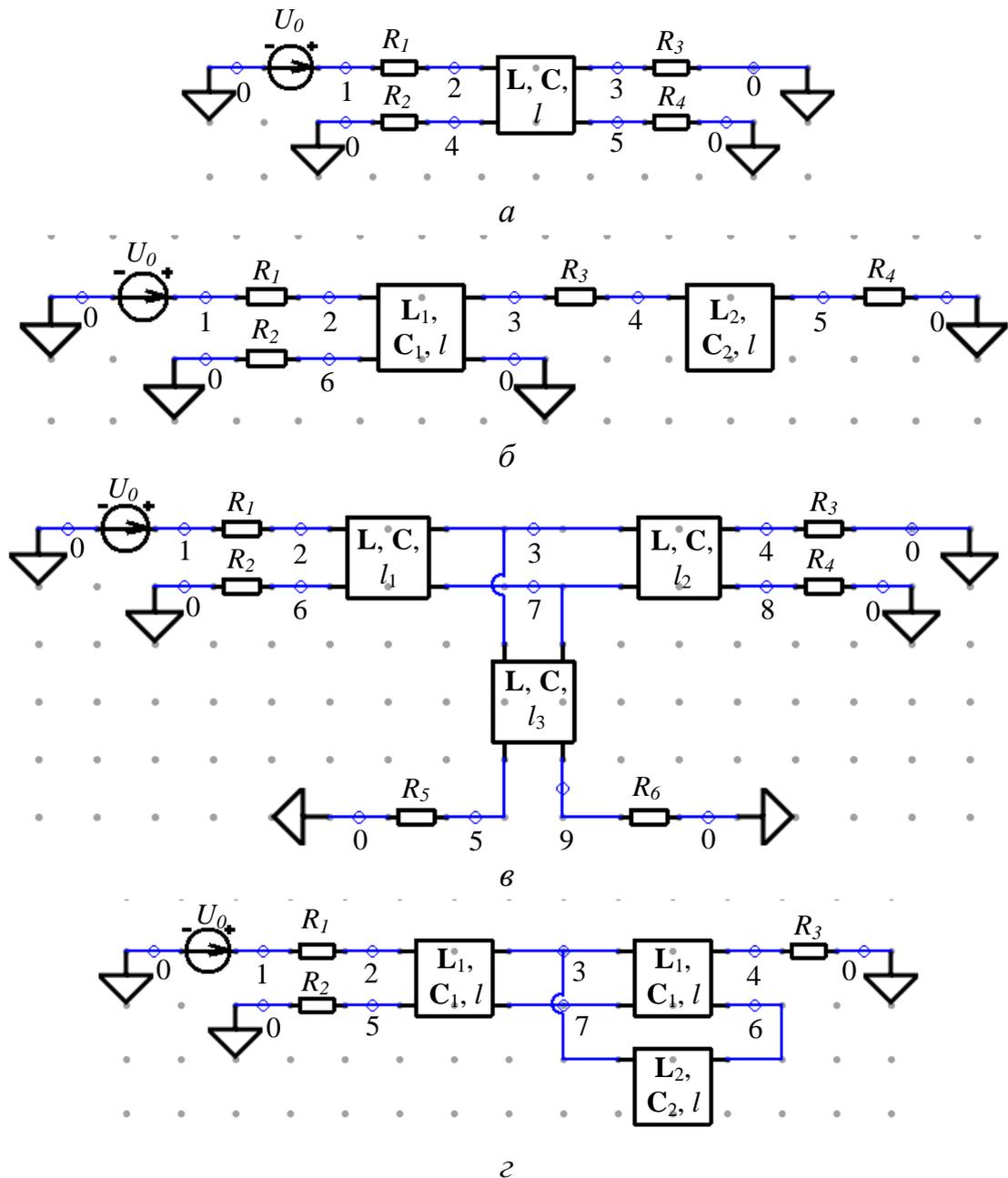
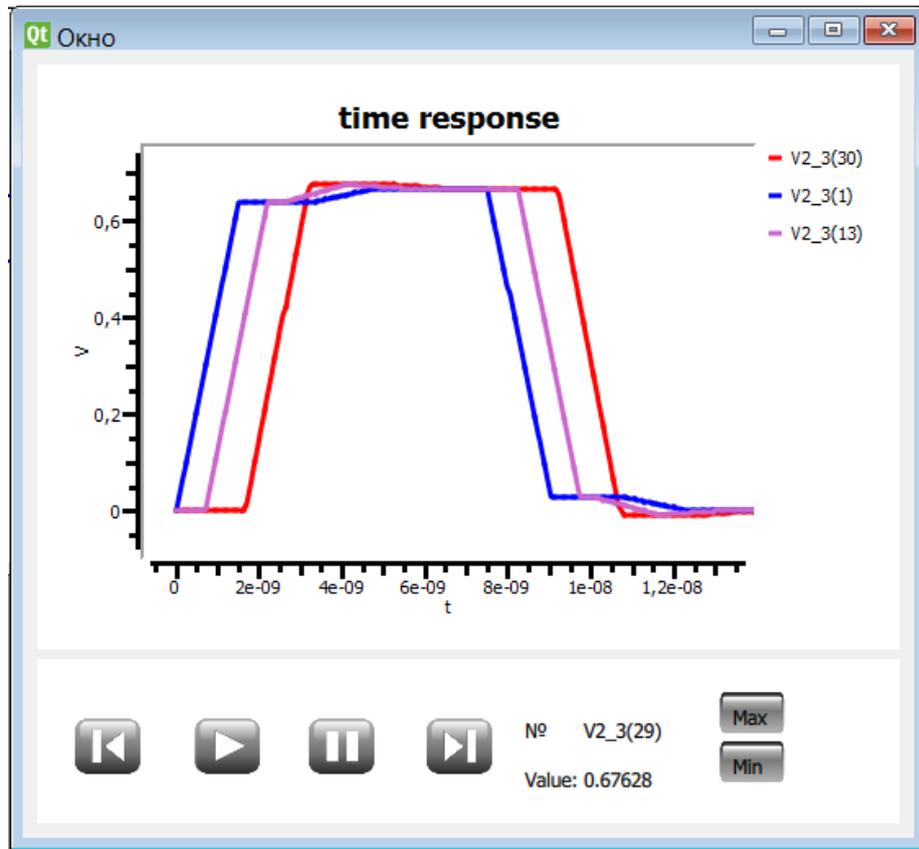
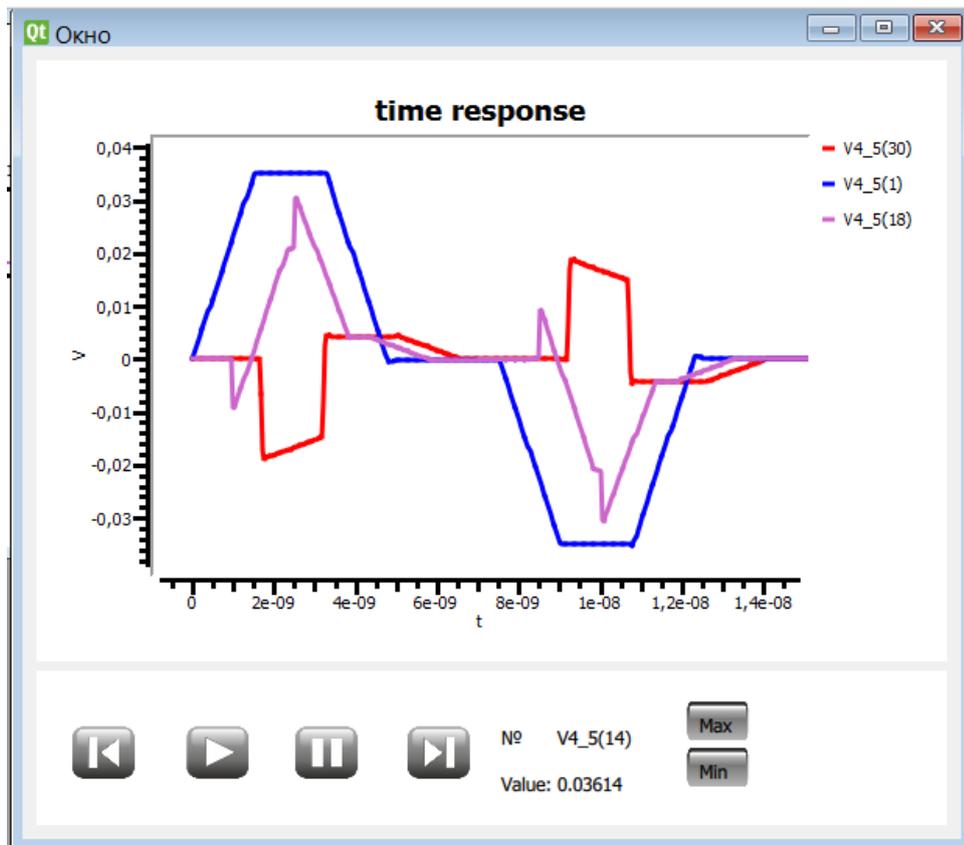


Рисунок 4.10 – Принципиальные схемы структур из работы [47]

Целью тестирования реализованных алгоритмов была проверка безотказного выполнения всех команд пользователя, а также корректность получаемых результатов. Необходимо было проверить «физичность» распространения сигнала по цепи, т.е. чтобы не нарушалась гальваническая связь проводников, а также сигнал плавно переходил от начального узла к конечному. Также проверке подвергались получаемые значения экстремумов сигнала (чтобы они не являлись локальными максимумами или минимумами) и координаты их локализации.



а



б

Рисунок 4.11 – Формы сигнала в активном (а) и пассивном (б) проводниках структуры из рисунка 4.10 а

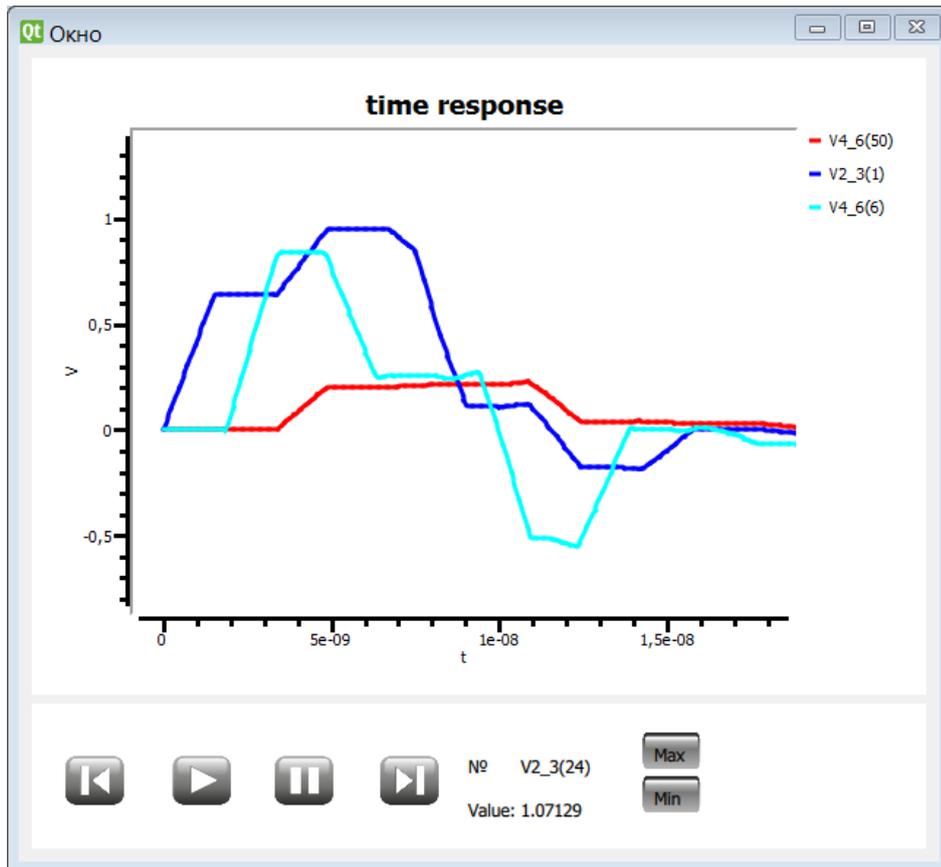
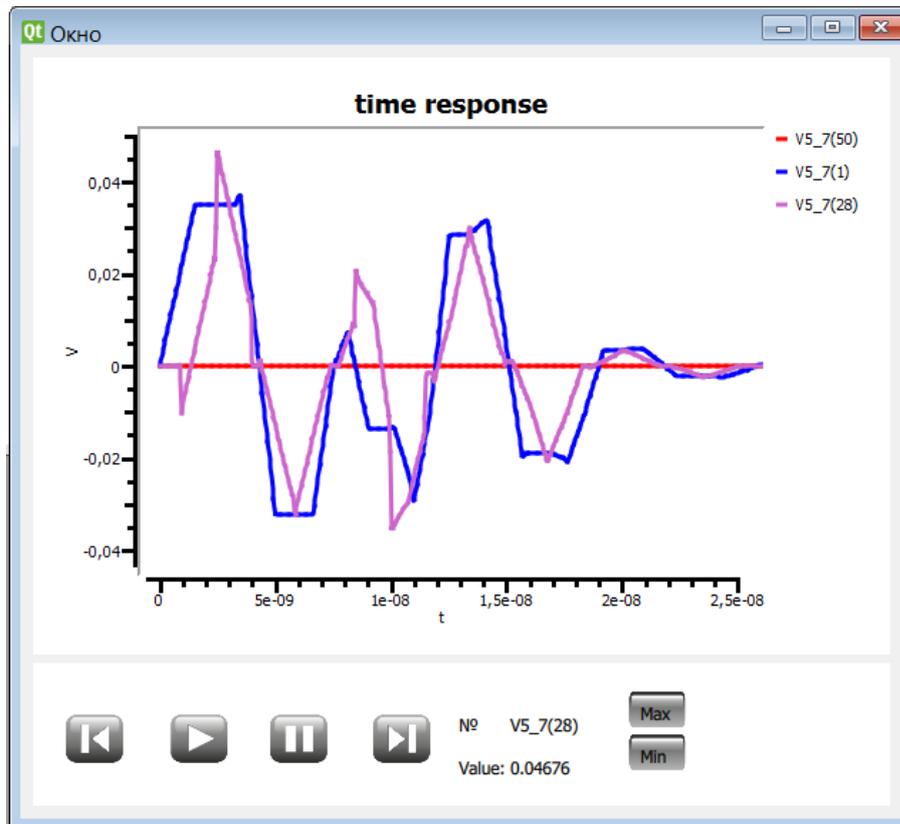
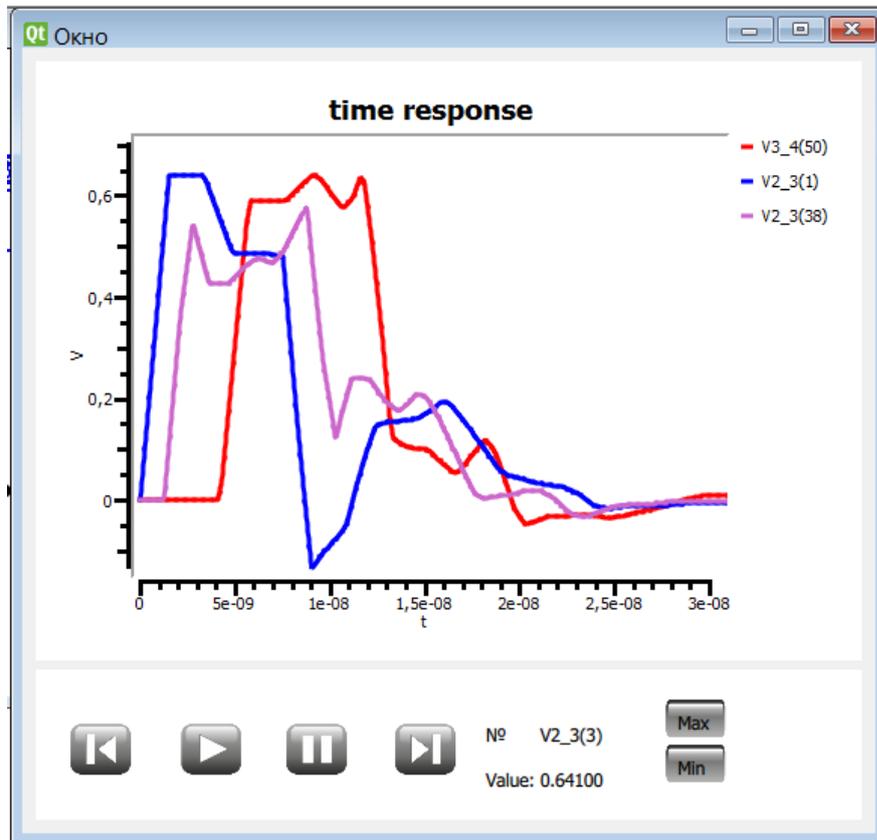
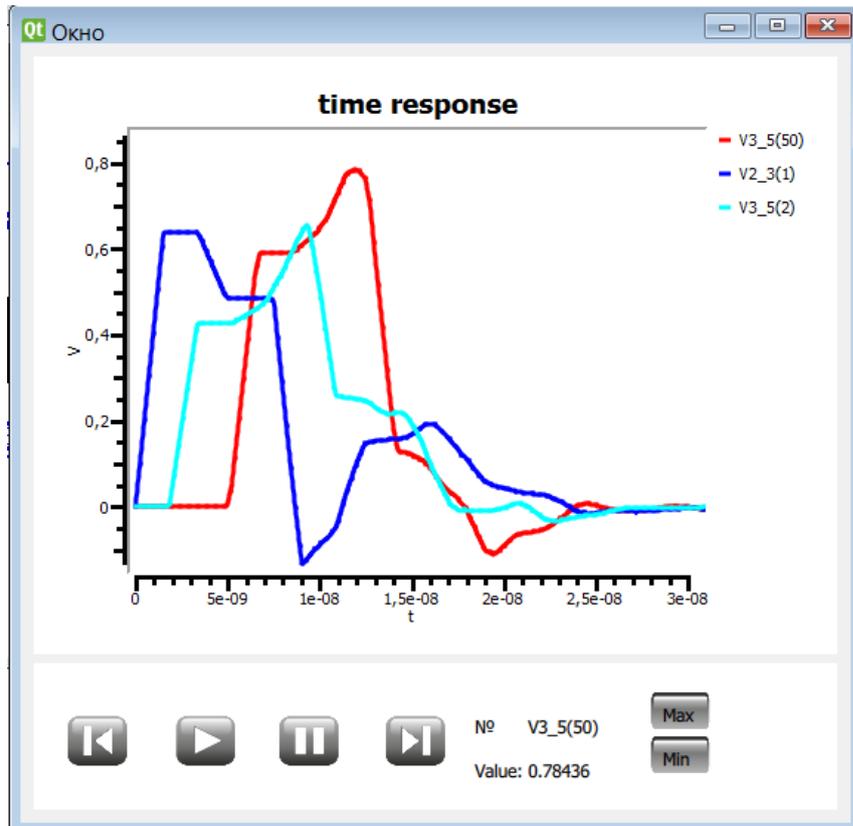
*a**б*

Рисунок 4.12 – Формы сигнала в активном (а) и пассивном (б) проводниках структуры из рисунка 4.10 б



a



б

Рисунок 4.13 – Формы сигнала в активном проводнике между узлами 2–4 (а) и 2–5 (б) структуры из рисунка 4.10 в

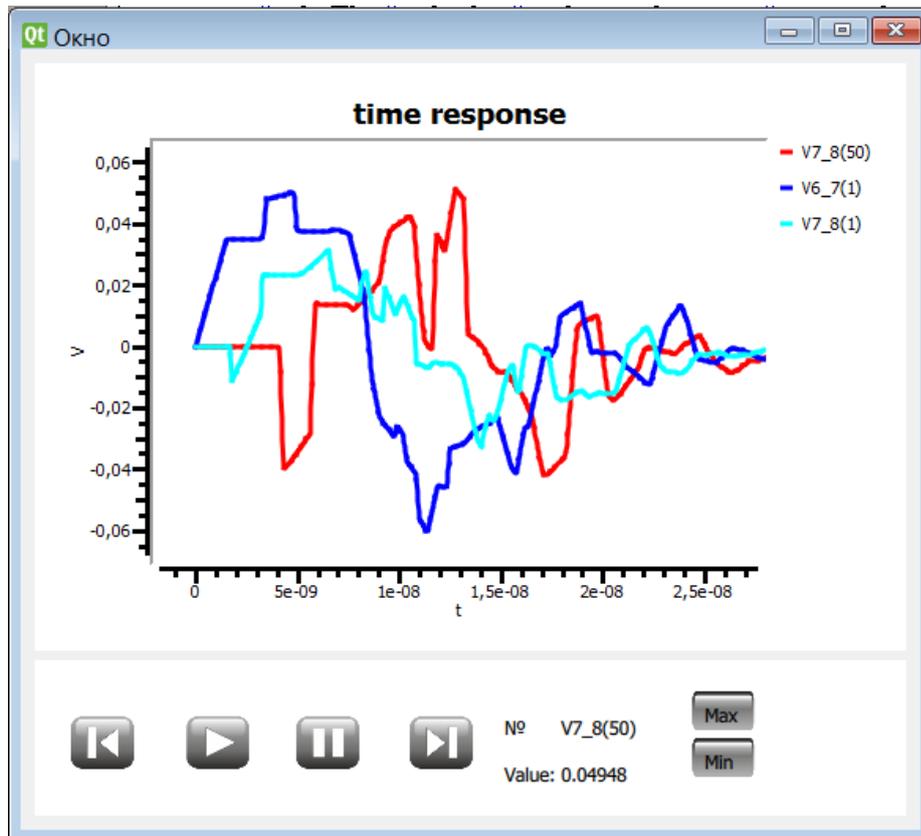
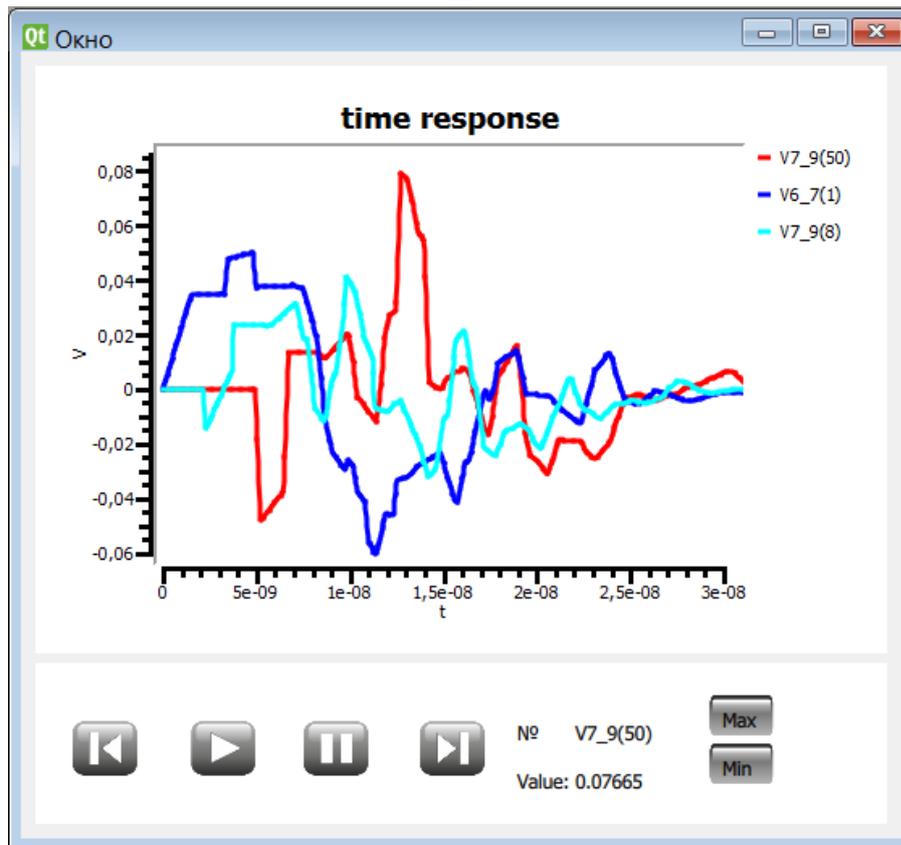
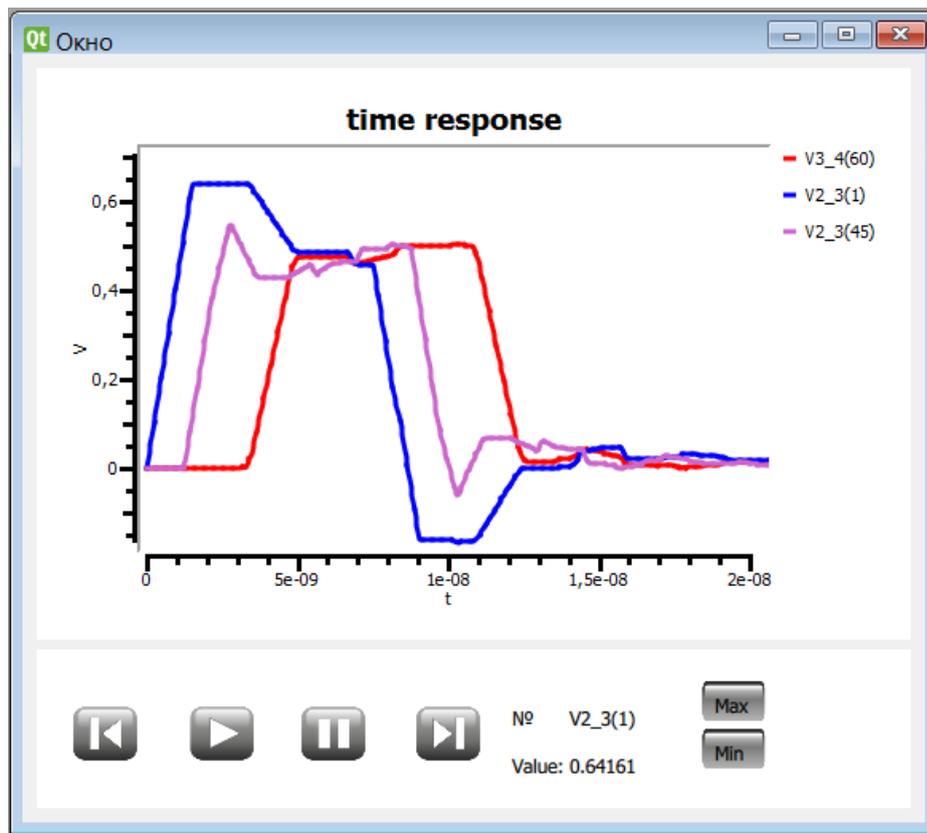
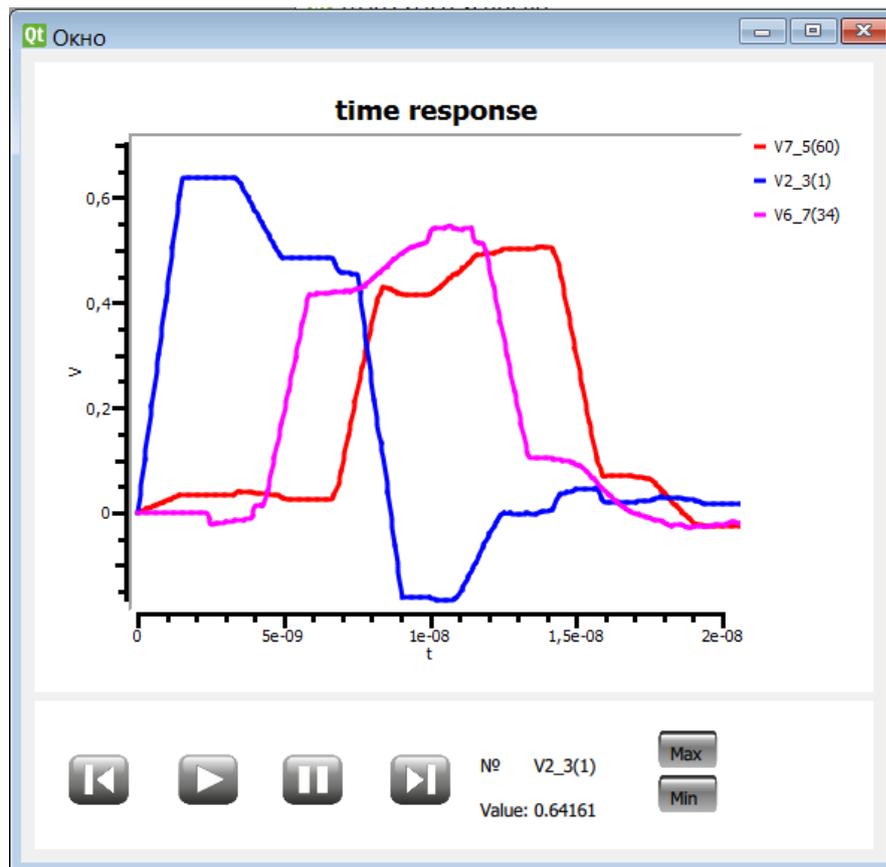
*a**б*

Рисунок 4.14 – Формы сигнала в пассивном проводнике между узлами 6–8 (*a*) и 6–9 (*б*) структуры из рисунка 4.10 *в*



а



б

Рисунок 4.15 – Формы сигнала между узлами 2–4 (а) и 2–5 (б) структуры из рисунка 4.10 з

Моделирование показало, что получаемые результаты корректны: все сигналы, распространяющиеся вдоль проводников, плавно переходят от начального узла к конечному, не наблюдается «нефизичных» скачков, локализованные экстремумы являются глобальными максимумами или минимумами, функционал работает без ошибок и сбоев. Таким образом, алгоритмы и их программная реализация корректны.

На рисунке 4.16 представлена принципиальная схема, созданная на основе реальной печатной платы системы автономной навигации (САН) космического аппарата. Следуя действиям, описанным в алгоритме из п. 4.2, получены формы сигнала, распространяющегося в одной из пассивных линий (рисунок 4.17). Дальнейшее исследование данной структуры описано в гл. 3.

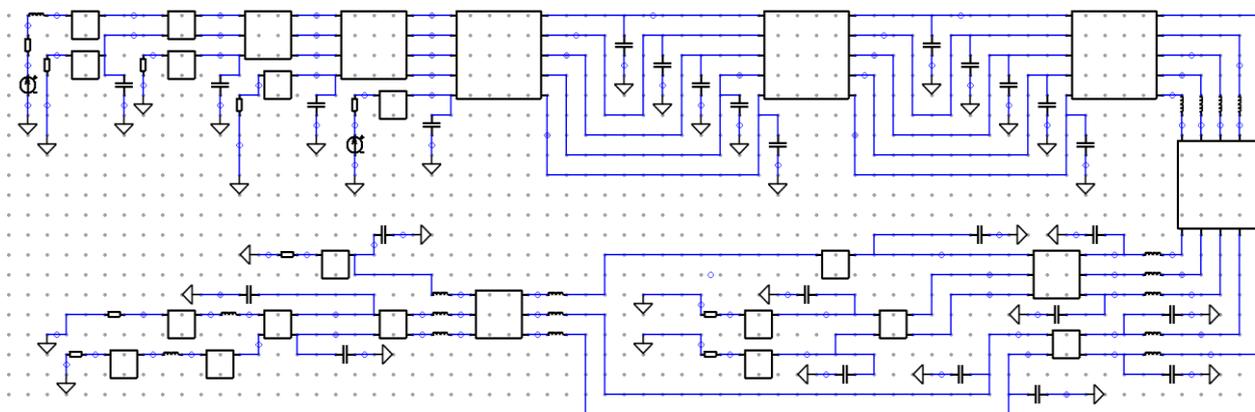


Рисунок 4.16 – Принципиальная схема шины ПП РПУ САН

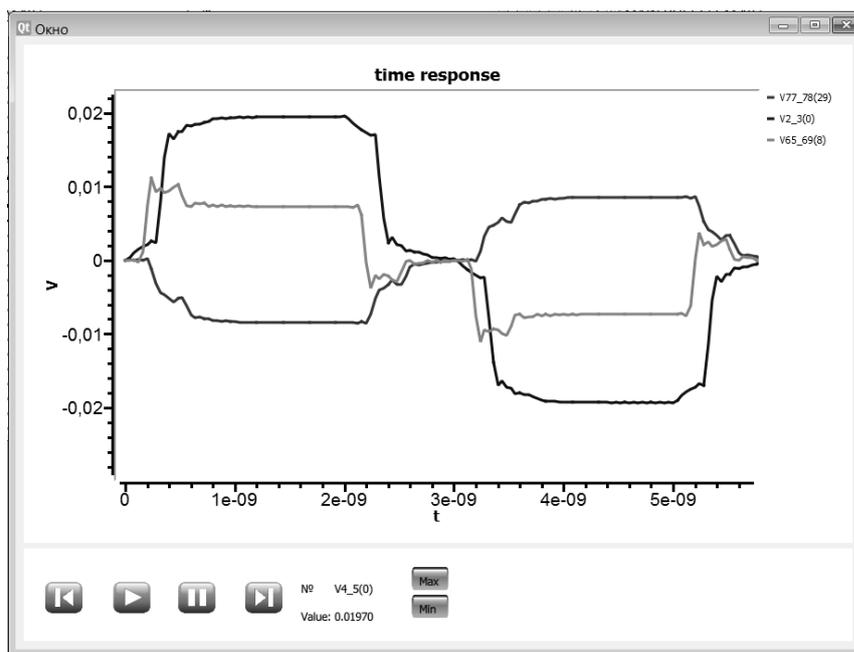


Рисунок 4.17 – Формы сигнала в пассивной линии

4.4. Тестирование выявления и локализации пиковых значений напряжения

4.4.1. Тестовые схемы из одиночных отрезков линий передачи

Для отображения максимумов или минимумов амплитуд форм напряжений и токов необходимо нажать соответствующую кнопку в меню динамической визуализации. В результате отобразится форма сигнала с наибольшей или наименьшей амплитудой, а также его местоположение на принципиальной схеме. Сначала работа алгоритма проверялась на структурах, изображенных на рисунке 4.10. Пиковые значения сигнала, превышающие значения в узлах, были обнаружены только для второй структуры (рисунок 4.10 б). Принципиальная схема с локализованным (указан на ней стрелкой) максимумом напряжения и формы сигнала изображены на рисунке 4.18, а с минимумом – на рисунке 4.19.

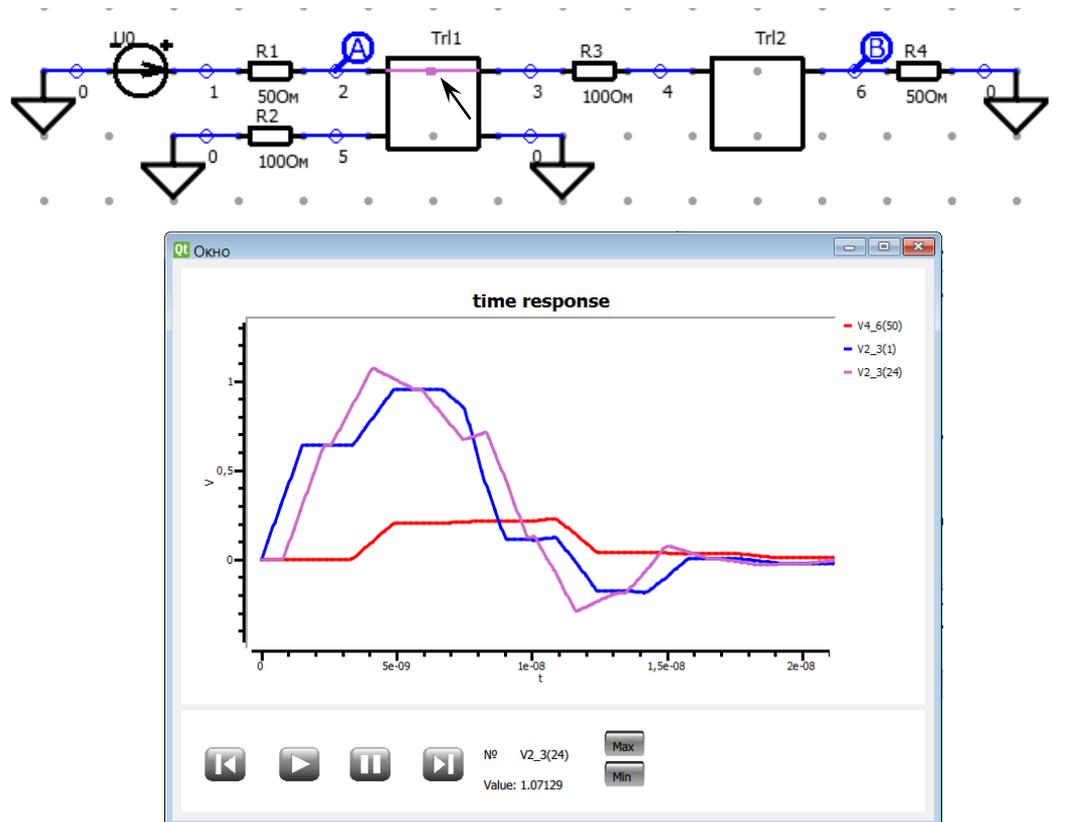


Рисунок 4.18 – Принципиальная схема с локализованным максимумом напряжения (сверху) и формы сигнала (внизу) для структуры из рисунка 4.10 б

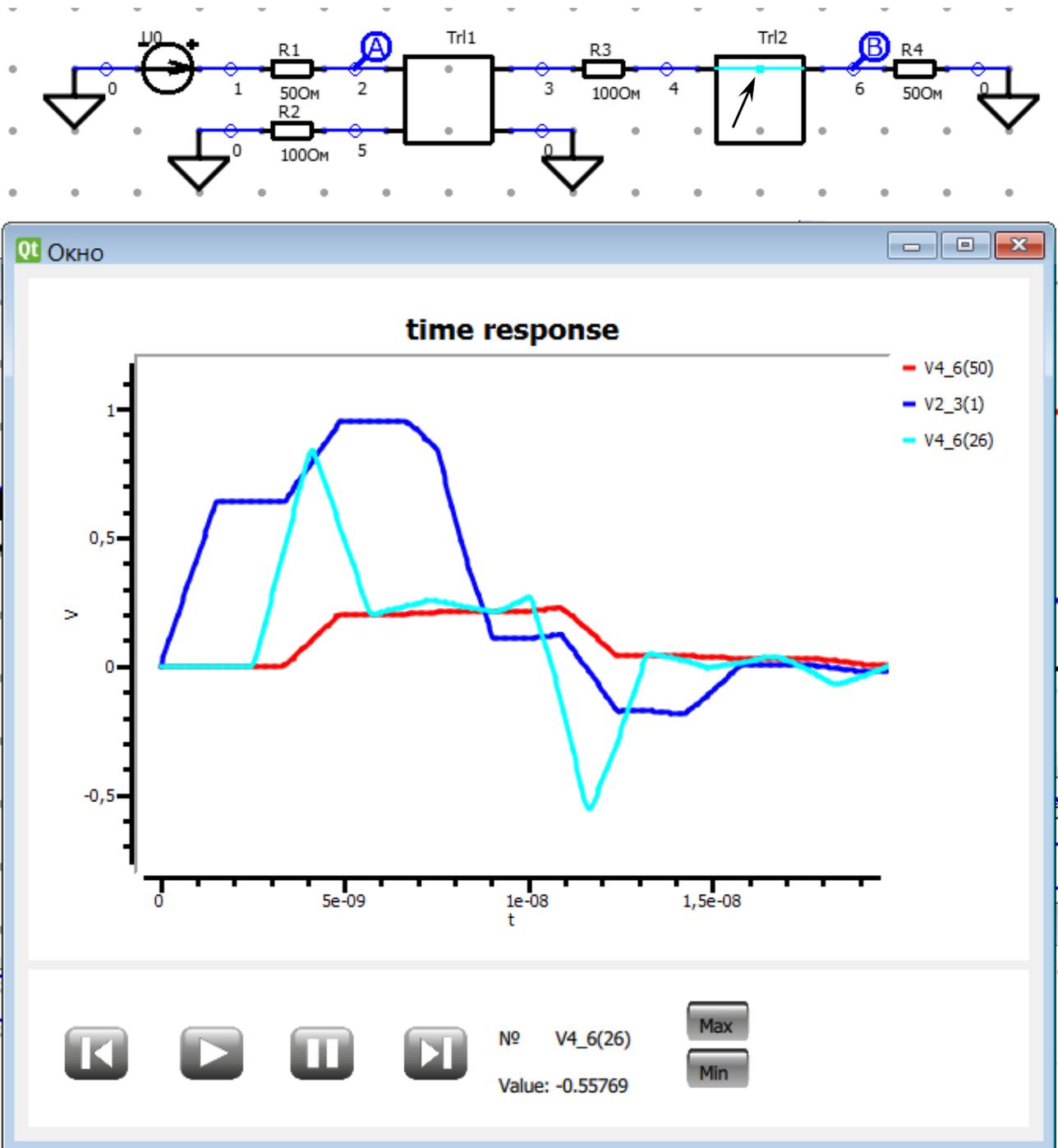


Рисунок 4.19 – Принципиальная схема с локализованным минимумом напряжения (сверху) и формы сигнала (внизу) для структуры из рисунка 4.10 б

4.4.2. Меандровая линия из двух витков

Затем в качестве тестовой схемы взята микрополосковая меандровая линия из двух витков, включенная в тракт 50 Ом ($R_1, R_2 = 50$ Ом), с длиной полувитков по 27 мм. Ширина проводника – 0,542 мм, толщина проводника – 0,1 мм, ширина

диэлектрика – 5,149 мм, толщина диэлектрика – 0,3 мм, расстояние между проводниками – 0,217 мм. В качестве воздействия использован СКИ в форме трапеции (время нарастания, вершины и спада по 0,1 нс) с амплитудой 1 В. На рисунке 4.20 представлена локализация (стрелка указывает на локализованные максимум и минимум), а на рисунке 4.21 приведены формы сигнала с максимумом и минимумом напряжений.

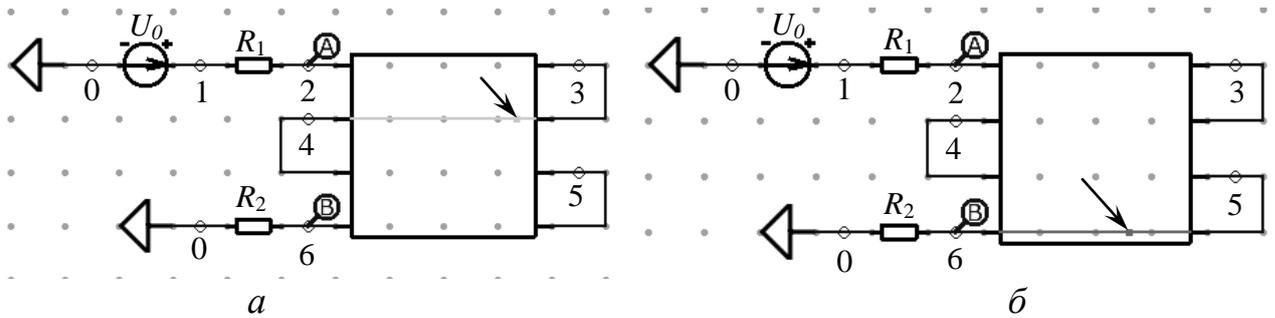


Рисунок 4.20 – Локализация максимума (а) и минимума (б) напряжений

В окне динамической визуализации отображается значение локализованного максимума или минимума, а также номер сегмента (надпись «V3_4(45)» означает, что точка находится в сегменте 45 между узлами 3 и 4).

Вычислено по 50 форм напряжений вдоль каждого полувитка меандровой линии, 6 из которых (через каждый полувиток) показаны на рисунке 4.22. Видно, что форма сигнала существенно искажается перекрестными наводками в полувитках линии. Максимальное напряжение равно 0,57 В (график 3_4(46)), что в 1,14 раза больше максимального напряжения в узле 2. Это локализованный максимум: он находится в 46-м сегменте (указан стрелкой) второго проводника отрезка линии (между узлами 3 и 4). Обращают на себя внимание и значительные отрицательные выбросы на сигналах.

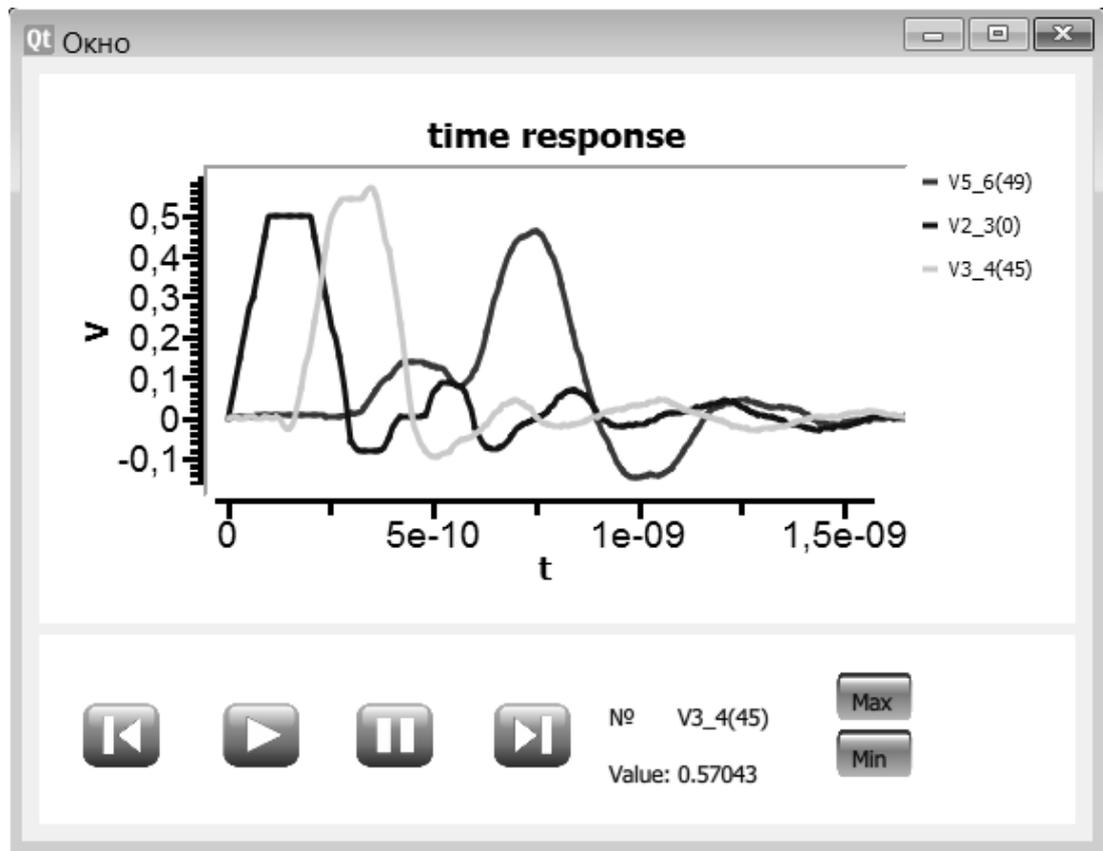
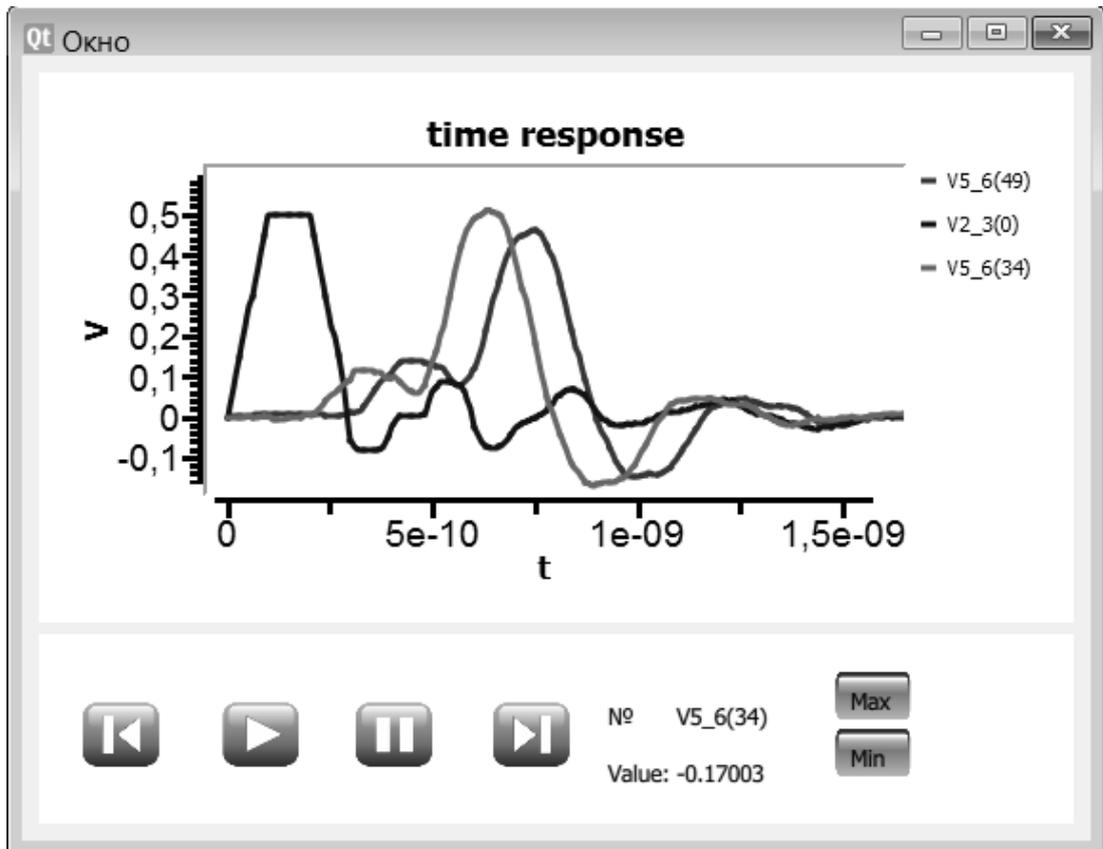
*a**б*

Рисунок 4.21 – Формы сигнала с максимумом (*a*) и минимумом (*б*) напряжений

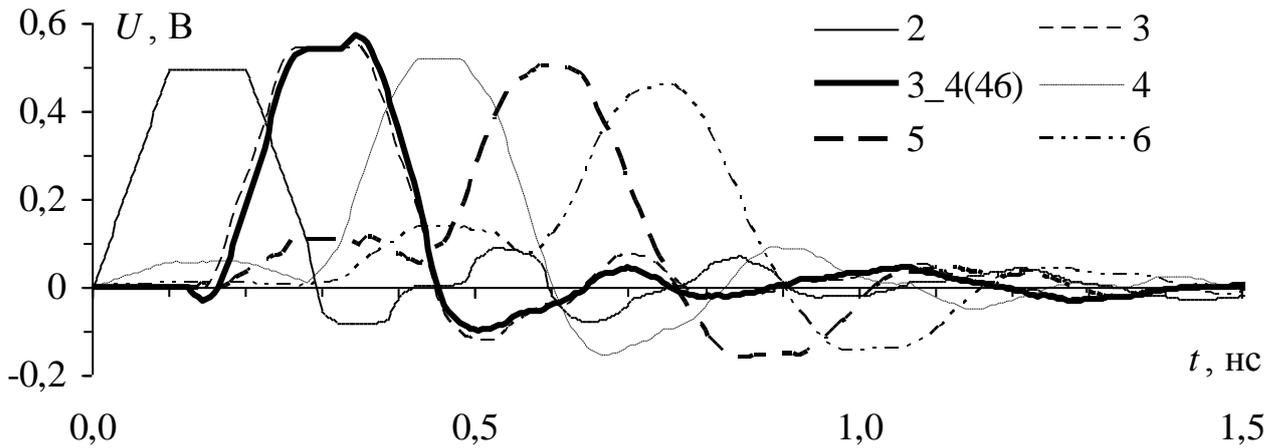


Рисунок 4.22 – Формы напряжений вдоль меандровой линии

4.4.3. Меандровая линия из одного витка

4.4.3.1. Изменение расстояния между проводниками

Для прояснения характера изменения форм напряжения рассмотрена упрощенная структура – микрополосковая меандровая линия из одного витка (С-секция), включенная в тракт 50 Ом, с длиной полувитков по 27 мм (рисунок 4.23).

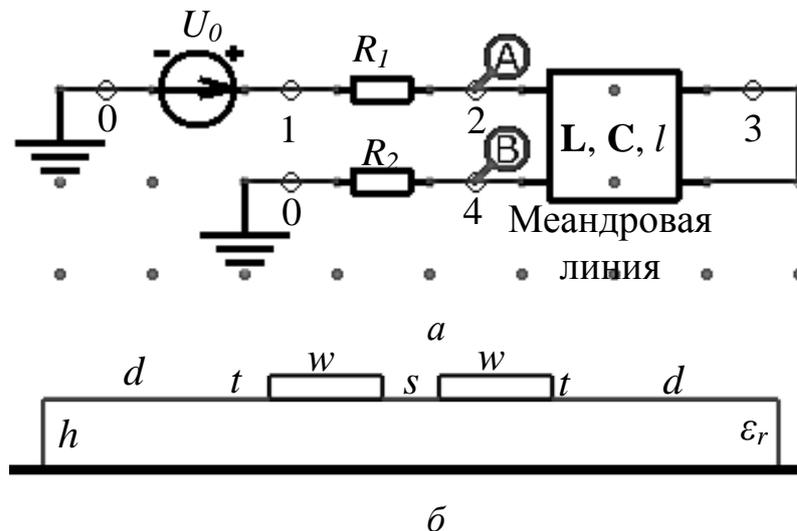


Рисунок 4.23 – Схема включения (а) и поперечное сечение (б) витка меандровой линии

При такой длине выбранный в качестве воздействия СКИ, в форме трапеции амплитудой 1 В с длительностью фронта, вершины и спада по 0,1 нс, полностью

разлагается на два импульса [34]. Ширина проводника (w) – 0,489 мм, толщина проводника (t) – 0,1 мм, толщина диэлектрика (h) – 0,3 мм, $d = 2*w$, диэлектрическая проницаемость (ϵ_r) – 4. Для исследования особенностей возникновения максимумов амплитуд усиливалась взаимная связь между проводниками с помощью уменьшения расстояния между ними. Моделирование специально выполнено без учета потерь, чтобы они не ослабляли влияние факторов, увеличивающих амплитуду сигнала. Каждый полувиток меандровой линии передачи разделен на 50 сегментов, в каждом из которых вычислены формы напряжений.

Выполнены вычисления для 22-х значений расстояния между полувитками (s уменьшалось с 0,4 мм до 1 мкм), но приведены результаты только для 6-и вычислений с наиболее различными результатами (рисунок 4.24).

Рассмотрим изменение форм сигнала на выходе линии (узел 4) из рисунка 4.24. Первый положительный импульс является ближней перекрестной помехой. Его амплитуда увеличивается до 0,26 В. Амплитуда второго положительного импульса уменьшается в 2 раза (с 0,5 В до 0,24 В). Примечательно, что при $s = 1$ мкм амплитуда помехи больше, чем основного импульса.

Рассмотрим изменение форм сигнала на входе линии (узел 2) из рисунка 4.24. Амплитуда его первого положительного импульса уменьшается в 1,5 раза (с 0,5 В до 0,33 В). Амплитуда второго положительного импульса наоборот – сначала увеличивается приблизительно в 5 раз (с 0,06 В до 0,32 В). При $s = 8$ мкм она равна 0,32 В, однако при s менее 8 мкм, амплитуда идет на спад (до 0,29 В). Абсолютное значение амплитуды первого отрицательного импульса, подобно второму положительному импульсу, сначала увеличивается в 2 раза (с минус 0,06 В до минус 0,13 В), а после $s = 8$ мкм уменьшается почти в 4 раза (до минус 0,034 В).

Рассмотрим изменение форм сигнала с максимальными амплитудами. Амплитуды меняются незначительно: сначала постепенно увеличиваются с 0,578 В до 0,633 В (при $s = 10$ мкм), а затем уменьшаются до 0,6 В. Тем не

менее, при последнем вычислении (рисунок 4.24 *e*) амплитуда локализованного максимума превышает амплитуду входного сигнала в 2 раза.

Геометрические параметры, максимальные значения амплитуд вычисленных напряжений, номер сегмента, в котором локализован максимум, среднее геометрическое волновых сопротивлений четной и нечетной мод приведены в таблице 4.2. Все локализованные максимумы находятся во втором полувитке меандровой линии – между узлами 3 и 4 (рисунок 4.23 *a*). Интересен и тот факт, что при увеличении взаимной связи между полувитками, локализованные максимумы смещаются ближе к центру полувитка.

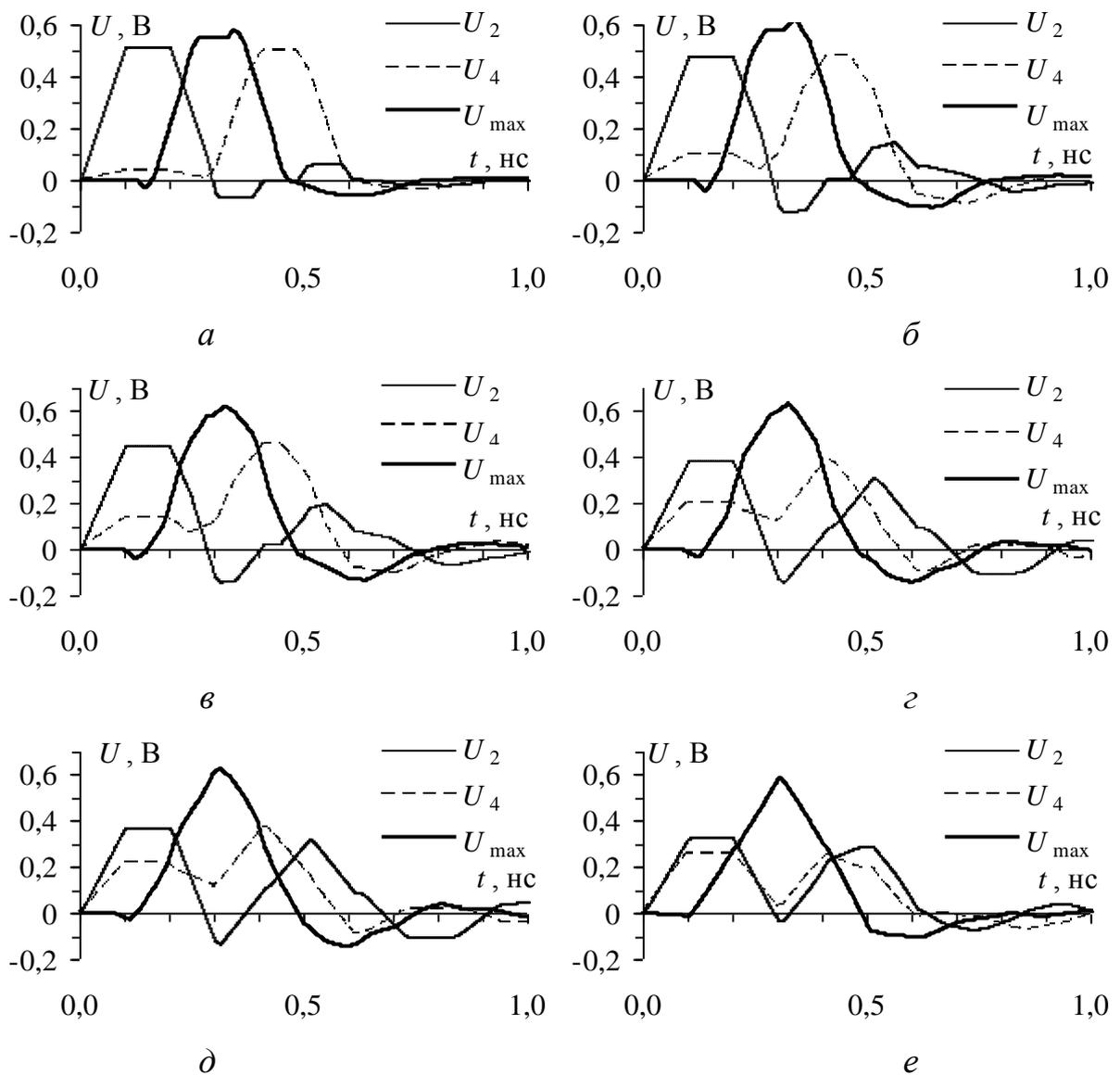
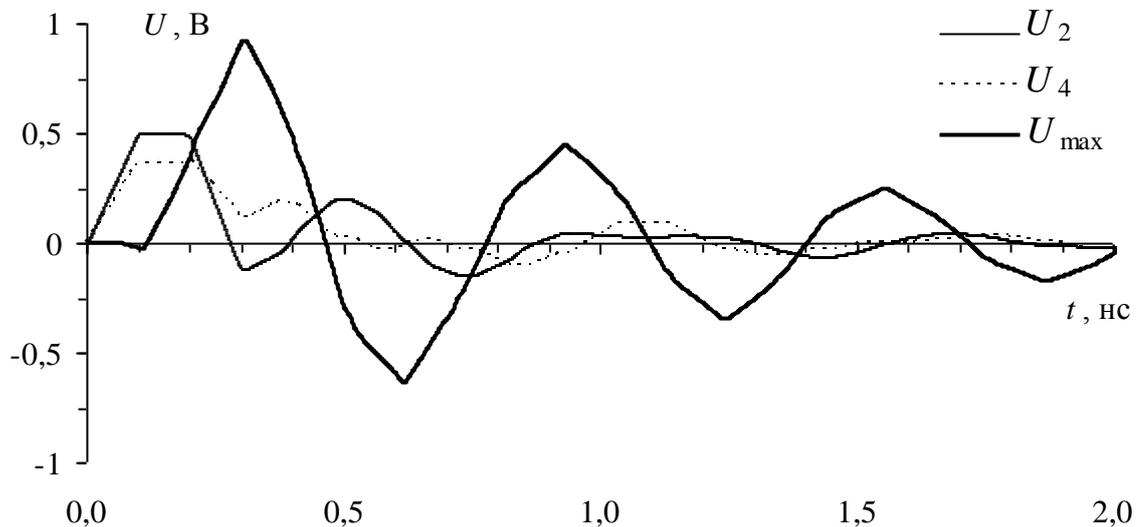


Рисунок 4.24 – Формы сигнала при $s = 400$ (*a*), 80 (*б*), 40 (*в*), 10 (*г*), 8 (*д*), 1 (*е*) мкм

Таблица 4.2 – Параметры вычислений

Рисунок 4.24	s , мкм	U_{\max} , В	№ сегмента	$(Z_e Z_o)^{0,5}$, Ом
<i>a</i>	400	0,57781	47	52,9
<i>б</i>	80	0,62047	45	45,2
<i>в</i>	40	0,62720	44	39,9
<i>г</i>	10	0,63330	41	27,8
<i>д</i>	8	0,63295	40	25,8
<i>e</i>	1	0,60119	37	11,1

Значение среднего геометрического значения волновых сопротивлений четной и нечетной мод снижается с 52 Ом до 11 Ом. Целесообразно проверить, как его выравнивание с нагрузками повлияет на сигналы. Формы сигнала для $s = 1$ мкм при $R_1 = R_2 = 11,1$ Ом приведены на рисунке 4.25.

Рисунок 4.25 – Формы сигнала при 1 мкм, $R_1=R_2=11,1$ Ом

На входе линии первый импульс имеет амплитуду 0,5 В, т.е. половину ЭДС, что соответствует согласованию. Локализованный максимум сместился на два сегмента относительно случая из рисунка 4.24 *e*, в сегмент 35 полувитка между узлами 3 и 4. Его амплитуда увеличилась до 0,92245 В. В данном сегменте наблюдаются затухающие колебания сигнала. На выходе линии наблюдается сильное ослабление сигнала, причем амплитуда перекрестной помехи (0,38 В) значительно превышает амплитуду основного импульса (0,19 В). Таким образом, при согласовании линии сохраняется превышение амплитуды локализованного максимума над амплитудой сигнала на входе витка меандра.

4.4.3.2. Изменение длины проводников

В качестве исследуемой линии взята эта же микрополосковая меандровая линия. Все геометрические параметры линии остались прежними, ширина зазора между проводниками стала фиксированной ($s = w/2 = 0,2445$ мм), воздействие то же. Каждый полувиток меандровой линии передачи разделен на 50 сегментов, в каждом из которых вычислены формы напряжений.

Выполнены вычисления для 20 разных длин полувитков (значение l увеличивалось с 0,027 м до 0,7 м), но приведены результаты только для вычислений, которые более различны (рисунок 4.26). В таблице 4.3 указаны длины проводников, значения максимумов амплитуд напряжений, а также номера сегментов, в которых они локализованы, и узлов, между которыми находятся эти сегменты.

Рассмотрим изменение формы сигнала на выходе линии (узел 4) из рисунка 4.26. Амплитуда первого положительного импульса (ближней перекрестной помехи) не изменяется. Амплитуда второго положительного импульса уменьшается с 0,5 до 0,25 В, причем сам импульс раскладывается на два импульса с одинаковой амплитудой (рисунок 4.26 *д, е*), равной половине амплитуды на входе. Время их прихода к выходу С-секции равно двойной длине отрезка, умноженной на погонную задержку нечетной и четной мод соответственно.

Рассмотрим изменение формы сигнала на входе линии (узел 2) из рисунка 4.26. Амплитуда его первого положительного импульса не изменяется. Абсолютные значения амплитуд отрицательного и второго положительного импульсов увеличиваются с 0,08 до 0,25 В.

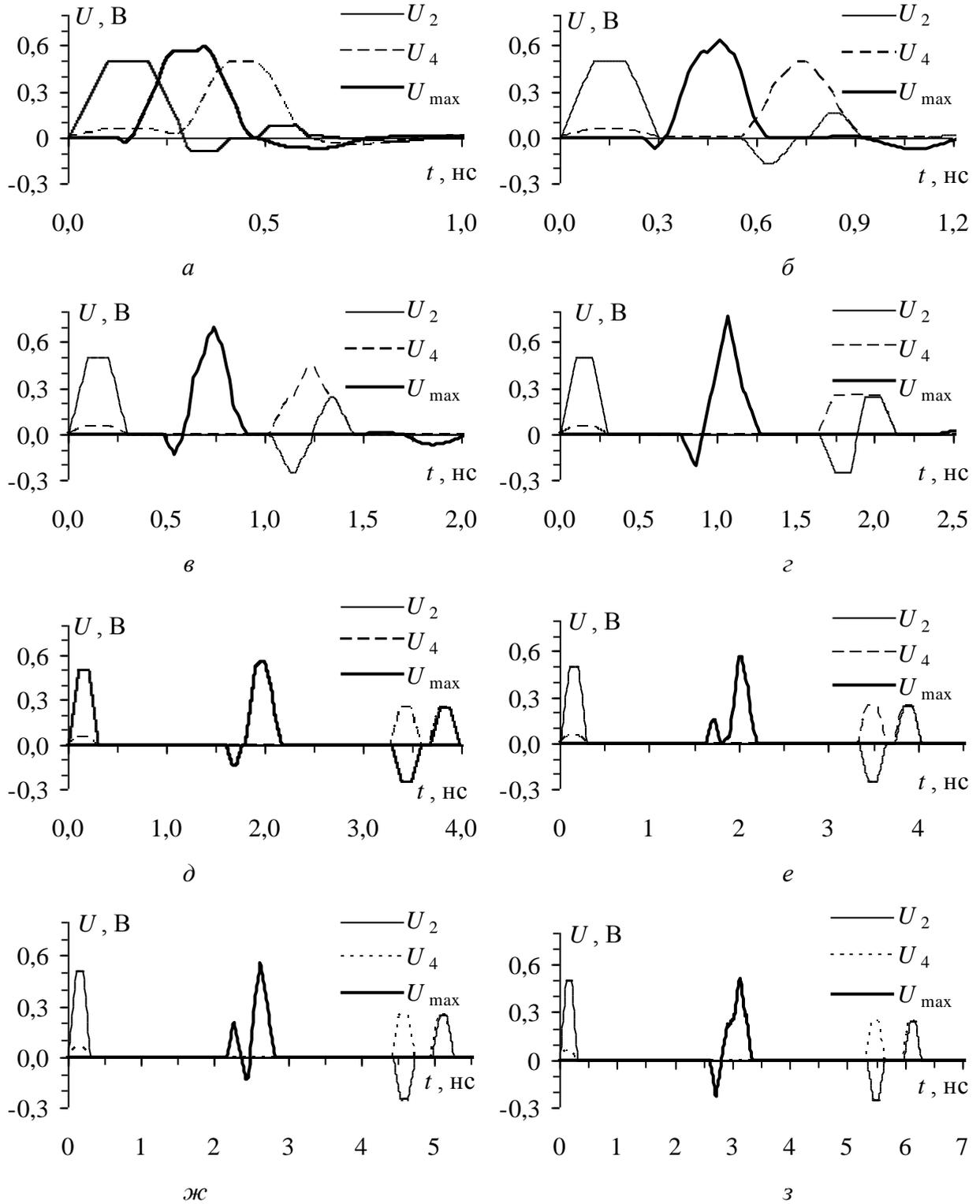


Рисунок 4.26 – Формы сигнала при $l = 0,027$ (*a*), $0,54$ (*б*), $0,1$ (*в*), $0,16$ (*г*), $0,36$ (*д*), $0,52$ (*е*) м

Рассмотрим изменение формы сигнала с максимальными амплитудами. Амплитуда положительного импульса изменяется неравномерно. Так, при увеличении l с $0,027$ до $0,16$ м, она увеличивается с $0,595$ до $0,765$ В (при $l = 0,16$ м наблюдается наибольшее значение для всех вычислений,

рисунок 4.26 *з*). При увеличении l до 0,52 м амплитуда снижается до 0,514 В, а при $l > 0,52$ м максимум не наблюдается, наибольшее значение амплитуды сигнала будет на входе линии. Отрицательный импульс имеет наибольшее абсолютное значение (0,25 В) при $l = 0,16$ м, но при $l = 0,325$ м практически полностью отсутствует. Местоположение максимума относительно одного проводника изменяется незначительно (на 2 сегмента), однако для $l = 0,325; 0,432$ м максимум локализован в первом проводнике (между узлами 2 и 3) рисунок 4.23 *а*. Во всех остальных случаях он локализован во втором проводнике.

Таблица 4.3 – Результаты вычислений

Рисунок 4.26	l , м	U_{\max} , В	№ сегмента	№ узлов
<i>а</i>	0,027	0,595	47	3, 4
<i>б</i>	0,054	0,631	46	3, 4
<i>в</i>	0,100	0,693	47	3, 4
<i>г</i>	0,160	0,765	47	3, 4
<i>д</i>	0,320	0,560	49	3, 4
<i>е</i>	0,325	0,561	49	2, 3
<i>ж</i>	0,432	0,560	49	2, 3
<i>и</i>	0,520	0,514	49	3, 4

Проведенное исследование проясняет причину появления максимумов напряжения. Сигнал в любой точке является суммой падающих и отраженных волн четной и нечетной мод. Максимум появляется, когда основной сигнал, не успев разложиться, встречается с отраженной волной, в результате чего импульсы суммируются, и появляется превышение напряжения. Таким образом, в результате исследования выявлены зависимости форм напряжений вдоль каждого проводника отрезка МПЛП и локализованных максимумов напряжений от расстояния между полувитками микрополосковой меандровой линии.

4.4.4. Сравнение результатов квазистатического и электродинамического моделирования

Для верификации квазистатического моделирования из п. 4.4.2 выполнено электродинамическое моделирование при прочих равных условиях. Сравнение форм напряжений в точке локализованного максимума показывает хорошее согласование основной формы импульса. Более ранний приход сигнала, полученного с помощью квазистатического моделирования, вызван неучетом задержки в перемычке, соединяющей первый и второй полувитки. Для более точного учета реальной структуры проведено еще одно квазистатическое моделирование со схемой, в которой вместо трёх перемычек между полувитками включены соответствующие отрезки одиночной линии с такими же параметрами, как у меандровой, таким образом, принципиальная схема меандровой линии приобрела вид, изображенный на рисунке 4.27.

Вычисленные формы напряжений показаны на рисунке 4.28. Как видно, основные формы импульса практически полностью совпадают. Кроме того, улучшилось совпадение и последующих импульсов: отрицательной и положительной полярностей. Сравнение результатов вычислений, представленных на рисунке 4.28, приведено в таблице 4.4. За эталонные принимались значения, полученные электродинамикой.

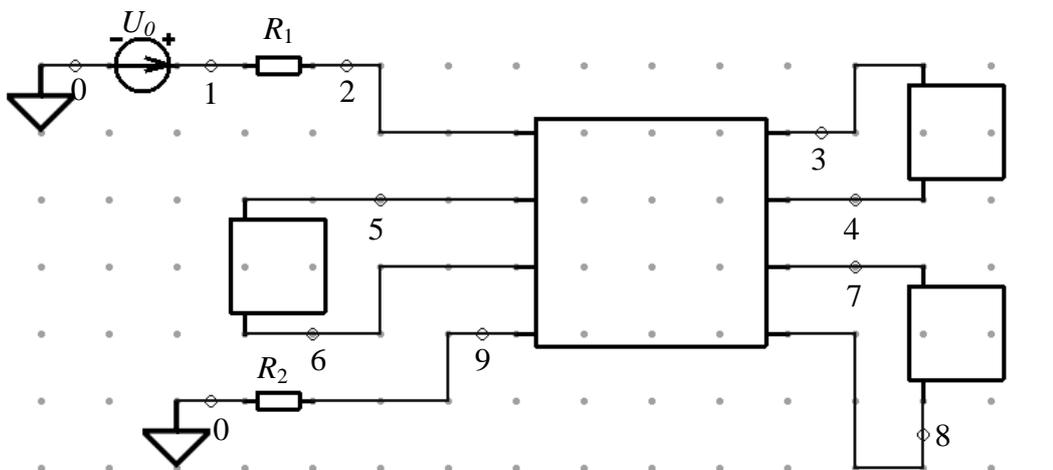


Рисунок 4.27 – Принципиальная схема двухвитковой меандровой линии с учетом задержки в перемычках

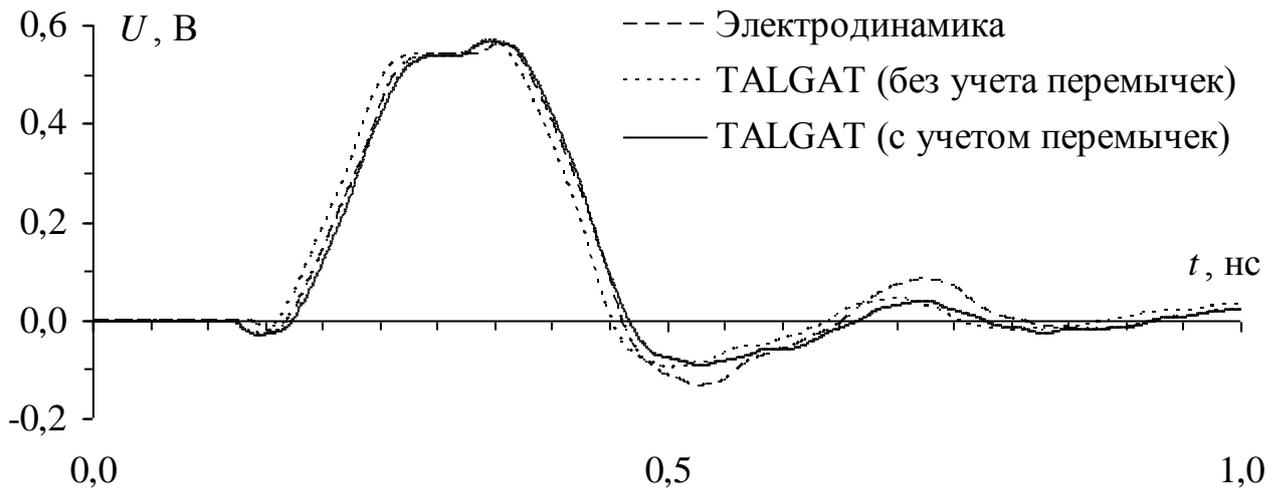


Рисунок 4.28 – Сравнение форм напряжений, вычисленных электродинамикой и квазистатикой

Таблица 4.4 – Сравнение результатов

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

Как видно из таблицы 4.4, расхождение результатов по амплитудам составляет менее 1,5 %, а по времени прихода сигнала менее 12 %. Относительно большая разница во времени вызвана разностью подходов и методов моделирования, однако, задержки по уровню 0,5 различаются не более 1 %. Кроме того, рассчитано среднеквадратическое отклонение разности амплитуд. При сравнении электродинамики и TALGAT (без учета перемычек) это значение равно 0,031 В. Во втором случае – для электродинамики и TALGAT (с учетом перемычек) получено значение среднеквадратического отклонения 0,019 В.

Для верификации квазистатического моделирования из п. 4.4.3 выполнено электродинамическое моделирование при прочих равных условиях без согласования линии (рисунок 4.29) и с согласованием (рисунок 4.30).

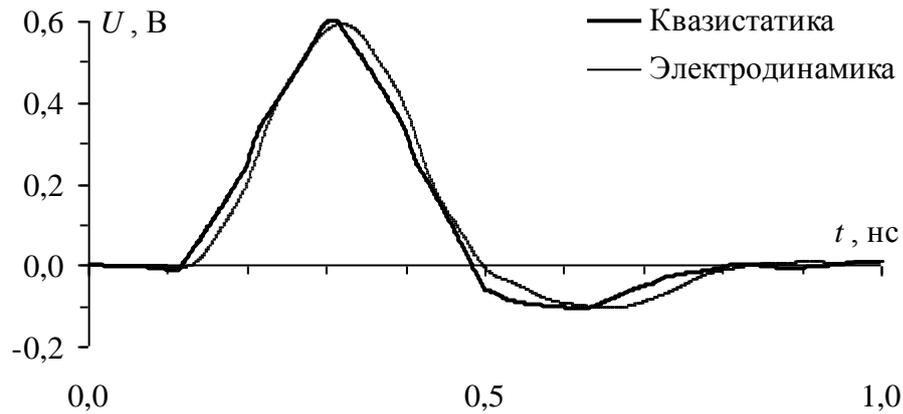


Рисунок 4.29 – Сравнение результатов моделирования для рисунка 4.24 e

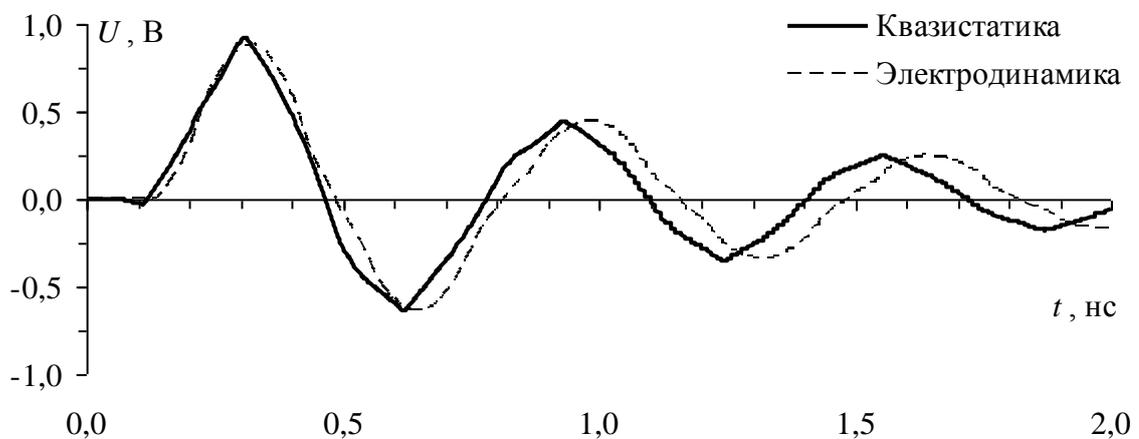


Рисунок 4.30 – Сравнение результатов моделирования для рисунка 4.25

Сравнение результатов вычислений, представленных на рисунке 4.29, приведено в таблице 4.5, а рисунке 4.30 – в таблице 4.6. За эталонные принимались значения, полученные электродинамикой. Как видно из таблицы 4.5, расхождение результатов по амплитудам составляет 1,01%, а по времени прихода сигнала 14,48%, среднеквадратическое отклонение между разностью амплитуд равно 0,027 В. В согласованном случае (рисунок 4.30), расхождение по амплитудам – 1,54%, а по времени прихода – 14,18%, среднеквадратическое отклонение между разностью амплитуд равно 0,126 В. Также следует обратить внимание на время, затраченное на вычисление. Такое колоссальное отличие вызвано, прежде всего, разностью подходов к электродинамическому и квазистатическому моделированию.

Таким образом, вычисление отклика другим подходом, доказывает наличие экстремумов напряжения вдоль проводников отрезка линии передачи, а значит и

достоверность разработанной методики выявления и локализации экстремумов сигнала в МПЛП.

Таблица 4.5 – Сравнение результатов для рисунка 4.29

Вид анализа	Амплитуда сигнала, В	Отличие по амплитуде, %	Задержка сигнала, нс	Отличие по задержке, %	Время вычисления, с
Электро-динамический	0,595	0	0,145	0	840
Квази-статический	0,601	1,01	0,124	14,48	0,45

Таблица 4.6 – Сравнение результатов для рисунка 4.30

Вид анализа	Амплитуда сигнала, В	Отличие по амплитуде, %	Задержка сигнала, нс	Отличие по задержке, %	Время вычисления, с
Электро-динамический	0,908	0	0,141	0	886
Квази-статический	0,922	1,54	0,121	14,18	0,48

Кроме того, для сравнения результатов вычислений применен критерий Пирсона. В таблице 4.7 показаны значения экстремумов напряжения, вычисленных для десяти разных случаев, отличающихся геометрическими параметрами исследуемых структур. В частности, использованы С-секция и двухвитковая меандровая линия, а также изменялись длины их проводников и расстояния между ними.

Полученное критическое значение равно 0,01. Значение «Chi квадрат» = 0,00039. Для доказательства корректности вычислений необходимо условие, при котором «Chi квадрат» будет меньше критического значения. В приведенном примере это условие достигнуто, таким образом, вычисления корректны.

Таблица 4.7 – Сравнение результатов вычислений с помощью критерия Пирсона

	Анализ	
	Электродинамический	Квазистатический
Амплитуда, В	0,562	0,570
	0,595	0,601
	0,908	0,922
	0,761	0,748
	0,909	0,920
	0,601	0,609
	0,489	0,499
	0,780	0,795
	0,985	0,999
	0,523	0,536

4.5. Использование результатов исследования

4.5.1. Результаты интеллектуальной деятельности

4.5.1.1. Вычисление напряжений и токов вдоль двухпроводной линии передачи на основе квазистатического анализа

Получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2015615880. Дата поступления 02 апреля 2015 г. Заявка №2015612556. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 26 мая 2015 г. Программа предназначена для вычисления токов и напряжений вдоль отрезка многопроводной линии передачи. Она позволяет задавать параметры цепи (количество и характеристики активных и реактивных компонентов), в которой находится линия передачи, длину отрезка, вдоль которого вычисляются токи и напряжения и рассчитывать значения токов и напряжений, как во временной, так и в частотной области.

4.5.1.2. Квазистатический анализ воздействия электростатического разряда на печатную плату

Получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2018619671. Дата поступления 18 июня 2018 г. Заявка №2018616368. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 09 августа 2018 г. Программа для ЭВМ «Квазистатический анализ воздействия электростатического разряда на печатную плату» предназначена для вычисления форм напряжений в любой точке вдоль проводников шины тестовой печатной платы (ПП) при воздействии на нее электростатическим разрядом.

Функциями программы являются:

1. Вычисление отклика в каждом сегменте каждого проводника каждого отрезка шины ПП.

2. Графическое отображение вычисленных форм напряжений с динамической визуализацией.

3. Выявление и локализация экстремумов напряжения вдоль проводников шины ПП.

4. Сохранение результатов в текстовый документ.

Работа выполнена в рамках соглашения № 14.574.21.0172 от 26.09.2017.

4.5.1.3. TALGAT 2012

Программа TALGAT 2012 – программный комплекс, включающий: ядро системы, вычислительные модули двумерных и трехмерных конфигураций, трехмерных проводных структур, вычисления отклика, модуль импорта печатных плат, модуль оптимизации эволюционными алгоритмами (генетические алгоритмы, эволюционные стратегии), программу управления системой из командной строки, программу управления системой с помощью графического интерфейса пользователя с поддержкой графики OpenGL и VTK, модуль матричных операций и другие модули. Особенности системы TALGAT 2012:

оригинальный набор команд скриптового языка; объектно-ориентированное реентерабельное ядро; выполнение двух- и трехмерного электростатического и трехмерного электродинамического анализа в одной среде и обработки результатов в совокупности.

4.5.1.4. TALGAT 2013

Помимо перечисленного в разделе 4.5.1.3 программный комплекс TALGAT 2013 имеет следующие особенности: реализация итерационных методов; вычисление отклика произвольных схем многопроводных линий передачи; структурно-параметрическая оптимизация любых параметров структур эволюционными алгоритмами, совместимая со всеми моделями анализа; возможность использования в качестве значения функции качества любых вычисляемых системой характеристик структур, а также одновременной оптимизации нескольких структур.

4.5.1.5. TALGAT 2014

Помимо перечисленного в разделе 4.5.1.4 программный комплекс TALGAT 2014 имеет следующие особенности: оригинальный набор команд скриптового языка; объектно-ориентированное реентерабельное ядро; выполнение двух- и трехмерного электростатического и трехмерного электродинамического анализа в одной среде и обработки результатов в совокупности; модульная архитектура; динамическое переключение реализации матричных операций; возможность расширения пользователем графического интерфейса посредством динамических диалогов.

4.5.1.6. TALGAT 2015

Помимо перечисленного в разделе 4.5.1.3 программный комплекс TALGAT 2015 имеет следующие особенности: оригинальный набор команд скриптового языка совмещен с использованием языка python; динамическая визуализация токов, графические средства создания конфигураций и принципиальных схем, импорт конфигураций из наиболее популярных САПР.

4.5.1.7. TALGAT 2016

Помимо перечисленного в разделе 4.5.1.6 программный комплекс TALGAT 2016 имеет следующие особенности: для оригинального набора команд скриптового языка, совмещенного с использованием языка python, добавлена возможность их автоматического преобразования; возможность подключения требуемых модулей; синтез моделей; вычисление матрицы СЛАУ с помощью CUDA; функции LU-разложения разреженных матриц; алгоритм перенумерации.

4.5.1.8. TALGAT 2017

Программный комплекс TALGAT 2017 предназначен для моделирования задач ЭМС.

Функциями программы являются:

1. Двумерный и трехмерный электростатический анализ.
2. Трехмерный электродинамический анализ.
3. Вычисление отклика произвольных схем многопроводных линий передачи.
4. Импорт печатных плат.
5. Структурно-параметрическая оптимизация любых параметров структур эволюционными алгоритмами (генетическими алгоритмами и эволюционными стратегиями).

6. Динамическая визуализация токов и напряжений.
7. Синтез моделей.
8. Вычисление матрицы СЛАУ с помощью технологии CUDA.
9. LU-разложение разреженных матриц.
10. Перенумерация больших матриц с помощью оригинального алгоритма.

4.5.2. ОКР по теме «УЭМ ТУСУР»

Результаты квазистатического моделирования двухвитковой меандровой линии представлены в технических отчетах по ОКР «Разработка комплекса программных и технических средств для контроля информационных магистралей, обеспечения электромагнитной совместимости и исследования надёжности унифицированного ряда электронных модулей на основе технологии «система-на-кристалле» для систем управления и электропитания космических аппаратов связи, навигации и дистанционного зондирования Земли с длительным сроком активного существования», тема «УЭМ-ТУСУР», хоздоговор 95/10 от 24.11.2010 в рамках реализации Постановления 218 Правительства РФ.

В двухвитковой меандровой линии, включенной в тракт 50 Ом, с расстоянием между проводниками 0,217 мм, их ширине 0,542 мм и длине 27 мм, при воздействии СКИ в форме трапеции (время нарастания, вершины и спада по 0,1 нс) с амплитудой 1 В, выявлен и локализован максимум напряжения, в 1,14 раза превышающий амплитуду сигнала на входе линии.

В микрополосковой С-секции на подложке с $\epsilon_r=4$ толщиной 0,3 мм, включенной в тракт 50 Ом, с длиной проводников 27 мм и их шириной 0,489 мм, выявлены и локализованы экстремумы напряжения при уменьшении зазора между проводниками с 0,4 мм до 1 мкм. В качестве воздействия использован СКИ в форме трапеции (время нарастания, вершины и спада по 0,1 нс) с амплитудой 1 В. Показано, что амплитуды экстремумов меняются незначительно: сначала постепенно увеличиваются с 0,578 В до 0,633 В (при $s=10$ мкм), а затем уменьшаются до 0,6 В. Выявлен и локализован максимум напряжения, в 2 раза

превышающий амплитуду сигнала на входе и выходе линии. Показано, что локализация максимумов не постоянна, а смещается от стыка к центру второго полувитка.

Кроме того, в той же С-секции, выявлены и локализованы экстремумы напряжения при изменении длины ее проводников. В С-секции с шириной зазора 0,2445 мм при изменении длины проводников с 27 мм до 70 см выявлены и локализованы максимумы напряжения, один из которых в 1,5 раза превышает амплитуду сигнала на входе. Показано, что локализация максимума также непостоянна: в большинстве случаев он во втором проводнике, в некоторых – в первом, а при определенной длине максимум не наблюдается.

Это позволило получить новые знания об особенностях распространения СКИ вдоль проводников меандровых линий, чтобы учитывать их при разработке систем управления и электропитания космических аппаратов связи, навигации и дистанционного зондирования Земли с длительным сроком активного существования.

4.5.3. ОКР по теме «САН»

Разработанное программное обеспечение и результаты исследований шины печатной платы системы автономной навигации использованы в ходе выполнения ОКР «Разработка принципов построения и элементов системы автономной навигации с применением отечественной специализированной элементной базы на основе наногетероструктурной технологии для космических аппаратов всех типов орбит», тема «САН», хоздоговор 96/12 от 16.11.2012 в рамках реализации Постановления 218 Правительства РФ. С помощью разработанного комплекса программ удалось получить следующие результаты при моделировании шины ПП РПУ САН:

1. Выявлены и локализованы в активном проводнике максимумы напряжения, в 1,2 и 2,7 раза превышающие амплитуду сигнала на входе при

использовании помехового сигнала с общей длительностью 0,3 нс. Максимумы расположены в непосредственной близости от шины, проходящей слоем ниже.

2. Выявлены значения максимумов напряжения, на 18% и 20% превышающие амплитуду СКИ на входе, а также минимумов, составляющие минус 36% и минус 40% от уровня 0,5 В при использовании трех длительностей СКИ (3; 0,3; 0,03 нс). Кроме того, с помощью оптимизации посредством ГА получена длительность СКИ 0,13 нс, при которой выявлен максимум напряжения в активном проводнике, на 16% превышающий уровень 0,5 В.

3. Выявлено значение максимума перекрестной наводки, составляющее 29% от установившегося уровня 0,5 В, а также наибольшее (по модулю) значение минимума, составляющее 33,4% от уровня 0,5 В при воздействии помехового сигнала с общей длительностью 0,03 нс.

4. Выявлено и локализовано значение экстремума напряжения, на 16% превышающее установившийся уровень в активном проводнике, при общей длительности СКИ 0,13 нс (помеховый сигнал), полученной с помощью оптимизации посредством ГА.

5. Выявлено и локализовано значение максимума напряжения, на 36% превышающее установившийся уровень, а также максимальное значение перекрестной помехи в шине ПП, составляющее 24% от установившегося уровня, при общей длительности СКИ около 1 нс (полезный сигнал), при использовании оптимизации длительности воздействия с помощью ГА.

6. Определены параметры нагрузок на концах проводников, при которых удалось понизить амплитуду помехового сигнала в 30 раз, не ухудшив амплитуды полезного сигнала.

7. Получены пиковое напряжение 471 В в активном проводнике и амплитуды перекрестных наводок в пассивных проводниках в диапазоне 1–32 В при использовании в качестве воздействия на шину ПП РПУ САН электростатического разряда с формой тока, заданной по стандарту IEC 61000-4-2.

Таким образом, указаны критичные места шины ПП РПУ САН, и сформулированы условия, при которых они возникают. Эти результаты переданы в отделы проектирования и испытаний РЭА и конструирования бортовой РЭА АО «ИСС» для их учета и, при необходимости, устранения во время разработки элементов САН с применением отечественной специализированной элементной базы на основе наногетероструктурной технологии для космических аппаратов всех типов орбит.

4.5.4. НИР по государственному заданию №8.1802.2014/К

Оптимизация с помощью ГА использована в НИР «Разработка новых программных и аппаратных средств для моделирования и обеспечения электромагнитной совместимости радиоэлектронной аппаратуры» по проектной части государственного задания в сфере научной деятельности 8.1802.2014/К, 2014–2016 гг.

1. Представлены результаты оптимизации с помощью ГА общей длительности СКИ, а также длительности фронта, вершины и спада по отдельности, по критерию максимизации пикового напряжения в шине ПП. При оптимизации общей длительности (около 0,13 нс) выявлено максимальное значение напряжения, на 16% превышающее установившийся уровень при общей длительности СКИ. При оптимизации длительностей фронта, вершины и спада СКИ выявлено и локализовано значение максимума напряжения, на 36% превышающее установившийся уровень, а также максимальное значение перекрестной помехи в шине ПП, составляющее 24% от установившегося уровня, при общей длительности СКИ около 1 нс для обоих случаев.

2. Представлены результаты оптимизации параметров нагрузок шины ПП с помощью ГА по критерию минимизации пикового напряжения, отличающейся использованием в качестве оптимизируемых параметров 10-и нагрузок на концах проводников шины ПП по критерию минимизации суммы пиковых напряжений в заданных узлах. С помощью оптимизации удалось уменьшить амплитуду сигнала

в активном проводнике в 30 раз, при этом выявленные вдоль проводников максимумы не превышали значений до оптимизации.

Для выполнения вычислительного эксперимента созданы две программы на языке TALGAT-script («Оптимизация с помощью ГА общей длительности СКИ по критерию максимизации пикового напряжения в шине ПП», «Оптимизация параметров нагрузок шины ПП с помощью ГА по критерию минимизации пикового напряжения»). Результаты моделирования позволили разработать новые программные средства для моделирования и обеспечения ЭМС РЭА.

4.5.5. НИР по государственному заданию №8.9562.2017/8.9

Исследования выявления экстремумов сигнала в шине печатной платы и результаты ее оптимизации использованы в НИР «Выявление новых подходов к совершенствованию обеспечения электромагнитной совместимости радиоэлектронной аппаратуры и моделирования систем активного зрения роботов» по базовой части государственного задания Минобрнауки Российской Федерации №8.9562.2017/8.9, ТУСУР, Томск, 2017–2019 гг.

1. При оптимизации длительностей фронта, вершины и спада СКИ (при общей длительности СКИ около 1,5 нс) выявлено максимальное значение напряжения, на 38% превышающее установившийся уровень. Представлено влияние коэффициентов кроссовера и мутации на оптимизацию с помощью ГА длительности СКИ по критерию максимизации пикового напряжения в шине ПП, отличающееся различными комбинациями коэффициентов мутации и кроссовера (коэффициенты мутации – 0,01; 0,03; 0,05; 0,08 при коэффициенте кроссовера – 0,5; коэффициенты кроссовера – 0,1; 0,3; 0,5; 0,8 при коэффициенте мутации – 0,1). Показано влияние коэффициентов мутации и кроссовера на сходимость полученных результатов.

2. Выявлены максимальное значение напряжения, на 20% превышающее амплитуду сигнала на входе, а также максимум перекрестной наводки, составляющий 14% от установившегося уровня в активном проводнике, при

моделировании распространения СКИ в форме трапеции вдоль проводников шины ПП. С помощью ЭС оптимизировалась общая длительность СКИ по критерию максимизации пикового напряжения в шине ПП. ЭС запускалась по 10 раз при разных начальных решениях – 3 нс, 300 пс, 30 пс. Показано, что изменение начального решения в диапазоне, близком к наилучшему решению, не влияет на результат оптимизации.

3. Проведены моделирование распространения СКИ в форме трапеции вдоль проводников шины ПП и оптимизация с помощью ЭС и ГА его длительности, по критерию максимизации пикового напряжения в критической точке шины ПП. ЭС запускалась по 20 раз при начальном решении 300 пс. ГА запускался 10 раз для параметров: число особей – 5, 10; число поколений – 5, 7, 10, 15; коэффициент мутации – 0,1; кроссовера – 0,5. После оптимизации двумя методами выявлены и локализованы максимумы перекрестных наводок, составляющие 32% и 78% от установившегося уровня в активных проводниках. Показано, что ГА справляется с задачей выявления и локализации максимумов перекрестных наводок лучше, чем ЭС.

Представленные результаты позволили выявить новые подходы к совершенствованию обеспечения ЭМС РЭА, с помощью которых выявлены критичные места на ПП РПУ САН.

4.5.6. ПНИ по ФЦП №14.574.21.0172

Разработанная математическая модель и численный метод для выявления и локализации экстремумов сигнала в МПЛП и результаты их использования представлены в отчете о прикладных научных исследованиях (ПНИ) «Теоретические и экспериментальные исследования по синтезу оптимальной сети высоковольтного электропитания для космических аппаратов» (федеральная целевая программа (ФЦП) «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технического комплекса России на 2014–2020 годы», соглашение №14.574.21.0172 от 26.09.2017, 2017–2019 гг.).

Представлено описание разработанной математической модели, основанной на объединении моделей Джорджевича и Накхлы. Показаны блок-схема разработанного алгоритма проведения вычислительного эксперимента, позволяющего выявить и локализовать экстремумы сигнала в МПЛП и включающего алгоритм поиска и определения допустимых путей распространения импульса. Показаны блок-схема разработанного алгоритма определения пути распространения импульса в гальванически связанных проводниках произвольной схемы из отрезков МПЛП, отличающегося автоматическим определением последовательности промежуточных узлов по заданным начальному и конечному узлам. Показаны блок-схема разработанного алгоритма поиска, отличающегося определением максимальных и минимальных значений токов и напряжений во всех подсекциях выбранного пути распространения сигнала, который позволяет выявить и локализовать критичные участки на печатной плате. Представлено описание модификации численного метода на основе квазистатического анализа МПЛП. Показан алгоритм и основные выражения для вычисления значений токов и напряжений вдоль проводников отрезков МПЛП. Предложенная модификация численного метода, позволяет вычислить токи и напряжения в любой точке вдоль проводников отрезков МПЛП. Представленные результаты позволили выполнить патентные исследования и научно-технический отчет по первому этапу выполнения проекта (выбор и обоснование направлений исследования).

4.5.7. НИР по программе УМНИК

Разработанное программное обеспечение использовано в НИР «Разработка программного модуля для динамической визуализации токов и электромагнитного поля печатной платы» по программе УМНИК, грант №3914ГУ1/2014 от 13.11.2014 г. и №10033ГУ2/2015 от 05.04.2016 г.

В отчете представлена структура и реализация программного комплекса, усовершенствованного с помощью изменения типов данных, передаваемых

между модулями, и добавления нового модуля, отличающегося наличием интеграции с библиотекой Qt в сочетании с разработанной математической моделью, алгоритмами и интерактивным интерфейсом пользователя на языке QML. Это позволило выполнить тестирование функциональности программного комплекса, а также исследования с помощью проведения 73 вычислительных экспериментов, отличающихся изменением типов структур, параметров структур и моделирования. Кроме того, реализация вычисления токов вдоль проводников отрезков МПЛП дала возможность дальнейшего развития комплекса программ – создания программного модуля вычисления электромагнитного поля МПЛП.

4.5.8. Учебный процесс НИ ТГУ

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

Полученные в диссертационной работе результаты моделирования распространения импульсных сигналов вдоль проводников, выявления и локализации пиковых значений сигнала в шине ПП РПУ САН, а также использования оптимизации посредством ГА позволили познакомить магистрантов с особенностями анализа и оптимизации при моделировании бортовой РЭА.

4.5.9. Учебный процесс ТУСУРа

Результаты работы использованы в учебном процессе ТУСУР при подготовке магистрантов по программам «Электромагнитная совместимость бортовой радиоэлектронной аппаратуры», «Электромагнитная совместимость в топливно-энергетическом комплексе» и «Защита от электромагнитного

терроризма» по дисциплине «Преднамеренные силовые электромагнитные воздействия» в 2016–2017 гг.

Приведенные в диссертационной работе математическая модель и численный метод, результаты математического моделирования для выявления и локализации экстремумов сигнала в различных полосковых структурах (тестовых схемах, меандровых линиях, шине ПП), а также разработанный программный комплекс использованы в осеннем семестре 2016 г. и 2017 г. в учебном процессе ТУСУРа, а также при подготовке трех выпускных квалификационных работ на кафедре ТУ.

Разработаны методические пособия по лабораторным работам. Проведены лабораторные работы по темам:

1. Знакомство и работа с функциями динамической визуализации и локализации экстремумов сигнала в системе TALGAT.
2. Исследование шины ПП с помощью функций модуля DynaVis системы компьютерного моделирования TALGAT.
3. Исследование шины ПП с помощью амплитудных критериев при различных расположениях источника воздействия.
4. Исследование шины ПП с помощью амплитудных критериев при изменении длительности воздействия.
5. Исследование шины ПП с использованием базы данных СКИ от реальных генераторов.
6. Исследование шины ПП с использованием оптимизации с помощью ГА.

Это позволило расширить компетенции студентов в области моделирования ЭМС РЭА, освоить программный комплекс по выявлению и локализации экстремумов сигнала в МПЛП и получить ряд новых научных результатов, представленных в докладах на научных конференциях 2017 г., в т.ч. индексируемых в системах цитирования Scopus и Web of Science.

4.6. Основные результаты и выводы

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

2. Представлены результаты тестирования возможности выявления и локализации экстремумов напряжений на примере тестовой структуры, а также двухвитковой микрополосковой меандровой линии, отличающегося сравнением результатов квазистатического анализа с электродинамическим. В меандровой линии, включенной в тракт 50 Ом, с расстоянием между проводниками 0,217 мм, их ширине 0,542 мм и длине 27 мм, при воздействии СКИ в форме трапеции (время нарастания, вершины и спада по 0,1 нс) с амплитудой 1 В, выявлен и локализован максимум напряжения, в 1,14 раза превышающий амплитуду сигнала на входе линии.

3. Представлено исследование форм локализованных максимумов в С-секции, отличающееся усилением связи между ее проводниками. Для микрополосковой С-секции на подложке с $\epsilon_r = 4$ толщиной 0,3 мм, включенной в тракт 50 Ом, с длиной проводников 27 мм и их шириной 0,489 мм, с уменьшением зазора между проводниками с 0,4 мм до 1 мкм при воздействии СКИ в форме трапеции (время нарастания, вершины и спада по 0,1 нс) с амплитудой 1 В выявлены и локализованы максимумы напряжения, один из которых в 2 раза превышает амплитуду сигнала на входе и выходе линии. Показано, что локализация максимумов не постоянна, а смещается от стыка к центру второго полувитка.

4. Представлено исследование форм локализованных максимумов в той же С-секции, отличающееся изменением длины ее проводников. В С-секции с шириной зазора 0,2445 мм при изменении длины проводников с 27 мм до 70 см выявлены и локализованы максимумы напряжения, один из которых в 1,5 раза

превышает амплитуду сигнала на входе. Показано, что локализация максимума также непостоянна: в большинстве случаев он во втором проводнике, в некоторых – в первом, а при определенной длине максимум не наблюдается.

5. Описано использование результатов работы.

Таким образом, разработан программный комплекс, позволяющий выполнять квазистатическое моделирование произвольных схем из отрезков МПЛП, вычислять значения токов и напряжений вдоль проводников схемы, а также выявлять и локализовать экстремумы сигнала. Представлено сравнение результатов квазистатического моделирования с электродинамическим. Использование разработанного комплекса программ позволило выявить новые особенности распространения сигнала вдоль проводников двухвитковой меандровой линии и С-секции, выявить критичные места трассировки и усовершенствовать учебный процесс.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполнения работы над кандидатской диссертацией решена научно-техническая задача разработки математической модели, численного метода и комплекса программ для выявления и локализации экстремумов сигнала в многопроводных линиях передачи.

При выполнении диссертации получены следующие результаты:

1. Модифицирован численный метод и получены аналитические выражения и алгоритмы, позволяющие выполнять вычисление форм сигнала вдоль каждого проводника каждого отрезка МПЛП.

2. Разработана математическая модель для выявления и локализации экстремумов сигнала в МПЛП.

3. Разработаны алгоритмы проведения вычислительного эксперимента, определения пути распространения импульса, а также выявления и локализации экстремумов сигнала.

4. Разработан комплекс программ для выявления и локализации экстремумов сигнала.

5. Проведено тестирование корректности вычислений модуля и работоспособности динамической визуализации.

6. Представлено применение реализованного функционала для оценки изменения форм сигнала и перекрестных помех и для локализации экстремумов сигнала.

7. С помощью реализованной функциональности выполнено исследование форм локализованных максимумов в витке меандровой линии при усилении связи между проводниками и при изменении их длины.

8. В результате исследований выявлены и локализованы максимумы напряжений в 1,14 и 2 раза превышающие амплитуду входного импульса в меандровой линии, а также в 1,2 и 2,7 раза превышающие амплитуду входного импульса в шине ПП РПУ САН.

9. В результате исследований выявлены и локализованы экстремумы напряжения, на 18 и 20% превышающие установившийся уровень напряжения в активном проводнике шины ПП РПУ САН.

10. При моделировании воздействия ЭСР на шину ПП РПУ САН получено пиковое напряжение 471 В.

11. В результате исследований выявлены и локализованы максимумы перекрестных наводок, составляющие 29, 33 и 40% от установившегося уровня в активном проводнике.

12. В результате оптимизации с помощью ГА и ЭС выявлены и локализованы экстремумы напряжения, на 16, 20, 36 и 38% превышающие установившийся уровень в активном проводнике.

13. В результате оптимизации с помощью ГА и ЭС выявлены и локализованы максимумы перекрестных наводок, составляющие 14, 24, 32 и 78% от установившегося уровня в активном проводнике.

14. Представлены результаты исследования влияния изменения параметров ГА на выявление и локализацию экстремумов сигнала в шине ПП РПУ САН.

15. С помощью оптимизации параметров нагрузок шины ПП РПУ САН удалось в 30 раз уменьшить амплитуду помехового сигнала в активном проводнике.

Таким образом, цель достигнута: разработана математическая модель, модифицирован численный метод и разработан комплекс программ для выявления и локализации экстремумов сигнала в многопроводных линиях передачи.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

FEM	Finite elements method
FIT	Finite integral method
GO	Geometrical optics
MLFMM	Multilevel fast multipole method
MOM	Method of moments
PO	Physical optics
БПФ	Быстрое преобразование Фурье
ГА	Генетический алгоритм
ИБ	Информационная безопасность
КА	Космический аппарат
ММ	Математическая модель
МПЛП	Многопроводная линия передачи
НИР	Научно-исследовательская работа
ОКР	Опытно-конструкторская работа
ПО	Программное обеспечение
ПП	Печатная плата
РПУ	Радиоприемное устройство
РЭА	Радиоэлектронная аппаратура
САН	Система автономной навигации
САПР	Система автоматизированного проектирования
СКИ	Сверхкороткий импульс
СЛАУ	Система линейных алгебраических уравнений
ТСПИ	Технические средства защиты информации
УИ	Утечка информации
ЦФ	Целевая функция
ЭВМ	Электронно-вычислительная машина
ЭМС	Электромагнитная совместимость
ЭС	Эволюционная стратегия
ЭСР	Электростатический разряд

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Khan Z.A. A novel transmission line structure for high-speed high-density copper interconnects // IEEE Trans. on Components, Packaging and Manufacturing Tech. – June 09, 2016. – Vol. 6. – P. 1077–1086.
2. Roy S. Efficient modeling of power/ground planes using delay-extraction-based transmission lines / S. Roy, A. Dounavis // IEEE Trans. on Components, Packaging and Manufacturing Technology. – April 21, 2011. – Vol. 1. – P. 761–771.
3. Electromagnetic Compatibility Requirements For Space Equipment And Systems, Aerospace Report No. TOR-2005(8583)-1; 8 August 2005.
4. Zhang M.S. Power noise suppression using power-and-ground via pairs in multilayered printed circuit boards / M.S. Zhang, J.F. Mao, Y.L. Long // IEEE Trans. on Components, Packaging and Manufacturing Technology. – 2011. – Vol. 1, No. 3. – P. 374–385.
5. Zhang D.C. Application of a new power distribution scheme for complex printed circuit boards for high-speed signaling / D.C. Zhang, M. Swaminathan, D. Keezer // IEEE Trans. on Components, Packaging and Manufacturing Technology. – June 04, 2015. – Vol. 5. – P. 806–817.
6. The effect of electrical connector degradation on high-frequency signal transmission / R. Ji, J. Gao, G.T. Flowers, G. Xie, Z. Cheng, Q. Jin // IEEE Trans. on Components, Packaging and Manufacturing Technology. – April 17, 2017. – Vol. 7. – P. 1163–1172.
7. Roy S. Macromodeling of multilayered power distribution networks based on multiconductor transmission line approach / S. Roy, A. Dounavis // IEEE Trans. on Components, Packaging and Manufacturing Technology. – February 21, 2013. – Vol. 3. – P. 1047–1056.
8. Shiue G.H. Analysis and design of crosstalk noise reduction for coupled striplines inserted guard trace with an open-stub on time-domain in high-speed digital

- circuits / G.H. Shiue, J.H. Shiu, P.W. Chiu // IEEE Trans. on Components, Packaging and Manufacturing Technology. – September 15, 2011. – Vol. 1. – P. 1573–1582.
9. Chang C.H. Bended differential transmission line using compensation inductance for common-mode noise suppression / C.H. Chang, R.Y. Fang, C.L. Wang // IEEE Trans. on Components, Packaging and Manufacturing Technology. – April 25, 2012. – Vol. 2. – P. 1518–1525.
 10. Reduction of common-mode and differential-mode noises using timing-offset differential signal / C.C. Yeh, B.R. Huang, K.C. Chen, R.Y. Fang, C.L. Wang // IEEE Trans. on Components, Packaging and Manufacturing Technology. – November 25, 2015. – Vol. 5. – P. 1818–1827.
 11. Lin D.B. Using stepped-impedance lines for common-mode noise reduction on bended coupled transmission lines / D.B. Lin, C.P. Huang, H.N. Ke // IEEE Trans. on Components, Packaging and Manufacturing Technology. – March 30, 2016. – Vol. 6. – P. 757–766.
 12. Mandic T. Simple and scalable methodology for equivalent circuit modeling of IC packages / T. Mandic, B.K.J.C. Nauwelaers, A. Baric // IEEE Trans. on Components, Packaging and Manufacturing Technology. – August 16, 2013. – Vol. 4. – P. 303–315.
 13. Tan X. Time-domain analysis of noise coupling between package and PCB power/ground planes based on WLP-FDTD / X. Tan, X.C. Li, J. Mao // IEEE Trans. on Components, Packaging and Manufacturing Technology. – January 10, 2017. – Vol. 7. – P. 269–275.
 14. Исследование функционирования локальной вычислительной сети в условиях воздействия сверхкоротких электромагнитных импульсов / К.Ю. Сахаров [и др.] // Технологии ЭМС. – 2006. – № 3 (18). – С. 36–45.
 15. Беличенко В.П. Сверхширокополосные импульсные радиосистемы / В.П. Беличенко, Ю.И. Буянов, В.И. Кошелев; под общ. ред. В.И. Кошелева. – Новосибирск: Наука, 2015. – 483 с.

16. Quantifying EMI: a methodology for determining and quantifying radiation for practical design guidelines / Y.S. Cao, Y. Wang, L. Jiang, A.E. Ruehli, J. Fan, J.L. Drewniak // *IEEE Transactions on Electromagn. Compat.* – October 2017. – Vol. 59, No. 5. – P. 1424–1431.
17. Черемошенцев С.Ф. Информационная безопасность и электромагнитная совместимость электронных средств при проявлениях электромагнитного терроризма / С.Ф. Черемошенцев, З.М. Гизатуллин // *Инфоком: труды Междунар. Академии связи.* – 2006. – №3. – С. 56–59.
18. Гизатуллин Р.М. Помехоустойчивость и информационная безопасность вычислительной техники при электромагнитных воздействиях по сети электропитания: монография / Р.М. Гизатуллин, З.М. Гизатуллин. – Казань: Изд-во Казан. Гос. техн. ун-та, 2014. – 142 с.
19. Акбашев Б.Б. Концепция защиты специальных технических зданий от внешних электромагнитных воздействий / Б.Б. Акбашев, Н.В. Балюк, Л.Н. Кечиев // *Труды III Всероссийской НТК «Техно-ЭМС 2016»*, Москва 18–20 апреля 2016 / Под ред. А.С. Кривова, Л.Н. Кечиева – М.: Грифон, 2016. ISBN 978-5-98862-277-2 – С. 60–63.
20. Paul C. *Analysis of Multiconductor Transmission Lines.* – Wiley-IEEE Press, 2007. – 821 p.
21. Gizatullin Z.M. Investigation of the Immunity of Computer Equipment to the Power-Line electromagnetic Interference / Z.M. Gizatullin, R.M. Gizatullin // *J. of Communications Tech. and Electronics.* – 2016. – No. 5. – P. 546–550.
22. Paoletti U. On the noise path determination with the noise source modulation technique // *IEEE Trans. on Electromagn. Compat.* – October 2017. – Vol. 59, No. 5. – P. 1400–1407.
23. Zhang M.S. Modeling, analysis, and design for noise suppression using embedded planar capacitors in multilayered printed circuit boards: a review / M.S. Zhang, H.Z. Tan, J.F. Mao // *IEEE Trans. on Components, Packaging and Manufacturing Technology.* – January 10, 2014. – Vol. 4. – P. 882–891.

24. Орлов П.Е. Новая концепция создания интегрированных датчиков для контроля электромагнитной обстановки в бортовой аппаратуре космического аппарата / П.Е. Орлов, Т.Р. Газизов, А.М. Заболоцкий // Авиакосмическое приборостроение. – 2012. – №5. – С. 20–23.
25. Ratio of the worst case noise and the impedance of power distribution network / X. Zhang, Y. Liu, X. Hu, C.K. Cheng // IEEE Trans. on Components, Packaging and Manufacturing Technology. – June 30, 2014. – Vol. 4. – P. 1325–1334.
26. Eliminating false positives in crosstalk noise analysis / Y. Ran, A. Kondratyev, K.H. Tseng, Y. Watanabe, M.M. Sadowska // IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems. – Aug. 29, 2005. – Vol. 24, No. 9. – P. 1406–1419.
27. Electromagnetic-simulation program with integrated circuit emphasis modeling, analysis, and design of 3-D power delivery / Z. Xu, Q. Wu, H. He, J.J.Q. Lu // IEEE Trans. on Components, Packaging and Manufacturing Technology. – February 06, 2013. – Vol. 3. – P. 641–652.
28. Visual modeling in an analysis of multidimensional data / A.A. Zakharova, E.V. Vekhter, A.V. Shklyar, A.J. Pak // IEEE Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics) (Omsk, Russia). – Nov. 14–16, 2017.
29. Parallel simulation of large linear circuits with nonlinear terminations using high-order stable methods / M.A. Farhan, E. Gad, M.S. Nakhla, R. Achar // IEEE Trans. on Components, Packaging and Manufacturing Technology. – June 05, 2014. – Vol. 4. – P. 1201–1211.
30. New method for fast transient simulation of large linear circuits using high-order stable methods / M.A. Farhan, E. Gad, M.S. Nakhla, R. Achar // IEEE Trans. on Components, Packaging and Manufacturing Technology. – January 09, 2013. – Vol. 3. – P. 661–669.
31. Behavioral modeling of IC core power-delivery networks from measured data / S.S. Igor, R. Luca, A.M. Ivan, G.C. Flavio // IEEE Trans. on Components, Packaging and Manufacturing Technology. – Vol. 1. – P. 367–373.

32. On modeling crosstalk faults / S. Kundu, S.T. Zachariah, Y. Chang, C. Tirumurti // IEEE Trans. on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems. – Nov. 21, 2005. – Vol. 24, No.12. – P. 1909–1915.
33. An automated and efficient substrate noise analysis tool / H. Li, C.E. Zemke, G. Manetas, V.I. Okhmatovski, E. Rosenbaum, A.C. Cangellaris // IEEE Trans. on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems. – Feb. 21, 2006. – Vol. 25, No. 3. – P. 454–468.
34. Possibility of Protection Against UWB Pulses Based on a Turn of a Meander Microstrip Line / R.S. Surovtsev, A.V. Nosov, A.M. Zabolotsky, T.R. Gazizov // IEEE Trans. on Electromagn. Compat. – 2017. – Vol. 59, No. 6. – P. 1864–1871.
35. Gazizov A.T. UWB pulse decomposition in simple printed structures / A.T. Gazizov, A.M. Zabolotsky, T.R. Gazizov // IEEE Trans. on Electromagn. Compat. – 2016. – Vol. 58, No. 4. – P. 1136–1142.
36. Huang S. Fast broadband modeling of traces connecting vias in printed circuit boards using broadband green's function method / Sh. Huang, L. Tsang // IEEE Trans. on Components, Packaging and Manufacturing Technology. – May 02, 2017. – Vol. 7. – P. 1343–1355.
37. Tripathi J.N. Efficient modeling of power supply induced jitter in voltage-mode drivers (EMPSIJ) / J.N. Tripathi, R. Achar, R. Malik // IEEE Trans. on Components, Packaging and Manufacturing Technology. – July 03, 2017. – Vol. 7. – P. 1691–1701.
38. A wideband model for on-chip interconnects with different shielding structures / K. Kang, X. Cao, Y. Wu, Z. Gao, Z. Tang, Y. Ban, L. Sun, W.Y. Yin // IEEE Trans. on Components, Packaging and Manufacturing Technology. – August 24, 2017. – Vol. 7. – P. 1702–1712.
39. Robust, stable time-domain methods for solving MPDEs of fast/slow systems / T. Mei, J. Roychowdhury, T.S. Coffey, S.A. Hutchinson, D.M. Day // IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems. – Jan. 24, 2005. – Vol. 24, No. 2. – P. 226–239.

40. CST MICROVAWE STUDIO [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.cst.com/products/CSTMWS>, свободный (дата обращения: 01.03.2016).
41. FEKO [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.feko.info/>, свободный (дата обращения: 01.03.2016).
42. AWR Microwave Office [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.awrcorp.com/products/microwave-office>, свободный (дата обращения: 01.03.2016).
43. ANSYS Workbench Platform [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.ansys.com/Products/Workflow+Technology/ANSYS+Workbench+Platform>, свободный (дата обращения: 01.03.2016).
44. Empire XPU [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.empire.de/>, свободный (дата обращения: 02.03.2016).
45. Газизов Т.Р. Уменьшение искажений электрических сигналов в межсоединениях и влияний преднамеренных силовых электромагнитных воздействий: дис. докт. техн. наук / Т.Р. Газизов. – Томск, 2010. – 357 с.
46. High-fidelity, high-performance computational algorithms for intrasystem electromagnetic interference analysis of IC and electronics / Z. Peng, Y. Shao, H.W. Gao, S. Wang, S. Lin // IEEE Trans. on Components, Packaging and Manufacturing Technology. – January 16, 2017. – Vol. 7. – P. 653–668.
47. Djordjevic A.R. Analysis of time response of lossy multiconductor transmission line networks / A.R. Djordjevic, T.K. Sarkar // IEEE Trans. Microwave Theory Tech. – 1987. – Vol. MTT- 35. – P. 898–908.
48. Achar R. Simulation of high-speed interconnects / R. Achar, M.S. Nakhla // Proc. of the IEEE. – 2001. – Vol. 89, No. 5. – P. 693–728.
49. Заболоцкий А.М. Временной отклик многопроводных линий передачи / А.М. Заболоцкий, Т.Р. Газизов – Томск: Томский государственный университет, 2007. – 152 с.

50. Tesche F.M. Application of multiconductor transmission line network analysis to internal interaction problems / F.M. Tesche, T.K. Liu // *Electromagnetics.* – 1986. – Vol. 6, No. 1. – P. 1–20.
51. Djordjevic A.R. Time–domain response of multiconductor transmission lines / A.R. Djordjevic, T.K. Sarkar, R.F. Harrington // *IEEE Proc.* – 1987. – Vol. 75, No. 6. – P. 743–764.
52. Заболоцкий А.М. Модели, алгоритмы, методики, технологии и устройства для обеспечения электромагнитной совместимости бортовой радиоэлектронной аппаратуры космического аппарата: дис. д-ра техн. наук : 05.12.04, 05.12.07 / Заболоцкий Александр Михайлович. – Томск, 2016. – 359 с.
53. Гилл Ф. Практическая оптимизация / Ф. Гилл, У. Мюррей, М. Райт // пер. с англ. – М.: Мир. – 1985. – С. 509.
54. Mitchell M. When will a genetic algorithm outperform hill climbing / M. Mitchell, J.H. Holland, S. Forrest // *Advances in Neural Information Processing Systems 6* / Eds.: J. D. Cowan, G. Tesauro, J. Alspector. – San-Mateo, Morgan Kaufmann. – 1994. – P. 51–58.
55. Back T. *Evolutionary algorithms in theory and practice* // New-York: Oxford University Press. – 1996. – P. 314.
56. Freisleben B. A genetic local search algorithm for solving symmetric and asymmetric traveling salesman problems / B. Freisleben, P. Merz // *IEEE International Conference on Evolutionary Computation (Nagoya, Japan).* – Nagoya, 1996. – P. 616–621.
57. Mittra R. Application of micro-genetic algorithm (MGA) to a class of electromagnetic analysis and synthesis problems / R. Mittra, S. Chakravarty, J. Yeo // *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium.* – 2002. – Vol. 1. – P. 306–309.
58. Zhang M.S. Signal-integrity optimization for complicated multiple-input multiple-output networks based on data mining of s-parameters / M.S. Zhang,

- H.Z. Tan, J.F. Mao // *IEEE Trans. on Components, Packaging and Manufacturing Technology*. – March 04, 2014. – Vol. 4. – P. 1184–1192.
59. Yegin K. On the design of broad-band loaded wire antennas using the simplified real frequency technique and a genetic algorithm / K. Yegin, A.Q. Martin // *IEEE Antennas and Propagation Magazine*. – 2003. – Vol. 51. – No. 2. – P. 220–228.
60. Газизов Т.Т. Методология, алгоритмы и программное обеспечение для комплексной оптимизации элементов радиоэлектронных устройств : дис. д-ра техн. наук: 05.13.18 / Газизов Тимур Тальгатович. – Томск, 2017. – 314 с.
61. Goudos K. Evolutionary algorithms applied to antennas and propagation: A review of state of the art / K. Goudos, C. Kalialakis, R. Mittra // *Int. J. of Antennas and Propagation Volume*. – 2016. – P. 1–12. Article ID 1010459.
62. Haupt R.L. *Genetic Algorithms in Electromagnetics* / R.L Haupt, D.H. Werner. New York, NY: Wiley-Interscience. – 2007. – 318 p.
63. Kravchenko V.F. The form optimization of the ultrashort pulsed signals on basis of atomic functions / V.F. Kravchenko, D.V. Smirnov // *Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves and Workshop on Terahertz Technologies, 2007. MSMW'07. The Sixth International Kharkov Symposium on*. – June 25–30, 2007. – P. 971–973.
64. Sathi V. Optimization of circular ring microstrip antenna using genetic algorithm / V. Sathi, C. Ghobadi, J. Nourinia // *Communication Networks and Services Research Conference, 2008. CNSR 2008. 6th Annual*. – May 5–8, 2008. – P. 898–905.
65. Frequency relaying based on genetic algorithm using FPGAs / D.V. Coury, M. Oleskovicz, A.C.B. Delbem, E.V. Simões, T.V. Silva, J.R. Carvalho, D. Barbosa // *Intelligent System Applications to Power Systems, 2009. ISAP '09. 15th International Conference on*. – Nov. 8–12, 2009. – P. 1–7.
66. A delay line circuit design for crosstalk minimization using genetic algorithm / C. Chung, S. Lee, B. M. Kwak, G. Kim, J. Kim // *IEEE Trans. on Computer-*

- Aided Design of Integrated Circuits and Systems. – Feb. 15, 2008. – Vol. 27, No. 3. – P. 578–583.
67. Projection matrix optimization for sparse signals in structured noise / S. Pazos, M. Hurtado, С.Н. Muravchik. A. Nehorai // IEEE Trans. on Signal Processing. – May 18, 2015. – Vol. 63. – P. 3902–3913.
68. Мелкозеров А.О. Компьютерное моделирование и оптимизация электромагнитной совместимости бортовой аппаратуры космических аппаратов: монография / А.О. Мелкозеров, Р.И. Аширбакиев. – Томск: Министерство образования и науки Российской Федерации; Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2013. – 220 с.
69. Афонин П.В. Оптимизация моделей сложных систем на основе метаэвристических алгоритмов и нейронных сетей. – Инженерный вестник. Издатель ФГБОУ ВПО «МГТУ им. Н.Э. Баумана». – 2016. – №16. – С. 508–516.
70. Семеникин Е.С. Эволюционные методы моделирования и оптимизации сложных систем / Е.С. Семеникин, М.Н. Жукова, В.Г. Жуков, И.А. Панфилов, В.В. Тынченко // Конспект лекций. – Издатель ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет». – Красноярск. – 2007. – 310 с.
71. Hansen N., Ostermeier A. Completely Derandomized Self-Adaptation in Evolution Strategies // Evolutionary Computation. – 2001. – Vol.9, №2. – P. 159–196.
72. Elcut [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://elcut.ru/index.htm>, свободный (дата обращения: 02.03.2016).
73. Система TALGAT [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://talgat.org/talgat-software/>, свободный (дата обращения: 02.10.2017).
74. Газизов Р.Р. Участие студентов младших курсов в НИОКР ТУСУРа по космической тематике как начало подготовки кадров для ракетно-космической отрасли // Молодеж. Техника. Космос: труды V

- Общероссийской молодежной науч.-техн. конф. – Балт. гос. ун-т. СПб., 2013. – С. 254–256.
75. Газизов Р.Р. Вычисление токов вдоль многопроводных межсоединений печатных плат // Материалы 51-й Международной научной студенческой конференции «Студент и научно-технический прогресс»: Информационные технологии. – Новосиб. гос. ун-т. Новосибирск, 2013. – С. 37.
76. Газизов Р.Р. Методика и алгоритмы для выявления и локализации экстремумов сигнала в многопроводных линиях передачи // Системы управления, связи и безопасности. – 2017. – № 4. – С. 1–14.
77. Газизов Р.Р. Результаты квазистатического анализа токов вдоль отрезка многопроводной шины печатной платы // Научная сессия ТУСУР-2013: материалы Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – Томск, 15–17 мая 2013: в 5 частях. – Ч. 1. – С. 103–105.
78. Газизов Р.Р. Анимированные графики для визуализации токов и напряжений в системе TALGAT // Научная сессия ТУСУР-2015: материалы Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – Томск, 15–17 мая 2013: в 5 частях. – Ч. 1. – С. 103–105.
79. Газизов Русл.Р. Функции локализации и визуализации токов и напряжений в системе TALGAT / Русл.Р. Газизов, Ев.В. Лежнин // Современное технологии в науке и образовании – СТНО-2016 [текст]: сб. тр. междунар. науч.-техн. и науч.-метод. конф.: в 4 т. Т.1./ под общ. ред. О.В. Миловзорова. – Рязань: Рязан. гос. радиотехн. ун-т, 2016. – С. 100–103.
80. Алгоритм DFS [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://e-maxx.ru/algo/dfs> свободный (дата обращения 28.03.2016).
81. Газизов Р.Р. Локализация максимумов напряжения в шине печатной платы системы автономной навигации космического аппарата / Р.Р. Газизов, А.М. Заболоцкий, А.О. Белоусов, Т.Т. Газизов // Труды МАИ. – 2016. –

- №89. – https://www.mai.ru/upload/iblock/9db/gazizov_zabolotskiy_belousov_gazizov_rus.pdf.
82. Gazizov R.R. Ultrashort Pulse Maximum Localization in Multiconductor Structures / R.R. Gazizov, A.M. Zabolotsky, T.R. Gazizov // IEEE Conference 2016 Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines. – Omsk, 2016. – P. 1–5.
 83. Газизов Р.Р. Локализация максимумов сверхкороткого импульса вдоль многопроводных структур / Р.Р. Газизов, А.М. Заболоцкий, Т.Р. Газизов // Динамика систем, механизмов и машин. – 2016. – Т. 2, № 1 – С. 68–74.
 84. Gazizov R.R. Influence of Ultrashort Pulse Duration on Its Peak Values Localization in PCB of Spacecraft Autonomous Navigation System / R.R. Gazizov, A.M. Zabolotsky, T.T. Gazizov, A.O. Belousov // 18th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices. – Erlagol, Altai, 29 June–3 July, 2017. – P. 69–74.
 85. Gazizov R.R. Influence of Ultrashort Pulse Duration on Localization of Crosstalk Peak Values in PCB of Spacecraft Autonomous Navigation System / R.R. Gazizov, A.O. Belousov, T.R. Gazizov // International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON 2017). – Astana, Kazakhstan, June 29–30, 2017. – P. 1–5.
 86. Gazizov R.R. Optimization of Ultrashort Pulse Duration with Usage of Genetic Algorithms by Criteria of Peak Voltage Maximization in PCB Bus / R.R. Gazizov, T.T. Gazizov, A.O. Belousov, T.R. Gazizov // Proc. of IEEE 2017 Siberian Symposium on Data Science and Engineering (SSDSE). – Novosibirsk, 12–13 Apr. 2017. – P. 1–6.
 87. Gazizov R.R. Optimization of PCB Bus Loads with Usage of Genetic Algorithms by Criteria of Peak Voltage Minimization / R.R. Gazizov, M.N. Kuharenko, T.R. Gazizov // IEEE Conference 2017 Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines. – Omsk, 2017. – P. 1–5.
 88. Газизов Р.Р. Выявление максимумов напряжения сверхкороткого импульса вдоль микрополосковой С-секции с помощью генетических алгоритмов /

- Р.Р. Газизов, Т.Т. Газизов // Современные проблемы радиоэлектроники: сб. науч. тр. [Электронный ресурс] / науч. ред. А.И. Громыко ; отв. за вып. А.А. Левицкий. – Электрон. дан. (31,5 Мб). – Красноярск : Сиб. федер. ун-т, 2017. С. 626–630.
89. Газизов Р.Р. Воздействие сверхкороткого импульса на шину печатной платы системы автономной навигации космического аппарата: моделирование и оптимизация генетическими алгоритмами / Р.Р. Газизов, Т.Р. Газизов, Т.Т. Газизов // Актуальные вопросы проектирования автоматических космических аппаратов для фундаментальных и прикладных научных исследований (выпуск 2) / Составитель В.В. Ефанов – Химки. Издатель АО «НПО Лавочкина», 2017. – С. 579–585.
90. Газизов Р.Р. Оптимизация параметров нагрузок шины печатной платы с помощью генетических алгоритмов по критерию минимизации пикового напряжения / Р.Р. Газизов, М.Н. Кухаренко, Т.Р. Газизов // Динамика систем, механизмов и машин. – 2017. – Т. 2, № 1 – С. 70–77.
91. Газизов Р.Р. Исследование локализации пиковых значений сигнала в печатной плате системы автономной навигации / Р.Р. Газизов, Т.Р. Газизов // Инфокоммуникационные технологии. – 2017. – Т. 15, № 2 – С. 170–178.
92. Gazizov R.R. Influence of Crossover and Mutation Coefficients on GA Optimization of Ultrashort Pulse Duration by Criteria of Peak Voltage Maximization in PCB Bus / R.R. Gazizov, R.S. Ryabov, T.R. Gazizov // Proc. of IEEE 2017 International Multi-Conference on Engineering, Computer and Information Sciences (SIBIRCON). – Novosibirsk, 18–24 Sep. 2017. – P. 1–5.
93. Gazizov R.R. Use of evolution strategy in identifying the worst case effects of ultrashort pulse propagation in PCB bus of spacecraft autonomous navigation system / Ruslan R. Gazizov, Alexander M. Zabolotsky, Rustam R. Gazizov // International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON 2018). – Moscow, March 14–16, 2018. – P. 1–4.

94. Gazizov Ruslan R. Use of genetic algorithm and evolution strategy when revealing the worst case effects of crosstalk propagation in PCB bus of spacecraft autonomous navigation system / Ruslan R. Gazizov, A.M. Zabolotsky, Rustam R. Gazizov // 19th International conference of young specialists on micro/nanotechnologies and electron devices (Erlagol, Altai, 29 June – 3 July). – Erlagol, 2018. – P. 93–97.
95. Gazizov R.R. Simulation of ESD Effects on PCB Bus of Spacecraft Autonomous Navigation System // Proc. of IEEE 2017 International Multi-Conference on Engineering, Computer and Information Sciences (SIBIRCON). – Novosibirsk, 18–24 Sep. 2017. – P. 1–5.
96. Суровцев Р.С. Оценка целостности сигналов в печатных платах системы автономной навигации космического аппарата / Р.С. Суровцев, Т.Р. Газизов // Электронный журнал «Труды МАИ». – 2015. – №83. – С. 1–19.
97. IEC 61000-4-2 (2003), Electromagnetic Compatibility (EMC) Part 4: Testing and measurement techniques – Section 2: Electrostatic discharge immunity test.
98. Gazizov T.R. Modal filter as a device for electrostatic discharge protection of onboard computers and control units of space vehicles / T.R. Gazizov, E.S. Dolganov, A.M. Zabolotsky // Russian Physics Journal. – August 2012. – Vol. 55, No. 3. – P. 282–286.
99. Hansen N. Python: module barecmaes2 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.lri.fr/~hansen/barecmaes2.html>, свободный (дата обращения: 17.11.2017).
100. Газизов Р.Р. Применение динамической визуализации в образовательном процессе // Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири (СИБРЕСУРС-22-2016): доклады (материалы конференции) 22-й Международной научно-практической конференции, Томск, 10–11 октября 2016 г. / отв. ред. Л.С. Петрова. – Томск: САН ВШ; Спектр, 2016. – С. 60–63.
101. Газизов Р.Р. Программный модуль для динамической визуализации токов и электромагнитного поля печатной платы // Электронные средства и системы

- управления: Материалы докладов Международной научно-практической конференции (12–14 ноября 2014): в 2-х ч. – Томск, 2014. – С. 200–202.
102. Газизов Р.Р. Исследование максимума напряжения сверхкороткого импульса в микрополосковой С-секции при изменении её длины /Р.Р. Газизов, А.М. Заболоцкий // Современные проблемы радиоэлектроники: сб. науч. тр. / науч. ред. В.Н. Бондаренко; отв. за вып. А. А. Левицкий. – Красноярск : Сиб. федер. ун-т, 2016. – С. 315–319.
103. Газизов Руслан Р. Выявление и локализация экстремумов сигнала в двухвитковой меандровой линии с учетом потерь /Руслан Р. Газизов, Рустам Р. Газизов // Сборник избранных статей научной сессии ТУСУР, Томск, 16–18 мая 2018 г.: в 3 частях. – Томск: В-Спектр, 2018 – Ч. 2. С. 246–248.
104. Gazizov R.R. Investigation of ultrashort pulse maximums localization in turn of meander line with variation of its duration // Научная сессия ТУСУР – 2017: Материалы Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, посвященной 55-летию ТУСУРа, Томск, 10–12 мая 2017 г.: в 8 частях. – Томск: В-Спектр, 2017 – Ч. 8. С.166–169
105. Газизов Р.Р. Локализация максимумов сигнала в многопроводных линиях передачи печатных плат с помощью системы TALGAT / Р.Р. Газизов, А.М. Заболоцкий, П.Е. Орлов // Докл. Томского гос. ун-та систем упр. и радиоэлектроники. – 2015. – 4(38) – С. 153–156.
106. Газизов Р.Р. Исследование распространения сверхкороткого импульса в микрополосковой С-секции при изменении зазора между связанными проводниками / Р.Р. Газизов, А.М. Заболоцкий, Т.Т. Газизов // Докл. Томского гос. ун-та систем упр. и радиоэлектроники. – 2016. – Т. 19, № 1 – С. 79–82.
107. Газизов Р.Р. Исследование локализации максимумов сверхкоротких импульсов в витке меандровой линии при изменении ее параметров // Современные технологии в науке и образовании – СТНО-2017 [текст]: сб.

- тр. междунар. науч.-техн. и науч.-метод. конф.: в 9 т. Т.3./ под общ. ред. О.В. Миловзорова. – Рязань: Рязан. гос. радиотехн. ун-т, 2017; Рязань. С. 93–98.
108. Газизов Р.Р. Исследование максимума напряжения сверхкороткого импульса в микрополосковой меандровой линии при изменении ее геометрических параметров / Р.Р. Газизов, А.М. Заболоцкий, Т.Т. Газизов // Технологии электромагнитной совместимости. – №3(58). – 2016. – С. 11–17.
109. Сайт инструментария Qt [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://qt.nokia.com/>, свободный (дата обращения: 29.03.2016).

ПРИЛОЖЕНИЕ

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по научной работе НИ ТГУ

д.ф.-м.н., проф.  И.В. Ивонин



2017 г.

АКТ

о внедрении (использовании) в учебный процесс результатов
диссертационной работы
Газизова Руслана Рифатовича

Настоящим актом подтверждается внедрение в учебный процесс федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет» результатов диссертационной работы Газизова Р.Р.

Материалы диссертационной работы использованы при преподавании дисциплины «Космическое приборостроение» для магистрантов физико-технического факультета по программе «Проектирование и конструирование промышленных космических систем» для предприятия «Газпром космические системы» (г. Королев) в весеннем семестре 2017 г.

Полученные в диссертационной работе результаты моделирования распространения импульсных сигналов вдоль проводников, выявления и локализации пиковых значений сигнала в шине печатной платы системы автономной навигации космического аппарата, а также использования оптимизации генетическими алгоритмами позволили познакомить магистрантов с особенностями анализа и оптимизации при моделировании бортовой радиоэлектронной аппаратуры.

Декан ФТФ ТГУ



д.ф.-м.н., проф. Шрагер Э.Р.



«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по учебной работе ТУСУР
д-р., техн. наук, проф.

Троян П.Е.

«1» 03 2018 г.

АКТ

внедрения в учебный процесс результатов диссертационной работы
Газизова Руслана Рифатовича

Мы, нижеподписавшиеся, заместители заведующего кафедрой телевидения и управления (ТУ) по учебной работе, канд. техн. наук, доцент Булдаков А.Н., и научной работе, канд., техн. наук, доцент, Куксенко С.П., настоящим актом подтверждаем факт внедрения результатов диссертационной работы Газизова Р.Р. в учебный процесс кафедры ТУ.

Приведенные в диссертационной работе методика и результаты математического моделирования для выявления и локализации экстремумов сигнала в различных полосковых структурах (тестовых схемах, меандровых линиях, шине печатной платы) и разработанный программный комплекс на основе системы компьютерного моделирования TALGAT 2016 использованы в осеннем семестре 2016 г. и 2017 г. в учебном процессе по дисциплине «Преднамеренные силовые электромагнитные воздействия» для групп 116-М1, 117-М1 магистерской программы «Электромагнитная совместимость бортовой радиоэлектронной аппаратуры», 116-М2, 117-М2 магистерской программы «Электромагнитная совместимость в топливно-энергетическом комплексе» и 146-М5, 147-М5 магистерской программы «Защита от электромагнитного терроризма», а также при подготовке двух выпускных квалификационных работ на кафедре ТУ. Использование указанных результатов позволило студентам освоить программный комплекс по выявлению и локализации экстремумов сигнала в многопроводных линиях передачи и получить ряд новых научных результатов, представленных в докладах на научных конференциях 2017 г., в т.ч. индексируемых в системах цитирования Scopus и Web of Science.

Заместитель заведующего каф. ТУ
по учебной работе, к.т.н., доцент

А.Н. Булдаков

Заместитель заведующего каф. ТУ
по научной работе, к.т.н., доцент

С.П. Куксенко



Акционерное общество
«ИНФОРМАЦИОННЫЕ СПУТНИКОВЫЕ СИСТЕМЫ»
имени академика М.Ф. Решетнёва»



ул. Ленина, д. 52, г. Железнодорожск, ЗАТО Железнодорожск, Красноярский край, Российская Федерация, 662972
Тел. (3919) 76-40-02, 72-24-39, Факс (3919) 72-26-35, 75-61-46, e-mail: office@iss-reshetnev.ru, http://www.iss-reshetnev.ru
ОГРН 1082452000290, ИНН 2452034898

УТВЕРЖДАЮ

Заместитель генерального конструктора по
электрическому проектированию и системам
управления КА акционерного общества
«Информационные спутниковые системы»
имени академика М.Ф. Решетнёва»
(АО «ИСС»), председатель секции №2 НТС,
к.т.н., доцент




С.Г. Кочура
«__» _____ 2015

о внедрении (использовании) результатов диссертационной работы
Газизова Руслана Рифатовича

Комиссия в составе:

начальника отделения проектирования и испытаний РЭА АО «ИСС» В.Н. Школьного,
начальника отдела конструирования бортовой РЭА АО «ИСС», к.т.н. С.Б. Сунцова,
начальника сектора АО «ИСС» О.А. Климкина

составила настоящий акт, подтверждающий факт использования в АО «ИСС» следующих
результатов диссертационной работы Газизова Р.Р.:

1. Разработанное программное обеспечение для выявления и локализации экстремумов сигнала в многопроводных линиях передачи.
2. Результаты моделирования шины печатной платы (ПП) радиоприемного устройства (РПУ) системы автономной навигации (САН) космического аппарата (КА).
3. Результаты исследований по выявлению и локализации экстремумов сигнала в шине ПП РПУ САН КА.
4. Результаты оптимизации шины ПП РПУ САН КА с помощью генетических алгоритмов.

Указанные результаты позволили визуализировать волновые процессы в ПП и выявить критичные места трассировки. Результаты представлены в технических отчетах по опытно-конструкторской работе «Разработка принципов построения и элементов системы автономной навигации с применением отечественной специализированной элементной базы на основе наногетероструктурной технологии для космических аппаратов всех типов» ТУСУРа для АО «ИСС» в рамках реализации Постановления №218 Правительства РФ, тема «САН», хоздоговор 96/12 от 16.11.2012. В 2013-2015 гг. Газизов Р.Р. являлся исполнителем этапов этой работы.

Начальник отделения проектирования и испытаний РЭА АО «ИСС»



В.Н. Школьный

Начальник отдела конструирования бортовой РЭА АО «ИСС», к.т.н.



С.Б. Сунцов

Начальник сектора АО «ИСС»



О.А. Климкин

Балтийский государственный технический университет
«ВОЕНМЕХ» имени Д.Ф. Устинова

Диплом

За участие в V Общероссийской молодежной
научно-технической конференции
«Молодежь. Техника. Космос»

НАГРАЖДАЕТСЯ

Тазизов
Руслан Рафатович

Балтийский государственный технический университет
«ВОЕНМЕХ» имени Д.Ф. Устинова

20 - 22 марта 2013 года

Ректор
БГТУ «ВОЕНМЕХ» имени Д.Ф. Устинова
д.т.н., профессор



К.М. Иванов







**ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ**



ДИПЛОМ

II степени

НАГРАЖДАЕТСЯ

Евг. В. Лежнин студент каф. АСУ,

Р.Р. Газизов студент каф. КИБЭВС, ТУСУР

за лучший доклад на секции 3 «Аудиовизуальная техника, бытовая радиоэлектронная аппаратура и сервис»
Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР - 2015»



Ректор
д.т.н., профессор

А.А. Шелупанов

Томск – 2015



Омский Государственный
**ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ**

X Международная IEEE научно-техническая
конференция

Д 2016
*инамика систем,
механизмов и машин*

ДИПЛОМ

Награждается

Р.Р. Газизов

за лучший доклад

**ЛОКАЛИЗАЦИЯ МАКСИМУМОВ СВЕРХКОРОТКОГО ИМПУЛЬСА ВДОЛЬ
МНОГОПРОВОДНЫХ СТРУКТУР**

на секции 5 «Радиотехнические системы и устройства.
Приборостроение. Электроника»

Председатель Научного
программного комитета
конференции, ректор ОмГТУ



А.В. Косых



**ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ**



ДИПЛОМ
II степени
НАГРАЖДАЕТСЯ

Газизов Зузхан

за лучший доклад на секции 8 «Technology for the benefit of Humanity»
Международной научно-технической конференции студентов,
аспирантов и молодых ученых
«Научная сессия ТУСУР - 2017»

Председатель конференции,
Ректор



А.А. Шелупанов

А.А. Шелупанов

Гомск – 2017



**XI International IEEE Scientific and Technical
Conference**

D 2017
*ynamics of systems,
mechanisms and machines*

ДИПЛОМ

Награждается

Р.Р. Газизов

занявший 1 место

на секции 5 «Инфокоммуникационные технологии»

за доклад « ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ НАГРУЗОК ШИНЫ ПЕЧАТНОЙ ПЛАТЫ С
ПОМОЩЬЮ ГЕНЕТИЧЕСКИХ АЛГОРИТМОВ ПО КРИТЕРИЮ МИНИМИЗАЦИИ
ПИКОВОГО НАПРЯЖЕНИЯ

OPTIMIZATION OF PCB BUS LOADS WITH USAGE OF GENETIC ALGORITHMS BY
CRITERIA OF PEAK VOLTAGE MINIMIZATION »

Председатель Научного
программного комитета
конференции, ректор ОмГТУ



А.В. Косых

14-16 November
Omsk, Russia

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2013619615

TALGAT 2012

Правообладатель: *Общество с ограниченной ответственностью
«ТУСУР - Модальные Технологии» (RU)*

Авторы: *см. на обороте*

Заявка № **2013617773**

Дата поступления **29 августа 2013 г.**

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ **11 октября 2013 г.**

*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

Б.П. Симонов



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2015614365

TALGAT 2013

Правообладатель: *Общество с ограниченной ответственностью
«ТАЛГАТ» (RU)*

Авторы: *см. на обороте*

Заявка № 2015611288

Дата поступления 03 марта 2015 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 16 апреля 2015 г.



*Врио руководителя Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

Л.Л. Курий

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2015615880

Вычисление напряжений и токов вдоль двухпроводной линии передачи на основе квазистатического анализа.

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» (RU)*

Авторы: *Газизов Руслан Рифатович (RU),
Заболоцкий Александр Михайлович (RU)*

Заявка № 2015612556

Дата поступления 02 апреля 2015 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 26 мая 2015 г.



*Врио руководителя Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

Л.Л. Курий

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2015617550

TALGAT 2014

Правообладатель: *Общество с ограниченной ответственностью
«Твердь» (RU)*

Авторы: *см. на обороте*

Заявка № 2015614488

Дата поступления 27 мая 2015 г.

Дата государственной регистрации
в Реестре программ для ЭВМ 14 июля 2015 г.

*Врио руководителя Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

Л.Л. Кирий



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2015660487

TALGAT 2015

Правообладатель: *Общество с ограниченной ответственностью
«Твердь» (RU)*

Авторы: *см. на обороте*

Заявка № 2015617580

Дата поступления 17 августа 2015 г.

Дата государственной регистрации
в Реестре программ для ЭВМ 01 октября 2015 г.

Заместитель руководителя Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Л.Л. Курий



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2016662520

TALGAT 2016

Правообладатель: *Общество с ограниченной ответственностью
«ТАЛГАТ» (RU)*

Авторы: *см. на обороте*

Заявка № 2016619296

Дата поступления 01 сентября 2016 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 14 ноября 2016 г.

*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

Г.П. Ивлиев



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2018611481

TALGAT 2017

Правообладатель: *Общество с ограниченной ответственностью
«ТАЛГАТ» (RU)*

Авторы: *см. на обороте*

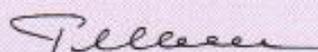
Заявка № 2017663209

Дата поступления 13 декабря 2017 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 02 февраля 2018 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

 Г.П. Ивлиев



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2018619671

Квазистатический анализ воздействия электростатического разряда на печатную плату

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» (ТУСУР) (RU)*

Автор: *Газизов Руслан Рифатович (RU)*

Заявка № **2018616368**

Дата поступления **18 июня 2018 г.**

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ **09 августа 2018 г.**

*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

Г.П. Ивлиев

