

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования

«Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники»

На правах рукописи



Гордеева Виктория Олеговна

Полосковые и кабельные
оптимизированные помехозащитные структуры
на основе модального разложения помеховых сигналов

Специальность 2.2.13

Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель

канд. техн. наук

Белоусов Антон Олегович

Томск 2025

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1 ЗАЩИТА РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ ОТ СВЕРХКОРОТКИХ ИМПУЛЬСОВ: ОБЗОР	10
1.1 Актуальность защиты	10
1.2 Методы защиты от электромагнитных воздействий	12
1.2.1 Традиционные методы защиты	12
1.2.2 Структуры с модальным разложением	15
1.3 Моделирование структур с модальным разложением	19
1.4 Критерии и алгоритмы оптимизации структур с модальным разложением	20
1.4.1 Критерии оптимизации	21
1.4.2 Алгоритмы оптимизации	26
1.5 Цель и задачи работы	41
2 МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ СТРУКТУР С МОДАЛЬНЫМ РАЗЛОЖЕНИЕМ	43
2.1 Полосковые модальные фильтры	43
2.2 Кабельные модальные фильтры	48
2.3 Подход к оптимизации модальных фильтров на основе круглого кабеля	61
2.4 Основные результаты раздела	66
3 ОПТИМИЗАЦИЯ СТРУКТУР С МОДАЛЬНЫМ РАЗЛОЖЕНИЕМ ГЛОБАЛЬНЫМИ АЛГОРИТМАМИ	67
3.1 Формулировка критериев оптимизации	67
3.1.1 Критерий максимизации полосы пропускания	68
3.1.2 Критерий контроля полосы пропускания	69
3.1.3 Критерий минимизации максимальной амплитуды помех при их распространении с двух направлений	69
3.1.4 Глазковый критерий	71
3.2 Разработка алгоритмов оптимизации	73
3.2.1 Модифицированный алгоритм эволюционных стратегий	73
3.2.2 Алгоритм адаптивного усечения секций	76
3.3 Полосковые защитные структуры	83
3.3.1 Оптимизация микрополосковой защитной структуры генетическим алгоритмом, эволюционными стратегиями и алгоритмом случайного поиска	83
3.3.2 Оптимизация микрополосковой защитной структуры алгоритмами ветвей и границ, имитации отжига и симплициальной гомологии	116

3.3.3	Оптимизация микрополосковой защитной структуры алгоритмом адаптивного усеечения секций	120
3.3.4	Оптимизация защитной структуры с лицевой связью генетическим алгоритмом, эволюционными стратегиями и алгоритмом случайного поиска	122
3.4	Кабельные защитные структуры	130
3.4.1	Оптимизация трехпроводного круглого кабеля эволюционными стратегиями.....	131
3.4.2	Оптимизация трехпроводного кабеля с изолированными проводниками эволюционными стратегиями.....	134
3.4.3	Оптимизация четырехпроводного круглого кабеля эволюционными стратегиями....	136
3.4.4	Оптимизация трехпроводного плоского кабеля генетическим алгоритмом, эволюционными стратегиями и алгоритмом случайного поиска по двум критериям	138
3.5	Рекомендации по оптимизации модальных фильтров.....	142
3.5.1	Защитные структуры.....	142
3.5.2	Алгоритмы глобальной оптимизации	149
3.6	Основные результаты раздела	151
4	ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КАБЕЛЬНЫХ МОДАЛЬНЫХ ФИЛЬТРОВ	154
4.1	Модальный фильтр на основе круглого кабеля	154
4.1.1	Моделирование и выбор материалов	154
4.1.2	Разработка прототипа на основе круглого кабеля	156
4.1.3	Результаты моделирования и измерений	160
4.2	Модальный фильтр на основе плоского кабеля	164
4.2.1	Моделирование и выбор материалов	165
4.2.2	Разработка прототипа на основе плоского кабеля.....	167
4.2.3	Результаты моделирования и измерений	169
4.3	Основные результаты раздела	171
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ	173
	СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ	177
	СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	178
	ПРИЛОЖЕНИЕ А (СПРАВОЧНОЕ) КОПИИ АКТОВ О ВНЕДРЕНИИ	192
	ПРИЛОЖЕНИЕ Б (СПРАВОЧНОЕ) КОПИИ ОХРАННЫХ ДОКУМЕНТОВ.....	198
	ПРИЛОЖЕНИЕ В (СПРАВОЧНОЕ) ДОСТИЖЕНИЯ И НАГРАДЫ.....	211

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы. Развитие радиоэлектронных средств (РЭС) всё сильнее актуализирует обеспечение их электромагнитной совместимости (ЭМС). Как известно, электромагнитные воздействия (ЭМВ) могут дестабилизировать и разрушать РЭС. Отдельного внимания заслуживают кондуктивные помехи, обладающие субнаносекундным временем нарастания или спада и высоким напряжением, называемые сверхкороткими импульсами (СКИ). Так, СКИ способны нанести существенный вред критичным техническим средствам, нарушив режим их работы или даже выведя их из строя, проникнув в критичные узлы. Для защиты РЭС от СКИ предложена модальная фильтрация, использующая разложение СКИ на импульсы меньшей амплитуды из-за различия задержек мод в многопроводной линии передачи. Устройства, работающие на этой основе, называют модальными фильтрами (МФ). Их часто реализуют полосковыми на печатных платах (ПП), но возможны и кабельные МФ.

На этапе проектирования МФ важен выбор оптимальных значений геометрических и электрофизических параметров. Для этого применяют эволюционные алгоритмы и эвристический поиск (ЭП) при оптимизации по ряду критериев, учитывающих амплитудные и временные характеристики выходного напряжения, согласование с трактом, массогабаритные и стоимостные характеристики МФ.

Степень разработанности темы. Актуальность обеспечения и изучения ЭМС подтверждается рядом работ под авторством М.Л. Волина, В.И. Ефанова, Д. Уайта и др. Большое внимание уделялось преднамеренным электромагнитным помехам в работах Р.В. Киричка, С.И. Комягина, Ю. Сахарова, N. Mora. Исследования по оценке устойчивости РЭС к воздействию электромагнитных полей, созданию генераторов импульсов и разработке средств и методов для оценки влияния ЭМВ показаны в работах В.П. Беличенко, А.М. Белянцева, В.И. Кошелева, Л.О. Мыровой, Ю.В. Парфенова. Устройства защиты от ЭМП на основе модальной фильтрации исследовали Т.Р. Газизов, А.М. Заболоцкий и И.Е. Самотин.

Эволюционные алгоритмы широко используются в области оптимизации и искусственного интеллекта. Они стали популярны в 50–70-х годах и представлены в работах N. Barricelli, J.L. Crosby, D.B. Fogel, A. Fraser, J.H. Holland. Большой вклад в разработку, исследование и применение эволюционных алгоритмов на практике внесли Л.А. Гладков, А.В. Еремеев, В.В. Курейчик, И.П. Норенков, B. Freisleben. H.P. Schwefel и I. Rechenberg разработали алгоритм эволюционных стратегий (ЭС), который стал одним из самых распространенных. Для задач оптимизации отлично подходит ЭС преобразования ковариационной матрицы (Covariance Matrix Adaptation Evolution Strategy, CMA-ES), с которой работали А.О. Мелкозеров, N. Hansen, A. Ostermeier, Z. Bayraktar, M.D. Gregory, D.H. Werner и др. Разработка критериев и применение эволюционных алгоритмов при оптимизации защитных

структур с модальным разложением рассматривались в работах А.О. Белоусова и Т.Т. Газизова. Между тем расширение инструментария оптимизации, за счет стохастических и детерминированных подходов, а также иных критериев, ранее не рассматривалось. Так, существующие критерии не учитывают частотные характеристики МФ, целостность передаваемого сигнала, а также помехи одновременно с двух направлений.

Цель работы – улучшить характеристики полосковых и кабельных помехозащитных структур с модальным разложением за счёт использования алгоритмов глобальной оптимизации.

Для ее достижения надо решить следующие **задачи**:

1. Выполнить обзор существующих структур с модальным разложением, критериев и алгоритмов их оптимизации.
2. Выполнить многовариантный анализ и оптимизацию полосковых и кабельных МФ эвристическим поиском.
3. Разработать подход к параметрической оптимизации МФ на основе круглых кабелей.
4. Сформулировать новые критерии оптимизации, учитывающие временные и частотные характеристики, и апробировать их на полосковых МФ.
5. Разработать и апробировать алгоритм оптимизации, находящий глобальный экстремум целевой функции с высокой точностью за умеренное время.
6. Сравнить алгоритмы случайного поиска, ветвей и границ, имитации отжига, симплициальной гомологии при оптимизации модальных фильтров на основе полосковых и кабельных структур.
7. Дать рекомендации по глобальной оптимизации полосковых и кабельных МФ.
8. Разработать макеты кабельных МФ и выполнить их измерения.

Научная новизна

1. Введены критерии оптимизации модальных фильтров, отличающиеся учетом их частотных характеристик (максимизация и контроль частоты среза), целостности полезного сигнала, а также помех одновременно с двух направлений.
2. Доказана эффективность применения различных классов глобальных алгоритмов при оптимизации полосковых и кабельных модальных фильтров.
3. Разработаны модальные фильтры на основе круглой и плоской кабельных структур, отличающиеся использованием компаунда на основе радиопоглощающего материала в качестве диэлектрического заполнения.

Теоретическая значимость

1. Изучены причинно-следственные связи при оптимизации полосковых и кабельных структур с модальным разложением глобальными алгоритмами.

2. Изучены особенности влияния параметров модальных фильтров на основе круглых и плоских кабельных структур на их временные и частотные характеристики.

3. Раскрыто влияние экрана и асимметрии поперечного сечения на временные характеристики модальных фильтров на основе круглых и плоских кабельных структур.

Практическая значимость

1. Разработаны и внедрены результаты: моделирования и оптимизации по ряду критериев полосковых и кабельных модальных фильтров для защиты радиоэлектронных средств (три акта внедрения в НИР по грантам РФФИ и госзадания); использования широкого ряда глобальных алгоритмов при оптимизации модальных фильтров (акт внедрения в учебный процесс ТУСУРа).

2. Представлен подход к оптимизации модальных фильтров на основе круглых кабелей для корректной параметрической оптимизации.

3. Модернизирован алгоритм эволюционных стратегий для возможности задания диапазонов оптимизируемых параметров.

4. Представлены результаты оптимизации модального фильтра на основе трехпроводной микрополосковой линии по одному и двум критериям в условиях экстремальных температур и влияния влаги.

5. Создан гибридный алгоритм адаптивного усечения секций с равномерным разбиением исходной области на секции, внутри которых случайным образом формируется набор решений.

6. Определены перспективы практического использования генетического алгоритма, эволюционных стратегий, случайного поиска, имитации отжига, ветвей и границ и симплициальной гомологии при оптимизации структур с модальным разложением.

7. Создана система практических рекомендаций по выбору и использованию глобальных алгоритмов при оптимизации модальных фильтров.

Положения, выносимые на защиту

1. Совокупность разработанных критериев позволяет комплексно оптимизировать модальные фильтры с учётом помеховых и полезных сигналов, обеспечивая выполнение требований к частоте среза, глазковой диаграмме и уровню помех одновременно с двух направлений.

2. При оптимизации полосковых и кабельных модальных фильтров по одному и двум критериям детерминированные, стохастические, вероятностный и гибридный алгоритмы дают результаты, близкие к результатам эволюционных алгоритмов.

3. Разработанный модальный фильтр на основе круглой кабельной структуры с полосой пропускания 580 МГц ослабляет помеху общей длительностью 80,5 пс по уровню 0,5

в 6,17 раза, а на основе плоской кабельной структуры с полосой пропускания 83,3 МГц – 200 пс по уровню 0,5 в 7 раз.

Оригинальные результаты соотносятся с паспортом специальности 2.2.13 – Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения по п.6 – Разработка и исследование методов и алгоритмов обработки сигналов и информации в радиотехнических устройствах и системах различного назначения, включая системы телевидения и передачи информации, при наличии помех с целью повышения помехоустойчивости и п. 7 – разработка и исследование методов обеспечения электромагнитной совместимости радиотехнических систем и устройств, включая системы связи и телевидения, методов обеспечения их стойкости к электромагнитному и ионизирующему излучению, методов разрушения и защиты информации в этих системах.

Методология и методы исследования. В работе применены математическое моделирование на основе метода моментов и модифицированного узлового метода, конечных разностей во временной области, модальный анализ, параметрическая оптимизация эвристическим поиском и алгоритмами глобальной оптимизации. Измерения в частотной области выполнялись векторным анализатором цепей.

Достоверность результатов основана на корректном использовании теории линий передачи и численных методов, сопоставимости результатов квазистатического и электродинамического подходов и их согласованности с результатами измерений на сертифицированных и поверенных аппаратно-программных комплексах.

Использование результатов

1. НИР «Комплекс фундаментальных исследований по электромагнитной совместимости» в рамках государственного задания FEWM-2020-0041, 2020–2023 гг.

2. НИР «Комплексное исследование кабельных и полосковых структур с модальными явлениями для защиты критичного оборудования от сверхкоротких импульсов», грант Президента Российской Федерации МК-900.2022.4, 2022–2023 гг.

3. НИР «Теоретические основы создания перспективных систем автоматизированного проектирования радиоэлектронной аппаратуры, работающей в экстремальных условиях» (номер темы FEWM-2022-0001) в рамках конкурса научных проектов, выполняемых коллективами исследовательских центров и (или) научных лабораторий образовательных организаций высшего образования, 2022–2023 гг.

4. НИР «Методология обеспечения электромагнитной совместимости средств функционального поражения электромагнитным излучением с другими радиоэлектронными средствами в составе комплекса противодействия беспилотным летательным аппаратам», грант РНФ 22-29-01331 от 29.12.2021 г., 2021–2022 гг.

5. НИР «Теоретическое обоснование появления комбинационных импульсов в многопроводных линиях передачи с неоднородным диэлектрическим заполнением», грант РФ 22-79-00187 от 27.07.2022 г., 2022–2023 гг.

6. НИР «Интеллектуальная оптимизация пассивных полосковых и кабельных структур для защиты радиоэлектронных средств от сверхширокополосных помех с использованием машинного обучения», грант РФ №24-29-00578 от 29.12.2023 г., 2024–2025 гг.

7. НИР «Методология автоматизированного проектирования радиоэлектронной аппаратуры, функционирующей в условиях деструктивных воздействий» в рамках конкурса научных проектов, выполняемых коллективами исследовательских центров и (или) научных лабораторий образовательных организаций высшего образования FEWM-2024-0005, 2024–2026 гг.

8. Учебный процесс ТУСУРа.

9. Результаты интеллектуальной деятельности: 2 патента на изобретение и 11 свидетельств о регистрации программы для ЭВМ.

Апробация результатов

Результаты исследований автора позволили подготовить заявки и победить в конкурсах: гранта Президента РФ; РФФИ; госзадания; на назначение стипендии Президента ТУСУР в 2025 г.; на назначение стипендии К.А. Валиева в 2023 и 2024 г.

Результаты докладывались и представлялись в материалах следующих конференций: Межд. науч.-прак. конф. «Электронные средства и системы управления», г. Томск, 2021 г.; Int. Conf. of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM), Республика Алтай, 2022, 2023 гг.; Int. Siberian Conf. on Control and Communications (SIBCON), г. Томск, 2022 г.; Int. Conf. on Problems of Informatics, Electronics and Radio Engineering (PIERE), г. Новосибирск, 2024 г.

Публикации. Результаты исследований опубликованы в 30 работах (3 без соавторов).

Тип публикации	Количество
Статья в журналах из перечня ВАК	6
Статья в журналах, индексируемых в WoS и Scopus (Q2)	1
Публикация в журналах, индексируемых в WoS и Scopus	3
Доклад в трудах конференций, индексируемых WoS и Scopus	5
Доклад и тезисы в трудах отечественных конференций	1
Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ	11
Патент на изобретение	2
Монография	1
ИТОГО:	30

Личный вклад. Все результаты получены автором лично или при непосредственном его участии. Результаты, сформулированные в положениях, выносимых на защиту, и составляющие научную новизну, получены автором лично или совместно с научным руководителем. Личный

вклад автора состоит в выполнении моделирования и оптимизации, формулировке ряда критериев, создании алгоритма оптимизации, обработке и интерпретации входных данных и подготовке публикаций. Часть результатов (подраздел 3.3 диссертации) получена с *Кимом Г.Ю.* Разработка макетов модальных фильтров и измерения выполнены с *Жечевым Е.С.*

Структура и объём диссертации. В состав диссертации входят введение, 4 главы, заключение, список использованной литературы из 141 наименований, 3 приложения. Объём диссертации – 212 с., в т.ч. 106 рисунков и 67 таблиц.

Краткое содержание работы. Во введении представлена краткая характеристика работы. В разделе 1 обоснована актуальность защиты РЭС от СКИ, представлен обзор традиционных методов защиты и структур с модальным разложением, рассмотрены существующие критерии и алгоритмы оптимизации, а также сформулированы цель и задачи работы. В разделе 2 выполнено предварительное моделирование полосковых и кабельных МФ, представлен подход к оптимизации МФ на основе круглых кабелей. В разделе 3 сформулированы и апробированы критерии оптимизации, учитывающие частотные характеристики МФ, целостность полезного сигнала и помехи одновременно с двух направлений, оптимизированы полосковые структуры стохастическими и детерминированными алгоритмами, даны практические рекомендации по выбору и использованию алгоритмов. В разделе 4 описаны создание и измерение кабельных МФ.

1 ЗАЩИТА РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ ОТ СВЕРХКОРОТКИХ ИМПУЛЬСОВ: ОБЗОР

1.1 Актуальность защиты

В настоящее время РЭС повсеместно интегрируются практически во все критически важные области жизнедеятельности современного человека – от систем связи и транспорта до медицины и обороны. Их работа непосредственно зависит от способности устойчиво функционировать в сложной электромагнитной обстановке, что с каждым годом все больше обостряет проблему обеспечения ЭМС [1]. Согласно ГОСТ 30804.4.4–2013 ЭМС определяется как способность технических средств (ТС) функционировать в электромагнитной среде, не создавая помехи для других ТС и не подвергаясь их воздействию [2]. Область ЭМС охватывает широкий спектр задач: от предотвращения собственного излучения помех устройствами до обеспечения устойчивости РЭС к внешним ЭМВ как природного, так и техногенного происхождения. В общем случае, ЭМВ делят на непреднамеренные [3, 4] (космические и атмосферные шумы, работа индустриального оборудования и др.) и преднамеренные (ПдЭМВ) [5, 6], источниками которых могут выступать, например, генераторы сверхширокополосных (СШП) импульсов.

Быстрый рост функциональной сложности РЭС, увеличение плотности монтажа, переход на низковольтные логические уровни и повсеместное внедрение цифровых систем существенно снизили устойчивость аппаратуры к ЭМВ. Учитывая участвовавшие инциденты, вызванные ЭМВ, мировое научное и инженерное сообщество пришло к необходимости стандартизации требований по ЭМС. Так, В 1934 г. в составе Международной электротехнической комиссии (IEC) создан Международный специальный комитет по радиопомехам (CISPR), который с конца 1930-х годов разрабатывает стандарты измерения и оценки радиочастотных помех, излучаемых электрическими и электронными устройствами (например, серии CISPR 11, 14, 16 и др.). В 1967 г. принят MIL-STD-461, американский стандарт для испытаний на ЭМС в оборонной технике. Последние его редакции предусматривают испытания, как на излучение, так и на устойчивость РЭС. В России первые стандарты по ЭМС разработаны и введены в действие в рамках ГОСТ Р: наиболее ранние, ГОСТ Р 50397-92 и ГОСТ Р 50842-95. Теперь основные действующие ГОСТы в области ЭМС включают ГОСТ Р 50397-2011, определяющий термины и определения, и ряд относящихся к конкретным аспектам ЭМС, например, ГОСТ Р 51317.4.3-2013 (Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость к радиочастотному электромагнитному полю. Требования и методы испытаний), ГОСТ Р 56093-14 (Средства обнаружения преднамеренных силовых электромагнитных воздействий), ГОСТ Р 52863-07 (Защита информации. Автоматизированные системы в

защищенном исполнении. Испытания на устойчивость к преднамеренным силовым электромагнитным воздействиям), ГОСТ Р 56103-14 17 (Организация и содержание работ по защите от преднамеренных силовых электромагнитных воздействий), ГОСТ Р 56115-14 (Средства защиты от преднамеренных силовых электромагнитных воздействий) и др.

Известно, что несоблюдение требований ЭМС может приводить к значительным нарушениям в работе РЭС: от программных сбоев до физического разрушения компонентов, что в отдельных случаях становится причиной крупных аварий. Например, в 1962 г. при высотном ядерном испытании мощный электромагнитный импульс (ЭМИ) вывел из строя около 300 уличных фонарей на Гавайях, сработали охранные сигнализации и временно прекратилась всякая связь между островами [7]. Кроме того, известны крупные инциденты, связанные с непреднамеренными ЭМП природного происхождения. Так, в марте 1989 г. зарегистрирована сильнейшая геомагнитная буря с начала космической эры (1957 г.) [8]. Особенно масштабные сбои произошли в энергосистеме канадской провинции Квебек: мощная солнечная буря спровоцировала токи, индуцированные в линиях электропередачи, и вызвав трёхчасовое отключение систем провинции, где более 6 млн человек остались без электричества [9]. Произошли также нарушения систем радиосвязи во всем мире, сбои в работе космических аппаратов [10]. В СССР во время этой геомагнитной бури была нарушена радиосвязь с пунктами на высоких широтах [11].

Особое внимание в задачах ЭМС уделяется помехозащите РЭС от кондуктивных СШП-помех, длительность которых находится в наносекундном и субнаносекундном диапазонах. Они названы СКИ, а в работе [12] они подробно классифицированы. Мощность СКИ и помехоустойчивость РЭС определяют степень нарушения функционирования элементов РЭС [13]. СКИ обладают малой длительностью, из-за чего энергия не успевает распределиться по элементам структуры, что приводит к ее локализации в одной точке, из-за чего увеличивается вероятность отказа в чувствительных областях [14]. Так, ввиду этих особенностей, СКИ способны вызвать сбой электроустановок, кабелей, аналоговых и цифровых устройств и других РЭС, чей уровень защиты от импульсных перенапряжений и помех недостаточно высок [15]. Существуют экспериментальные исследования, подтверждающие этот факт [16, 17]. В них показано, что генераторы СКИ при сравнительно небольших напряженностях электромагнитного поля способны оказывать губительное воздействие на РЭС. Кроме того, известна работа, где приведены результаты сравнительного анализа влияния СКИ на различные системы радиосвязи [18]. В работе [19] обсуждаются результаты цикла сравнительного экспериментального исследования функционирования персонального компьютера (ПК) при воздействии СКИ с различными спектральными характеристиками.

Таким образом, формирование и принятие нормативных документов на международном и национальном уровнях подчёркивает критическую важность обеспечения ЭМС на всех этапах жизненного цикла РЭС – от проектирования и моделирования, испытаний и ввода в эксплуатацию до утилизации. Одной из приоритетных задач ЭМС является обеспечение устойчивости РЭС к воздействию импульсных помех, в частности СКИ, которые представляют собой один из наиболее опасных видов ПдЭМВ. Это обуславливает необходимость разработки эффективных методов защиты от подобных воздействий.

1.2 Методы защиты от электромагнитных воздействий

1.2.1 Традиционные методы защиты

Как отмечалось ранее, ЭМВ различного происхождения представляют серьёзную угрозу для надёжной работы РЭС. В этой связи на протяжении десятилетий формировались традиционные методы защиты, направленные на снижение уровня как внешних, так и внутренних ЭМВ. Эти методы применяются как по отдельности, так и в сочетании, и составляют основу нормативных требований по ЭМС, регламентированных в российских и международных стандартах (ГОСТ Р 51317, IEC 61000). К этим методам относят экранирование, заземление, фильтрацию токов и напряжений, использование защитных компонентов (варисторов, TVS-диодов, разрядников), оптимизацию схем и трассировки, целостность питания, а также рациональную компоновку узлов и кабельных соединений [20]. Эффективная реализация этих мер требует системности, учитывающего характеристики источников помех, пути их распространения и восприимчивость защищаемых цепей.

Одним из наиболее широко применяемых методов защиты является экранирование, предполагающее использование проводящих или ферромагнитных материалов для ограничения распространения электромагнитных полей. Экранирование эффективно как против излучаемых, так и наведённых помех, препятствуя их проникновению в чувствительные элементы системы. В зависимости от типа воздействия применяются экраны для подавления электрического (высокочастотного) поля, магнитного (низкочастотного) поля или обоих одновременно [21]. На практике используются сплошные или сетчатые металлические оболочки, фольгированные кабели, металлические кожухи и специализированные экранирующие прокладки. Эффективность экранирования определяется его экранирующей способностью (shielding effectiveness, SE), которая зависит от проводимости материала, толщины, геометрии, а также качества соединений и заземления [22].

В [23] обобщается информация о последних достижениях в области многофункциональных материалов для защиты от ЭМВ, а также обсуждается возможность комбинирования многофункциональных материалов для защиты. В работе [24] приведен обзор

современных композитных материалов для защиты от ЭМВ с акцентом на механизмы экранирования, классификацию материалов и новые тенденции. Также, в [25] анализируется эффективность проводящих и магнитных экранов при крупномасштабном экранировании от магнитных полей окружающей среды с частотой до 20 кГц. В лабораторных условиях воспроизводятся несколько геометрических конфигураций экранов и источников поля, чтобы систематически анализировать их свойства по ослаблению поля.

В 2025 г. опубликован подробный обзор [26], в котором рассматриваются экологичные материалы, полученные из различных переработанных отходов, для защиты от ЭМВ. В начале обзора рассматриваются фундаментальные принципы и механизмы защиты от ЭМВ и методы их поглощения, необходимые для обеспечения экономичной работы. Далее в обзоре рассматриваются различные экологически чистые материалы, в том числе сельскохозяйственные отходы, побочные продукты промышленности, отходы животноводства и электронные отходы, и оценивается их потенциал для защиты от ЭМП.

Заземление и уравнивание потенциалов применяются для отвода токов помех, а также для исключения разностей потенциалов между различными частями оборудования. Основной задачей заземления является обеспечение низкоомного пути для оттока высокочастотных и импульсных токов на землю, тем самым уменьшая амплитуду перенапряжений в защищаемых цепях [27]. В системах с высокой плотностью монтажа критично учитывать импеданс заземляющих соединений, особенно на высоких частотах, где важно минимизировать длину проводников и избегать образования петель тока. Применение грамотного заземления регламентируется рядом международных и национальных стандартов, включая IEC 61000-5-2.

В работе [28] кратко изложены теория и методы, связанные с экранированием, соединением, заземлением в кабельных системах. Кроме того, известно, что из-за электромагнитной индукции между линиями электропередачи и связанными с ними заземляющими проводами ток промышленной частоты вызывает протекание в заземляющую сеть через металлическую опору, что может создавать помехи при измерении сопротивления заземления. В работе [29] анализируются механизмы возникновения таких помех и показано, что помехи промышленной частоты становятся сильнее на опорах с транспозицией фазных проводов. Доказано, что измерение сопротивления заземления методом переменной частоты эффективно устраняет помехи промышленной частоты. В исследовании [30] представлена модель экранированного кабеля для оценки ЭМ-излучения с помощью разложения на составляющие явления, включая диэлектрические свойства грунта. Модель создана на основе стандартизированной измерительной установки и проверена для различных случаев заземления и расположения кабеля.

Ещё одним важным направлением в обеспечении защиты от ЭМВ является применение защитных компонентов, способных ограничивать амплитуду импульсных перенапряжений и тем самым предотвращать повреждение чувствительных элементов РЭС. Наиболее распространёнными средствами являются варисторы, TVS-диоды (Transient Voltage Suppression), газоразрядники и полупроводниковые ограничители напряжения [31]. Варисторы, как правило, изготавливаются на основе оксида цинка и обладают нелинейной вольт-амперной характеристикой, благодаря чему эффективно ограничивают напряжение при превышении порогового значения. TVS-диоды – это полупроводниковые устройства быстрого отклика, предназначенные для защиты от коротких импульсов, таких как электростатические разряды, быстрые переходные процессы и импульсы перенапряжения. Исследование [32] демонстрирует схемы защиты на основе нескольких TVS-диодов при воздействии мощных микроволновых импульсов для защиты чувствительных полупроводниковых и микроволновых устройств от помех или повреждения в результате ПдЭМВ. Газоразрядники отличаются высокой разрядной способностью и применяются в линиях связи и электропитания для защиты от мощных внешних помех, включая грозовые разряды и ЭМИ.

На данный момент известно множество разных защитных структур, которые отличаются друг от друга, как конструкцией, так и по назначению. Наибольшее распространение получили фильтрующие устройства на основе L и C элементов. Преимуществом таких фильтров, помимо прочего, являются небольшие стоимость и габариты, а также доступность для потребителя ввиду их широкого распространения для защиты РЭС от ЭМВ. Так, известен фильтр ЭМП с интегральной схемой и защитой от электростатического разряда, включающий в себя резонансные накопители и катушку-конденсатор, но имеющий большие габариты [33]. В [34] приведен комбинированный дроссель для синфазной и дифференциальной мод, диаметр окружности которого достигает 20 см, что не всегда удобно в реализации на практике. Из [35] известен электромагнитный фильтр с керамическим материалом, включающий в себя компонент, который ингибирует химическую реакцию, а само устройство, помимо основного назначения способно функционировать в качестве радиатора. Достоинством данного фильтра является многофункциональность. Однако имеется сложность в изготовлении композитного материала.

Устройства на основе элементов с распределенными параметрами применяются для ослабления кондуктивных ЭМВ в шинах электропитания. В [36] представлен интегрированный фильтр для дифференциального и синфазного режимов работы, использующий плоские планарные структуры, отличающиеся простотой и компактностью. Фильтр имеет структуру, приближенную к линии передачи, включающую в себя фильтрующие элементы синфазного и дифференциального режимов в сборных шинах электропитания.

Между тем при формировании СКИ, из-за его малой длительности, основная энергия генератора расходуется на рост его амплитуды [15]. Высокая амплитуда ЭМВ может привести к пробоем полупроводниковых приборов [37] и/или конденсаторов в помехоподавляющих фильтрах на сосредоточенных параметрах, тогда как время срабатывания разрядников и варисторов может значительно превышать длительность СКИ [38], что делает их бесполезными.

Несмотря на широкую распространённость, традиционные методы защиты от ЭМВ имеют ряд существенных ограничений, особенно в условиях воздействия мощных СШП помех. Так, экранирование теряет эффективность в случае некорректного заземления, наличия щелей и разрывов в конструкции, а также при воздействии низкочастотных магнитных полей, для подавления которых требуются массивные ферромагнитные материалы. Кроме того, экраны могут вводить паразитные ёмкости и резонансные эффекты в высокочастотном диапазоне. Защитные компоненты, такие как варисторы и TVS-диоды, обладают ограниченным ресурсом и временем отклика: при воздействии СШП-импульсов с наносекундной длительностью они могут не успевать срабатывать или вовсе не активироваться из-за недостаточной энергии импульса. Газоразрядники, в свою очередь, срабатывают с задержкой и неэффективны против высокочастотных помех. Все эти факторы стимулируют поиск и разработку новых структур защиты, к числу которых относятся устройства, основанные на принципе модального разложения СКИ.

1.2.2 Структуры с модальным разложением

Как отмечено ранее, повсеместно применяемые устройства защиты от помех могут оказаться не эффективными. Из-за особенностей СКИ различной природы в условиях современной электромагнитной обстановки. Поэтому возникает необходимость в разработке новых защитных устройств. Так, для защиты РЭС от СКИ предложена технология модальной фильтрации, основанная на модальном разложении импульса на импульсы меньшей амплитуды из-за различий в задержках мод поперечных волн [39. 40]. При распространении импульса в отрезке линии, с неоднородным диэлектрическим заполнением, из N проводников (не считая опорного) импульс может подвергаться модальным искажениям, вплоть до разложения на N импульсов меньшей амплитуды, из-за различия погонных задержек мод в линии [41]. Полное разложение импульса в отрезке длиной l имеет место, если общая длительность импульса t_{Σ} меньше минимального модуля разности задержек распространения мод в линии, т.е. при условии

$$t_{\Sigma} < l \cdot \min |\tau_i - \tau_k|, \quad i, k = 1, \dots, N, \quad i \neq k, \quad (1.1)$$

где $\tau_{i(k)}$ – погонная задержка $i(k)$ -й моды отрезка. Для пары связанных линий ($N=2$)

$$t_{\Sigma} < l \cdot |\tau_2 - \tau_1|, \quad (1.2)$$

где τ_2, τ_1 – погонные задержки чётной и нечётной мод в отрезке связанных линий.

Таким образом, если в начало отрезка связанных линий между активным и опорным проводниками подается импульс длительностью меньшей, чем разность задержек мод этого отрезка, то к концу отрезка (между теми же проводниками) придут 2 импульса (импульс 1 и импульс 2), причем амплитудой в 2 раза меньшей, чем в начале отрезка (рисунок 1.1) [42].

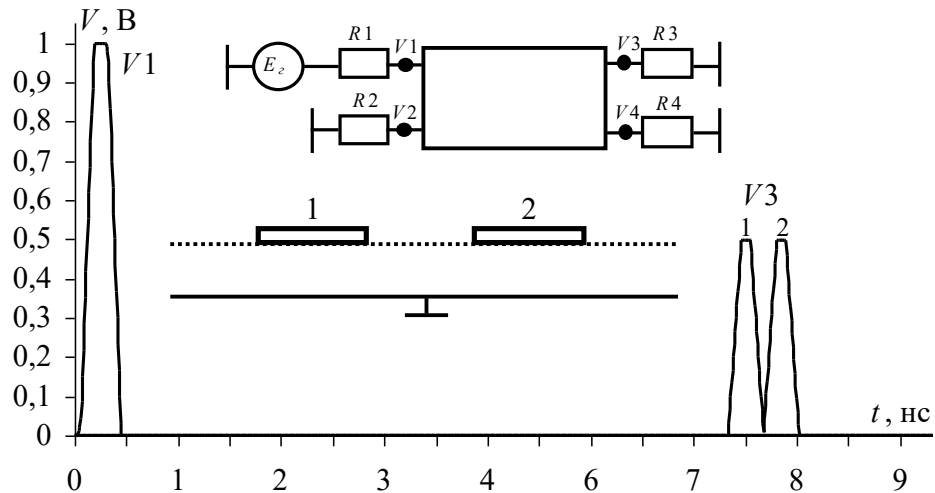


Рисунок 1.1 – Разложение импульса в одиночном отрезке связанной линии

Устройства защиты, работа которых основана на принципе модальной фильтрации, лишены недостатков традиционных устройств защиты, а также имеют ряд преимуществ (отсутствие полупроводниковых компонентов, как следствие высокая радиационная стойкость, долгий срок службы, функционирование при высоких напряжениях, малые габариты и низкая стоимость) [43]. К таким устройствам относят МФ [41] и меандровые линии [44]. Простейшие из них основаны на отрезке связанных линий. Для совершенствования защиты РЭС от СКИ может применяться каскадное соединение [42] таких отрезков (рисунок 1.2).

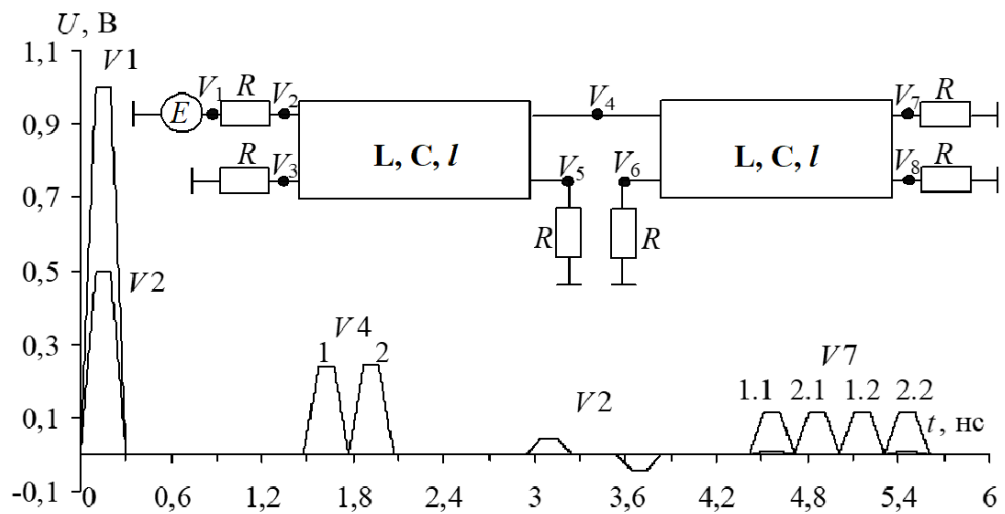


Рисунок 1.2 – Разложение импульса в двух отрезках связанных линий

В этом случае каждый импульс разложения последовательно делится еще на 2 импульса с меньшей амплитудой. В результате, подключение к отрезку еще одного отрезка приводит к разложению импульса 1 на импульсы 1.1 и 1.2, аналогично с импульсом 2, так что получается последовательность импульсов 1.1, 1.2, 2.1, 2.2 (рисунок 1.2).

Последовательное соединение n отрезков приведет при определенных условиях к разложению на 2^n импульсов, что возможно при последовательном удвоении или укорочении длин отрезков связанных линий. Таким образом, каскадное соединение импульсов приводит к улучшению ослабления МФ, однако при этом увеличивается длина структуры, что приводит к увеличению габаритов защитного устройства.

Как отмечалось ранее, МФ могут быть реализованы в виде как ПП, так и в виде кабельных структур. Исполнения на основе ПП характеризуются широким разнообразием конструктивных вариантов, включая: структуры на основе полосковых и микрополосковых линий (МПЛ), линии зеркально-симметричные, многослойные и другие. Кабельные структуры, в свою очередь, делятся на круглые и плоские кабели. Каждый из указанных типов может иметь различные конфигурации с вариативным количеством проводников и их взаимным расположением.

МФ на основе ПП были широко исследованы ранее в ряде работ [45–49]. В [50] исследован отрезок многопроводной МПЛ в части искажений сигнала в его активном проводнике, возникающих из-за различия задержек мод. В [51] предложено устройство защиты от импульсных сигналов, состоящее из трех параллельных проводников с равными расстояниями между ними, находящихся в диэлектрическом заполнении. Из [52] известен МФ, конструкция которого представляет собой три проводника в диэлектрическом заполнении. В [53] приведена 2-проводная МПЛ с дополнительным диэлектриком, которая представляет собой два в поперечном сечении одинаковых и прямоугольных проводника, расположенных на одном слое подложки ПП, причем между двумя проводниками располагается дополнительный диэлектрический материал, диэлектрическая проницаемость которого больше, чем у подложки. В [54] приведена 2-проводная обращенная полосковая линия, в которой используемая ПП на основе стеклотекстолита с двумя проводниками на одном слое спрессована с металлической пластиной через диэлектрик (изолирующий слой). МФ из [55] представляет собой 4 в поперечном сечении прямоугольных проводника на диэлектрическом слое, причем первый расположен на одной его стороне, а три других – на обратной. Кроме этого, известны различные виды МФ на основе гибких печатных кабелей, которые отличаются характеристиками материала изготовления [56].

Работа [57] посвящена особенностям зеркально-симметричных структур МФ. Особое внимание уделяется улучшению характеристик таких МФ посредством оптимизации по одному

и нескольким критериям [58–62]. Помимо этого, известны и другие работы, посвящённые зеркально-симметричным МФ. Так, в [63, 64] приведен МФ, который представляет собой 5 в поперечном сечении одинаковых и прямоугольных проводников на диэлектрическом слое, причем первый и второй проводники расположены на одной его стороне, два дополнительных проводника расположены зеркально-симметрично относительно первого и второго проводников на обратной стороне диэлектрического слоя, пятый проводник расположен в диэлектрическом слое на равном расстоянии от внешних проводников.

В отличие от МФ на основе ПП эффект модального разложения в кабелях исследован достаточно мало. Так, Саотин И.Е. в работе [42] рассматривает три варианта подключения к кабелю генератора импульса в форме трапеции при двух вариантах выбора опорного проводника. Исследование выполнялось на примере плоских кабельных структур АПУНП, ТРП–3×0,5 и RJ-12. В результате выявлено, что для 3-проводных кабелей наблюдается явление модального разложения при расположении опорного проводника посередине. Кроме того, в этой же работе получены важные для модального разложения электрические параметры широко применяемых плоских кабелей, среди которых кабели марок ВВГ и ПУГНП с разным диаметром проводящих жил.

В работе [65] впервые исследована возможность улучшения защитных характеристик МФ на основе круглых кабелей за счет их каскадного соединения с различной геометрической конфигурацией. Рассмотрены трехпроводные МФ на основе круглых кабелей и МПЛ и 4 варианта каскадного соединения из двух и трех отрезков таких МФ. Для них выполнены имитационное моделирование временного отклика на воздействие СКИ и параметрическая оптимизация. Достигнуто ослабление СКИ в 25,5 раза. Кроме того, известен ряд работ по исследованию эффекта модального разложения в круглых кабельных структурах [66, 67], а также оптимизации таких структур посредством ЭП в диапазоне реальных геометрических и электрофизических параметров. Рассмотрен ряд структур МФ с 2–4 проводниками в защитном экране и без него. Проведена параметрическая оптимизация по амплитудному и временному критериям с целью получения полной декомпозиции СКИ. В результате во всех структурах достигнут максимальный коэффициент затухания в 3,7 раза.

Таким образом, несмотря на наличие отдельных исследований, тема модальной фильтрации в кабельных структурах остаётся недостаточно разработанной. Учитывая их широкую распространённость, технологическую доступность, большую длину и подтверждённую возможность к реализации эффекта модального разложения, кабельные МФ требуют дальнейшего комплексного анализа.

1.3 Моделирование структур с модальным разложением

Моделирование МФ, как правило, выполняется в системах электродинамического и квазистатического анализа, основанных на различных численных методах (метод моментов, конечных элементов и др.), таких как CST Studio Suite [68], ANSYS [69], TUSUR.EMC [70]. При электродинамическом (полноволновом) моделировании осуществляется численное решение уравнений Максвелла, с учётом всех возможных типов волн. Это обеспечивает высокую точность расчётов, но сопровождается значительными вычислительными затратами, даже при анализе простых структур. В этой связи данный подход, как правило, применяется для моделирования устройств, работающих на высоких частотах – в диапазоне десятков гигагерц.

При моделировании с помощью квазистатического подхода допускается, что в линии происходит распространение только поперечной T -волны, в то время как высшие типы волн не учитываются. Этот подход можно использовать при моделировании полосковых линий, поперечные размеры которых малы по сравнению с длиной волны [71, 72]. Описание волновых процессов в квазистатическом подходе основано на решении телеграфных уравнений, к которым сводятся уравнения Максвелла. Решение таких уравнений менее затратно, а точность, обеспечиваемая при таком подходе, приемлема даже для решения сложных задач.

Такой подход реализован в системе квазистатического анализа TUSUR.EMC, которая базируется на методе моментов. Она предназначена для компьютерного моделирования различных электромагнитных задач, включая задачи ЭМС. Система TUSUR.EMC включает следующие модули [73]: вычислительные для двумерных и трехмерных структур проводников и диэлектриков с произвольными границами (MOM2D, MOM3D), трехмерных проводных структур (MOMW); оптимизации с помощью генетических алгоритмов (GA) и эволюционных стратегий (ES); утилит (UTIL); интерпретации инфиксных выражений (INFIX) и др. Отдельного внимания заслуживает модуль субмодуль анимированной динамической визуализации «DynaVis», основанный на алгоритме поиска в глубину GoThrough [74], с помощью которого можно отследить поведение помехи в процессе прохождения по линии.

Так, моделирование МФ в системе TUSUR.EMC начинается с построения поперечного сечения структуры. В процессе построения пользователь имеет возможность задавать геометрические параметры в виде переменных, что обеспечивает удобство при моделировании сложных структур с взаимозависимыми элементами, а также существенно упрощает процесс алгоритмической оптимизации. Далее задаются электрофизические параметры МФ: диэлектрические и магнитные характеристики используемых материалов диэлектриков. Также вводятся параметры схемной модели: нагрузки, источники и др.

Из конкретных значений параметров вычисляются матрицы погонных коэффициентов электростатической (C) и электромагнитной (L) индукции. Далее всё определяется произведением матриц L и C и его собственными значениями и векторами. На основе данных матриц вычисляются вторичные характеристики: матрица характеристических импедансов Z_C , погонные задержки мод τ_i , матрицы погонных сопротивлений R (для учета потерь в проводниках) и проводимостей G (для учета потерь в диэлектриках). На основе этих матриц, после задания параметров линии передачи и воздействующего сигнала, строятся отклики во временной или частотной области. Указанное широко известно из теории многопроводных линий передачи, а краткое описание этого с формулами приведено, например, в [75], где также детально описано вычисление временного отклика на воздействие импульса.

1.4 Критерии и алгоритмы оптимизации структур с модальным разложением

На этапе проектирования защитных структур важную роль играет выбор оптимальных значений геометрических и электрофизических параметров (в основном, из-за высоких требований, предъявляемых к устройству). При разработке помехозащитных устройств традиционно применяются различные методы и алгоритмы их оптимизации.

Поскольку диапазон возможных значений для различных параметров МФ довольно широк, как и число оптимизируемых параметров, полный перебор всех возможных комбинаций (число которых может достигать до десятков тысяч и выше) невозможен. Поэтому для поиска оптимальных значений геометрических и электрофизических параметров применяются различные методы оптимизации: как локальные, так и глобальные [76, 77]. Глобальные методы оптимизации определяют фактический экстремум целевой функции (ЦФ) во всей области, тогда как локальные касаются лишь поиска одного из них. Между тем глобальные алгоритмы предпочтительнее ввиду большого числа одновременно оптимизируемых параметров и их диапазонов. Например, даже при определении оптимального соотношения параметров ПП на основе обычной связанной МПЛ имеется ряд возможных оптимизируемых параметров со своими диапазонами. В широком пространстве параметров может быть несколько оптимальных комбинаций, определяющих глобальный экстремум искомой ЦФ. По этой причине, при оптимизации МФ, один или несколько параметров принимаются фиксированными для определения единственного экстремума ЦФ в заданном диапазоне. При этом оптимизация МФ осложняется тем, что зависимость значений оптимизируемых параметров от поведения ЦФ носит нелинейный характер.

1.4.1 Критерии оптимизации

Требуемые характеристики МФ, в свою очередь, описываются задают критерии оптимизации, формирующие общую ЦФ. Например, к любому МФ могут одновременно предъявляться требования по амплитудным и временным характеристикам, а также согласованию с трактом, массогабаритным и стоимостным [78]. Это обостряет необходимость использования ЦФ, объединяющих в себе несколько критериев оптимизации. Поэтому корректная оптимизация МФ является непростой задачей. Далее рассмотрим каждый из перечисленных критериев подробнее.

1.4.1.1 Амплитудный

Наиболее важными критериями оптимизации МФ являются амплитудные [79]. Для защиты от помех актуален анализ зависимости $U(t)$ на выходе МФ. Поэтому рассмотрим амплитудные критерии во временной области.

На основе $U(t)$ сформулированы 5 норм, используемых для оценки эффективности воздействия сигнала помехи на различное (по специфике реакции на воздействие) оборудование [12]. Расчет N -норм основан на применении математических операторов ко всей форме сигнала (таблица 1.1).

Таблица 1.1 – Описание и применение N -норм

	Наименование	Выражение	Применение
N_1	Пиковое значение (абсолютное)	$ U(t) _{\max}$	Сбой схемы / электрический пробой / дуговые эффекты
N_2	Пиковая (абсолютная) производная	$\left \frac{dU(t)}{dt} \right _{\max}$	Искрение компонента / сбой схемы
N_3	Пиковый (абсолютный) импульс	$\left \int_0^t U(t) dt \right _{\max}$	Диэлектрический пробой (если U обозначает поле E)
N_4	Выпрямленный общий импульс	$\int_0^\infty U(t) dt$	Повреждение оборудования
N_5	Квадратный корень интеграла действия	$\left\{ \int_0^\infty U(t) ^2 dt \right\}^{\frac{1}{2}}$	Выгорание компонента

Используя эти нормы, можно сформулировать выражения для f_i и K_i .

1. Для сбоя схемы, а также электрического или дугового пробоя важен максимальный модуль $U(t)$:

$$f_1 = \max |U(t)|, \quad K_1 = \max |E(t)|. \quad (1.3)$$

2. Для искрения, а также сбоя схемы, важен максимальный модуль скорости изменения $U(t)$:

$$f_2 = \max \left| \frac{\partial U(t)}{\partial t} \right|, \quad K_2 = \max \left| \frac{\partial E(t)}{\partial t} \right|. \quad (1.4)$$

3. Для пробоя диэлектрика важен максимальный модуль интеграла от $U(t)$:

$$f_3 = \max \left| \int_0^t U(t) dt \right|, \quad K_3 = \max \left| \int_0^t E(t) dt \right|. \quad (1.5)$$

4. Для повреждения аппаратуры важно значение интеграла от модуля $U(t)$:

$$f_4 = \int_0^\infty |U(t)| dt, \quad K_4 = \int_0^\infty |E(t)| dt. \quad (1.6)$$

5. Для выгорания компонентов важно значение квадратного корня интеграла от квадрата модуля $U(t)$:

$$f_5 = \left\{ \int_0^\infty |U(t)|^2 dt \right\}^{\frac{1}{2}}, \quad K_5 = \left\{ \int_0^\infty |E(t)|^2 dt \right\}^{\frac{1}{2}}. \quad (1.7)$$

1.4.1.2 Временные

Временные критерии важны для предотвращения наложения импульсов, увеличивающего максимальное значение напряжения ($U_{\max}$) на выходе МФ с ростом длительности воздействующей помехи. В отличие от амплитудных, временные критерии могут не требовать затратного вычисления отклика, поскольку для них достаточно вычислить лишь τ_i . Можно выделить несколько временных критериев. Будем различать диапазонно-временные и интервально-временные критерии.

Диапазонно-временные критерии

Диапазонно-временные критерии связаны с расширением временного диапазона импульсов разложения на выходе МФ. Эти критерии важны для роста максимальной длительности воздействующей помехи, которая будет полностью разлагаться. Первый устремляет наименьшей из погонных задержек ($\tau_{\min}$) к минимально возможной, т.е. равной скорости света в вакууме, а второй – наибольшей ($\tau_{\max}$) к максимально возможному, т.е. определяемой скоростью света в диэлектрике МФ с максимальной значением относительной диэлектрической проницаемостью ($\epsilon_{r\max}$).

1. Для первого диапазонно-временного критерия

$$f_6 = \tau_{\min} - \frac{1}{c}, \quad K_6 = \frac{\sqrt{\epsilon_{r\max}} - 1}{c}. \quad (1.8)$$

2. Для второго диапазонно-временного критерия

$$f_7 = \frac{\sqrt{\epsilon_r}}{c} - \tau_{\max}, \quad K_7 = \frac{\sqrt{\epsilon_{r\max}} - 1}{c}. \quad (1.9)$$

Эти критерии естественно использовать совместно. Они применимы для МФ с любым числом проводников N .

Интервально-временной критерий

Этот критерий важен при $N > 2$. Он применяется для выравнивания временных интервалов между импульсами на выходе МФ, что увеличит длительность воздействующей помехи, которая будет разлагаться на выходе МФ полностью. Для упорядоченных по возрастанию значений τ_i , на основе отклонения текущих τ_i для промежуточных мод от τ_i при равномерных временных интервалах между импульсами, получено

$$f_8 = \max |\tau_i - (\tau_{\min} + (i-1)\Delta)|, i = 2, \dots, N-1, K_8 = \frac{\sqrt{\varepsilon_{r\max}} - 1}{c}. \quad (1.10)$$

где

$$\Delta = (\tau_{\max} - \tau_{\min}) / (N-1). \quad (1.11)$$

1.4.1.3 Согласование с трактом

Одним из важных критериев при оптимизации МФ является критерий согласования. Он важен для минимизации отражений полезных высокочастотных сигналов от входа МФ. Известно условие согласования двух связанных линий сопротивлениями на их концах со значением R равным среднему геометрическому значению импедансов четной и нечетной мод [80]:

$$R = \sqrt{Z_e Z_o}. \quad (1.12)$$

В многопроводной линии передач (МПЛП) количество распространяющихся мод равно количеству проводников, не считая опорного. Из собственных значений матрицы импедансов МПЛ можно определить импедансы мод. Последующие этапы определения условия согласования, возможны на основе теории многопроводных линий передачи, например, на основе работы [81], но требуют проработки. Между тем, по аналогии с согласованной одиночной линией передачи, для согласования МПЛП с трактом можно использовать условие равенства амплитуды сигнала в начале линии $U_{IN}(t)$ половине амплитуды ЭДС $E(t)$. Тогда после упрощения получим ЦФ и нормировочный коэффициент для критерия согласования в виде

$$f_9 = |\max(E(t)) - 2 \max(U_{IN}(t))|, K_9 = \max|E(t)|. \quad (1.13)$$

Данный критерий естественно использовать при $N > 2$. Однако он требует вычисления отклика в начале линии.

1.4.1.4 Массогабаритный

Как было отмечено ранее, в качестве критериев оптимизации могут использоваться самые различные условия. Однако, при оптимизации МФ на основе полосковых линий,

наиболее значимыми являются амплитудные, временные, массогабаритный, а также стоимостной критерии. Далее рассмотрена формулировка массогабаритного критерия для снижения массы и габаритов МФ.

Далее рассмотрен критерий применительно к ПП (рисунок 1.3):

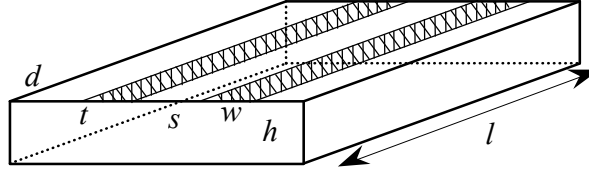


Рисунок 1.3 – Вид макета ПП

Масса вычисляется

$$m = \rho_m V, \quad (1.14)$$

где ρ_m – плотность материала, а V – объем изделия. Целесообразно применить формулу ко всей рассматриваемой структуре, например, для обычной связанной МПЛ, рассчитать массу всех проводников и диэлектрической подложки (при наличии покрывающего слоя, также и его).

Пусть имеется проводник (рисунок 1.4).

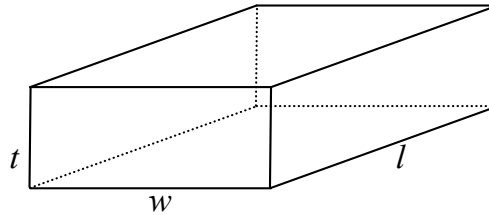


Рисунок 1.4 – Основные геометрические параметры проводника

Объем проводника будет рассчитываться как

$$V = lwt, \quad (1.15)$$

где для него l – длина, w – ширина и t – высота.

Тогда масса N одинаковых проводников

$$m = N\rho_c lwt, \quad (1.16)$$

а для более общего случая N различных проводников критерий принимает вид

$$f_i = \rho_c l \sum_{j=1}^N w_j t_j. \quad (1.17)$$

Объем диэлектрика(-ов) будет рассчитываться как

$$V = lh \left(2d + \sum_{j=1}^N w_j + \sum_{j=1}^{N-1} s_j \right), \quad (1.18)$$

где w_i и s_i – ширина и разнос i -го проводника.

Критерий для диэлектрика принимает вид

$$f_i = h\rho_d \left(2d + \sum_{j=1}^N w_j + \sum_{j=1}^{N-1} s_j \right). \quad (1.19)$$

Общий вид массогабаритного критерия:

$$F_i = M_i \frac{f_{10.1} + f_{10.2}}{K_{10.1} + K_{10.2}}, \quad (1.20)$$

где

$$f_{10.1} = \rho_c \sum_{j=1}^N w_j t_j, \quad K_{10.1} = N\rho_c w_{\max} t_{\max}. \quad (1.21)$$

$$f_{10.2} = h\rho_d \left(2d + \sum_{j=1}^N w_j + \sum_{j=1}^{N-1} s_j \right), \quad K_{10.2} = N\rho_d h_{\max} (2d_{\max} + w_{\max}). \quad (1.22)$$

1.4.1.5 Стоимостной

Далее рассмотрена реализация стоимостного критерия, оптимизация по которому снизит финансовые затраты на изготовление итоговой ПП или устройства на её основе. Так, существуют различные факторы формирования цены, применимые к изготовлению ПП, которые можно учесть. Они поделены на технические и коммерческие. По степени влияния на стоимость изготовления ПП технические факторы делятся на оказывающие влияние в большей, средней и малой степенях [82].

В большей степени влияют материал диэлектрика, число слоев; циклы сверления/металлизации. В средней степени влияют проводник/зазор, диаметр и число отверстий, толщина покрытия печатных контактов гальваническим золотом, толщина ПП и медной фольги, жесткость допусков на параметры платы. В малой степени влияют: параметры шелкографии (цвет, количество символов, толщина линий, шрифт); карбоновое покрытие; паяльная маска; тип покрытия контактных площадок.

К коммерческим факторам относятся: срочность производства и объём заказа. Очевидно, что рассмотрение коммерческих факторов нецелесообразно, поскольку они не учитываются на этапе моделирования. Применительно к построению геометрических моделей ПП для стоимостного критерия важны следующие факторы:

1. Значение ε_r .

В зависимости от выбора материала подложки (FR-4, анодированный алюминий, Rogers и др.), итоговая стоимость ПП может сильно варьироваться (например, от 2 до 15 тыс. руб. за ПП). FR-4 является наиболее бюджетным и распространенным материалом ПП, а значение его ε_r на частоте 1 МГц варьируется в среднем от 3,8 до 5,5. В результате при FR-4 важно обеспечивать ε_r в указанном диапазоне (за исключением случаев, когда по техническому заданию требуется конкретный диэлектрик, отличный от FR-4).

2. Нижняя граница ширины проводника/зазора между проводниками.

В зависимости от компании-изготовителя, для различной толщины проводника (например, 18, 35, 70 и 105 мкм) существует своя нижняя граница ширины проводников либо зазора между ними (например, 150, 200, 300 и 350 мкм). Между тем существует возможность уменьшения нижней границы ширины проводников либо зазора между ними до 100 мкм, а в некоторых случаях до 75 мкм. Однако при этом добавляются 20–40% к базовой цене. В результате, для стоимостного критерия важно устанавливать нижнюю границу диапазона не менее 150 и 200 мкм (для толщин проводников 18 и 35 мкм) и не менее 300 и 350 мкм (для толщин проводников 70 и 105 мкм).

3. Отклонение значений параметров от стандартных.

Наиболее распространенные толщины проводников – 18, 35, 70 и 105 мкм, а подложки – 500, 1000, 1500 и 2000 мкм. Менее распространены, но доступны толщины проводников – 5, 9, 12, 50, 100, 200, 400 мкм, а подложки – 200, 350, 800, 2400 мкм. Отклонения от них при изготовлении может повлечь за собой небольшой рост итоговой стоимости ПП.

В результате, для стоимостного критерия при оптимизации, достаточно обеспечить должные границы диапазонов варьируемых параметров. Между тем ранее показано, что для временных критериев оптимизации важно уменьшать зазор между активным и пассивными проводниками (вплоть до 1 мкм). Однако ввиду стоимостного критерия, при оптимизации многопроводных МФ, электрические и массогабаритные характеристики могут быть ухудшены по причине изменения границ диапазонов оптимизируемых параметров (например, при минимальном зазоре между проводниками 150–200 мкм).

1.4.2 Алгоритмы оптимизации

Как правило, на первом этапе разработки МФ, они оптимизируются посредством ЭП или эволюционных алгоритмов, например, генетическими алгоритмами (ГА) [83]. Выбор эволюционных алгоритмов в данном случае обусловлен наличием большого числа локальных экстремумов ЦФ, оптимизируемых параметров и их больших диапазонов, а также рядом критериев оптимизации, формирующих ЦФ и применяемых к МФ одновременно. Однако, помимо эволюционных, есть ряд иных потенциально пригодных для оптимизации МФ методов и классов алгоритмов, в том числе детерминированных и стохастических. Далее представлен обзор различных алгоритмов, пригодных для оптимизации структур с модальным разложением.

1.4.2.1 Генетический алгоритм

В общем случае, ГА – это алгоритм, позволяющий найти решение задач различной сложности через последовательный подбор и комбинирование искоемых параметров с

использованием механизмов, схожих с биологической эволюцией. Он воплощает представления о дарвиновской эволюции на основе генерации, тестирования и отбора наиболее жизнеспособных особей [84]. Основными понятиями при оптимизации с помощью ГА являются: особь (или набор хромосом – каждое возможное решение задачи оптимизации), поколение (набор особей в популяции), скрещивание (также известное как кроссинговер или кроссовер – генетический оператор, благодаря которому хромосомы обмениваются своими частями), мутация (генетический оператор, из-за которого происходит случайное изменение одной или нескольких аллелей в хромосоме, например, 1001011 изменяется на 1000011). Принцип работы ГА упрощенно проиллюстрирован на рисунке 1.5. Основные её этапы:

1. Генерация начальной популяции из n хромосом. Начальная популяция состоит из n хромосом, где каждая хромосома представляет собой потенциальное решение задачи оптимизации. Пусть популяция в начальный момент времени обозначается как

$$P^{(0)} = \{C_1, C_2, \dots, C_n\}, \quad (1.23)$$

где C_i – i -я хромосома.

2. Вычисление функции пригодности. Для каждой хромосомы C_i вычисляется ее функция пригодности (или ЦФ):

$$f_i = \text{fitness}(C_i). \quad (1.24)$$

3. Выбор пары родителей. Отбирается пара хромосом-родителей на основе их пригодности. Выбранные родители обозначаются как

$$P_{\text{parents}} = \{C_{\text{parent1}}, C_{\text{parent2}}\}. \quad (1.25)$$

4. Скрещивание двух родителей. Выполняется операция скрещивания (кроссинговера) с определенной вероятностью P_c . Результат скрещивания (потомки) обозначается, например, $C_{\text{offspring1}}$ и $C_{\text{offspring2}}$.

5. Мутации потомков.

Выполняется операция мутации с определенной вероятностью P_m для каждого потомка:

$$\begin{aligned} C_{\text{offspring1}} &= \text{mutation}(C_{\text{offspring1}}), \\ C_{\text{offspring2}} &= \text{mutation}(C_{\text{offspring2}}). \end{aligned} \quad (1.26)$$

6. Формирование нового поколения. Шаги 3–5 повторяются, пока не будет сгенерировано новое поколение популяции $P^{(t+1)}$ (заменяющее старые хромосомы новыми), которое будет содержать n хромосом:

$$P^{(t+1)} = P^{(t)} \setminus \{C_i, C_j\} \cup \{C_{\text{offspring1}}, C_{\text{offspring2}}\}. \quad (1.27)$$

7. Шаги 2–6 повторяются до достижения критерия останова (КО).

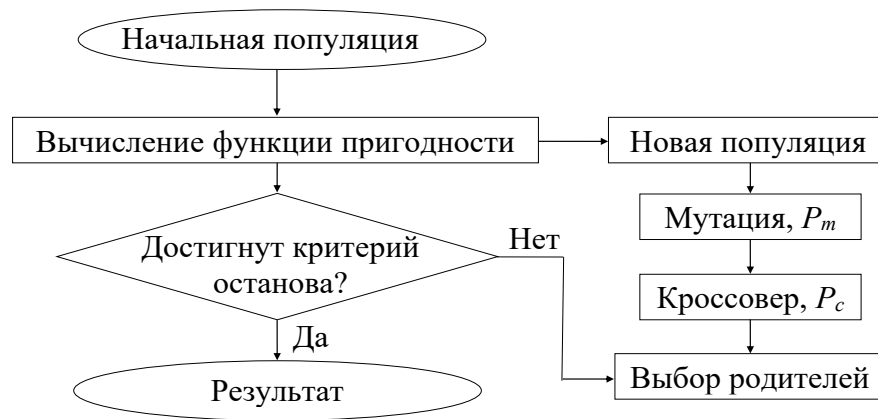


Рисунок 1.5 – Принцип работы ГА [85]

Отразим основные этапы при оптимизации МФ посредством ГА:

1. Задать оптимизируемые параметры поперечного сечения.

2. Задать параметры ГА, с которыми будет выполняться дальнейшая оптимизация: коэффициенты кроссовера и мутации. Задать диапазоны изменения оптимизируемых параметров. Число особей в одном поколении образует популяцию. Выбор числа особей и поколений осуществляется в зависимости от сложности оптимизируемой структуры, числа оптимизируемых параметров, а также ЦФ. При оптимизации происходит последовательный рост числа особей и поколений (для лучшего результата важно, чтобы число поколений не превышало число особей) до тех пор, пока несколько последовательных запусков не станут давать близкие результаты ЦФ, т.е. пока не будет достигнута сходимость результатов. Чтобы понять, из каких соображений выбираются генетические операторы кроссовера и мутации, нужно знать о том, как формируются особи: при работе ГА каждый оптимизируемый параметр кодируется строкой битов, а особью называют строку, являющуюся конкатенацией строк упорядоченного набора параметров (рисунок 1.6). Что касается оператора кроссовера (или этапа скрещивания), то это процесс соединения «родительских» строк с помощью точки раздела (которая устанавливается при настройке алгоритма, по умолчанию 0,5 или 50%), при котором «потомки» получаются путём обмена отсечёнными частями (рисунок 1.7а). К полученному в результате скрещивания (а до этого и отбора) новому поколению применяется оператор мутации, необходимый для «выбивания» популяции из локального экстремума и способствующий защите от преждевременной сходимости. При этом каждый бит отдельной особи популяции с некоторой вероятностью (которая обычно очень мала и, по умолчанию, задается как 0,1 или 1%) инвертируется (рисунок 1.7б).

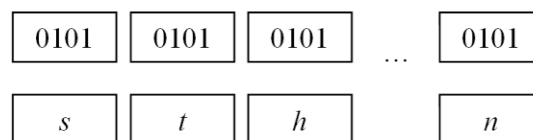


Рисунок 1.6 – Кодирование битовой последовательностью



Рисунок 1.7 – Работа операторов кроссовера (а) и мутации (б)

3. На последнем этапе происходит процесс оптимизации до достижения сходимости. Помимо очевидных преимуществ ГА перед ЭП можно выделить его универсальность, заключающуюся в том, что от конкретной задачи зависят только ЦФ и кодирование решений. Остальные шаги для любых задач выполняются одинаково. Кроме этого, для ускорения вычислений и получения более точных результатов рекомендуется последовательная оптимизация: сначала посредством ЭП, а затем – ГА. Такой подход призван сузить диапазон оптимизируемых параметров, благодаря чему решение возможно найти не только быстрее, но и точнее.

1.4.2.2 Эволюционные стратегии

Эволюционные стратегии (ЭС) – это метод, созданный в качестве методов решения оптимизационных задач и, по аналогии с ГА, основанный на принципах природной эволюции [86]. Из-за схожести двух алгоритмов, естественно отразить их различия, как при оптимизации, так и при настройке.

Первое различие заключается в способе представления особей. ЭС оперируют векторами действительных чисел

$$x_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in}), \quad (1.28)$$

где x_i представляет особь, и n – размерность вектора, тогда как ГА – бинарными (или иногда целочисленными) векторами

$$b_i = (b_{i1}, b_{i2}, \dots, b_{in}), \quad (1.29)$$

где b_i представляет бинарный вектор, где каждый бит b_{ij} может быть 0 или 1.

Второе различие между ЭС и ГА кроется в организации процесса отбора (селекции). При реализации ЭС формируется промежуточная популяция, состоящая из всех «родителей» и некоторого числа «потомков», созданных в результате применения генетических операторов. С помощью отбора размер этой промежуточной популяции уменьшается до величины «родительской» популяции за счет исключения наименее приспособленных особей:

$$P^{(t+1)} = \text{SelectSurvivors}(\text{Merge}(P^{(t)}, \text{Offspring})), \quad (1.30)$$

где $P^{(t)}$ – текущая популяция, $P^{(t+1)}$ – новое поколение, SelectSurvivors – операция выбора выживших с уменьшением размера популяции до необходимого, а Merge – операция объединения популяции родителей и потомков. Сформированная таким образом популяция

образует очередное поколение. В ГА, напротив, предполагается, что в результате отбора из популяции «родителей» выбирается число особей, равное размерности исходной популяции, при этом некоторые (наиболее приспособленные) особи могут выбираться многократно. В то же время, менее приспособленные особи также имеют возможность оказаться в новой популяции. Однако шансы их выбора пропорциональны величине приспособленности особей.

ЭС в системе TUSUR.EMC обычно реализуются посредством подключения открытой библиотеки *barectmaes2* с алгоритмом на языке Python [87]. При настройке алгоритма, вначале указывается общее число вычислений (вместо отдельного задания числа особей и поколений), однако это не обязательно, поскольку без этого оптимизация будет выполняться до одного из критериев останова. Возможность задания диапазонов оптимизируемых параметров отсутствует, однако возможно устанавливать начальные точки отсчета, относительно которых, с определенным шагом (который также можно задавать), будут оптимизироваться параметры. Наконец, операторы кроссовера и мутации не требуют задания при настройке алгоритма, однако в процессе оптимизации адаптивно изменяются. Блок-схема классических ЭС представлена на рисунке 1.8.

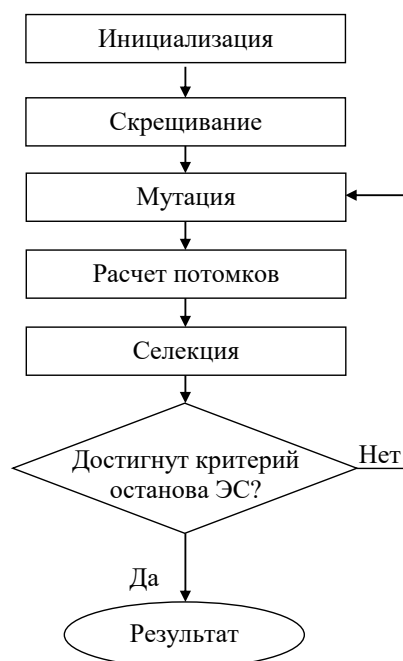


Рисунок 1.8 – Алгоритм работы классических ЭС

1.4.2.3 Случайный поиск

Случайный поиск (СП), также известный как метод Монте-Карло, представляет собой простой и общий численный метод решения задач оптимизации. Его основная идея заключается в использовании случайных чисел для выбора точек в пространстве параметров с целью поиска оптимального решения. Рассмотрим его этапы:

1. Инициализация. Выполняется генерация случайной точки x_0 в пространстве параметров, которую можно рассматривать как потенциальное решение задачи оптимизации:

$$x_0 = (x_{01}, x_{02}, \dots, x_{0n}). \quad (1.31)$$

2. Оценка. Значение ЦФ в данной точке вычисляется как

$$f(x_0) = f(x_{01}, x_{02}, \dots, x_{0n}), \quad (1.32)$$

где $f(x_0)$ – значение ЦФ в точке x_0 .

3. Сравнение. Сравнивается полученное значение ЦФ с текущим лучшим значением ЦФ (f_{best}).

4. Обновление. Если текущая точка дает лучшее решение, чем предыдущая наилучшая точка, то выполняется обновление лучшего результата и сохранение текущей точки как новой лучшей, т.е. $f_{\text{best}} = f(x_0)$.

5. Повторение. Шаги 1–4 повторяются определенное число раз или до достижения критерия останова.

К достоинствам СП можно отнести:

1. Простоту и универсальность. Алгоритм прост в реализации и применим к широкому спектру задач оптимизации без требования гладкости или дифференцируемости ЦФ.

2. Работу с шумными функциями. Алгоритм способен справляться с задачами, в которых ЦФ излишне зашумлена.

Недостатки СП:

1. Низкая эффективность в высокоразмерных пространствах, где число случайных точек, которые нужно сгенерировать для обеспечения адекватного покрытия, может быть чрезмерно высоким, что делает алгоритм неэффективным.

2. Отсутствие гарантии нахождения глобального оптимума. Поскольку алгоритм основан на случайном выборе точек, нет гарантии того, что он найдет глобальный экстремум. Он скорее будет сходиться к локальному экстремуму.

Таким образом, СП является полезным инструментом в определенных сценариях, особенно когда другие методы оптимизации сложны в применении. Однако его эффективность может сильно зависеть от конкретной задачи и особенностей ЦФ.

СП в системе TUSUR.EMC реализуется посредством подключения открытой библиотеки «random_s» с алгоритмом на языке Python [88, 89]. В качестве входных параметров алгоритм принимает число решений на одно вычисление, списки с минимальными и максимальными значениями (выступают в роли диапазонов изменения параметров), а также число вычислений. Как отмечалось ранее, при помощи данного алгоритма генерируются случайные значения в задаваемых пользователем диапазонах, после чего они подставляются в ЦФ. Результат заносятся в многомерный массив с данными одного типа (в numpy называется numpy.ndarray).

При дальнейших расчетах новый результат сравнивается с хранимым в массиве. Если новый лучше предыдущего, то он перезаписывается в массив, если нет – в массиве остается старое решение. В итоге алгоритм, останавливаясь по окончании заданного числа вычислений, выводит данные из массива с результатом. Алгоритм СП представлен на рисунке 1.9.

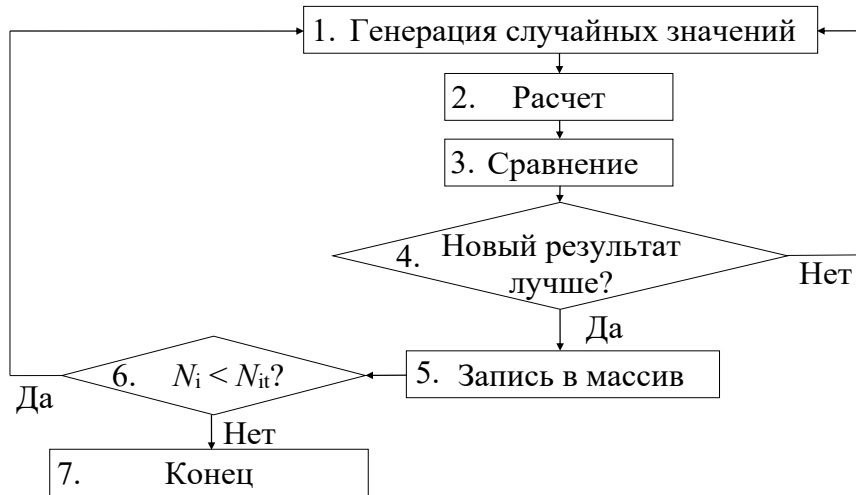


Рисунок 1.9 – Алгоритм СП

1.4.2.4 Алгоритм ветвей и границ

Алгоритма ВГ представлен на рисунке 1.10 [90, 91]. Алгоритм разделяет многомерное пространство поиска на заданное пользователем число подпространств N_{sp} (ветвей). Затем каждое значение N_{sp} подвергается оценке путем вычисления значений ЦФ. Наименее «перспективные» ветви пространства, определяемые на основе значений ЦФ, отсекаются.

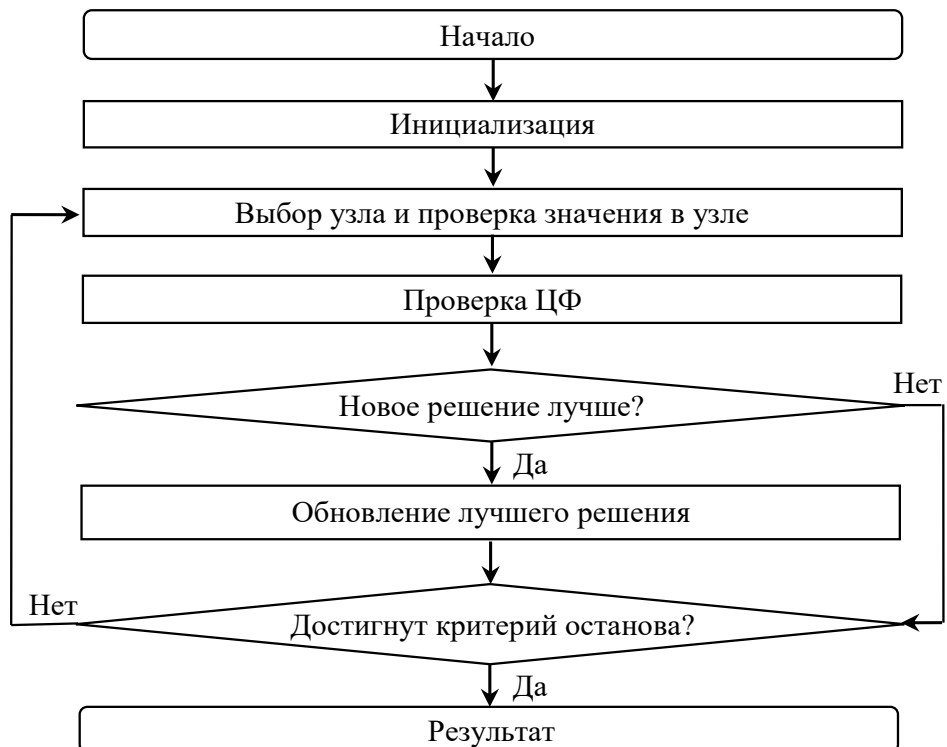


Рисунок 1.10 – Алгоритм ВГ

Это позволяет сосредоточить усилия на наиболее перспективных из них, что ускоряет сходимость алгоритма к оптимальному решению. В то же время, значение из N_{sp} , содержащее оптимальное решение на данной итерации, подвергается дальнейшему разделению на заданное ранее число подпространств N_{sp} . Процесс продолжается до выполнения одного из критериев останова (КО): разница между текущим оптимальным решением и лучшим решением меньше заданного значения точности, либо в пространстве поиска не найдены значения N_{sp} , ожидающие оценки.

1.4.2.5 Метод имитации отжига

Имитация отжига – это метод оптимизации, имитирующий процесс отжига металла [92, 93]. Он имитирует физический процесс отжига металла, где нагревание и постепенное охлаждение позволяют частицам (или атомам) достигнуть более устойчивого состояния. При работе алгоритм допускает временные изменения ЦФ в процессе оптимизации. Это делается с целью избежать попадания в локальные экстремумы, и дать алгоритму возможность лучше исследовать пространство параметров. Его этапы:

1. Инициализация. Выбирается случайная начальная точка x_0 в пространстве поиска параметров.
2. Задание параметров. Задаются параметры алгоритма, такие как температура (T) и коэффициент охлаждения (или плавления) ($0 < \alpha < 1$). Температура обычно берется высокой в начале процесса и постепенно уменьшается при работе алгоритма.
3. Оценка текущего состояния. Вычисляется ЦФ $f(x_0)$ в начальной точке.
4. Выбор новой точки. Генерируется случайное изменение Δx вокруг текущей точки x_0 и получается новая

$$x_{new} = x_0 + \Delta x. \quad (1.33)$$

5. Оценка нового состояния. Вычисляется ЦФ $f(x_{new})$ в новой точке.
6. Принятие решения. Если новая точка имеет меньшее значение ЦФ, чем текущая (т.е. $f(x_{new}) < f(x_0)$), она принимается как новая. В ином случае (т.е. $f(x_{new}) \geq f(x_0)$), принимаем ее с вероятностью

$$e^{-(f(x_{new}) - f(x_0))/T}. \quad (1.34)$$

Эта вероятность уменьшается с уменьшением T , что позволяет алгоритму иногда принимать худшие решения для избегания попадания в локальные экстремумы.

7. Обновление температуры. Температура уменьшается с использованием заранее заданного коэффициента охлаждения α как $T = \alpha T$.

8. Повторение. Шаги 4–7 повторяются, пока не будет достигнут КО.

Алгоритма ИО представлен на рисунке 1.11 [92, 93]. Он, как известно, отражает процесс отжига в металлургии, базируясь на идее контролируемого охлаждения материала после его нагрева, что способствует улучшению кристаллической структуры и снижению дефектов в материале. В контексте алгоритма ИО, процесс «отжига» аналогичен случайному поиску решений в пространстве поиска, где высокие температуры соответствуют большей степени случайности в принятии решений, а охлаждение системы обеспечивает снижение вероятности принятия неверного решения. Температурный режим в алгоритме ИО соответствует параметру, определяющему вероятность принятия нового решения, основанную на разнице между новым и текущим значением ЦФ, а также на текущей температуре системы. По мере уменьшения температуры, вероятность принятия худшего решения уменьшается, что приводит к сужению поискового пространства и сходимости алгоритма к экстремуму ЦФ.

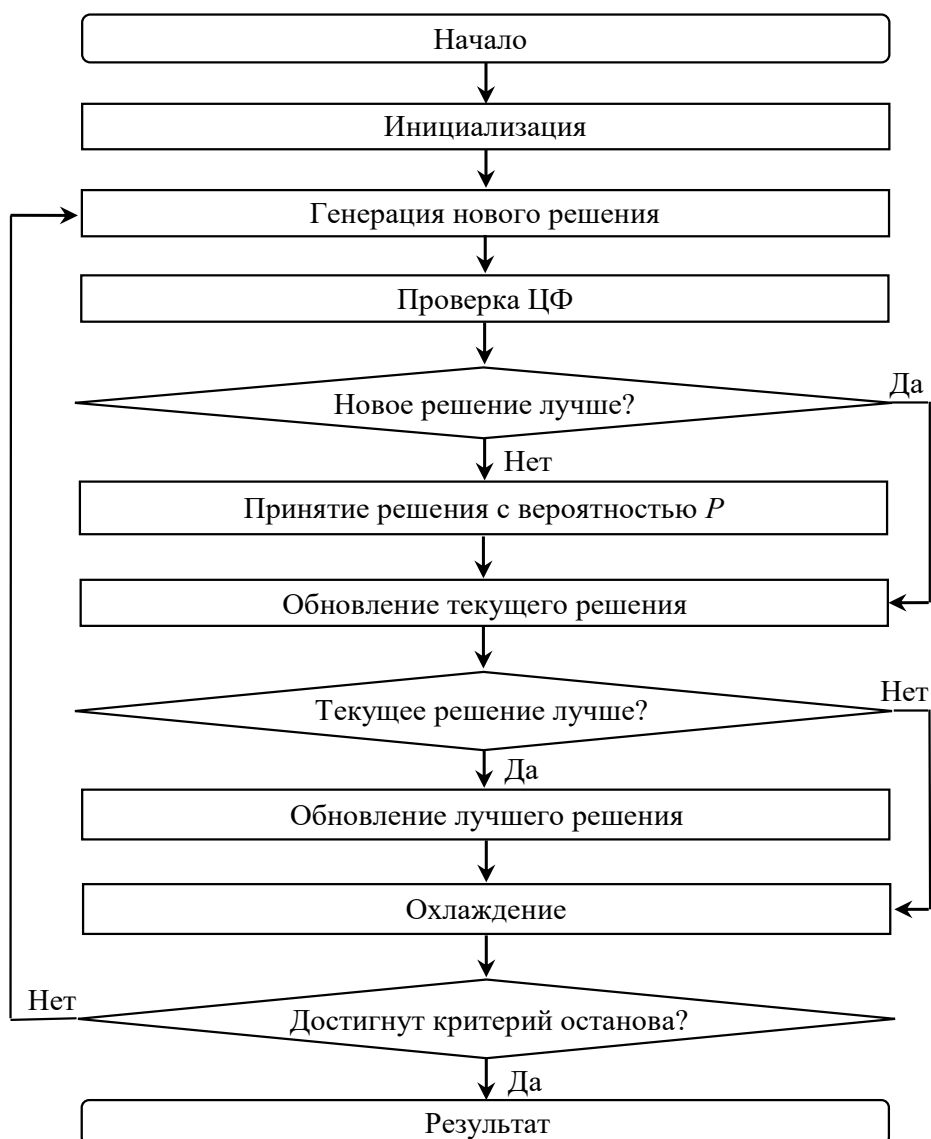


Рисунок 1.11 – Алгоритм ИО

Процесс охлаждения системы в алгоритме ИО обычно осуществляется согласно закону Гиббса, который определяет скорость охлаждения системы по определенному температурному распределению

$$P(\Delta E, T) = e^{-\frac{\Delta E}{T}}, \quad (1.35)$$

где ΔE – изменение энергии (разница в значениях ЦФ между текущим и новым решениями), T – текущая температура (контролируемая переменная, уменьшающаяся по мере работы алгоритма).

1.4.2.6 Симплициальная гомология

Симплициальная гомология для глобальной оптимизации (с англ. simplicial homology global optimization, SHGO) является детерминированным методом глобальной оптимизации [94]. Рассмотрим общую оптимизационную задачу вида

$$\min_x f(x), x \in \mathbb{R}^n, \quad (1.36)$$

где $f(x)$ – непрерывная вещественная ЦФ; x – вектор размерности n .

ЦФ $f(x)$ может быть как гладкой (имеет непрерывную производную на всем множестве определения), так и негладкой (имеет прерывные производные на всем множестве определения) в зависимости от используемого метода оптимизации. Предполагается, что n -мерный вектор x ограничен. Предполагается, что ЦФ $f(x)$ имеет конечное число локальных минимумов

$$f: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}. \quad (1.37)$$

Вводится функция $g(x)$, отображающая набор линейных ограничений для вектора x

$$g: [l, u]^n \rightarrow \mathbb{R}^m \quad (1.38)$$

Например, если для каждой переменной вектора x реализованы нижняя и верхние границы l_i и u_i , то имеется изначально определенный гиперпрямоугольник

$$x \in \Omega \subseteq [l, u]^n = [l_1, u_1] \times [l_1, u_1] \times \dots \times [l_n, u_n] \subseteq \mathbb{R}^n, \quad (1.39)$$

где Ω – ограниченное допустимое подмножество, исключаяющее точки за пределами границ и ограничений:

$$\Omega = \{x \in [l, u]^n \mid g_i(x) \geq 0, \forall i = 1, \dots, m\}. \quad (1.40)$$

Определение 1. k -симплекс – это набор из $n + 1$ вершин в выпуклом (расположен по одну сторону от плоскости каждой своей грани) многограннике размерности n . Формально, если $n + 1$ точек это $n + 1$ стандартных базисных векторов для $\mathbb{R}^{n+1}$, тогда n -мерный k -симплекс представляет собой

$$S^n = \left\{ (v_1, \dots, v_{n+1}) \in \mathbb{R}^{n+1} \mid \sum_{i=1}^{n+1} v_i = 1, v_i \geq 0 \right\}. \quad (1.41)$$

Например, нульмерный симплекс – это точка, двумерный симплекс – это треугольник, трехмерный симплекс – это тетраэдр.

Определение 2. Симплициальный комплекс $\mathcal{H}$ – это множество $\mathcal{H}^0$ вершин вместе с множествами $\mathcal{H}^n$ n -симплексов, которые являются $(n+1)$ -элементами подмножеств $\mathcal{H}^0$. Единственным требованием является то, что каждое $(k+1)$ -элементное подмножество вершин n -симплекса в $\mathcal{H}^n$ является k -симплексом в $\mathcal{H}^k$. То есть, любые два симплекса либо вообще не имеют общей точки, либо пересекаются только по целой границе некоторой размерности, причем только по одной грани.

Определение 3. k -мерная цепь – это объединение симплексов. Например, нульмерная цепь – это набор вершин, одномерная цепь – это набор ребер, двумерная цепь – это набор треугольников. $C(\mathcal{H}^k)$ обозначает k -мерную цепь из k -симплексов. Вершина в $\mathcal{H}^0$ обозначается как v_i . Если v_i и v_j являются двумя конечными точками направленного ребра в $\mathcal{H}^1$ от v_i до v_j , то $\overline{v_i v_j}$ представляет ребро таким образом, что оно ограничено нульмерной цепью $\partial(\overline{v_i v_j}) = v_j - v_i$ и для ребра, направленного от v_j до v_i , имеем $\partial(-\overline{v_i v_j}) = v_i - v_j$. Симплексы более высокой размерности могут быть представлены и направлены аналогично. Например, треугольник, состоящий из трех вершин v_i, v_j, v_k , направленных как $\overline{v_i v_j v_k}$, имеет границу из направленных ребер $\partial(\overline{v_i v_j v_k}) = \overline{v_i v_j} + \overline{v_j v_k} + \overline{v_k v_i}$ (∂ – граничный оператор).

Определение 4. Цепь $c \in C_k$ называют *циклом*, если $\partial_k c = 0$, т.е. $c \in \text{Ker} \partial_k$ (здесь Ker обозначает ядро). Группу k -мерных циклов обозначают Z_k .

Определение 5. Цепь $c \in C_k$ называют *границей*, если $c = \partial_{k+1} c'$ для некоторой цепи $c' \in C_{k+1}$. Группу k -мерных границ обозначают B_k . Из равенства $\partial \partial = 0$ (теорема из теории гомологий [95]) следует, что $B_k \subset Z_k$.

Определение 6. Пусть дана группа $H_k(\mathcal{H}) = Z_k \setminus B_k$. Ее элементами служат классы эквивалентности циклов: циклы считаются эквивалентными, если их разность является границей; такие циклы называют *гомологичными*. Группу $H_k(\mathcal{H})$ называют группой k -мерных симплициальных гомологий комплекса $\mathcal{H}$.

Определение 7. Звезда вершины v_i $st(v_i)$ представляет собой множество точек Q таких, что каждый симплекс, содержащий множество Q , содержит v_i .

Алгоритм симплициальной гомологии состоит из 5 шагов:

1. Равномерная генерация точек выборки N в пределах заданных ограничений и ограниченного подмножества Ω , в котором строятся нульмерные цепи $\mathcal{H}^0$ -вершины симплексов.

2. Построение направленного симплициального комплекса $\mathcal{H}$ путем триангуляции вершин.

3. Построение минимизирующего множества $M \subset \mathcal{H}^0$ путем повторного использования леммы Шпернера [96].

4. Применение методов локальной оптимизации, используя начальные точки, определенные во множестве M , для поиска локальных экстремумов.

5. Определение глобального экстремума функции из множества найденных локальных экстремумов.

Определение 8. В результате триангуляции генерируется множество неориентированных ребер E . Множество направленных ребер $\mathcal{H}^1$ строится путем задания направления каждому ребру во множестве E . Вершина $v_i \in \mathcal{H}^0$ соединена с другой вершиной v_j ребром, содержащимся во множестве E . Ребру задается направление $\overrightarrow{v_i v_j}$, то есть от v_i к v_j , если $f(v_i) < f(v_j)$, так что $\partial(\overrightarrow{v_i v_j}) = v_j - v_i$. По аналогии, ребру задается направление $\overrightarrow{v_j v_i}$, то есть от v_j к v_i , если $f(v_i) > f(v_j)$, так что $\partial(\overrightarrow{v_j v_i}) = v_i - v_j$.

Определение 9. Вершина v_i симплициального комплекса $\mathcal{H}$ является *минимизирующей*, если каждое ребро, соединенное с v_i , направлено в сторону от v_i , то есть $\partial(\overrightarrow{v_i v_j}) = (v_{j \neq i} - v_i) \vee 0 \vee v_{j \neq i} \in \mathcal{H}^0$.

Гарантия нахождения стационарных точек ЦФ в подобластях вблизи точек минимизации определяется *теоремой*: для минимизирующей точки $v_i \in M \subset \mathcal{H}^0$ на поверхности непрерывной липшицево гладкой ЦФ (условие Липшица) f в ограниченном пространстве $\mathbb{R}^n$ и диапазоне $\mathbb{R}$, существует *хотя бы одна стационарная* точка в подобласти, определяемой $st(v_i)$. Данное условие останется инвариантным для негладких, не непрерывных и нелинейных ЦФ, при условии использования симплициального метода дискретизации (метод *simplicial*) [94].

Визуальная демонстрация аппроксимации симплициального комплекса $\mathcal{H}$ для функции двух переменных

$$\begin{aligned} f(x) &= -\sin(2x_1 - 0,5\pi) - 3\cos(x_2) - 0,5x_1, \\ x \in \Omega &= [0, 9] \times [-2,5, 2,5], \end{aligned} \quad (1.42)$$

приведена на рисунке 1.13. График функции в 3-мерной системе координат представлен на рисунке 1.12.

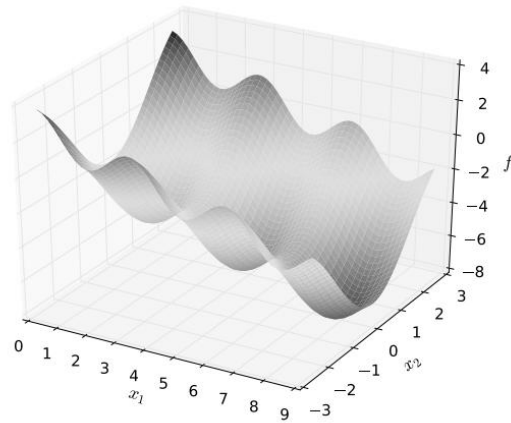


Рисунок 1.12 – График функции (1.42) в 3-мерной системе координат

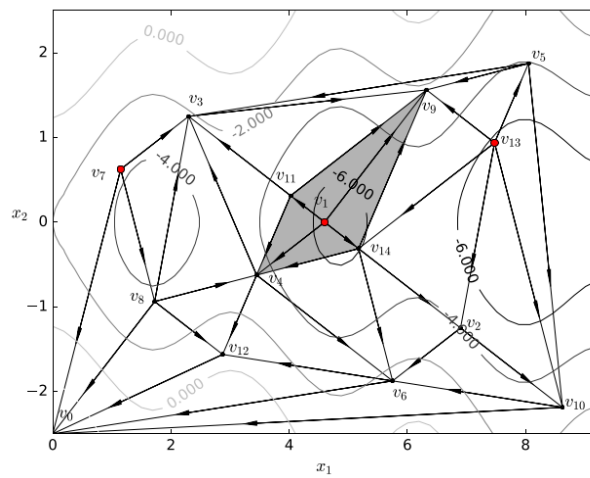


Рисунок 1.13 – Направленный симплициальный комплекс $\mathcal{H}$, образующий симплициальную аппроксимацию для функции (1.42) с числом выборок $N = 15$

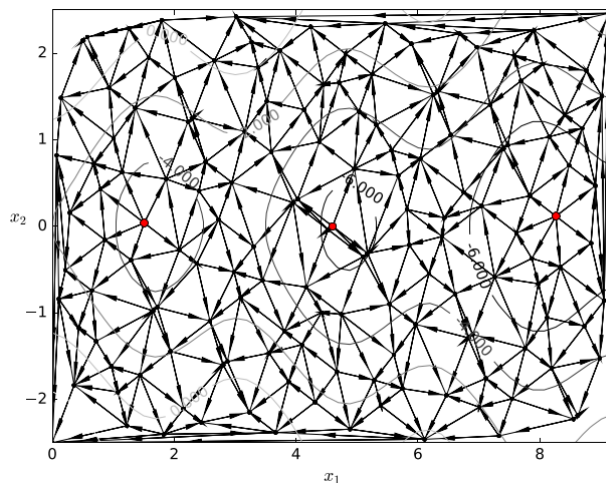


Рисунок 1.14 – Направленный комплекс $\mathcal{H}$, образующий симплициальную аппроксимацию для функции (1.42) с числом выборок $N = 150$

Из рисунка 1.13 видно, что в результате аппроксимации направленного симплициального комплекса $\mathcal{H}$ определены три минимизирующие вершины $\{v_1, v_7, v_{13}\}$. Закрашенная серым область отображает множество $st(v_1)$. Результат аппроксимации

направленного симплициального комплекса $\mathcal{H}$ функции (1.42) для числа выборок $N = 150$ приведен на рисунке 1.14. Из него видно, что хоть минимизирующие вершины и изменились (стали ближе к истинному локальному экстремуму), мощность множества $|M|$ остается неизменной. То есть, при *оптимальном* количестве точек выборки мощность множества $|M|$ перестанет расти с ростом N . Данное свойство алгоритма SHGO доказано в [94].

Таким образом, гарантированное определение глобального минимума в алгоритме SHGO обеспечивается путем оптимального выбора N . Повышение надежности определения глобального минимума также улучшается за счет использования детерминированных методов генерации точек, основанных на квазислучайных последовательностях с низким расхождением, таких как последовательность Соболя [97] или последовательность Хэлтона [98].

В системе TUSUR.EMC существует возможность использования SHGO с помощью библиотеки *Scipy* с открытым исходным кодом. Алгоритм в общем виде представлен на рисунке 1.15. В некоторых областях пространства поиска он может проявлять недостаточную чувствительность к окрестности локальных экстремумов ЦФ. По этой причине, используют дополнительный локальный метод оптимизации для уточнения результатов в областях локальных оптимумов или в случае, когда алгоритм SHGO приближается к глобальному экстремуму ЦФ. В качестве локального метода оптимизации использован последовательный алгоритм программирования методом наименьших квадратов SLSQP.

Как следует из рисунка 1.15, на шаге 1.1 происходит проверка выполнения КО. При известном значении глобального экстремума ЦФ может использоваться КО по точности [99]. В качестве других КО могут выступать максимально допустимые время вычисления t_{lim} или число вычислений N_{it} (задаваемых пользователем). На шаге 1.2 создается пустое множество P , которое включает в себя вершины v_i ($i=0, \dots, D-1$, где D – общее число вершин в симплексе, задаваемое пользователем), входящие в ограниченное подмножество Ψ . Далее равномерно генерируются точки выборки D в общем пространстве поиска в количестве $D-|P|$. Здесь $|P|$ – текущее число вершин во множестве P (например, если P содержит 5 вершин v_i , то длина множества P равна 5 или $|P|=5$). Пользователь может выбрать метод генерации точек самостоятельно, в данном случае использовался метод «*simplicial*», как наиболее подходящий для сложных задач. На шаге 1.3 рассчитываются вершины v_i во множестве P в пределах заданных пользователем ограничений области поиска (диапазонов) оптимизируемых параметров. Иначе говоря, рассчитывается ЦФ в диапазонах оптимизируемых параметров. Вершины v_i , выходящие за пределы подмножества Ψ , уничтожаются. На шаге 1.4 алгоритм проверяет выполнение условия $D > |P|$, что означает заполнение множества P вершинами v_i не менее, чем в количестве D . В случае выполнения данного условия алгоритм возвращается на

шаг 1.2. На шаге 1.5 строится направленный симплициальный комплекс H путем триангуляции вершин v_i с применением леммы Шпернера [96], пример которого показан на рисунке 1.13 (для произвольной функции с двумя аргументами x_1 и x_2). Далее, на шаге 1.6, строится минимизирующее множество $M \subset H$ путем повторного использования леммы Шпернера. Точки множества M на рисунке 1.14 отмечены красным цветом. После этого применяются методы локальной оптимизации (в данном случае – SLSQP), используя начальные точки, определенные во множестве M , для поиска оптимального решения внутри каждого симплекса с целью уточнения экстремумов ЦФ (шаг 1.7). Наконец, определяется глобальный экстремум ЦФ из множества найденных локальных [100].



Рисунок 1.15 – Алгоритм SHGO

1.5 Цель и задачи работы

В результате обзора выполнено тщательное исследование по существующим методам защиты от ПдЭМВ, в частности, структур с модальным разложением, их разновидностям, особенностям моделирования и оптимизации, включающим критерии и алгоритмы оптимизации. Несмотря на то, что существующие критерии оптимизации позволяют существенно усовершенствовать МФ, они не охватывают частотную область анализа, оценку целостности полезного сигнала, а также нетривиальные сценарии воздействия, при которых импульсная помеха может поступать в линию одновременно с двух направлений и локализоваться в центральных секциях. Учет таких факторов при проектировании и оптимизации МФ актуален. Кроме того, в предыдущих работах оптимизация МФ, как правило, ограничивалась применением ЭП и эволюционных алгоритмов, таких как ГА или ЭС. При этом возможности использования других классов методов, в частности стохастических (например, СП) и детерминированных (ВГ и SHGO), ранее почти не рассматривались. Между тем они обладают рядом преимуществ в задачах с большим числом параметров и могут быть результативно применены при проектировании и оптимизации МФ.

Также установлено, что кабельные МФ остаются мало исследованными как в части особенностей их параметрической оптимизации, так и экспериментальной верификации. В большинстве известных работ оптимизация МФ осуществлялась вручную с использованием ЭП, тогда как применение глобальных методов оптимизации к кабельным МФ практически не рассматривалось. Между тем они примечательны благодаря широкому распространению и доступности кабельной продукции, а также возможности их интеграции в существующие линии передачи без значительных конструктивных доработок.

Цель работы – улучшить характеристики полосковых и кабельных помехозащитных структур с модальным разложением за счёт использования алгоритмов глобальной оптимизации.

Для ее достижения надо решить следующие **задачи**:

1. Выполнить обзор существующих структур с модальным разложением, критериев и алгоритмов их оптимизации.
2. Выполнить многовариантный анализ и оптимизацию полосковых и кабельных МФ эвристическим поиском.
3. Разработать подход к параметрической оптимизации МФ на основе круглых кабелей.
4. Сформулировать новые критерии оптимизации, учитывающие временные и частотные характеристики, и апробировать их на полосковых МФ.

5. Разработать и апробировать алгоритм оптимизации, находящий глобальный экстремум целевой функции с высокой точностью за умеренное время.
6. Сравнить алгоритмы случайного поиска, ветвей и границ, имитации отжига, симплицальной гомологии при оптимизации модальных фильтров на основе полосковых и кабельных структур.
7. Дать рекомендации по глобальной оптимизации полосковых и кабельных МФ.
8. Разработать макеты кабельных МФ и выполнить их измерения.

2 МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ СТРУКТУР С МОДАЛЬНЫМ РАЗЛОЖЕНИЕМ

Здесь представлены результаты предварительного моделирования полосковых и кабельных защитных структур с модальным разложением. Рассмотрены МФ с различной геометрией поперечного сечения. Предложен подход к оптимизации МФ на основе круглого кабеля алгоритмами глобальной оптимизации [101, 102].

2.1 Полосковые модальные фильтры

Конфигурации МФ на основе полосковых структур наиболее распространены. Это обусловлено широкими возможностями их модернизации и оптимизации, а также гибкостью в адаптации под специфические требования, предъявляемых в технических заданиях. Рассмотрим подробнее два МФ: на основе 3-проводной МПЛ (МФ 1) и 2-проводной полосковой линии с лицевой связью (МФ 2). На рисунке 2.1 представлены поперечные сечения МФ 1 и МФ 2, соответственно, где w – ширина проводников, s_i – расстояния между проводниками, t – толщина проводников, h – толщина подложки, d – расстояние от края МФ до его ближайших проводников, а ϵ_r – относительная диэлектрическая проницаемость подложки. Эквивалентные схемы МФ представлены на рисунке 2.2, где l – длина линии, E – источник ЭДС, R_Γ – сопротивление источника, R_H – сопротивление нагрузки, R – сопротивления на концах проводников.

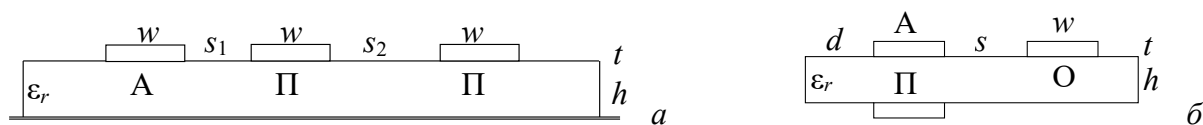


Рисунок 2.1 – Поперечные сечения МФ 1 (а) и МФ 2 (б)

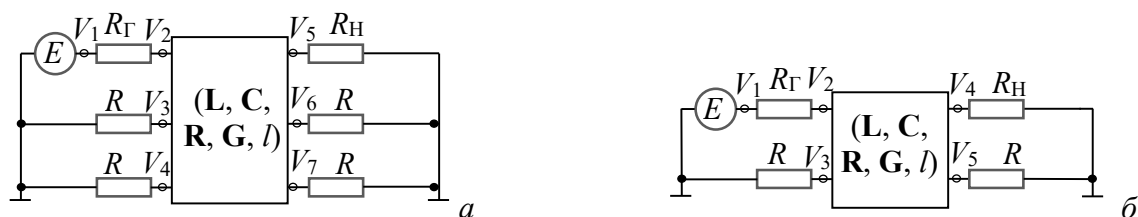


Рисунок 2.2 – Эквивалентные схемы МФ 1 (а) и МФ 2 (б)

МФ 1 (рисунок 2.1а) в общем случае рассматривается как 3-проводная линия передачи с неоднородным диэлектрическим заполнением в поперечном сечении. Следовательно, в ней распространяются 3 моды с соответствующими им характеристиками. Основная связь между проводниками обеспечивается через их торцы, а возбуждаемые моды распространяются в воздухе и подложке с разными скоростями. При этом разница между ними может привести к разложению воздействующего импульса (если длина проводников, умноженная на

максимальную разность погонных задержек мод не меньше суммы длительностей фронта, плоской вершины и спада импульса). МФ 2 (рисунок 2.1б) рассматривается как 2-проводная линия передачи с неоднородным диэлектрическим заполнением в поперечном сечении. Следовательно, в ней распространяются две моды с соответствующими им характеристиками. Активный (А) и пассивный (П) проводники расположены друг под другом на внешних слоях структуры, а третий – на одной стороне с проводником А на расстоянии s от него. Связь между проводниками А и П осуществляется по всей ширине проводников, преимущественно, через диэлектрический слой, что обеспечивает высокое значение разницы задержек мод в линии.

На рисунке 2.3 представлены временные отклики на импульсное воздействие при технологически допустимых стандартных параметрах ПП. Для МФ 1: $w=1000$ мкм, $h=1000$ мкм, $t=35$ мкм, $s_1=1000$ мкм, $s_2=1000$ мкм, $d=3w$, $\epsilon_r=4,5$, $\text{tg}\delta=0,025$, $l=600$ мм. Для МФ 2: $w=2000$ мкм, $h=500$ мкм, $t=105$ мкм, $s=100$ мкм, $d=w$, $\epsilon_r=4,5$, $\text{tg}\delta=0,025$, $l=600$ мм. Для первичной оценки характеристик структур матрицы **R** и **G** приняты равными нулю для исключения влияния потерь. Сопротивления на концах всех проводников (R_{Γ} , R_{Π} и R) взяты по 50 Ом. Параметры воздействующего СКИ: амплитуда ЭДС 1 В, длительности фронта, спада и плоской вершины по 50 пс, так что общая длительность импульса – 150 пс. В таблице 2.1 приведены вычисленные матрицы **C**, **L**, **τ** и **Z**.

Таблица 2.1 – Матрицы **C**, **L**, **τ** и **Z** полосковых МФ при стандартных параметрах

	МФ 1	МФ 2
C , пФ/м	$\begin{bmatrix} 109,999 & -43,6785 & -1,52974 \\ -43,6785 & 134,512 & -43,6785 \\ -1,52974 & -43,6785 & 109,999 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 221,831 & -171,005 \\ -171,005 & 201,356 \end{bmatrix}$
L , нГн/м	$\begin{bmatrix} 370,33 & 177,779 & 100,066 \\ 177,779 & 348,783 & 177,779 \\ 100,066 & 177,779 & 370,33 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 280,463 & 212,684 \\ 212,684 & 362,488 \end{bmatrix}$
τ , нс/м	$\begin{bmatrix} 6,24907 & 0 & 0 \\ 0 & 5,4902 & 0 \\ 0 & 0 & 5,27522 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 4,58067 & 0 \\ 0 & 6,44066 \end{bmatrix}$
Z , Ом	$\begin{bmatrix} 62,8773 & 27,0222 & 13,6507 \\ 27,0222 & 59,0614 & 27,0222 \\ 13,6507 & 27,0222 & 62,8773 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 60,3919 & 48,9747 \\ 48,9747 & 71,3877 \end{bmatrix}$

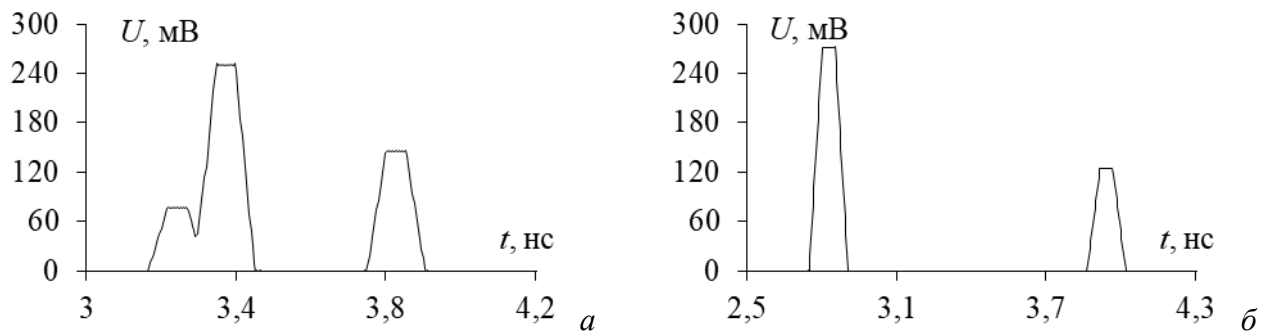


Рисунок 2.3 – Формы выходного напряжения МФ 1 (а) и 2 (б) при стандартных параметрах

Из рисунка 2.3 видно, что в рассматриваемых МФ воздействующий импульс разлагается на последовательность мод, однако для МФ 1 импульсы 1 и 2 частично накладываются. Амплитуды импульсов различны для обоих МФ. Так, для МФ 1 уровень максимального выходного напряжения ($U_{\max}$) 252 мВ, для МФ 2 – $U_{\max}=272,2$ мВ. Из матрицы τ , из таблице 2.1 видно, что для МФ 1 разности погонных задержек мод $\Delta\tau_1=0,22$ нс/м и $\Delta\tau_2=0,76$ нс/м, а для МФ 2 – $\Delta\tau=1,86$ нс/м. Матрицы Z показывают, что МФ 1 ближе к согласованию с трактом 50 Ом, чем МФ 2 (среднеарифметическое сопротивление $Z_{\text{ср}}$ (по главной диагонали матрицы Z) МФ 1 составило 61,6 Ом, а МФ 2 – 65,9 Ом). Однако для этих МФ можно уменьшить $U_{\max}$.

Рассмотрим уменьшение $U_{\max}$, выполнив оптимизацию по амплитудному критерию посредством ЭП. Для этого поочередно изменялись параметры поперечного сечения МФ с учетом технологических допусков при фиксировании остальных. Получены параметры для МФ 1: $w=1000$ мкм, $h=201$ мкм, $t=98$ мкм, $s_1=97$ мкм, $s_2=253$ мкм, $d=3w$. Для МФ 2 получены параметры: $w=2000$ мкм, $h=1000$ мкм, $t=105$ мкм, $s=1000$ мкм, $d=w$. На рисунке 2.4 представлены временные отклики для обоих МФ после оптимизации, а в таблице 2.2 – матрицы C , L , τ и Z .

Таблица 2.2 – Матрицы C , L , τ и Z полосковых МФ после оптимизации посредством ЭП

	МФ 1	МФ 2
C , пФ/м	$\begin{bmatrix} 268,601 & -31,416 & -0,8939 \\ -31,416 & 271,113 & -12,9557 \\ -0,8939 & -12,9557 & 258,603 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 117,739 & -96,0833 \\ -96,0833 & 116,016 \end{bmatrix}$
L , нГн/м	$\begin{bmatrix} 144,074 & 36,6012 & 7,03621 \\ 36,6012 & 141,595 & 20,4597 \\ 7,03621 & 20,4597 & 151,992 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 601,809 & 437,839 \\ 437,839 & 642,829 \end{bmatrix}$
τ , нс/м	$\begin{bmatrix} 5,61246 & 0 & 0 \\ 0 & 6,67213 & 0 \\ 0 & 0 & 6,12639 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 4,68764 & 0 \\ 0 & 6,27078 \end{bmatrix}$

	МФ 1	МФ 2
$Z, \text{ Ом}$	$\begin{bmatrix} 23,2595 & 4,32669 & 0,64064 \\ 4,32669 & 22,9556 & 2,22912 \\ 0,64064 & 2,22912 & 24,2482 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 125,205 & 98,166 \\ 98,166 & 129,992 \end{bmatrix}$

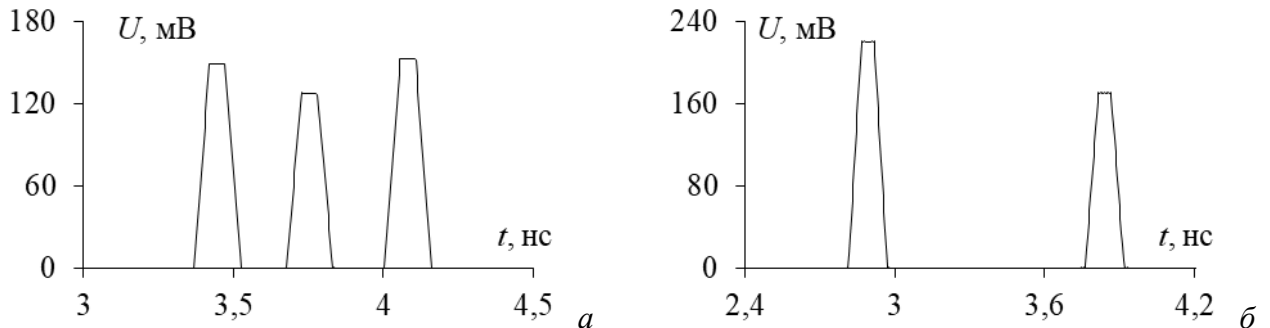


Рисунок 2.4 – Формы выходного напряжения МФ 1 (а) и 2 (б) после оптимизации ЭП

Из рисунка 2.4 видно, что амплитуды импульсов на выходе МФ 1 и 2 различны, однако для МФ 1 наблюдается полное разложение. Этот факт открывает возможность дальнейшего улучшения защитных характеристик. Для МФ 1 получено $U_{\max}=152,5$ мВ (на 24,6% меньше, чем при стандартных параметрах), для МФ 2 – $U_{\max}=211,7$ мВ (на 12,5% меньше). Из таблицы 2.2 видно, что для МФ 1 разности погонных задержек мод практически выровнялись ($\Delta\tau_1=0,51$ нс/м и $\Delta\tau_2=0,55$ нс/м). Так, после ЭП $\Delta\tau_1$ увеличилась на 39,7%, а $\Delta\tau_2$ – уменьшилась на 16%. Для МФ 2 $\Delta\tau=1,59$ нс/м, что на 7,8% меньше, чем до ЭП. Кроме того, по матрице Z заметно, что для обоих МФ согласование с трактом 50 Ом ухудшилось, что говорит о целесообразности оптимизации, учитывающей согласование. Так, оптимизация по амплитудному критерию посредством ЭП уменьшила $U_{\max}$. Одним из путей улучшения характеристик МФ является использование алгоритмов глобальной оптимизации.

Очевидно, что каждый из параметров поперечного сечения влияет на выходные характеристики МФ ($U_{\text{вх}}$, $U_{\max}$, $\Delta\tau_i$, Z и др.), изменяя взаимное влияние проводников. Для определения наиболее перспективных из них для дальнейшей оптимизации, выполним предварительную оценку их влияния на основную характеристику МФ – $U_{\max}$. Для этого для МФ 1 взяты параметры $w=1000$ мкм, $h=1500$ мкм, $t=35$ мкм, $s_1=s_2=500$ мкм, $d=3w$, $\epsilon_r=4,5$ при $l=600$ мм. Выполнен полный перебор параметров (по одному за раз), при фиксировании остальных, в следующих диапазонах: 100–2000 мкм для w и h , 10–200 мкм для t , 10–1000 мкм для s_1 и s_2 . Для МФ 2 фиксированы $w=2000$ мкм, $h=500$ мкм, $t=105$ мкм, $s=100$ мкм, $d=w$, $\epsilon_r=4,5$, $\text{tg}\delta=0,025$, $l=0,6$ м. По аналогии с МФ 1 диапазоны варьируемых параметров: 100–2000 мкм для w , 50–2000 мкм для h , 10–200 мкм для t , 10–2000 мкм для s . Такой подход позволит отследить изменение $U_{\max}$ в зависимости от изменяемого параметра без учета влияния фиксированных для

первичной оценки их влияния. Данные зависимости для обоих МФ проиллюстрированы на рисунках 2.5 и 2.6, соответственно.

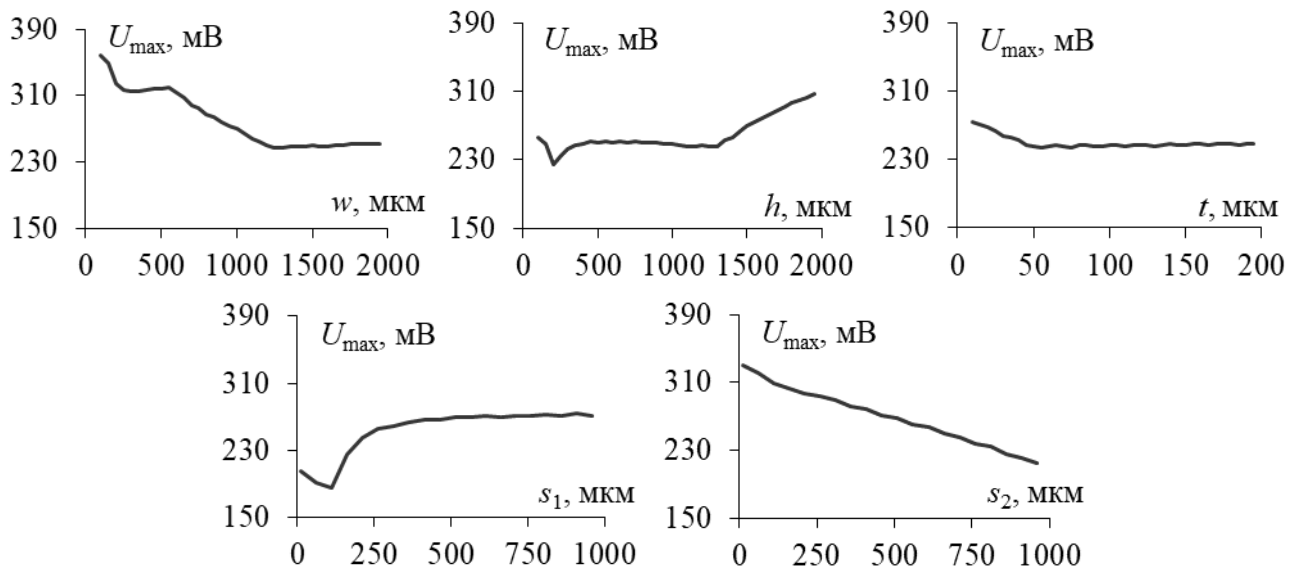


Рисунок 2.5 – Зависимости $U_{\max}$ от параметров поперечного сечения МФ 1

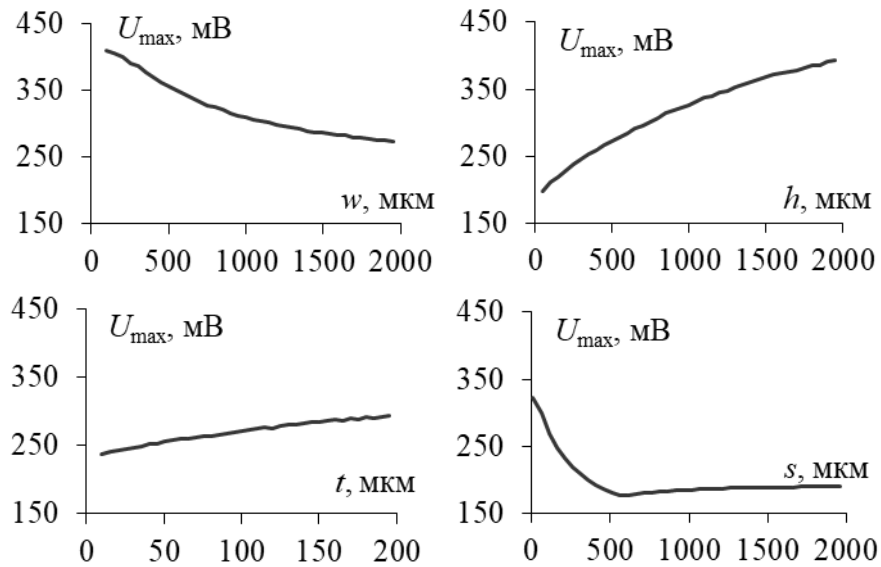


Рисунок 2.6 – Зависимости $U_{\max}$ от параметров поперечного сечения МФ 2

Как видно из зависимостей на рисунках 2.5 и 2.6, параметры по отдельности влияют на $U_{\max}$. Для МФ 1 изменение $U_{\max}$ от t и s_2 носит преимущественно линейный характер, также как для МФ 2 – от w , h , t . Заметно, что для обоих МФ минимально влияет t . Однако это влияние может быть усилено различными комбинациями других параметров. Так, например, разброс $U_{\max}$ при изменении t для МФ 1 для приведенного выше набора фиксированных параметров находится в диапазоне от 243,9 до 274,7 мВ (разница 5,9%), однако с уменьшением s_i и h до 100 и 1000 мкм, соответственно, разница уменьшается до 1,2% (разброс от 247,3 до 253,2 мВ). Из этого следует, что при оптимизации важно учитывать сочетания параметров, оказывающих взаимное влияние на ЦФ. Для предотвращения её линейного изменения при одновременной

варьируемости нескольких параметров, целесообразно фиксировать один из них, что также способствует сужению области поиска. В частности, параметр w , сильно влияющий на характеристический импеданс, лучше не изменять. Тогда для полосковых МФ наиболее пригодны к оптимизации по амплитудному критерию h, t, s_i .

Таким образом, выполнено предварительное моделирование двух полосковых МФ. Для стандартного набора параметров и найденного посредством ЭП вычислены матрицы C, L, τ и Z и временные отклики. За счет оптимизации по амплитудному критерию посредством ЭП удалось уменьшить $U_{\max}$ на 24,6% для МФ 1 и на 12,5% для МФ 2. Рекомендованы параметры полосковых МФ для оптимизации.

2.2 Кабельные модальные фильтры

Как отмечено в пункте 1.2.2, эффект модального разложения может возникать в кабельных структурах, что делает возможным создание МФ на их основе. Широкое применение кабелей с круглым и плоским поперечным сечением определяет высокую практическую значимость их использования в качестве помехозащитных структур.

Рассмотрим подробнее круглые кабельные структуры. На рисунке 2.7 представлены поперечные сечения МФ (число проводников без учета опорного) на основе круглых: 3-проводного кабеля с изолированным опорным проводником (МФ 3), 4-проводного кабеля с изолированным опорным проводником (МФ 4), 2-проводного кабеля с внешней изоляцией и с изоляцией вокруг проводников (МФ 5), экранированного 2-проводного кабеля с внешней изоляцией и с изоляцией вокруг проводников (МФ 6), 3-проводного кабеля с внешней изоляцией и с изоляцией вокруг проводников (МФ 7), экранированного 3-проводного кабеля с внешней изоляцией и с изоляцией вокруг проводников (МФ 8). Здесь r_{1i} – радиус проводника, r_2 – радиус изоляции вокруг опорного проводника, r_3 – радиус внешней изоляции, r_{4i} – радиус изоляции вокруг сигнальных проводников, h_{1i} – толщина собственной изоляции вокруг проводников. Эквивалентная схема, соответствующая МФ 3, 7 и 8, представлена на рисунке 2.2а, МФ 4 – на рисунке 2.8, МФ 5 и 6 – на рисунке 2.2б.

МФ 3, 7 и 8 в общем случае рассматриваются как 3-проводные линии передачи с неоднородным диэлектрическим заполнением в поперечном сечении. Следовательно, в них распространяются 3 моды со своими характеристиками. Оба проводника П расположены на одинаковом расстоянии от проводников О и А. Так, связь между проводниками А и П одинакова и регулируется в большей степени их размерами и взаимной близостью внутри диэлектрического заполнения, а возбуждаемые моды распространяются в воздухе и диэлектрическом слое с разными скоростями, разница которых между ними может привести к разложению воздействующего импульса.

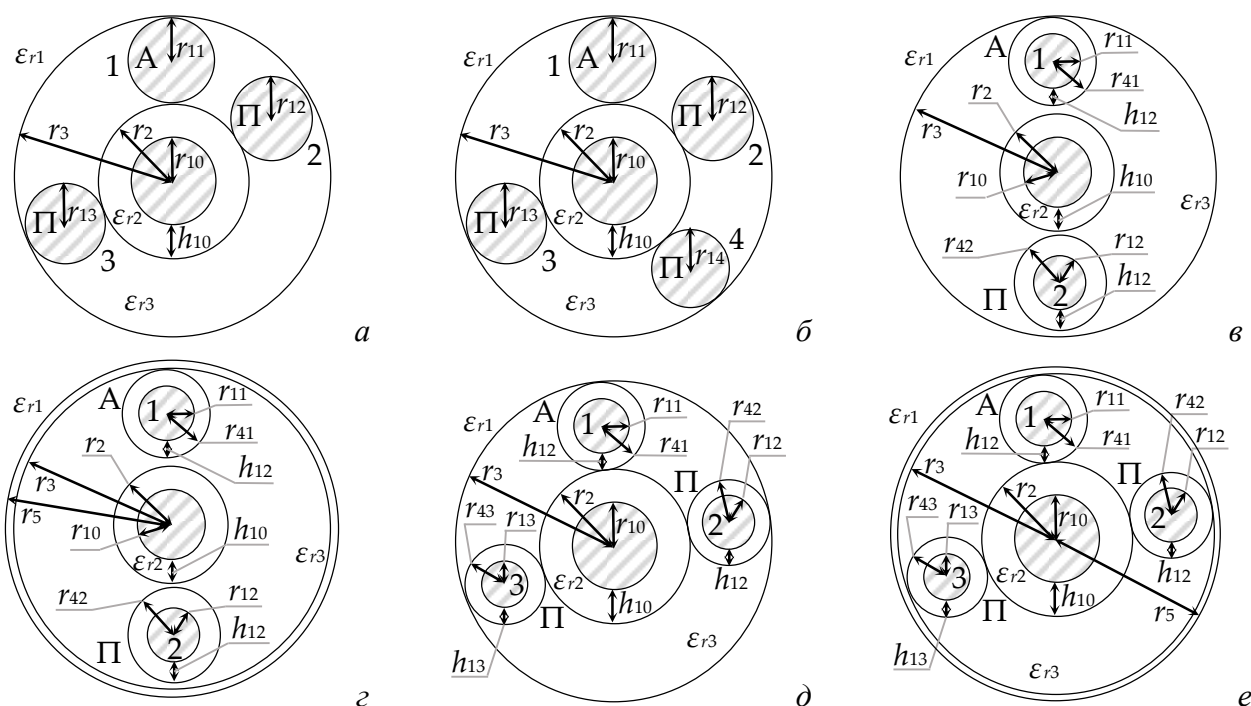


Рисунок 2.7 – Поперечные сечения МФ 3 (а), 4 (б), 5 (в), 6 (г), 7 (д), 8 (е)

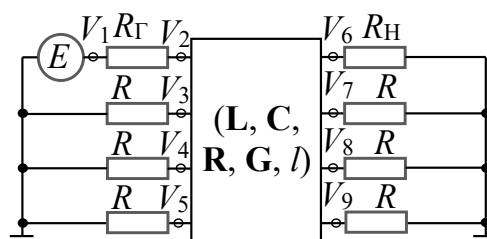


Рисунок 2.8 – Эквивалентная схема МФ 4

МФ 8 отличается от МФ 7 наличием внешнего экрана (выполняющего роль проводника О). МФ 4 рассматривается как 4-проводная линия передачи с неоднородным диэлектрическим заполнением в поперечном сечении. Следовательно, в ней распространяются 4 моды с соответствующими им характеристиками. Конструктивно МФ 4 отличается от МФ 3 наличием дополнительного пассивного проводника. МФ 5 и 6 рассматриваются как 2-проводные линии передачи с неоднородным диэлектрическим заполнением в поперечном сечении. Следовательно, в них распространяются 2 моды со своими характеристиками. Каждый из проводников имеет собственную изоляцию, а все проводники помещены в единый диэлектрический слой. МФ 6 отличается от МФ 5 наличием внешнего экрана (выполняющего роль проводника О).

Кабельная продукция, как правило, изготавливается с фиксированными технологическими размерами и симметричным расположением проводников. Однако симметрия затрудняет эффективное модальное разложение. На рисунке 2.9 представлены временные отклики на импульсное воздействие при технологически допустимых стандартных

параметрах МФ и симметричном расположении проводников. В таблице 2.3 приведены параметры МФ, при которых выполнялось моделирование, однако для всех МФ $\varepsilon_{r1}=1$ и $l=1$ м. При этом матрицы **R** и **G** также приняты равными нулю. ЭДС воздействия принята 5 В, а R и воздействие такие же, как в подразделе 2.1. В таблице 2.4 приведены вычисленные **C**, **L**, **τ** и **Z**, полученные в результате моделирования.

Таблица 2.3 – Стандартные параметры МФ, с которыми выполнялось моделирование

МФ	r_{10} , мм	r_{11} , мм	r_{12} , мм	r_{13} , мм	r_{14} , мм	h_{10} , мм	h_{11} , мм	h_{12} , мм	h_{13} , мм	ε_{r2}	ε_{r3}
3	0,5	0,5	0,5	0,5	-	0,6	-	-	-	5	19
4	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,6	-	-	-	2,4	4,2
5	1,1	1,1	1,1	-	-	0,8	0,8	0,8	-	2,4	4,2
6	0,5	0,5	0,5	-	-	0,6	0,6	0,6	-	2,4	4,2
7	0,5	0,5	0,5	0,5	-	0,6	0,6	0,6	0,6	2,4	4,2
8	0,5	0,5	0,5	0,5	-	0,6	0,6	0,6	0,6	2,4	4,2

Таблица 2.4 – Матрицы **C**, **L**, **τ** и **Z** для МФ 3–8 со стандартными параметрами

	МФ 3	МФ 4
C , пФ/м	$\begin{bmatrix} 244,671 & -69,8785 & -69,8785 \\ -69,8785 & 244,671 & -69,8785 \\ -69,8785 & -69,8785 & 244,671 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 93,2098 & -2,71929 & -2,71929 & -2,05158 \\ -2,71929 & 93,2098 & -2,05158 & -2,71929 \\ -2,71929 & -2,05158 & 93,2098 & -2,71929 \\ -2,05158 & -2,71929 & -2,71929 & 93,2098 \end{bmatrix}$
L , нГн/м	$\begin{bmatrix} 418,186 & 113,609 & 113,609 \\ 113,609 & 418,186 & 113,609 \\ 113,609 & 113,609 & 418,186 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 409,675 & 139,415 & 139,415 & 95,4478 \\ 139,415 & 409,675 & 95,4478 & 139,415 \\ 139,415 & 95,4478 & 409,675 & 139,415 \\ 95,4478 & 139,415 & 139,415 & 409,675 \end{bmatrix}$
τ , нс/м	$\begin{bmatrix} 8,22875 & 0 & 0 \\ 0 & 9,78799 & 0 \\ 0 & 0 & 9,78799 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 5,73895 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 5,36916 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 5,47117 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 5,47117 \end{bmatrix}$
Z , Ом	$\begin{bmatrix} 46,8893 & 15,7718 & 15,7718 \\ 15,7718 & 46,8893 & 15,7718 \\ 15,7718 & 15,7718 & 46,8893 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 75,077 & 26,6448 & 26,6448 & 17,6437 \\ 26,6448 & 75,077 & 17,6437 & 26,6448 \\ 26,6448 & 17,6437 & 75,077 & 26,6448 \\ 17,6437 & 26,6448 & 26,6448 & 75,077 \end{bmatrix}$
	МФ 5	МФ 6
C , пФ/м	$\begin{bmatrix} 77,1631 & -11,2329 \\ -11,2329 & 77,1631 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 114,739 & -0,9534 \\ -0,9534 & 114,739 \end{bmatrix}$
L , нГн/м	$\begin{bmatrix} 457,631 & 110,743 \\ 110,743 & 457,631 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 253,018 & 1,89612 \\ 1,89612 & 253,018 \end{bmatrix}$
τ , нс/м	$\begin{bmatrix} 6,12153 & 0 \\ 0 & 5,53746 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 5,39007 & 0 \\ 0 & 5,38568 \end{bmatrix}$
Z , Ом	$\begin{bmatrix} 77,7462 & 15,1023 \\ 15,1023 & 77,7462 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 46,9608 & 0,37107 \\ 0,37107 & 46,9608 \end{bmatrix}$

	МФ 7	МФ 8
$C, \text{ пФ/М}$	$\begin{bmatrix} 64,7758 & -11,7561 & -11,756 \\ -11,7561 & 64,7758 & -11,756 \\ -11,756 & -11,756 & 64,7755 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 147,799 & -2,5266 & -2,5266 \\ -2,5266 & 147,799 & -2,5266 \\ -2,5266 & -2,5266 & 147,798 \end{bmatrix}$
$L, \text{ нГн/М}$	$\begin{bmatrix} 570,071 & 182,252 & 182,252 \\ 182,252 & 570,071 & 182,252 \\ 182,252 & 182,252 & 570,071 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 252,905 & 5,54209 & 5,54209 \\ 5,54209 & 252,905 & 5,54209 \\ 5,54209 & 5,54209 & 252,905 \end{bmatrix}$
$\tau, \text{ нс/М}$	$\begin{bmatrix} 6,20999 & 0 & 0 \\ 0 & 5,44798 & 0 \\ 0 & 0 & 5,44797 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 5,38253 & 0 & 0 \\ 0 & 5,3872 & 0 \\ 0 & 0 & 5,38719 \end{bmatrix}$
$Z, \text{ Ом}$	$\begin{bmatrix} 97,6223 & 26,4356 & 26,4365 \\ 26,4356 & 97,6223 & 26,4365 \\ 26,4365 & 26,4365 & 97,6225 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 46,9597 & 1,04292 & 1,04293 \\ 1,04292 & 46,9597 & 1,04293 \\ 1,04293 & 1,04293 & 46,9598 \end{bmatrix}$

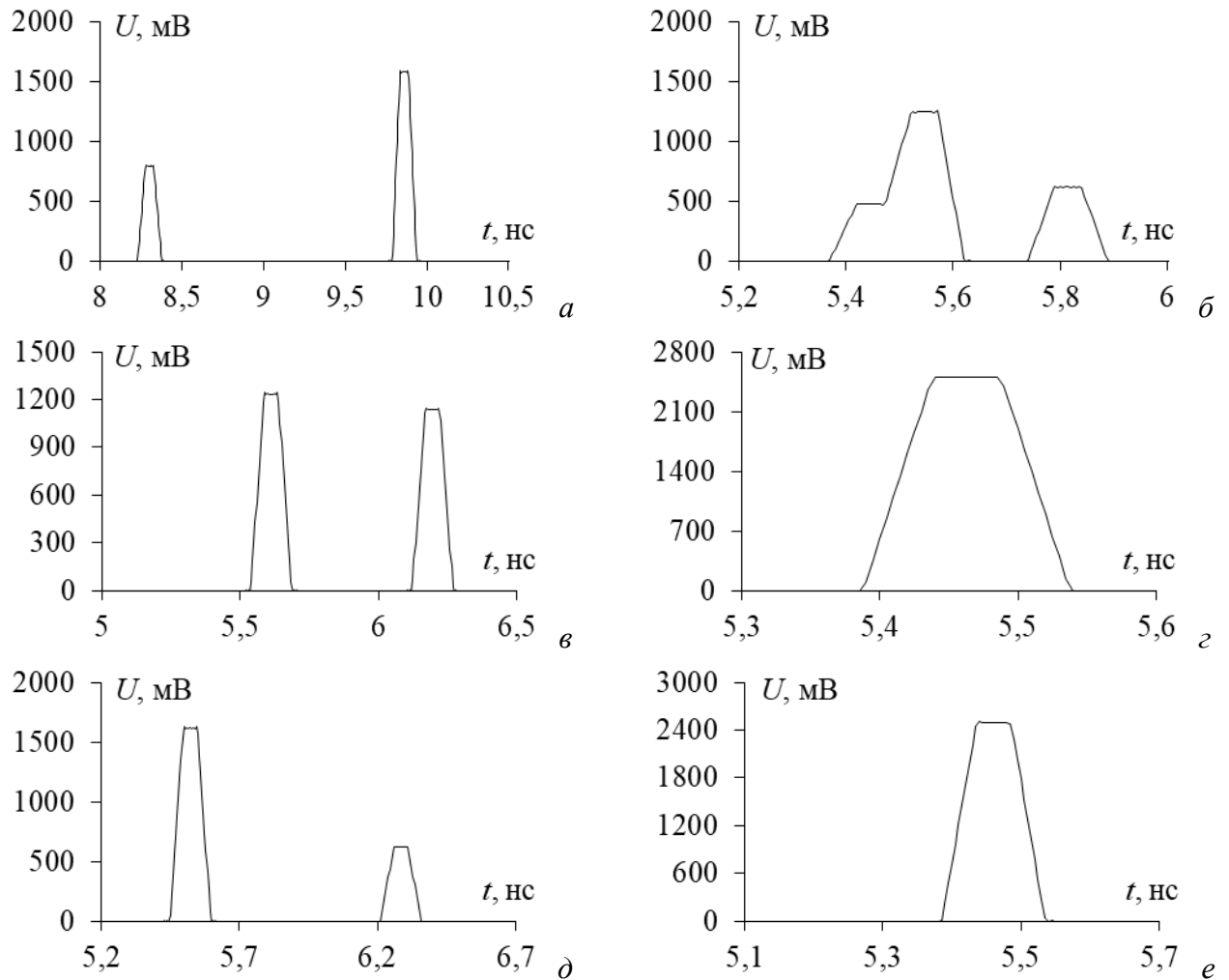


Рисунок 2.9 – Формы выходных напряжений МФ 3 (а), 4 (б), 5 (в), 6 (г), 7 (д), 8 (е) при стандартных параметрах

Из таблицы 2.4 и рисунка 2.9 видно, что при стандартных параметрах полное разложение достигнуто только для МФ 5. Кроме того, из-за симметрии в поперечном сечении наблюдается симметрия в матрицах для всех МФ (по элементам главной диагонали), кроме матриц τ . Для удобства в таблице 2.5 сведены $U_{\max}$, $Z_{\text{ср}}$ и $\Delta\tau_i$.

Таблица 2.5 – Характеристики МФ 3–8 со стандартными параметрами

МФ	$U_{\max}$, мВ	$Z_{\text{ср}}$, Ом	$\Delta\tau_1$, нс/м	$\Delta\tau_2$, нс/м	$\Delta\tau_3$, нс/м
3	1590	46,88	1,56	0	-
4	1250	75,1	0,1	0	0,27
5	1240	77,75	0,58	-	-
6	2500	46,96	0,0044	-	-
7	1630	97,62	0	0,76	-
8	2510	46,96	0,005	0	-

Видно, что симметрия негативно влияет на характеристики МФ, в частности на $\Delta\tau_i$, некоторые из которых для всех, кроме МФ 5, стремятся к нулю. Уменьшение или отсутствие задержек между импульсами мод приводит к их наложению и, следовательно, возрастанию результирующего напряжения. Значение $Z_{\text{ср}}$ показывают близость МФ 3, 6 и 8 к согласованию с трактом 50 Ом. Однако и для этих МФ можно добиться уменьшения $U_{\max}$.

Рассмотрим возможность уменьшения $U_{\max}$, выполнив оптимизацию по амплитудному критерию посредством ЭП по аналогии с подразделом 2.1. Однако помимо изменения величин параметров поперечного сечения, также вносилась асимметрия поперечного сечения МФ, путем изменения расположения проводников. В таблице 2.6 приведены параметры МФ после оптимизации, на рисунке 2.10 – временные отклики, а в таблице 2.7 – матрицы C , L , τ и Z .

Таблица 2.6 – Параметры МФ 3–8 после ЭП

МФ	r_{10} , мм	r_{11} , мм	r_{12} , мм	r_{13} , мм	r_{14} , мм	h_{10} , мм	h_{11} , мм	h_{12} , мм	h_{13} , мм	ϵ_{r2}	ϵ_{r3}
3	0,8	0,9	0,8	0,8	-	0,7	-	-	-	19	5
4	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,6	-	-	-	2,4	4,2
5	1,1	0,5	0,5	-	-	1	0,6	0,6	-	2,4	4,2
6	0,9	0,9	0,9	-	-	0,675	0,8	0,8	-	2,4	4,2
7	0,9	0,841	0,9	0,53	-	0,675	0,67	0,895	0,98	2,4	4,2
8	0,9	0,841	0,9	0,9	-	0,675	0,67	0,85	0,6	2,4	4,2

Таблица 2.7 – Матрицы C , L , τ и Z для МФ 3–8 после ЭП

	МФ 3	МФ 4
C , пФ/м	$\begin{bmatrix} 656,004 & -488,755 & -53,1707 \\ -488,755 & 644,901 & -52,2 \\ -53,1707 & -52,2 & 257,48 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 261,771 & -110,928 & -111,69 & -1,7574 \\ -110,928 & 237,43 & -1,8199 & -85,899 \\ -111,69 & -1,8199 & 180,729 & -7,0839 \\ -1,7574 & -85,899 & -7,0839 & 156,287 \end{bmatrix}$

	МФ 3	МФ 4
L , нГн/м	$\begin{bmatrix} 328,334 & 204,868 & 81,1368 \\ 204,868 & 348,71 & 82,6475 \\ 81,1368 & 82,6475 & 383,62 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 260,255 & 140,025 & 146,298 & 82,5422 \\ 140,025 & 264,197 & 89,3037 & 132,739 \\ 146,298 & 89,3037 & 280,42 & 63,418 \\ 82,5422 & 132,739 & 63,418 & 288 \end{bmatrix}$
τ , нс/м	$\begin{bmatrix} 12,3426 & 0 & 0 \\ 0 & 8,5429 & 0 \\ 0 & 0 & 9,81014 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 5,42042 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 6,29355 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 5,71002 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 6,07358 \end{bmatrix}$
Z , Ом	$\begin{bmatrix} 35,8505 & 25,6786 & 11,064 \\ 25,6786 & 37,1654 & 11,1974 \\ 11,064 & 11,1974 & 41,3661 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 46,0278 & 26,4117 & 27,6987 & 15,9168 \\ 26,4117 & 46,682 & 17,3119 & 25,185 \\ 27,6987 & 17,3119 & 49,859 & 12,0641 \\ 15,9168 & 25,185 & 12,0641 & 51,3013 \end{bmatrix}$
	МФ 5	МФ 6
C , пФ/м	$\begin{bmatrix} 61,238 & -4,98682 \\ -4,98682 & 61,2382 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 135,492 & -18,6723 \\ -18,6723 & 136,076 \end{bmatrix}$
L , нГн/м	$\begin{bmatrix} 556,379 & 94,1186 \\ 94,1186 & 556,379 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 231,505 & 37,6766 \\ 37,6766 & 228,178 \end{bmatrix}$
τ , нс/м	$\begin{bmatrix} 5,53291 & 0 \\ 0 & 6,04907 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 5,59857 & 0 \\ 0 & 5,44663 \end{bmatrix}$
Z , Ом	$\begin{bmatrix} 95,5421 & 11,9947 \\ 11,9947 & 95,5419 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 41,7284 & 6,26098 \\ 6,26098 & 41,3381 \end{bmatrix}$
	МФ 7	МФ 8
C , пФ/м	$\begin{bmatrix} 91,7016 & -32,541 & -12,425 \\ -32,541 & 79,5669 & -4,9671 \\ -12,425 & -4,9671 & 60,9813 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 147,92 & -18,902 & -22,736 \\ -18,902 & 132,341 & -0,309 \\ -22,736 & -0,309 & 149,119 \end{bmatrix}$
L , нГн/м	$\begin{bmatrix} 455,573 & 228,507 & 143,503 \\ 228,507 & 498,477 & 124,38 \\ 143,503 & 124,38 & 574,163 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 215,329 & 35,1516 & 39,1476 \\ 35,1516 & 226,465 & 6,86661 \\ 39,1476 & 6,86661 & 219,591 \end{bmatrix}$
τ , нс/м	$\begin{bmatrix} 6,08825 & 0 & 0 \\ 0 & 5,3885 & 0 \\ 0 & 0 & 5,53859 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 5,50175 & 0 & 0 \\ 0 & 5,38077 & 0 \\ 0 & 0 & 5,67733 \end{bmatrix}$
Z , Ом	$\begin{bmatrix} 77,8608 & 36,0882 & 21,551 \\ 36,0882 & 86,4009 & 17,6116 \\ 21,551 & 17,6116 & 99,374 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 38,9706 & 5,97508 & 6,51393 \\ 5,97508 & 41,7576 & 1,08775 \\ 6,51393 & 1,08775 & 38,8403 \end{bmatrix}$

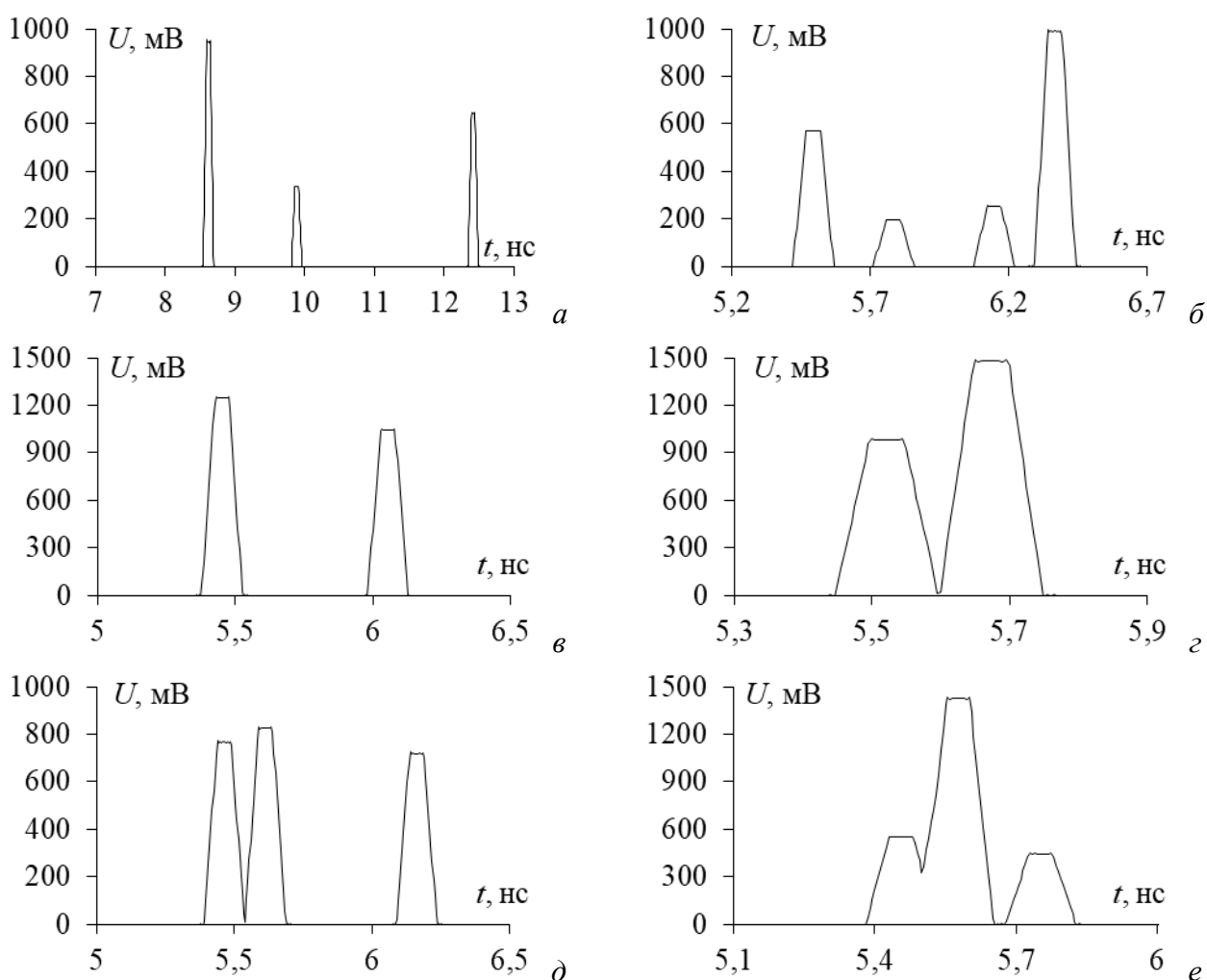


Рисунок 2.10 – Формы выходного напряжения МФ 3 (а), 4 (б), 5 (в), 6 (г), 7 (д), 8 (е) после ЭП

Из рисунка 2.10 видно, что для всех МФ достигнуто полное разложение (только для МФ 8 есть частичное наложение), хоть и амплитуды каждого из импульсов различны. Из таблицы 2.7 заметно, что при асимметрии поперечного сечения МФ, матрицы асимметричны. Для удобства в таблицу 2.8 сведены $U_{\max}$, $Z_{\text{ср}}$ и Δt_i .

Таблица 2.8 – Характеристики МФ 3–8 после оптимизации посредством ЭП

МФ	$U_{\max}$, мВ	$Z_{\text{ср}}$, Ом	Δt_1 , нс/м	Δt_2 , нс/м	Δt_3 , нс/м
3	950	38,13	1,27	2,53	-
4	1000	48,48	0,29	0,36	0,22
5	1180	95,54	0,52	-	-
6	1500	41,53	0,15	-	-
7	830	87,88	0,15	0,55	-
8	1440	39,86	0,12	0,18	-

Видно, что для всех МФ Δt_i отличны от нуля, и $U_{\max}$ меньше, чем в таблице 2.5. Так, оптимизация посредством ЭП позволила снизить уровень $U_{\max}$ на 25,2% для МФ 3, на 11,11% для МФ 4, на 2,48% для МФ 5, на 25% для МФ 6, на 32,52% для МФ 7 и 27,1% для МФ 8. Кроме того, для МФ 4 улучшилось согласование с трактом 50 Ом, а для остальных МФ оно стало хуже.

По аналогии с подразделом 2.1 для определения наиболее перспективных параметров поперечного сечения для дальнейшей оптимизации, оценено их влияние на $U_{\max}$. Поскольку у МФ 3–8 схожие параметры поперечного сечения, достаточно сравнить, например, МФ 3 и 5, различающихся в числе сигнальных проводников и собственной изоляции. Для МФ 3 $r_{10}=r_{11}=r_{12}=r_{13}=0,5$ мм, $h_{10}=0,6$ мм, $\varepsilon_{r1}=1$, $\varepsilon_{r2}=5$, $\varepsilon_{r3}=19$ при $l=1$ м. Для МФ 5 $r_{10}=r_{11}=r_{12}=0,5$ мм, $h_{10}=h_{11}=h_{12}=0,6$ мм, $\varepsilon_{r1}=1$, $\varepsilon_{r2}=2,4$, $\varepsilon_{r3}=4,2$ при $l=1$ м. Выполнен полный перебор параметров (по одному за раз) в диапазоне 0,1–2 мм для каждого при фиксировании остальных. Зависимости $U_{\max}$ от параметров для МФ 3 и 5 показаны на рисунках 2.11 и 2.12.

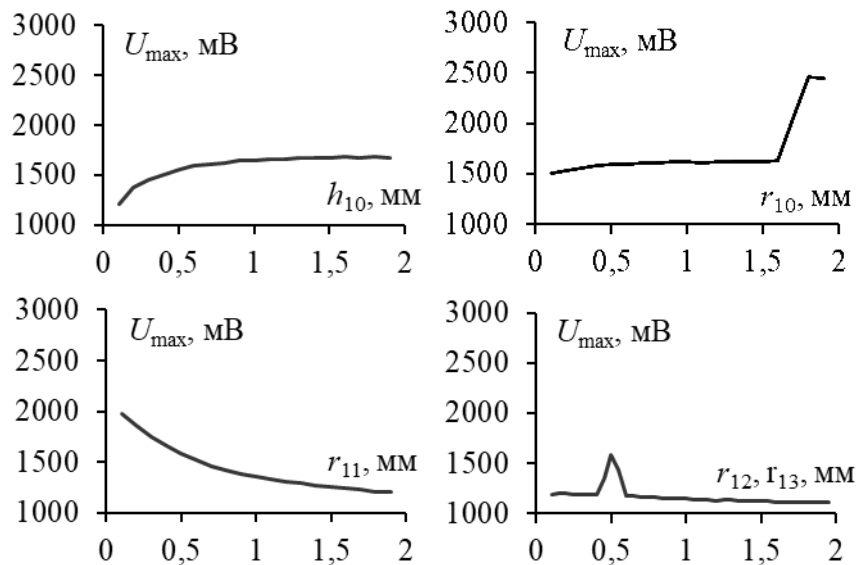


Рисунок 2.11 – Зависимости $U_{\max}$ от параметров поперечного сечения МФ 3

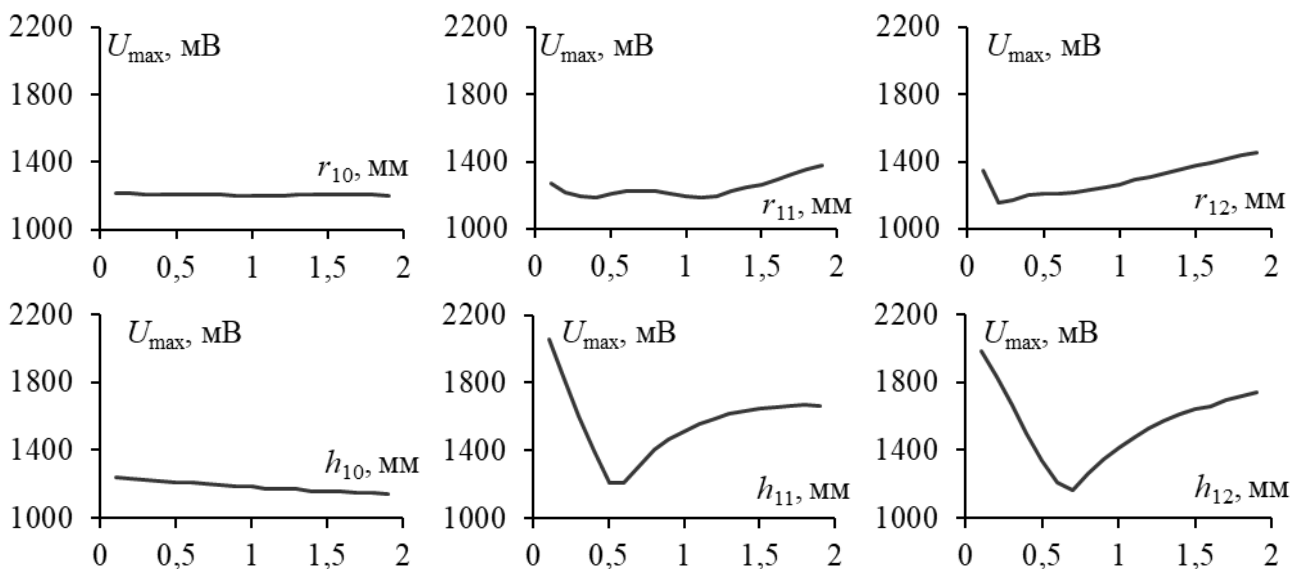


Рисунок 2.12 – Зависимости $U_{\max}$ от параметров поперечного сечения МФ 5

Из зависимостей на рисунках 2.11 и 2.12 видно, параметры различно влияют на $U_{\max}$. Для МФ 3 влияние обоих проводников П одинаково ввиду симметрии структуры (каждый из них в равной степени удален от проводников А и О). Кроме того, для МФ 3 при $r_{12}=r_{13}=0,5$ мм

заметен резкий рост $U_{\max}$ из-за симметрии поперечного сечения, выравнивающей задержки импульсов мод, что приводит к наложению импульсов и увеличению $U_{\max}$. Для МФ 5 r_{10} и h_{10} минимально влияют на изменение $U_{\max}$, а влияния параметров, относящихся к первому (r_{11} и h_{11}) и второму (r_{12} и h_{12}) проводникам П, схожи, поэтому необходимо их одновременное изменение для предотвращения симметрии поперечного сечения. Так, для круглых кабельных МФ наиболее пригодны к оптимизации по амплитудному критерию параметры проводников П r_{1i} , h_{1i} , ($i=2, 3, \dots, N$). Помимо этого, при оптимизации взаимное расположение проводников для предотвращения одинаковой связи между проводником А и проводниками П.

Далее рассмотрим плоские кабельные структуры. На рисунке 2.13 представлены поперечные сечения МФ на основе 2-проводных (без учета опорного проводника) плоских кабелей: с собственной изоляцией вокруг проводников и разделительными перемычками (МФ 9); с собственной изоляцией вокруг проводников и общей изоляцией вокруг них (МФ 10); в однородном диэлектрическом заполнении (МФ 11); с собственной изоляцией вокруг проводников в однородном диэлектрическом заполнении (МФ 12). Данные МФ рассматриваются как 2-проводные линии передачи с неоднородным диэлектрическим заполнением в поперечном сечении. Следовательно, в них распространяются 2 моды со своими характеристиками. Эквивалентные схемы идентичны для всех четырех МФ на основе плоских кабельных структур и приведены на рисунке 2.2б.

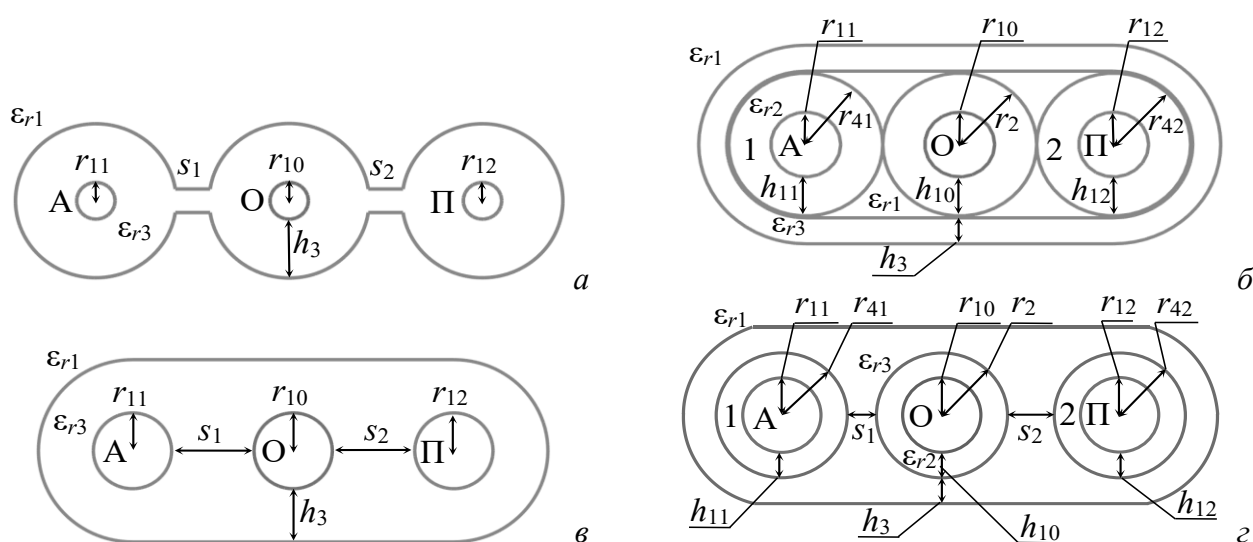


Рисунок 2.13 – Поперечные сечения МФ 9 (а), 10 (б), 11 (в) и 12 (г)

На рисунке 2.14 представлены временные отклики на импульсное воздействие при технологически допустимых стандартных параметрах проводников МФ. В таблице 2.9 приведены эти параметры ($\epsilon_{r1}=1$ для всех МФ, $l=1000$ мм для МФ 12, $l=600$ мм для остальных). Матрицы $\mathbf{R}$ и $\mathbf{G}$ приняты равными нулю, а R и воздействия такие же, как в подразделе 2.1. В таблице 2.10 приведены вычисленные $\mathbf{C}$, $\mathbf{L}$, $\mathbf{\tau}$ и $\mathbf{Z}$.

Таблица 2.9 – Стандартные параметры МФ, с которыми выполнялось моделирование

МФ	r_{10} , мм	r_{11} , мм	r_{12} , мм	h_{10} , мм	h_{11} , мм	h_{12} , мм	h_3 , мм	s_1 , мм	s_2 , мм	ε_{r2}	ε_{r3}
9	1,1	1,1	1,1	-	-	-	1	0,9	0,9	-	20
10	1,1	1,1	1,1	0,8	0,8	0,8	0,1	2	2	4,2	3
11	0,5	0,5	0,5	-	-	-	1	1	1	-	20
12	1,1	1,1	1,1	0,8	0,8	0,8	0,5	0,1	0,1	3	3,5

Таблица 2.10 – Матрицы C , L , τ и Z для МФ 9–12 со стандартными параметрами

	МФ 9	МФ 10
C , пФ/м	$\begin{bmatrix} 113,06 & -7,6079 \\ -7,6079 & 113,06 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 52,9999 & -3,88352 \\ -3,88352 & 52,1085 \end{bmatrix}$
L , нГн/м	$\begin{bmatrix} 1310,97 & 423,535 \\ 423,535 & 1310,97 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 466,773 & 114,478 \\ 114,478 & 466,773 \end{bmatrix}$
τ , нс/м	$\begin{bmatrix} 10,3482 & 0 \\ 0 & 13,5243 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 5,31928 & 0 \\ 0 & 4,45847 \end{bmatrix}$
Z , Ом	$\begin{bmatrix} 107,004 & 21,2466 \\ 21,2466 & 107,004 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 93,7537 & 15,1374 \\ 15,1374 & 94,5409 \end{bmatrix}$
	МФ 11	МФ 12
C , пФ/м	$\begin{bmatrix} 328,327 & -24,9106 \\ -24,9106 & 328,328 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 62,599 & -8,43475 \\ -8,43475 & 62,7605 \end{bmatrix}$
L , нГн/м	$\begin{bmatrix} 1303,25 & 404,022 \\ 404,023 & 1303,25 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 466,834 & 114,488 \\ 114,488 & 466,851 \end{bmatrix}$
τ , нс/м	$\begin{bmatrix} 17,8225 & 0 \\ 0 & 22,7599 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 5,00858 & 0 \\ 0 & 5,6197 \end{bmatrix}$
Z , Ом	$\begin{bmatrix} 62,7333 & 12,2788 \\ 12,2788 & 62,7333 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 86,8971 & 16,5474 \\ 16,5474 & 86,8983 \end{bmatrix}$

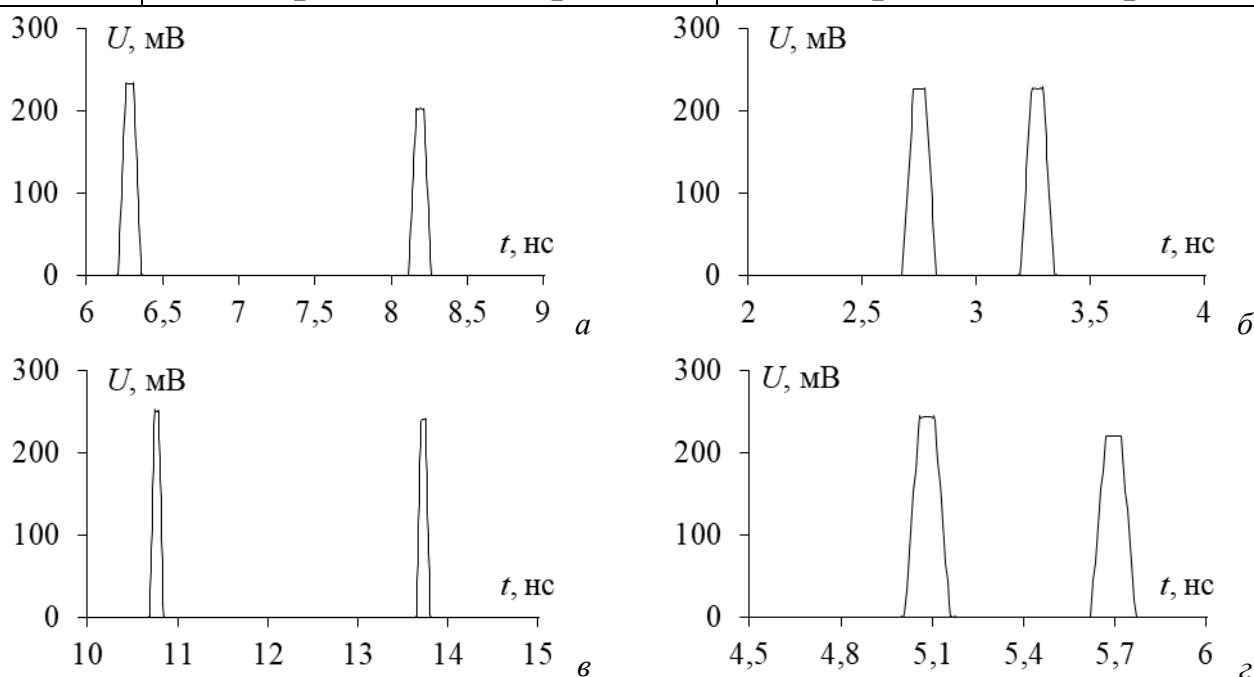


Рисунок 2.14 – Формы выходного напряжения МФ 9 (а), 10 (б), 11 (в) и 12 (г) со стандартными параметрами

Из рисунка 2.14 видно, что для всех структур можно получить полное разложение за счет высоких Δt , вызванных высоким ϵ_r . Наибольшие значения Δt наблюдаются в структурах без собственной изоляции проводников. В таблицу 2.11 сведены $U_{\max}$, $Z_{\text{ср}}$ и Δt_i для МФ 9–12.

Таблица 2.11 – Характеристики МФ 9–12 со стандартными параметрами

МФ	$U_{\max}$, мВ	$Z_{\text{ср}}$, Ом	Δt , нс/м
9	234,3	107	3,18
10	228,5	94,15	0,86
11	252	62,73	4,94
12	244,8	86,9	0,61

Рассмотрим уменьшение $U_{\max}$, выполнив оптимизацию по амплитудному критерию посредством ЭП по аналогии с подразделом 2.1. В таблице 2.12 приведены параметры МФ после оптимизации, на рисунке 2.15 – временные отклики, а в таблице 2.13 C , L , τ и Z .

Таблица 2.12 – Параметры МФ 9–12 после ЭП

МФ	r_{10} , мм	r_{11} , мм	r_{12} , мм	h_{10} , мм	h_{11} , мм	h_{12} , мм	h_3 , мм	s_1 , мм	s_2 , мм	ϵ_{r2}	ϵ_{r3}
9	0,5	0,5	0,5	-	-	-	1,6	0,9	0,9	-	20
10	1,1	1,1	1,1	0,8	0,8	0,8	0,5	2	2	4,2	3
11	0,5	0,5	0,5	-	-	-	0,5	2	2	-	20
12	0,5	0,5	0,5	0,6	0,6	0,6	0,1	1	1	3	3,5

Таблица 2.13 – Матрицы C , L , τ и Z для МФ 9–12 после ЭП

	МФ 9	МФ 10
C , пФ/м	$\begin{bmatrix} 91,0016 & -9,1476 \\ -9,1476 & 91,0016 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 26,0652 & -3,43412 \\ -3,43412 & 25,2589 \end{bmatrix}$
L , нГн/м	$\begin{bmatrix} 2198,58 & 852,009 \\ 852,009 & 2198,58 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 647,879 & 193,734 \\ 193,734 & 647,879 \end{bmatrix}$
τ , нс/м	$\begin{bmatrix} 11,6128 & 0 \\ 0 & 15,802 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 4,3265 & 0 \\ 0 & 3,63354 \end{bmatrix}$
Z , Ом	$\begin{bmatrix} 154,503 & 38,5478 \\ 38,5478 & 154,503 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 158,542 & 34,8275 \\ 34,8275 & 161,005 \end{bmatrix}$
	МФ 11	МФ 12
C , пФ/м	$\begin{bmatrix} 163,656 & -8,62638 \\ -8,62638 & 163,657 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 36,8062 & -6,90703 \\ -6,90703 & 36,8064 \end{bmatrix}$
L , нГн/м	$\begin{bmatrix} 1471,49 & 524,538 \\ 524,538 & 1471,49 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 731,655 & 232,805 \\ 232,805 & 731,681 \end{bmatrix}$
τ , нс/м	$\begin{bmatrix} 12,7727 & 0 \\ 0 & 17,591 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 4,66979 & 0 \\ 0 & 5,37001 \end{bmatrix}$
Z , Ом	$\begin{bmatrix} 93,8033 & 19,6651 \\ 19,6651 & 93,8033 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 143,215 & 36,3879 \\ 36,3879 & 143,217 \end{bmatrix}$

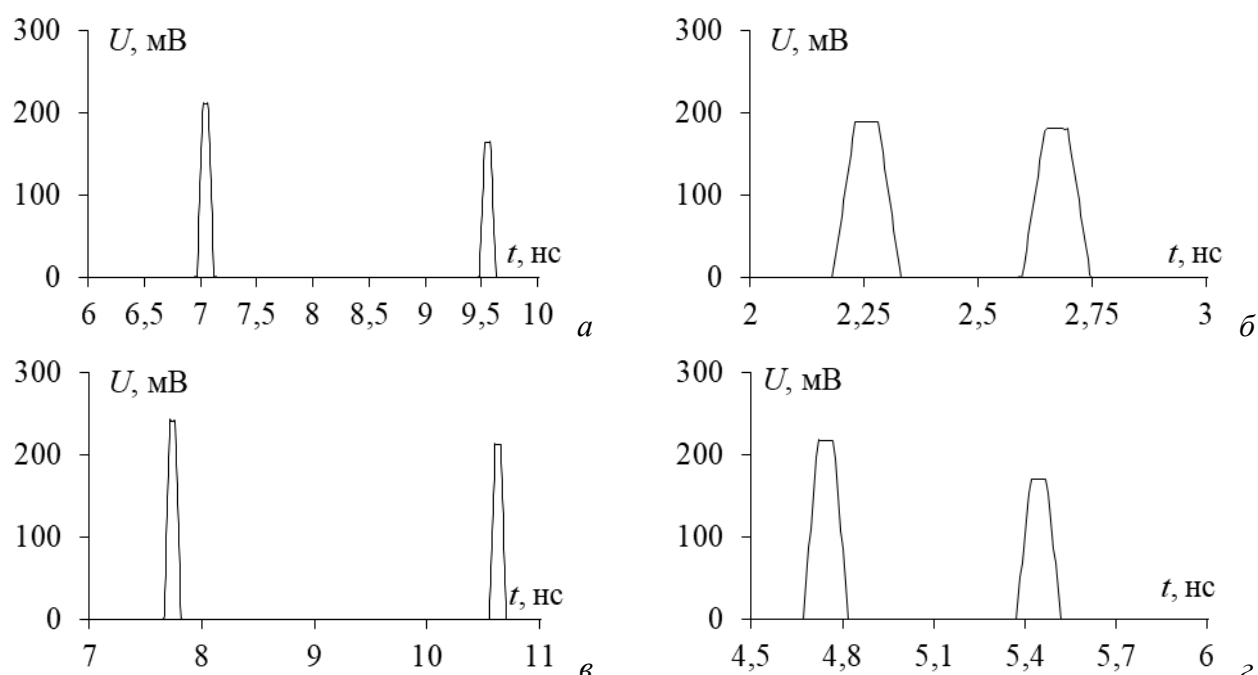


Рисунок 2.15 – Формы выходного напряжения МФ 9 (а), 10 (б), 11 (в) и 12 (г) после ЭП

При сравнении рисунков 2.14г и 2.15г видно, что достигнуто уменьшение $U_{\max}$ при сохранении полного разложения. В таблицу 2.14 сведены $U_{\max}$, $Z_{\text{ср}}$ и Δt_i для МФ 9–12 после оптимизации посредством ЭП.

Таблица 2.14 – Характеристики МФ 9–12 после ЭП

МФ	$U_{\max}$, мВ	$Z_{\text{ср}}$, Ом	Δt , нс/м
9	212,2	154,5	4,19
10	188,3	159,8	0,69
11	242,4	93,8	4,82
12	217,6	143,2	0,7

Из таблицы 2.14 видно, что согласование с трактом ухудшилось (на 18,2, 25,8, 19,8 и 24,5 для МФ 9–12), однако при этом уменьшилось $U_{\max}$: на 4,95% для МФ 9, на 9,64% для МФ 10, на 1,94% для МФ 11 и на 5,9% для МФ 12. Помимо этого, заметно изменение Δt : увеличение на 11% для МФ 10 и на 1,2% для МФ 11 и уменьшение на 13,7 и 6,9% для МФ 9 и 12, соответственно.

По аналогии с подразделом 2.1, для определения наиболее перспективных параметров поперечного сечения для дальнейшей оптимизации, выполним предварительную оценку степени их влияния на $U_{\max}$. Поскольку МФ 9–12 характеризуются схожими параметрами поперечного сечения, сравнены МФ 11 и МФ 12, отличающиеся изоляцией вокруг проводников. Для МФ 11 взяты параметры $r_{10}=r_{11}=r_{12}=0,5$ мм, $h_3=s_1=s_2=1$ мм, $l=600$ мм. Для МФ 12 взяты параметры $r_{10}=r_{11}=r_{12}=1,1$ мм, $h_{10}=h_{11}=h_{12}=0,6$ мм, $h_3=1$ мм, $s_1=s_2=0,1$ мм, $l=600$ мм. Выполнен полный перебор параметров (по одному за раз) в диапазонах 0,1–2 мм для r_{1i} и h_3 , и

0,1–5 мм для s_i . Зависимости $U_{\max}$ от параметров для обоих МФ показаны на рисунках 2.16 и 2.17.

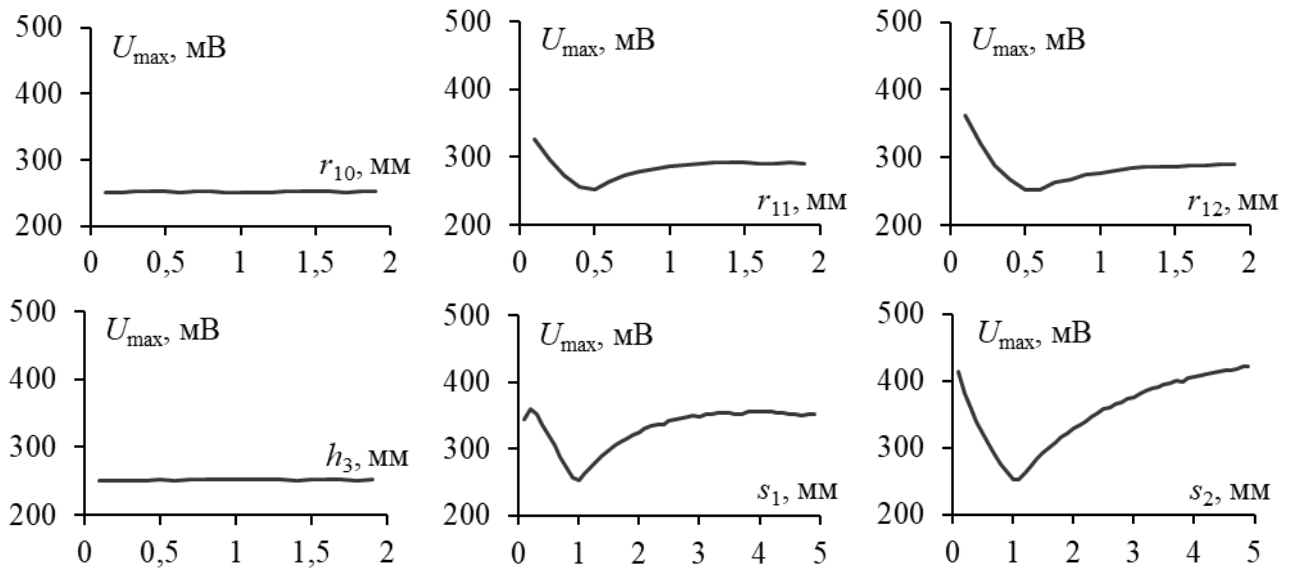


Рисунок 2.16 – Зависимости $U_{\max}$ от параметров поперечного сечения МФ 11

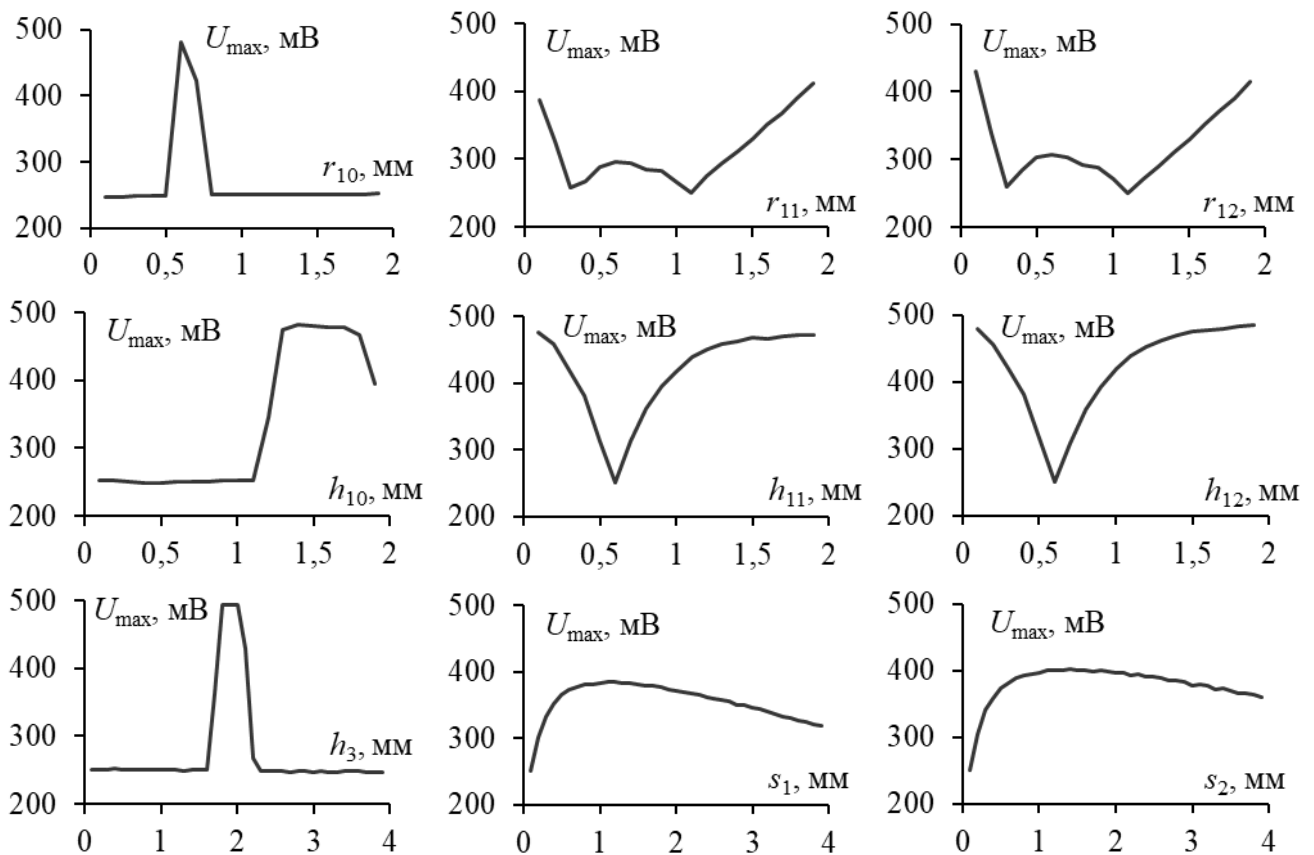


Рисунок 2.17 – Зависимости $U_{\max}$ от параметров поперечного сечения МФ 12

Видно, что параметры различно влияют на $U_{\max}$. Для МФ 11 наименьшее влияние у r_{10} и h_3 , а параметры r_{11} и r_{12} имеют схожий характер кривых, как и s_1 и s_2 . Для МФ 12 аналогичная ситуация: характер зависимостей схож для пар параметров (r_{11} и r_{12} , h_{11} и h_{12} и s_1 и s_2). Для

МФ 12 существенно влияют все параметры, однако для r_{10} , h_{10} и h_3 имеются линейные участки со всплесками, где Δt уменьшается (до 0,036 нс/м), импульсы налагаются.

Для плоских кабельных МФ наибольшее влияние на выходные характеристики оказывают параметры сигнальных проводников r_{1i} , h_{1i} , s_i , а также h_3 . Кроме этого, при оптимизации в диапазоне реальных параметров, необходимо учитывать, что параметры r_{1i} , h_{1i} зависят друг от друга согласно технологическому регламенту, определяющему величину h_{1i} для ряда значений r_{1i} (например, $h_{1i}=0,6$ мм соответствует $r_{1i}=0,5$ мм, $h_{1i}=1$ мм – $r_{1i}=1,8$ мм и др.).

Таким образом, выполнено предварительное моделирование 10 МФ на основе круглых и плоских кабелей. Для стандартного набора параметров и найденного посредством ЭП вычислены C , L , τ и Z и временные отклики. После оптимизации по амплитудному критерию посредством ЭП удалось максимально уменьшить U_{max} на 32,52%, а минимально – на 1,94%. Отмечено положительное влияние асимметрии на разложение импульсов в круглых кабелях. Рекомендованы параметры для оптимизации кабельных МФ.

2.3 Подход к оптимизации модальных фильтров на основе круглого кабеля

В подразделах 2.1–2.2 рассмотрены особенности моделирования и оптимизации МФ. Несмотря на потенциал круглых кабельных структур для реализации МФ, их оптимизация представляет определённую сложность в силу особенностей поперечного сечения и необходимости соблюдения геометрических ограничений. Здесь предложен подход к их эффективной параметрической оптимизации, основанный на использовании полярной системы координат при построении их геометрии, что позволяет сохранить корректность полученных результатов и избежать наложения проводников при алгоритмической оптимизации.

Как отмечалось ранее, полосковые и кабельные (в частности, круглые кабели) МФ имеют свои особенности и различия, из-за чего подходы к их оптимизации также отличаются. Так, для обоих видов МФ параметрическая оптимизация подразумевает поиск такого набора параметров структуры, при котором разрабатываемый МФ будет в наибольшей степени удовлетворять назначению.

Первым и наиболее значимым различием в оптимизации МФ на основе полосковых и круглых кабельных структур является особенность их построения в системе TUSUR.EMC. Оно выполняется с использованием простейших геометрических элементов с соответствующими командами в коде: прямые LINE и LINETO, окружность CIRCLE, дуга ARC. Каждый из объектов, описывающих поперечное сечение, создается функцией с аргументами. Так, LINE и LINETO описывают прямую, однако принимают разные аргументы: если для LINE необходимо задание начальных и конечных координат ($x; y$), то LINETO продолжает линию от последней точки на координатной плоскости и достаточно задать только конечные координаты ($x; y$).

CIRCLE требует указания координат $(x; y)$ для центра окружности, а также ее радиуса и числа сегментов. Для ARC помимо координат центра дуги необходимо также указать её начальные и конечные координаты, и число сегментов. Так, все объекты, участвующие в построении поперечного сечения, привязаны к координатам сетки на плоскости (в декартовой системе координат).

Построение, как правило, начинается от нуля и каждый последующий объект LINE не только связан с предыдущим, но и может иметь собственную изменяемую переменную, как видно из рисунка 2.18а. За счет этого можно использовать данные переменные в качестве оптимизируемых параметров без риска наложения объектов.

При построении структур с круговым сечением используется объект Circle (требующий задания координат $(x; y)$, а также радиуса окружности, как показано на рисунке 2.18б). В данном случае, симметричное расположение проводников многопроводного МФ с круговым сечением приведет к совпадению времени прихода определенных мод, что ухудшает эффект модальной фильтрации. Эта проблема решается изменением связи между активным и пассивными проводниками, что требует введения асимметрии (относительно центрального опорного проводника) расположения активного и пассивного проводников в МФ. Из-за этого, требуется задание случайных координат $(x; y)$, что может привести к выходу проводников из допустимых границ и наложению на другие объекты (поскольку координаты отдельных проводников не связываются между собой). Поэтому оптимизация МФ с круговым сечением выполнялась исключительно вручную, по ЭП.

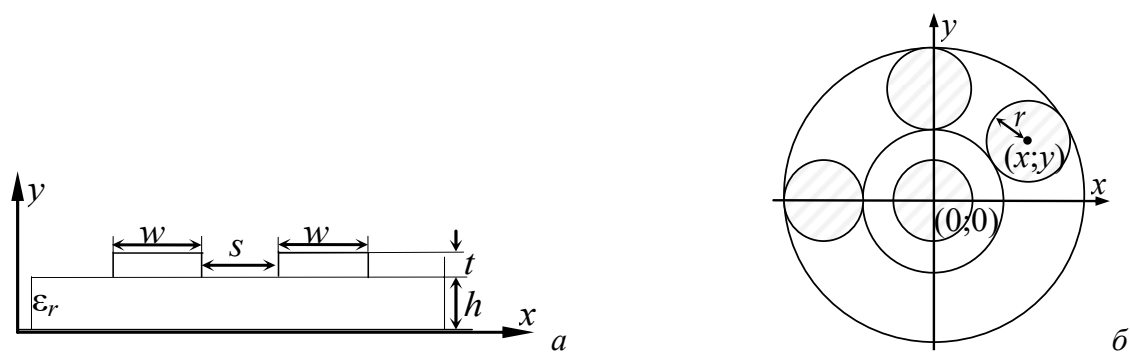


Рисунок 2.18 – Построение поперечного сечения МФ на основе: МПЛ (а) и круглого кабеля (б)

Если построено поперечное сечение, надо задать электрофизические параметры: относительные диэлектрическая (ϵ_r) и магнитная (μ_r) проницаемости среды, тангенс электрических потерь ($\tan\delta$). Они задаются командами «SET_ER_PLUS» и «SET_ER_MINUS» для ϵ_r , «SET_MU_PLUS» и «SET_MU_MINUS» для μ_r , «SET_TAN_DELTA_PLUS» и «SET_TAN_DELTA_MINUS» для $\tan\delta$, в зависимости от направления построения элементов поперечного сечения.

Как следует из этого, при оптимизации полосковых структур, оптимизируемые параметры изменяются относительно осей координат, не допуская наложения элементов поперечного сечения друг на друга, тогда как при таком же принципе построения круглых кабельных структур есть риск наложения элементов.

Из первого различия вытекает второе: использование разных систем координат. Так, при построении поперечного сечения полосковых структур и, соответственно, их оптимизации, используется декартова система координат, которая идеально подходит для такого рода структур. Однако для оптимизации кабельных МФ удобнее полярная система координат, в которой координаты точки относительно осей определяются углом и радиусом, относительно начала координат. Так, использование угла и радиуса центра проводника позволяет точнее контролировать их положение на плоскости: без наложения элементов.

Третье отличие выражено в плавающих граничных условиях, под которыми, в данном случае, понимается диапазон изменения оптимизируемых параметров. Для полосковых МФ можно задать граничные условия точно, исходя из заданных требований и физической реализуемости, без риска наложения проводников и диэлектриков друг на друга. В кабельных же МФ, точно можно задать лишь радиусы элементов, и только при условии, что расстояние от центра проводника до начала координат будет фиксированным. Однако с изменением радиуса элементов, они располагаются ближе или дальше от центра координат, что увеличивает риск наложения соседних элементов. Однако основная сложность состоит в нахождении оптимального положения проводников относительно друг друга, поскольку в этом случае нельзя точно обозначить граничные условия оптимизируемых параметров (они неизвестны). Исходя из этого, при оптимизации кабельных МФ, в качестве граничных условий для угла расположения центра проводника целесообразно использовать переменные, которые зависят от других изменяемых в процессе оптимизации параметров (например, радиусов самих проводников, расстояний от центра проводников до начала координат).

Четвёртое отличие состоит в методах оптимизации МФ. Полосковые МФ, как правило, оптимизируются с помощью ГА, ЭС, СП. Они справляются с задачами многопараметрической и многоцелевой оптимизации, показывая высокую эффективность. Однако, ввиду особенностей построения МФ на основе круглых кабелей в системе TUSUR.EMC, их оптимизация зачастую выполняется только методом ЭП.

Итак, можно сделать вывод, что главным различием в оптимизации полосковых и круглых кабельных МФ является специфика их построения в системе компьютерного моделирования. Поэтому актуально создание нового подхода к оптимизации круглых кабельных МФ.

Для предотвращения наложения проводников друг на друга или на границы диэлектриков в процессе оптимизации нужен переход из декартовой системы координат в полярную. При этом положение проводника будет определяться не двумя координатами $(x; y)$, а радиусом (расстояние R от центра проводника до начала координат) и углом φ относительно горизонтальной оси (рисунок 2.19).

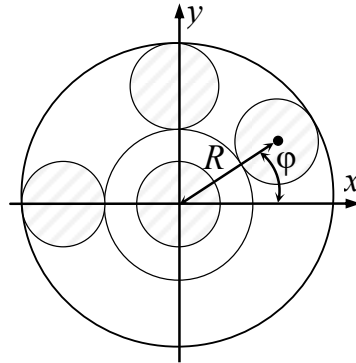


Рисунок 2.19 – Определение положения проводника в полярной системе координат

Основную сложность представляет определение оптимизируемых углов между активным и пассивными проводниками А и П, которые призваны предотвратить наложение проводников друг на друга в процессе оптимизации. Данные углы найдены через формулу длины дуги, при установленном фиксированном значении угла расположения активного проводника $\alpha_A = 95^\circ$. Подход пояснен на примере МФ 3. Его поперечное сечение показано на рисунок 2.7а, а эквивалентная схема – на рисунке 2.2а. К МФ применены следующие условия: проводники А и опорный (О) фиксированы; выполняется оптимизация радиусов пассивных проводников (r_{12} и r_{13}), радиусов от центра проводников до начала координат ($R_{П1}$ и $R_{П2}$), углов (φ_1, φ_2) между осью x и $R_{П1/П2}$ (определяющих положения первого и второго пассивного проводников) и толщины внутреннего диэлектрика (h_{10}). Визуализация данных условий представлена на рисунке 2.20 (где r_2 – радиус внутреннего диэлектрика относительно начала координат, а r_3 – внешнего).

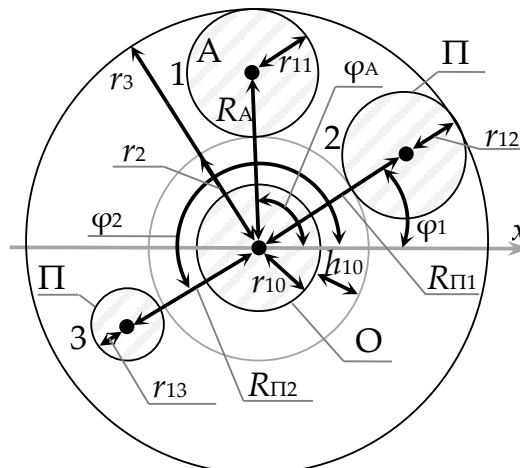


Рисунок 2.20 – Варьируемые параметры МФ 3

Для соблюдения корректности поперечного сечения взят диапазон углов в градусах. Минимальный угол между центрами активного и каждого из пассивных проводников определялся как

$$\alpha = \frac{180(\sum r_{\Pi i})}{\pi R_{\Pi A}}, \quad (2.1)$$

где $R_{\Pi A}$ – расстояние от начала координат до центра пассивных и активного проводников, которое, для упрощения, принято для них одинаковым; $r_{\Pi i}$ – радиусы соседних проводников, между которыми необходимо определить угол.

Таким образом, приняв угол расположения активного проводника α_A постоянным, углы для каждого оптимизируемого (относительно проводника А) проводника

$$\varphi = \alpha_A \pm (\alpha + 3), \quad (2.2)$$

где для второго (по счету) проводника, граница диапазона определяется разностью фиксированного α_A и полученного угла α (и еще 3 для предотвращения соприкосновения проводников), а для третьего – суммой этих углов. Предлагаемый подход к оптимизации МФ на основе круглого кабеля применим для МФ с любым числом проводников.

Апробация показана в подразделе 3.4. Оптимизация выполняется с помощью модифицированного алгоритма ЭС, позволяющего задавать диапазоны оптимизируемых параметров. Его реализация подробно рассмотрена в пункте 3.2.1. Данный подход реализован на языке Python с подключением библиотеки ЭС. При оптимизации создавались переменные, зависящие от параметров поперечного сечения друг от друга. Данная условность вызвана необходимостью учета зависимости одних параметров от других при оптимизации. Такой подход позволяет использовать переменные в качестве граничных условий. Так, учитывая, что в данном МФ границы оптимизируемых параметров могут зависеть от других изменяемых параметров, можно заключить, что без этого условия полноценная оптимизация кабельных МФ будет невозможна. Например, при изменении толщины внутреннего диэлектрика изменится и радиус центральной точки проводников (А и П) относительно начала координат, то есть радиусы в данном случае будут зависеть от толщины внутреннего диэлектрика. Поэтому использование для оптимизации ГА на внутреннем скриптовом языке системы TUSUR.EMC затруднительно, ввиду отсутствия возможности задания переменных в качестве диапазонов оптимизируемых параметров (принимаются лишь числа). Тем не менее, оптимизация кабельных МФ с помощью ГА на внутреннем скриптовом языке системы TUSUR.EMC возможна при задании корректных (с учетом особенностей конкретного МФ) численных значений, но не переменными. Следствием этого может являться некорректная оптимизация.

Между тем оптимизация с использованием данного подхода возможна, например, путем подключения внешних библиотек на языке Python.

Таким образом, детализированы различия в оптимизации полосковых и круглых кабельных МФ, включающие особенности построения в системе TUSUR.EMC, использование разных систем координат, плавающие границы диапазонов у круглых кабелей и алгоритмы оптимизации. Предложен подход к оптимизации круглых кабельных МФ, основанный на использовании полярной системы координат при построении их геометрических моделей, позволяющий избежать наложения проводников.

2.4 Основные результаты раздела

1. Выполнено предварительное моделирование двух полосковых МФ. Для стандартного набора параметров и найденного посредством ЭП вычислены матрицы C , L , τ и Z и временные отклики. За счет оптимизации по амплитудному критерию посредством ЭП $U_{\max}$ уменьшено на 24,6% для МФ 1 и на 12,5% для МФ 2. Рекомендованы параметры полосковых МФ для оптимизации.

2. Выполнено предварительное моделирование 10 МФ на основе круглых и плоских кабелей. Для стандартного набора параметров и найденного посредством ЭП вычислены C , L , τ и Z и временные отклики. После оптимизации по амплитудному критерию посредством ЭП удалось максимально уменьшилось $U_{\max}$ на 32,52%, а минимально – на 1,94%. Отмечено положительное влияние асимметрии на разложение импульсов в круглых кабелях. Рекомендованы параметры для оптимизации кабельных МФ.

3. Детализированы различия в оптимизации полосковых и круглых кабельных МФ, включающие особенности построения в системе TUSUR.EMC, использование разных систем координат, плавающие границы диапазонов у круглых кабелей и алгоритмы оптимизации. Предложен подход к оптимизации круглых кабельных МФ, основанный на использовании полярной системы координат при построении их геометрических моделей, позволяющий избежать наложения проводников.

3 ОПТИМИЗАЦИЯ СТРУКТУР С МОДАЛЬНЫМ РАЗЛОЖЕНИЕМ ГЛОБАЛЬНЫМИ АЛГОРИТМАМИ

Здесь представлены результаты оптимизации полосковых и кабельных МФ глобальными методами. Сравнены результаты ГА и классических ЭС [103]. Сформулированы и апробированы на ряде МФ критерии оптимизации, учитывающие частотные характеристики [82, 104–106], воздействие помехи с двух направлений [107, 108], а также целостность передаваемого сигнала [109, 110]. Предложена и апробирована модификация алгоритма ЭС, позволяющая задавать диапазоны оптимизируемых параметров [111–113]. Разработан гибридный алгоритм оптимизации, совмещающий детерминированный и стохастический подходы [114]. Показаны и проанализированы результаты оптимизации полосковых МФ с использованием ГА, ЭС и СП по одному [115, 116] и двум критериям [117–119], в том числе в экстремальных условиях [120]. Представлены результаты оптимизации полосковых МФ с использованием ВГ, ИО и SHGO [121–123], а также кабельных МФ по одному и двум критериям [102, 124–126]. Результаты оптимизации посредством ГА, ЭС и СП использованы для моделей машинного обучения [127, 128].

3.1 Формулировка критериев оптимизации

Приведенные в подразделе 1.4 критерии оптимизации МФ позволяют оптимизировать по одному или нескольким критериям. Однако они не охватывают частотную область, не учитывают целостность передаваемого сигнала и не отражают случаи двустороннего воздействия помех. Исходя из этого, целесообразно восполнить эти пробелы формулировкой новых критериев, учитывающих эти особенности.

Кроме того, при последовательной оптимизации по нескольким критериям может возникнуть ситуация, когда достижение отдельных критериев противоречит друг другу при разных запусках даже при равных весовых коэффициентах. Другими словами, алгоритм находит различные решения в окрестностях глобального экстремума ЦФ. В этом случае алгоритм выбирает промежуточное решение, удовлетворяющее обоим критериям (при условии равенства весовых коэффициентов). При этом определение оптимального решения, которое бы соответствовало всем критериям в наибольшей степени, усложняется ввиду того, что оно остается за оператором. Поэтому для оценки полученных результатов (в данном случае, по двум критериям) для всех структур сформулирован коэффициент оптимальности (k_{opt})

$$k_{\text{opt}} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{|f_i - f_{i \text{ opt}}| + 1}, \quad 3.1$$

где f_i – вычисленное значение i -го критерия; $f_{i \text{ opt}}$ – эталонное значение i -го критерия. Числитель выражения позволяет установить одинаковый вес для каждого критерия оптимизации в

коэффициенте оптимальности. Сумма в знаменателе гарантирует, что разница вычисленных и оптимальных значений i -го критерия будет иметь минимальный вес и предотвращает деление на ноль. В 2-критериальной оптимизации, максимум k_{opt} составляет 2 (когда полученные значения полностью совпадают с эталонными). Так, чем больше k_{opt} , тем ближе алгоритм к эталонному значению.

3.1.1 Критерий максимизации полосы пропускания

Как правило, разработка конкретного МФ должна соответствовать предъявляемым требованиям, в частности, к полосе пропускания полезного сигнала. Нередко разработчику требуется корректировать оптимальные параметры МФ, чтобы он соответствовал требуемой полосе пропускания цепи, в которую он включается. Есть широкий ряд критериев оптимизации МФ: амплитудный, временные, согласования, массогабаритный и стоимостной. Между тем данные критерии (за исключением массогабаритного и стоимостного) предназначены для обработки формы напряжения СКИ, распространяющегося по МФ (т.е. анализируются параметры временной области). Между тем МФ не оптимизировались в частотной области, например, по критерию максимизации или контроля полосы пропускания. Однако это актуально для проектирования МФ под конкретные электрические цепи.

В общем случае, формулировка ЦФ (с одним или несколькими критериями) сводится к минимизации или максимизации. Общая ЦФ для многоцелевой (многокритериальной) оптимизации, а также основные критерии, сформулированы в подразделе 1.4.1. Аналогично можно сформулировать выражения для ЦФ f_i и нормировочных коэффициентов K_i частотных критериев для максимизации и контроля полосы пропускания полезного сигнала.

Как известно, ширина полосы пропускания определяется частотой среза f_{cp} по уровню 0,707 или минус 3 дБ. Если важно максимизировать полосу пропускания, вне зависимости от иных предъявляемых требований, то критерий максимизации полосы пропускания

$$f_{cp} \rightarrow \max. \quad (3.2)$$

Однако реализация данного критерия в системе TUSUR.EMC имеет свои особенности. Поскольку значения напряжений и соответствующих им частот (на АЧХ) хранятся в виде матриц-строк в разных массивах, сначала надо определить значение АЧХ, максимально приближенное к 0,707. Далее надо определить соответствующую ему частоту. Это сделано через поиск индексов в массивах. Так, сначала определяются индексы значений, удовлетворяющих условию

$$x \leq 0,707 \text{ или } x \leq -3 \text{ дБ}. \quad (3.3)$$

После этого, формируется отдельный список данных значений. Индекс первого значения f_{cp} , удовлетворяющего указанному условию, в списке стоит первым (учитывая, что характер

частотной зависимости МФ соответствует фильтрам нижних частот. Далее из массива со значениями частот определяется значение, соответствующее первому элементу списка с индексами (удовлетворяющему указанному условию). Поскольку i -е элементы массивов частот и напряжений находятся в полном соответствии, мы получаем искомое значение $f_{\text{ср}}$. Между тем известные критерии сформулированы под минимизацию ЦФ (подраздел 1.4.1). Поэтому для критерия максимизации полосы пропускания минимизируется выражение, обратное $f_{\text{ср}}$. Тогда итоговый вид критерия (3.2) и соответствующего ему весового коэффициента

$$f_1 = \frac{1}{f_{\text{ср}}}, K_1 = f_{\text{max}}, \quad (3.4)$$

где f_{max} – максимальная частота в диапазоне моделирования (задаваемая пользователем).

3.1.2 Критерий контроля полосы пропускания

Как отмечалось ранее, практика разработки современных РЭС предполагает конкретные значения соответствующих им частотных характеристик. Кроме этого, в разрабатываемых МФ, с увеличением полосы пропускания, возможно уменьшение результирующего ослабления распространяющегося СКИ (и наоборот). Поэтому при разработке МФ под конкретное РЭС важно соблюсти баланс между указанными характеристиками, обеспечив минимальное ослабление в полосе пропускания конкретного РЭС. Поэтому, если важен контроль полосы пропускания (приведение к конкретной частоте), вне зависимости от иных предъявляемых требований, то критерий контроля полосы пропускания

$$|f_x - f_{\text{ср}}| \rightarrow \min, \quad (3.5)$$

где f_x – заданное значение $f_{\text{ср}}$.

Критерий подразумевает минимизацию модуля разности f_x и заданной $f_{\text{ср}}$. В результате, чем меньше эта разница – тем результат ближе к $f_{\text{ср}}$. Тогда итоговый вид (3.5) и соответствующего весового коэффициента

$$f_2 = |f_x - f_{\text{ср}}|, K_2 = f_{\text{max}}. \quad (3.6)$$

3.1.3 Критерий минимизации максимальной амплитуды помех при их распространении с двух направлений

На практике помеховые сигналы могут распространяться не только со стороны источника, но и в противоположном направлении. Суперпозиция прямых и отраженных сигналов может приводить к росту амплитуды помехи в определённых участках цепи [129, 130], повышая риски выхода из строя компонентов и снижения общей надежности системы [131]. Поэтому важна формулировка критерия оптимизации МФ с учетом

распространения помех с двух направлений для защиты РЭС от СКИ в условиях сложной электромагнитной обстановки.

При оптимизации по амплитудному критерию с учетом распространения помехи с двух направлений надо учитывать напряжение линии не только в контрольном узле (V_5 на выходе структуры из рисунка 3.1), но и вдоль структуры. Система TUSUR.EMC имеет в своем функционале субмодуль анимированной динамической визуализации «DynaVis». С его помощью программный субмодуль определяет путь сигнала по цепи с дальнейшим отображением на экране. На вход алгоритма поступают координаты узлов A и B и число подсекций, на выходе получается список координат этих подсекций вдоль конкретного проводника МФ. Субмодуль позволяет визуализировать изменение формы напряжения, а также выявлять его экстремумы, при прохождении через отрезки линий передачи произвольной сложности. С его помощью можно разделить линию на необходимое число подсекций для наблюдения за прохождением сигнала по линии с течением времени. На рисунке 3.1 показано деление проводника между узлами V_2 и V_5 на 50 подсекций, а рисунке 3.2 – формы напряжения U_1 и U_2 во времени t_1 и t_2 с двух генераторов в выборочных подсекциях МФ (с параметрами, полученными по критерию минимизации максимальной амплитуды на его выходе).

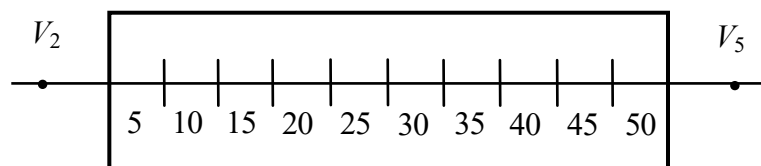


Рисунок 3.1 – Деление проводника между узлами V_2 и V_5 на 50 подсекций «DynaVis»

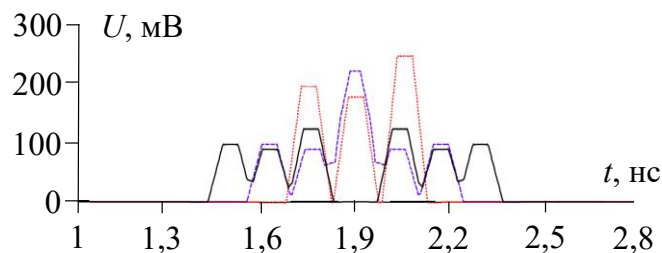


Рисунок 3.2 – Формы напряжения в подсекциях 21 и 29 (—); 23 и 27 (- -); 25 (···)

Из рисунка 3.2 видно, что подсекции 21 и 29 включают в себя по 3 импульса (результат модального разложения), распространяющихся с двух сторон МФ. Поскольку воздействия и сопротивления с двух сторон одинаковы, то и формы сигналов, проходящих по линии, также одинаковы. Сигналы частично накладываются друг на друга, начиная с подсекций 22–28, и сливаются в середине линии (подсекция 25), приводя к более высокой амплитуде напряжения. Однако при различных видах воздействий с двух направлений возможно смещение максимума напряжения (при суперпозиции сигналов) в соседние подсекции. Поэтому при оптимизации важно учитывать все подсекции МФ, в которых распространяются помехи.

Критерий минимизации амплитуды с учетом распространения СКИ с двух направлений формируется на основе амплитудного при условии, что максимальная амплитуда $U(t)$ минимизируется вдоль линии передачи, разделенной на n подсекций.

$$\max(U_1(t), U_2(t), \dots, U_n(t)) \rightarrow \min \quad (3.7)$$

где n – число подсекций.

Поскольку критерий учитывает максимальные амплитуды напряжения вдоль линии, то они нормируются максимально возможным напряжением (ЭДС источника). Тогда итоговый вид критерия (3.7) и соответствующего ему весового коэффициента

$$f_3 = \max(U_1(t), U_2(t), \dots, U_n(t)), K_3 = \max|E(t)|. \quad (3.8)$$

3.1.4 Глазковый критерий

Для реализации общего глазкового критерия целесообразно использовать два ключевых параметра: вертикальное (высота) и горизонтальное (ширина) раскрытия глаза. Их оценка осуществляется на основе 10-го и 90-го перцентилей (значение, которое величина не превышает с фиксированной вероятностью, заданной в процентах) сигнала, что позволяет учесть его статистические свойства и минимизировать влияние выбросов и шумов. Перцентиль – это мера, в которой процентное значение общих значений равно этой мере или меньше таковой. Например, 90% значений данных находятся не выше 90-го перцентиля, а 10% значений данных находятся выше 90-го перцентиля.

Перцентиль при этом вычислялся с использованием функции *numpy.percentile* из библиотеки *numpy* на языке *Python*. Рассмотрим подробнее расчет перцентиля для задачи оптимизации. Пусть дан упорядоченный по возрастанию набор данных $X = \{x_1, x_2, \dots, x_N\}$, где N – число элементов. Тогда для заданного перцентиля q (в диапазоне $0 \leq q \leq 100$) индекс элемента вычисляется как

$$i = \frac{q}{100} \times (N - 1). \quad (3.9)$$

Далее, если i -й элемент представлен целым числом, то значение перцентиля

$$P_q = x_i. \quad (3.10)$$

Если i -й элемент дробный, то используется интерполяция (в данном случае – линейная), выражаемая как

$$P_q = (1 - m) \cdot x_{\lfloor i \rfloor} + m \cdot x_{\lceil i \rceil}, \quad (3.11)$$

где $\lfloor i \rfloor$ – нижний индекс (целая часть), $\lceil i \rceil$ – верхний индекс (следующее целое), $m = i - \lfloor i \rfloor$ – дробная часть индекса, определяющая вклад соседнего элемента.

1. *Критерий максимизации высоты глаза* отвечает за расширение глазковой диаграммы по вертикальной оси. Он стремится к максимизации разницы 90-го (U_{P90}) и 10-го (U_{P10}) перцентилей уровня напряжения, полагая, что большинство точек выборки будет стремиться «вверх» и «вниз», тем самым увеличивая высоту глаза. Критерий имеет вид

$$(U_{P90} - U_{P10}) \rightarrow \max. \quad (3.12)$$

Как отмечалось ранее, известные критерии сформулированы под задачу минимизации ЦФ. Поэтому при формулировке критерия максимизации раскрытия глаза минимизируется выражение (3.12) со знаком минус. Кроме того, для использования нескольких критериев (с различной размерностью) в единой ЦФ, каждый из них необходимо нормировать. В данном случае критерий оперирует значениями амплитуд напряжений в линии и нормируется максимально возможным напряжением (в данном случае – ЭДС источника, поскольку напряжение на входе и выходе МФ всегда меньше неё). Тогда итоговый вид (3.12) и соответствующего весового коэффициента

$$f_4 = -(U_{P90} - U_{P10}), K_4 = \max |E(t)|. \quad (3.13)$$

Поскольку основная часть значений выборки будет стремиться к возможным минимуму и максимуму, сокращение числа значений между U_{P10} и U_{P90} косвенно будет также вести к горизонтальному расширению (помимо вертикального), ускоряя переход между устойчивыми уровнями «0» и «1».

2. *Критерий максимизации ширины глаза* отвечает за расширение глазковой диаграммы по горизонтальной оси. Он реализован также с использованием перцентилей (как индикаторов устойчивого сигнала), но в этом случае они служат для отслеживания переходов сигнала между устойчивыми уровнями «0» и «1» (и наоборот) по всей длине выборки данных. В качестве выборок выступают векторы-строки, хранящие значения распространяющегося сигнала по осям (амплитуда и время). Вначале фиксируются U_{P10} и U_{P90} при нарастании и спаде сигнала для каждого перехода в выборке. После вычисляется среднее время перехода, которое необходимо минимизировать. Таким образом, минимизируя время перехода сигнала между устойчивыми уровнями ($t_{\text{пер}}$), возможно обеспечить горизонтальное расширение. Тогда критерий имеет вид

$$t_{\text{пер}} \rightarrow \min. \quad (3.14)$$

Поскольку критерий основан на временной характеристике сигнала, его значение нормируется таким образом, чтобы избежать чрезмерного уменьшения весового вклада критерия при объединении с другими. Использование в качестве нормировочного коэффициента полной длительности битовой последовательности нецелесообразно из-за её значительного превышения над временем переходного процесса. Так, поскольку время переходного процесса $t_{\text{пер}}$ по определению не превышает одного периода сигнала T ,

нормировочный коэффициент принят равным T . Это обеспечивает адекватную оценку вклада критерия в общую ЦФ без избыточного снижения его значимости. Таким образом, итоговый вид критерия (3.14) и соответствующего ему нормировочного коэффициента

$$f_5 = t_{\text{пер}}, K_5 = T. \quad (3.15)$$

В итоге снизится время перехода сигнала между устойчивыми уровнями, что увеличит ширину глаза.

Сформулированы критерии оптимизации и нормировочные коэффициенты для них. Они учитывают частотные характеристики МФ, целостность передаваемого сигнала, а также двустороннее воздействие помехового сигнала.

3.2 Разработка алгоритмов оптимизации

Для МФ можно использовать разные алгоритмы глобальной оптимизации: ГА, ЭС, СП, ВГ, ИО и SHGO. Каждый из них для корректной работы требует задания настроек, зависящих от специфики задачи. Так, для ГА коэффициенты мутации и кроссовера, как правило, берутся по 0,1 и 0,5, соответственно, 10 бит для кодирования. Параметры алгоритма ЭС (коэффициенты мутации и кроссовера) адаптивно корректируются в процессе оптимизации с использованием ковариационной матрицы, которая автоматически определяет направление и масштаб изменений, что устраняет необходимость ручной настройки и повышает устойчивость к локальным экстремумам ЦФ. Алгоритм ВГ требует задания количества ветвей (подпространств поиска). Для ИО необходимо задание начальной температуры (как правило, берется 100) и скорости охлаждения в процентах. SHGO требует задания числа выборок и итераций. Алгоритм СП, ввиду своей простоты, требует лишь задания числа итераций. В качестве КО для всех алгоритмов могут выступать достижение заданного числа итераций, для ГА, ЭС, ВГ и SHGO – сходимость ЦФ с заданной точностью. Также SHGO имеет критерий останова по достижению заданного числа вычислений.

3.2.1 Модифицированный алгоритм эволюционных стратегий

В настоящее время при параметрической оптимизации защитных структур с модальным разложением наилучшим образом себя зарекомендовали эволюционные алгоритмы: ГА и классический алгоритм ЭС. При этом ГА используется чаще, ввиду его универсальности, выраженной в возможности многокритериальной оптимизации, а также быстрой сходимости значений к глобальному экстремуму вне зависимости от конфигурации МФ. Однако его существенным недостатком является большое время расчетов.

В [103] сравнены алгоритмы ГА и классических ЭС из пункта 1.4.2 на примере МФ 1 и 2, оптимизировавшихся по амплитудному критерию. Выявлено, что классические ЭС находят

решение быстрее, однако имеют ряд недостатков перед ГА, в частности, попадание в локальные экстремумы и получение нефизичных результатов (из-за отсутствия возможности задания диапазонов оптимизируемых параметров). Так, возможность задания диапазонов параметров МФ важна для ЭС.

Как правило, при оптимизации МФ с помощью ЭС применяется открытая библиотека «*barectmaes2*» на языке Python [87]. В качестве входных параметров используются список начальных точек отсчета для каждого оптимизируемого параметра и начальный шаг, адаптируемый при оптимизации. Как отмечалось ранее, ко входным параметрам не относятся пределы для каждого параметра, что приводит, в общем случае, к физически нереализуемому результату. Например, подобные результаты занесены в таблицу 3.1, где в качестве КО могут выступать: I – останов, вызванный максимумом вычислений, P – останов ввиду сходимости оптимизируемых параметров и Q – остановка ввиду сходимости ЦФ. Так, при построении структуры с данными параметрами элементы поперечного сечения налагаются друг на друга.

Таблица 3.1 – Нефизичные результаты оптимизации МФ 3

<i>N</i>	<i>h</i> , мкм	<i>t</i> , мкм	<i>s</i> ₁ , мкм	<i>s</i> ₂ , мкм	<i>U</i> _{max} , мВ	Время, с	КО
1	4822	875,4	-1014	-62	46,3	9051	I
2	3960,2	-21,8	-1131,3	-1163,7	8,7	2434	Q
3	5692	25	-1037	-1011	0,13	2891	Q
4	10972	995	-65,7	4042	72,8	9564	I
5	3641	45,8	-1000	-1006	0,91	4834	P

Поскольку алгоритм генерирует список искомым переменных, начиная с задаваемой пользователем начальной точки и с изменяемым в процессе оптимизации шагом, важно «отсеять» вышедшие за требуемый диапазон значения и «направить» их в пределы диапазона оптимизируемых параметров (например, если значение отрицательное, переместить точку поиска «выше»). Подобную задачу также можно решить путем исключения значений, вышедших за границы диапазона, однако это приведет к ошибкам в работе ЭС. Кроме этого, такой подход не решит задачу «возвращения» в диапазон значений, вышедших за него. Поэтому, задача решена заменой вышедшего за границы диапазона значения на случайное в выбранном диапазоне. Его можно было заменить и на начальные точки отсчета, приведенные выше, однако это влияет на прогресс в выполнении алгоритма, тогда как замена на случайное значение в выбранном диапазоне, в общем случае, не нарушает прогресса. Блок-схема модифицированного ЭС (далее – ЭС) представлена на рисунке 3.3. Она отличается от традиционной (рисунок 1.8) добавлением элементов 1.1 и 1.2, отвечающих за замену вышедшего за границы диапазона значения на случайное в выбранном диапазоне.

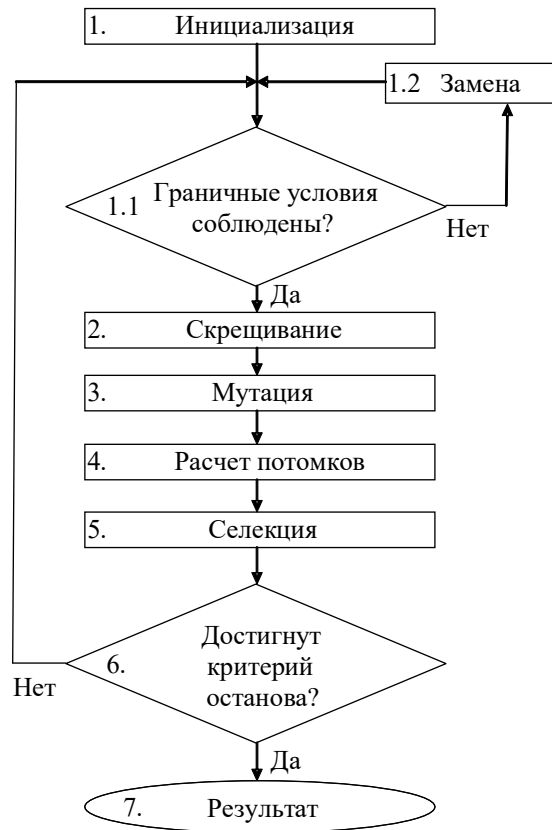


Рисунок 3.3 – Блок-схема работы ЭС

Реализация шагов 1.1 и 1.2 в ЭС демонстрируется в виде псевдокода (где x_{i_min} и x_{i_max} — нижняя и верхняя границы оптимизируемых параметров x_i):

1. **Если** $x_{i_min} \leq x_i \leq x_{i_max}$:
2. Оставить x_i неизменным
3. **Иначе:**
4. Установить x_i = случайное значение из диапазона $[x_{i_min}, x_{i_max}]$

Алгоритм проверяет граничные условия для каждого x_i (Шаг 1.1) и, при необходимости, заменяет значение x_i (Шаг 1.2). Вышедшие за пределы переменные x_i заменяются на случайные в указанных диапазонах.

Для проверки работоспособности алгоритма он проверен на узком диапазоне значений на примере МФ 2. Как правило, искомые параметры находятся в пределах 100–1000 мкм для h , 200–2000 мкм для s и 30–175 мкм для t . Диапазоны были уменьшены до 250–350 мкм для h и s и 50–150 мкм для t . Неизменные параметры МФ, а также воздействующего СКИ, взяты такими же, как для МФ 2 в подразделе 2.1. Оптимизация выполнялась с учетом потерь, при максимальном числе вычислений. В таблице 3.2 сведены результаты проверки работоспособности алгоритма с более узким диапазоном поиска значений.

Таблица 3.2 – Результаты оптимизации МФ 2 по алгоритму ЭС в малых диапазонах параметров

N	h , мкм	t , мкм	s , мкм	$U_{\max}$, мВ	Время, с
1	285	120,7	320,3	141,5	368
2	257,6	121,5	272	145	722
3	281,4	123,3	301	143,3	1336
4	307,7	123,4	319,3	142,6	206
5	256,5	123,3	297,4	142,9	627
6	325,5	123,8	275,2	147,3	609
7	300	123,7	304	143,7	705
8	253,3	120,9	328,3	140	1448
9	259,3	123	294,4	143,2	1436
10	262,7	123,4	337,6	139,7	2073

Из таблицы 3.2 видно, что, несмотря на малые диапазоны параметров, они не выходят за края диапазона, из чего можно сделать вывод о корректной работе предложенного алгоритма.

3.2.2 Алгоритм адаптивного усечения секций

Методы, применяемые в оптимизации МФ, демонстрируют компромисс между точностью, устойчивостью и вычислительными затратами. ГА и ЭС дают высокую точность нахождения глобального экстремума, но требуют значительных ресурсов из-за сложных математических операций. СП сохраняет вычислительную простоту и устойчивость к локальным экстремумам, но не всегда точен. Алгоритм ВГ систематически исследует пространство, но демонстрирует уязвимость в многоэкстремальных средах и тенденцию к застреванию в локальных экстремумах.

Поэтому разработан гибридный алгоритм адаптивного усечения секций (АУС), объединяющий преимущества разных алгоритмов. Для формирования начальной выборки взят алгоритм СП, чья стохастическая природа обеспечивает глобальную исследовательскую способность и устойчивость к локальным экстремумам. Чтобы придать поиску направленность, взята концепция пространственного деления из алгоритма ВГ: исходная область $\Omega \subset \mathbb{R}^d$ (где $\mathbb{R}^d$ – d -мерное евклидово пространство всех векторов $x=(x_1, \dots, x_d)$ с вещественными координатами) делится на гиперкубические секции (от 2- до N -мерных гиперкубов), где независимо выполняется оценка. Ключевая особенность подхода – отсечение неперспективных секций. Так, после каждой итерации отсекается половина худших областей, что экспоненциально сужает пространство поиска. Это позволяет сохранить вычислительную эффективность алгоритма СП и систематичность алгоритма ВГ, создавая механизм, который балансирует между глобальным сканированием и локальным поиском.

В самом начале алгоритм делит общее пространство поиска на K секции:

$$K = N_{\text{sec}}^d, \quad (3.16)$$

где N_{sec} – число секций на переменную (задается пользователем), d – размерность (число оптимизируемых переменных). Например, при $N_{\text{sec}}=5$ и $d=3$, общее число секций K составит 125. Таким образом, число секций соразмерно числу комбинаций диапазонов на каждый параметр.

Далее инициализируется первая итерация и объявляется переменная для записи лучшего решения. После начинается основной цикл алгоритма, включающий в себя генерацию N_{sol} (число решений на одну секцию, задается пользователем) решений в каждой из секций, выбор лучшего решения для каждой секции, ранжирование выбранных лучших решений по пригодности, отсечение половины неперспективных секций, а также обновление лучшего решения (инициированного до начала основного цикла), если новое решение лучше (для первой итерации лучшее решение обновляется всегда). Если при отсечении число решений нечетное, то округление происходит в сторону отсеченных секций (например, если всего секций 13 – будет отсечено 7). При этом вводится общее число проходов по секциям в процессе оптимизации N_{pass} (задается пользователем). Основные количественные оценки описываются тремя упрощенными формулами, описывающими уменьшение числа секций на i -м проходе $K^{(i)}$, число вычислений ЦФ на i -м проходе $N^{(i)}$ и общее число вычислений ЦФ ($N^{(i)}$) за N_{pass} :

$$K^{(i)} = \max\left(\left\lfloor \frac{K}{2^i} \right\rfloor, 1\right), \quad (3.17)$$

$$N^{(i)} = K^{(i)} N_{\text{sol}}, \quad (3.18)$$

$$N_{\text{total}} = \sum_{i=0}^{N_{\text{pass}}-1} N^{(i)} \leq 2KN_{\text{sol}}. \quad (3.19)$$

Из этого следует, что после первой итерации затраты на каждую последующую падают вдвое. Этот цикл продолжается до достижения заданного числа итераций N_{it} , после чего выводятся результаты с указанием лучшего решения, значений оптимизируемых параметров и времени выполнения оптимизации. В результате алгоритм выполняет $N^{(i)}$ вычислений ЦФ за проход 1, $(K^{(i)}N_{\text{sol}})/2$ – за 2, $(K^{(i)}N_{\text{sol}})/4$ – за 3 и т.д. При этом, когда после отсева остается одна секция, поиск (генерация новых решений) выполняется только в ней до N_{it} . Блок-схема алгоритма представлена на рисунке 3.4.

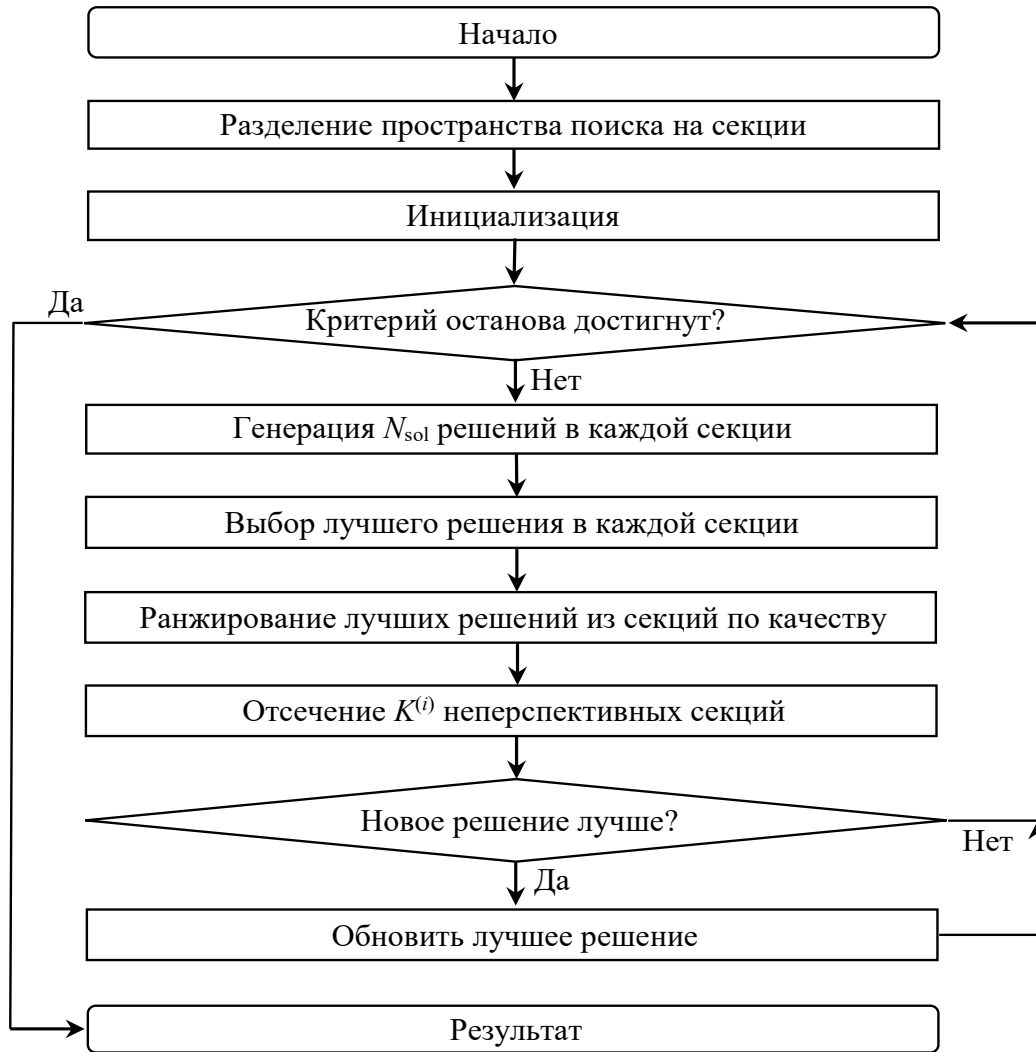


Рисунок 3.4 – Блок-схема алгоритма АУС

Выполнена предварительная верификация алгоритма. Для этого выполнена его проверка на примере двух классических тестовых функций, каждая из которых обладает специфическими характеристиками, позволяющими оценить работоспособность алгоритмов в различных условиях.

1. **Функция сферы** отличается наличием единственного глобального минимума [132]. Её известные свойства (выпуклость и простота) позволяют объективно оценить корректность реализации алгоритмов на гладкой поверхности функции. Функция сферы определяется как

$$F(x, y) = x^2 + y^2. \quad (3.20)$$

Глобальный минимум функции достигается при $(x, y) = (0, 0)$ со значением функции $F(0, 0) = 0$. Как правило, в исследованиях переменные данной функции рассматриваются в ограниченных диапазонах, например, $x, y \in [-100, 100]$, однако при необходимости диапазоны могут быть расширены или уменьшены. Так, на рисунке 3.5 показано двухмерное представление функции сферы при $x, y \in [-10, 10]$.

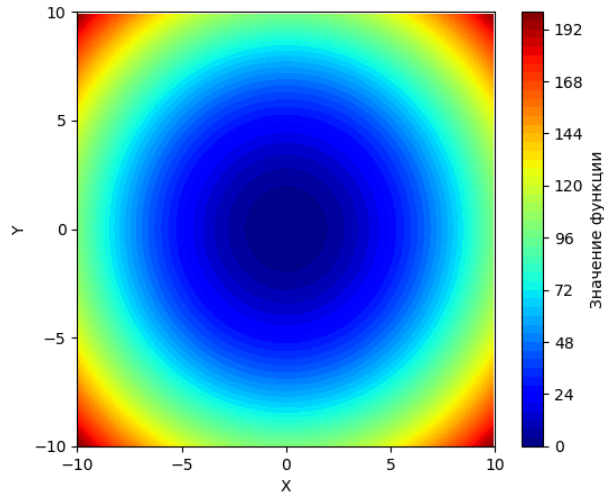


Рисунок 3.5 – Двухмерное представление функции сферы

2. **Функция Экли** имеет более сложный ландшафт [133]. Она характеризуется наличием одного глобального экстремума наряду с множеством локальных, что создаёт дополнительные сложности при поиске оптимального решения. Она позволяет оценить устойчивость и способность алгоритмов избегать локальных минимумов в многоэкстремальном пространстве решений. Функция Экли определяется как

$$F(x, y) = -20 \exp \left[-0,2 \sqrt{0,5(x^2 + y^2)} \right] - \exp \left[0,5(\cos(2\pi x) + \cos(2\pi y)) \right] + e + 20. \quad (3.21)$$

Она обладает одним глобальным экстремумом, расположенным в точке $(x, y) = (0, 0)$, где $F(0, 0) = 0$, а также содержит множество локальных. Как правило, для неё переменные рассматриваются в диапазоне $x, y \in [-5, 5]$, что позволяет воспроизвести сложный рельеф поверхности с множеством локальных экстремумов. На рисунке 3.6 показано двухмерное представление функции Экли при $x, y \in [-5, 5]$.

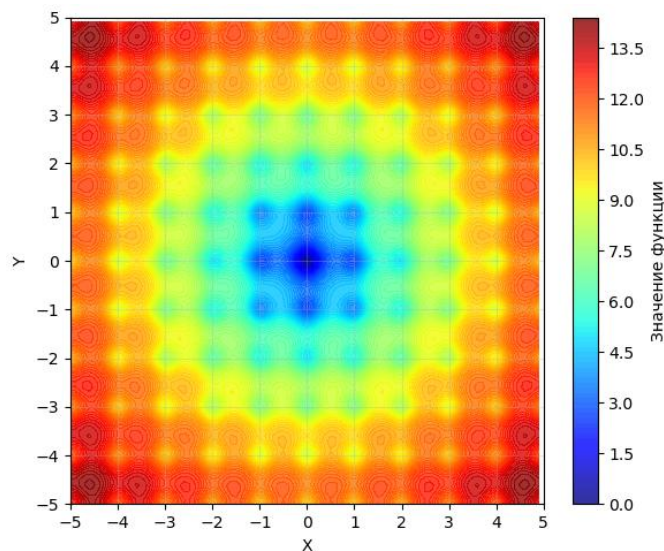


Рисунок 3.6 – Двухмерное представление функции Экли

Оптимизация для тестовых функций (3.20) и (3.21) выполнялась при разных комбинациях N_{pass} , N_{sec} и N_{sol} . Для функции сферы параметры x и y оптимизировались в диапазоне от минус 10 до 10, для функции Экли – $x, y \in [-5, 5]$. Результаты приведены в таблицах 3.3 и 3.4, куда внесены значения оптимизируемых параметров (x , y), минимизируемой ЦФ (F) и времени, затраченного на расчеты (в мс). Лучшие решения выделены полужирным шрифтом.

Таблица 3.3 – Результаты оптимизации для функции сферы

N	x	y	F	Время	x	y	F	Время
	$N_{\text{pass}}=5$				$N_{\text{pass}}=10$			
	$N_{\text{sec}}=2, N_{\text{sol}}=2 (N_{\text{total}}=18)$				$N_{\text{sec}}=2, N_{\text{sol}}=2 (N_{\text{total}}=28)$			
1	2,27141	2,07398	9,46071	3	0,89222	0,82182	1,47146	12,99
2	4,30708	0,53611	18,83835	2	-0,12823	1,25619	1,59445	3
3	-1,13014	-1,96689	5,14587	4	-0,41491	-2,24038	5,19147	3
4	3,62716	-2,99666	22,1363	3	-3,22154	0,50734	10,6357	2
5	2,61115	-0,34742	6,93878	3	0,57379	0,92917	1,1926	4
	$N_{\text{sec}}=2, N_{\text{sol}}=5 (N_{\text{total}}=45)$				$N_{\text{sec}}=2, N_{\text{sol}}=5 (N_{\text{total}}=70)$			
1	1,50459	-0,26352	2,33323	5	-1,54489	-0,00696	2,38674	5
2	-0,67244	0,28954	0,53601	4	1,22916	1,2197	2,99849	3
3	-0,87914	-0,5211	1,04444	2	0,068	0,03039	0,00555	3
4	0,55883	1,58558	2,82636	3	-0,55464	0,57005	0,63258	3
5	1,18683	0,6833	1,87547	3	-0,10192	-0,03494	0,01161	3
	$N_{\text{sec}}=2, N_{\text{sol}}=10 (N_{\text{total}}=90)$				$N_{\text{sec}}=2, N_{\text{sol}}=10 (N_{\text{total}}=140)$			
1	0,62384	0,96595	1,32224	5	-0,65236	0,20159	0,46622	4
2	-1,50073	0,72001	2,77058	6	-0,04001	-0,17465	0,0321	7
3	1,09645	0,36314	1,33407	3	-0,82527	-1,08625	1,86102	4
4	-0,29863	1,00235	1,09389	3	0,23562	0,77002	0,64845	4
5	-0,98592	-0,45667	1,18059	3	0,69471	-1,48862	2,6986	4
	$N_{\text{sec}}=5, N_{\text{sol}}=2 (N_{\text{total}}=94)$				$N_{\text{sec}}=5, N_{\text{sol}}=2 (N_{\text{total}}=104)$			
1	0,50591	-0,82627	0,93866	9	-0,27454	0,2505	0,13812	4
2	0,34064	0,44305	0,31233	7	-0,35588	0,27949	0,20476	4
3	0,12808	-1,35998	1,86595	4	-0,27409	0,46883	0,29492	5
4	0,03383	0,56682	0,32243	4	0,1719	-0,05218	0,03227	4
5	0,20411	-0,90912	0,86816	4	0,66522	0,60004	0,80256	4
	$N_{\text{sec}}=5, N_{\text{sol}}=5 (N_{\text{total}}=235)$				$N_{\text{sec}}=5, N_{\text{sol}}=5 (N_{\text{total}}=260)$			
1	-0,16618	-0,82717	0,71183	6	-0,428	0,14065	0,20296	10,99
2	-0,47176	-0,05039	0,22509	11	0,13947	-0,2825	0,09926	6
3	-0,37173	-0,38463	0,28612	4	-0,37689	0,04485	0,14406	6
4	0,01074	0,02589	0,00079	6	0,11479	-0,02384	0,01374	6
5	0,42429	0,23649	0,23595	5	0,31772	0,54768	0,4009	7
	$N_{\text{sec}}=5, N_{\text{sol}}=10 (N_{\text{total}}=470)$				$N_{\text{sec}}=5, N_{\text{sol}}=10 (N_{\text{total}}=520)$			
1	0,1079	-0,26354	0,0811	14	-0,04078	-0,17383	0,03188	12
2	0,16472	0,04177	0,02888	9	0,06923	0,07904	0,01104	14,99
3	0,17746	-0,03593	0,03278	8	-0,11214	-0,27282	0,087	9
4	0,17452	0,02559	0,03111	8	-0,03972	0,04288	0,00342	9
5	-0,28179	-0,14754	0,10117	8	0,0714	0,22897	0,05753	8,99
	$N_{\text{sec}}=10, N_{\text{sol}}=2 (N_{\text{total}}=386)$				$N_{\text{sec}}=10, N_{\text{sol}}=2 (N_{\text{total}}=400)$			
1	0,06371	-0,34768	0,12494	18,99	-0,14913	0,01829	0,02257	11,99

N	x	y	F	Время	x	y	F	Время
2	0,08876	-0,10094	0,01807	10,99	0,21287	-0,30075	0,13576	18,99
3	0,02347	0,02716	0,00129	11	-0,19656	0,15771	0,06351	12
4	-0,09986	0,047	0,01218	11,99	-0,08324	-0,05508	0,00996	11,99
5	0,14946	-0,27765	0,09943	11,99	0,33109	-0,39565	0,26616	11,99
$N_{\text{sec}}=10, N_{\text{sol}}=5 (N_{\text{total}}=965)$					$N_{\text{sec}}=10, N_{\text{sol}}=5 (N_{\text{total}}=1000)$			
1	0,10347	-0,00454	0,01073	23,99	0,19505	-0,04854	0,0404	19,99
2	-0,00178	0,15685	0,0246	24,98	-0,25376	-0,13392	0,08233	26,98
3	0,0497	0,06197	0,00631	18,99	-0,12777	-0,05802	0,01969	21,99
4	0,07903	0,09081	0,01449	17,99	-0,28535	-0,10697	0,09286	18,98
5	0,01445	0,29611	0,08789	17,99	0,02306	0,23303	0,05484	17,99
$N_{\text{sec}}=10, N_{\text{sol}}=10 (N_{\text{total}}=1930)$					$N_{\text{sec}}=10, N_{\text{sol}}=10 (N_{\text{total}}=2000)$			
1	0,14596	0,10429	0,03218	33,98	-0,09784	0,0837	0,01658	34,98
2	0,01001	-0,1853	0,03444	31,98	0,05952	0,09128	0,01187	22,99
3	-0,03601	0,09627	0,01056	28,98	-0,01319	0,06805	0,0048	35,98
4	0,05453	-0,07268	0,00826	31,98	-0,10719	0,01067	0,0116	27,98
5	-0,02484	0,03425	0,00179	26,99	-0,17357	-0,03632	0,03145	28,98

Таблица 3.4 – Результаты оптимизации для функции Экли

N	x	y	F	Время	x	y	F	Время
$N_{\text{pass}}=5$					$N_{\text{pass}}=10$			
$N_{\text{sec}}=2, N_{\text{sol}}=2 (N_{\text{total}}=18)$					$N_{\text{sec}}=2, N_{\text{sol}}=2 (N_{\text{total}}=28)$			
1	-0,22212	0,4746	3,48084	3	0,1054	0,98445	2,89162	5,99
2	0,51337	-0,55285	4,36356	2	-0,20665	0,71007	3,6939	2
3	-0,21936	0,26453	2,61566	3	1,25508	1,07122	5,33614	3
4	1,04449	0,08133	2,97137	4	-1,03359	-0,07602	2,90295	5
5	0,96802	0,10972	2,89168	4	0,32695	-0,09666	2,46474	3
$N_{\text{sec}}=2, N_{\text{sol}}=5 (N_{\text{total}}=45)$					$N_{\text{sec}}=2, N_{\text{sol}}=5 (N_{\text{total}}=70)$			
1	-1,11657	-0,06656	3,35417	6	0,31726	0,17783	2,70688	7
2	1,75812	0,0865	5,55197	4	0,97819	0,01594	2,60371	4
3	-0,23905	-0,09826	1,88023	4	0,76639	0,01363	3,04041	5
4	-0,51434	-0,68827	4,50364	4	1,08713	-0,07473	3,18099	5
5	0,38142	0,01833	2,63181	5	-0,02253	-0,04931	0,22998	5
$N_{\text{sec}}=2, N_{\text{sol}}=10 (N_{\text{total}}=90)$					$N_{\text{sec}}=2, N_{\text{sol}}=10 (N_{\text{total}}=140)$			
1	0,31346	-0,16152	2,61894	6	0,0774	-0,35025	2,54862	8,99
2	1,06806	-0,05587	3,00509	5	-0,26762	0,08575	2,04412	4
3	0,12288	-1,11861	3,59472	3	0,09342	0,36948	2,68954	5,99
4	-0,80424	0,17551	3,43517	3	-0,00083	-0,03387	0,12612	5
5	-0,31438	-0,06353	2,30318	5	-0,1725	-0,10538	1,40753	4
$N_{\text{sec}}=5, N_{\text{sol}}=2 (N_{\text{total}}=94)$					$N_{\text{sec}}=5, N_{\text{sol}}=2 (N_{\text{total}}=104)$			
1	-0,89809	-0,03314	2,66979	8	-0,16562	0,08802	1,27126	7,99
2	-0,27427	0,06281	2,02797	6,99	0,02872	0,24709	1,7592	5
3	-0,06282	0,20775	1,51392	4	0,1695	-0,0866	1,29514	5
4	-0,83772	-0,05299	2,87276	5	0,04495	0,15351	1,01648	6
5	0,20879	-0,19602	2,16983	7,99	-0,07154	0,0001	0,33306	6
$N_{\text{sec}}=5, N_{\text{sol}}=5 (N_{\text{total}}=235)$					$N_{\text{sec}}=5, N_{\text{sol}}=5 (N_{\text{total}}=260)$			
1	0,11762	0,07743	0,86127	13,99	-0,19299	0,08768	1,48444	12,99
2	-0,20014	-0,06784	1,46793	7	0,03243	0,08668	0,47577	7,99
3	-0,1591	-0,2081	1,95318	6	0,08123	-0,06171	0,54723	8
4	-0,09432	-0,27557	2,12779	8	0,00811	0,18287	1,20744	6,99

N	x	y	F	Время	x	y	F	Время
5	-0,11901	-0,06956	0,83482	7	-0,06469	0,066	0,47651	7,99
$N_{\text{sec}}=5, N_{\text{sol}}=10 (N_{\text{total}}=470)$					$N_{\text{sec}}=5, N_{\text{sol}}=10 (N_{\text{total}}=520)$			
1	-0,05177	0,1514	1,01873	15,99	0,05359	-0,09595	0,6067	20,99
2	-0,03189	0,10536	0,60575	13	-0,04316	-0,02675	0,21107	11,99
3	-0,03179	0,07988	0,42956	15,99	0,10645	-0,06296	0,71686	12,99
4	0,09141	-0,12821	1,0073	11,99	0,04547	-0,11328	0,70134	10,99
5	-0,16265	-0,03248	1,06391	9,99	-0,03715	-0,13545	0,85012	11,99
$N_{\text{sec}}=10, N_{\text{sol}}=2 (N_{\text{total}}=386)$					$N_{\text{sec}}=10, N_{\text{sol}}=2 (N_{\text{total}}=400)$			
1	0,08123	0,17751	1,33537	17	0,00894	-0,07467	0,35658	19,99
2	0,01061	-0,13479	0,80367	12,99	-0,11781	0,03439	0,70506	12,99
3	0,01129	-0,05879	0,26203	12,99	-0,01948	-0,07611	0,37882	13,99
4	0,0778	0,12463	0,91333	13,99	-0,00648	-0,0271	0,09936	13,99
5	0,05534	-0,16459	1,13723	12,99	-0,1637	-0,00767	1,04364	12,99
$N_{\text{sec}}=10, N_{\text{sol}}=5 (N_{\text{total}}=965)$					$N_{\text{sec}}=10, N_{\text{sol}}=5 (N_{\text{total}}=1000)$			
1	0,00297	0,0261	0,09256	37,98	-0,01489	-0,04651	0,20051	21,99
2	-0,04562	-0,00949	0,18862	21,99	-0,02599	0,1523	0,96608	24,99
3	-0,02706	0,14521	0,90901	19,99	-0,10181	0,03606	0,59031	21,99
4	0,03466	-0,10082	0,57958	21,99	-0,03418	0,0612	0,32465	20,99
5	0,0466	0	0,18861	21,99	0,04575	-0,06076	0,36331	21,99
$N_{\text{sec}}=10, N_{\text{sol}}=10 (N_{\text{total}}=1930)$					$N_{\text{sec}}=10, N_{\text{sol}}=10 (N_{\text{total}}=2000)$			
1	0,03816	-0,03737	0,22561	51,97	-0,02701	-0,04875	0,23858	35,98
2	0,05701	-0,083	0,53706	49,97	0,07924	-0,0541	0,50179	37,97
3	0,02788	0,00155	0,09962	35,98	-0,00559	-0,02651	0,09605	38,98
4	-0,02729	-0,00719	0,10088	35,98	0,01215	0,01995	0,08053	34,98
5	-0,15102	0,11129	1,27995	37,97	0,02889	-0,06433	0,32718	35,98

Из таблицы 3.3 видно, что для функции сферы удалось получить оптимум $F(0,01215, 0,02589)=0,00079$ при $N_{\text{it}}=5, N_{\text{sec}}=5, N_{\text{sol}}=5$ за 6 мс. В данном случае для получения лучшего результата понадобилось $N_{\text{total}}=235$. Заметно, что рост N_{pass} с 5 до 10 улучшает результат: например, при $N_{\text{sec}}=2, N_{\text{sol}}=5$ среднее значение уменьшается с 1,723102 до 1,206994. Из таблицы 3.4 видно, что для функции Экли получен оптимум $F(0,01074, 0,01995)=0,08053$ при $N_{\text{pass}}=10, N_{\text{sec}}=10, N_{\text{sol}}=10$ за 34,98 мс. Для этого понадобилось 2000 вычислений ЦФ, при этом уже с итерации 7 алгоритм сосредоточил поиск в одной секции. Рост N_{pass} с 5 до 10 также улучшает результат: при $N_{\text{sec}}=2, N_{\text{sol}}=5$ среднее значение уменьшается с 3,584364 до 2,352394. Однако рост N_{sec} и N_{sol} больше улучшает результат. Для наглядности в таблице 3.5 сведены средние значения ЦФ (для 5 запусков) при разных N_{sec} и N_{sol} .

Таблица 3.5 – Средние значения ЦФ для разных комбинаций $N_{\text{pass}}, N_{\text{sec}}$ и N_{sol}

N_{pass}	N_{sol}	Функция сферы			Функция Экли		
		$N_{\text{sec}}=2$	$N_{\text{sec}}=5$	$N_{\text{sec}}=10$	$N_{\text{sec}}=2$	$N_{\text{sec}}=5$	$N_{\text{sec}}=10$
5	2	12,504	0,8615	0,051	3,2646	2,251	0,89
	5	1,723	0,292	0,0288	3,584	1,449	0,392
	10	1,54	0,055	0,01745	2,991	0,825	0,4486
10	2	4,017	0,2945	0,0996	3,458	1,135	0,517
	5	1,207	0,172	0,058	2,352	0,8383	0,489
	10	1,141	0,038	0,1526	1,763	0,617	0,2488

Из таблицы 3.5 видно, что максимально влияет на ЦФ N_{sec} . У N_{sol} влияние меньше, однако оно выше, чем у N_{pass} . Это обусловлено тем, что каждом новом значении N_{pass} отсеивается половина неперспективных секций, быстро сужая поиск до последней секции. Таким образом, указание большого числа N_{pass} при оптимизации может быть неэффективно, тогда как увеличение числа N_{sec} и N_{sol} (для роста вероятности нахождения наиболее перспективных и узких секций) – напротив. Однако, это будет приводить к росту N_{total} и временных/вычислительных затрат. Для гладких 1-экстремальных ЦФ достаточно малого числа итераций, а для многоэкстремальных ЦФ необходим рост их числа, в частности, рекомендуется уделять особое внимание N_{sec} . Так, при ограниченных мощностях используемого для расчетов ПК рекомендуется N_{sec} в диапазоне 5–10 при $d \leq 5$, 3–5 при $6 < d < 10$ и 2 при $d > 10$, $N_{\text{sol}} > 2$, $N_{\text{pass}} \geq \lfloor \log_2 K \rfloor + 1$ (позволит алгоритму достаточно заузить пространство поиска). Однако, при очень жестких ограничениях по вычислительной мощности ПК, приоритет стоит отдать росту N_{sec} .

Таким образом, модифицирован алгоритм ЭС, путем реализации задания диапазонов оптимизируемых параметров, что предотвращает получение некорректных результатов оптимизации. Разработан новый алгоритм АУС, объединяющий в себе достоинства алгоритмов СП и ВГ. Он основан на равномерном разбиении исходной области на секции, внутри каждой из которых случайным образом формируется набор решений. По оценке пригодности решений отбрасывается половина секций с худшими показателями, что экспоненциально сужает последующее пространство поиска и тем самым значительно сокращает суммарные вычислительные затраты. Так, алгоритм АУС формализует гибридный подход, соединяющий стохастическую генерацию решений с систематическим геометрическим сжатием исследуемой области, обеспечивая вычислительно эффективный механизм глобальной оптимизации.

3.3 Полосковые защитные структуры

Здесь представлены результаты оптимизации МФ 1–2 по критериям, представленным в подразделе 1.4.1, а также сформулированным в подразделе 3.1, с использованием ГА, ЭС, СП, ИО, ВГ и SHGO [103–124].

3.3.1 Оптимизация микрополосковой защитной структуры генетическим алгоритмом, эволюционными стратегиями и алгоритмом случайного поиска

3.3.1.1 Оптимизация по амплитудному критерию

Поперечное сечение МФ 1 представлено на рисунке 2.1а, а эквивалентная схема – на рисунке 2.2а. Оптимизация выполнялась без потерь по амплитудному критерию посредством

ЭС, ГА и СП в диапазонах: 200–1000 мкм для h , 18–200 мкм для t , 10–300 мкм для s_1 и s_2 . Для ЭС шаг – $\sigma=10$ мкм, а начальные решения: $h=500$ мкм, $t=30$ мкм, $s_1=200$ мкм, $s_2=200$ мкм. Остальные параметры: $w=1000$ мкм, $d=3w$. При моделировании и оптимизации сегментация границ поперечного сечения выбрана: 5 сегментов для параметра t , 20 – для s_i и h и 100 – для w и d . Параметры СКИ, а также l и R , взяты, как в подразделе 2.1. Настройки алгоритмов соответствуют приведенным в подразделе 3.2. Результаты оптимизации сведены в таблицы 3.6–3.8, где отражены номер запуска (N), оптимизируемые параметры и ЦФ ($U_{\max}$), время вычислений и КО для ЭС. Лучшие результаты, полученные каждым из алгоритмов, выделены полужирным шрифтом. Формы выходных напряжений для наилучших результатов оптимизации тремя алгоритмами приведены на рисунке 3.7.

Результаты оптимизации сравнивались между собой по итоговым значениям оптимизированных параметров и ряду характеристик. Отклонение (Δ) рассчитывалось как

$$\Delta = \left| \frac{X_1 - X_2}{X_1 + X_2} \right| \cdot 100\%, \quad (3.22)$$

где X_1 – максимальное значение, X_2 – минимальное значение.

Таблица 3.6 – Результаты оптимизации МФ 1 по амплитудному критерию для ГА

N	h , мкм	t , мкм	s_1 , мкм	s_2 , мкм	$U_{\max}$, мВ	Время, с
$N_{it}=5/10$						
1	203,1	78	147,6	293,2	149,5	185
2	996,9	188,6	11,1	239,7	148,3	186
3	243,9	36,6	58,9	156,7	155,2	186
4	830,6	192,9	13,4	102,1	153,4	186
5	200	151,5	107,8	212,4	150	186
Δ , %	66,58	68,10	86,01	48,34	2,27	0,27
$N_{it}=10/10$						
1	200	33	113,5	240,4	150,5	356
2	1000	193,6	11,1	176	147,8	354
3	209,4	178,6	106,7	211,3	151,3	354
4	1000	197,9	19,1	76	148,4	354
5	209,4	26,6	87,3	234	151,6	358
Δ , %	66,67	76,3	82,18	51,96	1,27	0,56
$N_{it}=10/100$						
1	203,1	55,1	108,9	242	148,8	3229
2	203,1	89,4	132,8	267	148,7	3225
3	203,1	121,5	114,6	228,4	148,7	3222
4	996,9	196,4	12,3	73,7	146,8	3222
5	200	33,7	115,8	264,7	149,5	3264
Δ , %	66,58	70,71	83,05	56,74	0,91	0,65
$N_{it}=50/100$						
1	1000	183,6	13,4	187,4	147,3	16140
2	990,6	140	10	93	147,2	16286
3	990,6	191,4	10	55,5	146,2	16396

N	h , мкм	t , мкм	s_1 , мкм	s_2 , мкм	$U_{\max}$, мВ	Время, с
4	1000	178,6	10	65,7	146,5	16683
5	1000	153,6	13,4	77,1	147,2	16967
Δ , %	0,47	15,51	14,51	54,3	0,37	2,5

Таблица 3.7 – Результаты оптимизации МФ 1 по амплитудному критерию для ЭС

N	h , мкм	t , мкм	s_1 , мкм	s_2 , мкм	$U_{\max}$, мВ	Время, с	КО
$N_{it}=500$							
1	991,6	140,2	10	47,1	147,7	1820	I
2	201	132,1	97,2	196,5	150,9	1816	I
3	994,9	184,6	12,1	105,6	147,9	1815	I
4	604,6	126,8	107,1	276	161,1	1819	I
5	539,6	76,5	88,2	250	161,2	1817	I
Δ , %	66,39	41,4	82,92	70,84	4,37	0,14	
$N_{it}=1000$							
1	987,7	88,8	10,1	27,3	148,4	3597	I
2	200,3	42,1	113	252,7	149,4	3595	I
3	995,4	180,1	11,3	48,5	147,4	3639	I
4	603,4	128,7	111,6	282,7	160,1	3602	I
5	202,8	89,4	116,3	236,4	149,7	3624	I
Δ , %	66,5	62,1	84,02	82,39	4,13	0,61	
$N_{it}=2500$							
1	488,4	113,3	106,6	262	162,9	9032	I
2	994,8	131,4	10,1	40,7	147,7	9125	I
3	993,6	137,3	49,6	102,7	149,7	9166	I
4	527	88,3	98,6	264,3	161,2	7867	P
5	439,3	135,6	127,3	295,8	163,3	8744	P
Δ , %	38,74	21,72	85,3	75,81	5,02	7,63	
$N_{it}=5000$							
1	536,2	35,1	57,8	198,7	161,1	10755	P
2	983	26,8	10	17,4	149,5	18322	I
3	565	97,4	99,2	261,7	161,2	12992	P
4	577,9	83,7	87,5	236,7	160	12345	P
5	590,7	119	108,8	277,1	160,8	14532	P
Δ , %	29,413	63,24	83,16	88,18	3,77	26,02	

Таблица 3.8 – Результаты оптимизации МФ 1 по амплитудному критерию для СП

N	h , мкм	t , мкм	s_1 , мкм	s_2 , мкм	$U_{\max}$, мВ	Время, с
$N_{it}=50$						
1	914,1	144,6	11,1	118,3	151,1	1539
2	216,8	77,1	98,6	283,2	158	1530
3	211	95,5	131,8	245,6	156,5	1532
4	255,2	18,7	38,5	152,3	158,2	1533
5	245	132,1	38,7	84,4	160,9	1531
Δ , %	62,49	77,1	84,46	54,08	3,14	0,29
$N_{it}=100$						
1	228,3	119,6	174,5	288,2	167,3	3068
2	208,2	74,5	89,9	178,1	158,1	3066
3	248,7	160,4	54,1	96,5	159,9	3108
4	245,4	152,5	41,7	102,3	161,4	3089

N	h , мкм	t , мкм	s_1 , мкм	s_2 , мкм	$U_{\max}$, мВ	Время, с
5	981,1	182,6	11,5	192,3	149,1	3108
Δ , %	64,99	42,05	87,63	49,83	5,75	0,68
$N_{it}=1000$						
1	225,4	46,5	75	190,6	153,9	7625
2	214,5	32	41,2	260,2	169,5	7800
3	227,2	83,5	111,6	267,9	155,2	7802
4	245,9	34,4	60	229,9	159	7925
5	211,2	188,8	49,8	91,3	155,3	7862
Δ , %	7,59	71,01	46,07	49,16	4,82	1,93
$N_{it}=5000$						
1	200,5	87,3	92,4	255,7	154,4	15318
2	222,2	51,3	76,9	209,8	154,7	15577
3	209,9	109,2	130,7	269,7	152	15402
4	213,3	125,4	150	288,5	151,9	15095
5	205,1	53,5	70,4	173,8	151,3	15195
Δ , %	5,13	41,94	36,12	24,81	1,11	1,57

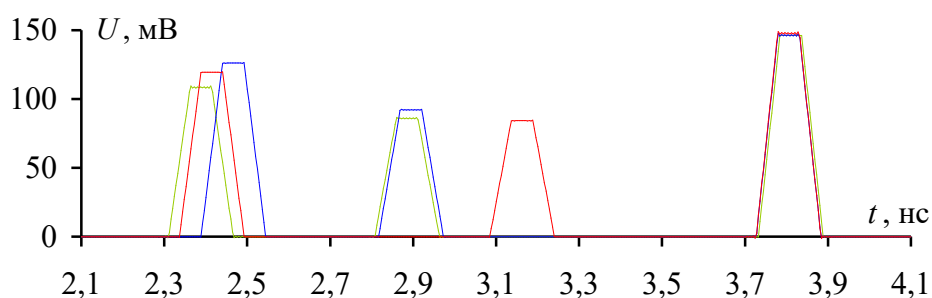


Рисунок 3.7 – Формы выходного напряжения для наилучшего результата оптимизации МФ 1 с использованием ЭС (—), ГА (—) и СП (—)

При оптимизации посредством СП удалось получить минимальный уровень выходного напряжения 149,1 мВ, ЭС – 147,4 мВ, а ГА – 146,2 мВ. При этом временные затраты СП на один запуск составили, в среднем, 15300 с при 5000 вычислениях, что немного меньше, чем ГА при том же числе вычислений (в среднем, 16500 с) и больше, чем у ЭС (в среднем, 13800 с). Однако минимальный уровень $U_{\max}$ при СП несколько больше, чем при ЭС (на 0,57 %) и ГА (на 0,98 %). Тем не менее, эти значения близки.

3.3.1.2 Оптимизация по двум критериям

Далее показаны результаты оптимизации МФ 1 одновременно по двум критериям посредством ЭС, ГА и СП. Оптимизация выполнялась по критериям: амплитудному и согласования. Первый критерий важен для минимизации максимального напряжения на выходе МФ, а второй – отражений полезных высокочастотных сигналов от входа МФ. На основе критериев из подраздела 1.4.1 сформулируем общую ЦФ F для одновременной оптимизации по двум критериям:

$$F = M_1 \frac{\max(U(t))}{\max(E(t))} + M_2 \frac{|\max(E(t)) - 2 \max(U_{\text{вх}}(t))|}{\max|E(t)|}, \quad (3.23)$$

где M_i – весовой коэффициент i -го критерия, $i=1, 2, \dots, N_c$, где N_c – число критериев оптимизации, а $U(t)$ – напряжение на выходе МФ, $E(t)$ – ЭДС источника и $U_{\text{вх}}(t)$ – напряжение на входе МФ. Принято $M_1=M_2=0,5$.

Оптимизируемые параметры, их диапазоны, а также начальные решения для ЭС такие же, как для однокритериальной оптимизации (подпункт 3.3.1.1). Параметры воздействующего СКИ и R такие же, как в подпункте 3.3.1.1, а $l=1$ м. Настройки алгоритмов соответствуют приведенным в подразделе 3.2. Результаты такой оптимизации приведены в таблицах 3.9–3.11. На рисунке 3.8 показаны формы ЭДС, входные и выходные напряжения.

Таблица 3.9 – Результаты оптимизации МФ 1 по двум критериям для ГА

N	h , мкм	t , мкм	s_1 , мкм	s_2 , мкм	$U_{\text{вх}}$, мВ	U_{max} , мВ	Время, с
$N_{\text{it}}=5/10$							
1	987,5	68	116,9	297,7	521,9	167,7	131
2	1000	30,8	217	290,9	549,9	231	132
3	956,1	53,7	95,3	260,2	516,9	165,2	129
4	868,2	30,8	63,5	229,5	505,1	165,3	129
5	984,3	56,5	110,1	255,6	522,9	175,2	130
6	990,6	34,4	190,8	289,8	544,9	222,1	128
7	924,7	28,7	101	288,6	524,2	180,7	129
8	965,5	33,7	210,2	259,1	545,2	237,1	129
9	931	118,6	176	221,5	518,3	225,2	130
10	852,5	33	110,1	282,9	517,7	185,8	131
Δ , %	7,96	61,03	54,72	14,68	4,25	17,87	1,54
$N_{\text{it}}=10/10$							
1	993,7	25,1	93	263,6	529,2	181,1	254
2	931	38,7	99,8	278,4	521	173,2	258
3	943,5	34,4	95,3	294,3	522,4	170,3	259
4	949,8	53,7	120,3	269,3	523,4	183	260
5	959,2	82,9	166,9	293,2	527	198,1	269
6	921,6	69,4	148,7	292	526,6	190,6	277
7	993,7	26,6	146,5	288,6	540,7	205,8	276
8	981,2	26,6	90,7	239,7	526,9	182,9	270
9	993,7	125,8	114,6	238,6	506,9	167,2	276
10	978	26,6	94,2	276,2	527,8	178	277
Δ , %	3,76	66,73	29,58	10,45	3,23	10,35	4,33
$N_{\text{it}}=10/100$							
1	996,9	35,8	86,2	277,3	523,5	163,7	3242
2	993,7	40,8	95,3	300	524,5	164,1	3262
3	1000	26,6	86,2	295,5	527,3	168,9	3273
4	996,9	36,6	94,2	289,8	525,8	166,6	3239
5	1000	28	85,1	298,9	526,4	166	3266
6	1000	20,1	93	300	531,8	179,6	2346
7	1000	21,6	82,8	297,7	528,2	170,2	2293
8	1000	32,3	93	296,6	527,2	168,8	2291

N	h , мкм	t , мкм	s_1 , мкм	s_2 , мкм	$U_{вх}$, мВ	U_{max} , мВ	Время, с
9	996,9	31,6	102,1	293,2	529,8	175,7	2293
10	996,9	21,6	73,7	295,5	524,9	164,2	2295
Δ , %	0,32	33,99	16,15	3,93	0,79	4,63	17,65
$N_{it}=50/100$							
1	990,6	29,4	86,2	289,8	525,4	166,2	15648
2	1000	90,8	86,2	300	506,1	182,7	15663
3	996,9	27,3	82,8	296,6	525,7	165,4	15782
4	965,5	29,4	82,8	293,2	522,2	163,5	15058
5	993,7	22,3	83,9	296,6	527,8	170,3	15043
6	993,7	30,1	89,6	300	526,5	167,4	15139
7	1000	22,3	71,4	284	524	163,2	15237
8	987,5	25,9	78,2	300	523,9	163,5	11689
9	1000	21,6	77,1	288,6	526,3	167,9	11746
10	993,7	25,9	71,4	256,8	521,8	162,4	12026
Δ , %	1,76	61,57	11,30	7,76	2,10	5,88	14,90

Таблица 3.10 – Результаты оптимизации МФ 1 по двум критериям для ЭС

N	h , мкм	t , мкм	s_1 , мкм	s_2 , мкм	$U_{вх}$, мВ	U_{max} , мВ	Время, с
$N_{it}=500$							
1	998	30,2	85,6	295,3	525,5	165,1	1886
2	992,9	33,7	89,3	296,1	525	164	1887
3	996	33	93,6	294,1	526,8	169,1	1904
4	993,5	26,8	93,5	294,8	528,8	173,7	1908
5	998,1	35,7	100,6	299,6	528,1	170,4	1900
6	997,2	26,3	81,4	284,2	528,1	170,4	1409
7	999,6	38,1	95,4	298,8	525,9	164,9	1423
8	999,7	35,8	91,6	299,6	525,6	164,6	1423
9	995,8	30,2	85,5	299,5	525,4	163,8	1410
10	994	26,2	84,8	298,6	526,5	166,5	1414
Δ , %	0,34	18,51	10,55	2,64	0,36	2,93	15,04
$N_{it}=1000$							
1	999,7	28,7	83,7	298,3	526	163	3655
2	999	20,1	72	300	525,1	162,8	3691
3	999,8	29,4	90,6	295,5	527,5	168,4	3688
4	998,3	33,1	89,7	299,7	525,8	164,8	3712
5	1000	29,1	84,4	299,9	525,8	163,2	3723
6	1000	27,8	81,8	294,4	525,4	163	2927
7	999,9	34	93,1	299,3	526,7	165,8	2764
8	997,7	37,6	94,5	296,1	525,6	164,9	2782
9	1000	30,4	83,3	285,3	524,8	163,2	2950
10	999,9	24,5	78,5	299,7	525,6	162,9	2820
Δ , %	0,12	30,33	13,51	2,51	0,23	1,69	14,78
$N_{it}=2500$							
1	1000	24,4	78,2	299,7	525,6	162,9	9087
2	1000	33,2	88,7	299,2	525,6	163,1	9309
3	999,9	29,1	84,9	300	525,9	163,5	9422
4	1000	28,6	83,3	298	525,6	162,9	9444
5	1000	32,8	87,9	297,6	525,5	163	9229
6	1000	37,7	93,4	299,6	525,5	163,3	9994

N	h , мкм	t , мкм	s_1 , мкм	s_2 , мкм	U_{BX} , мВ	U_{max} , мВ	Время, с
7	999,9	29,2	85,3	299,4	526	163,9	9450
8	1000	33,4	89,7	300	525,8	163,7	9568
9	1000	37,4	92,8	298,2	525,4	163,3	9557
10	1000	28,6	83,2	298,1	525,5	163	9664
Δ , %	0,01	21,42	8,86	0,40	0,05	0,18	4,75
$N_{it}=5000$							
1	1000	33,4	89,1	300	525,7	163,3	18400
2	1000	33	88,3	298,4	525,5	163	19029
3	999,7	24,6	78,2	299,6	525,5	163,4	18615
4	1000	33,3	89,1	300	525,7	163,3	18397
5	1000	29,2	85	299,9	525,9	163,6	19195
6	1000	29,1	84,4	300	525,8	163,2	18093
7	999,2	29,5	87,3	299	526,5	165,2	18149
8	1000	29	84,3	299,9	525,8	163,1	19057
9	1000	33,1	88,4	298,8	525,5	163,2	19001
10	999,9	24,2	78,4	297,4	525,7	163,5	19373
Δ , %	0,04	15,97	6,52	0,44	0,10	0,67	3,42

Таблица 3.11 – Результаты оптимизации МФ 1 по двум критериям для СП

N	h , мкм	t , мкм	s_1 , мкм	s_2 , мкм	U_{BX} , мВ	U_{max} , мВ	Время, с
$N_{it}=500$							
1	966,3	34,2	133,6	277,8	533,5	198,7	1226
2	951,9	62,5	174	289,1	532,1	207,3	1204
3	999,8	51,1	125,8	254,6	529,7	190,5	1194
4	998,8	21,6	59,7	252,5	519,3	168,2	1200
5	901,6	23,5	90,9	259,3	521,1	183,8	1207
6	985,6	24,1	145,3	263,1	540,4	213	1229
7	928,1	114,8	15,7	266,4	416,5	161,3	1160
8	975,8	109,2	14,5	132,9	415	159,5	1176
9	965,3	51,4	93,1	272,9	517,8	164,7	1220
10	948,4	35,4	117,8	295,6	528,3	185,1	1188
Δ , %	5,16	68,33	84,62	37,97	13,13	14,36	2,89
$N_{it}=1000$							
1	968,1	58,7	135	282,1	527,1	187,1	4971
2	970,9	18,5	230,1	291	551,9	237,9	5070
3	951,8	32,4	106,7	288,4	526,8	181,3	5070
4	991	42,6	157,5	288,3	537,8	205,2	5052
5	962,2	131,9	19,8	111,3	419	160,9	5139
6	993,3	22,7	89,1	242,4	528,9	183,9	2392
7	986,1	35,1	257,8	293,5	551,8	240,8	2460
8	969,8	24	74,9	247,7	521	167,4	2792
9	927,1	50,6	118,9	297,8	521,8	175,3	2373
10	947,8	41	87	222,5	517,2	171,2	2448
Δ , %	3,45	75,40	85,73	45,59	13,69	19,89	36,82
$N_{it}=2500$							
1	989,7	45,8	216,4	296,4	545,3	227,3	5828
2	982,3	160,5	22,8	173,3	419,7	162	6035
3	658,7	34,8	119,3	297,6	493,4	187,8	5752
4	976,2	35,5	88,8	283,5	522,8	165,7	5977

N	h , мкм	t , мкм	s_1 , мкм	s_2 , мкм	$U_{\text{вх}}$, мВ	U_{max} , мВ	Время, с
5	991,1	163,8	23,8	120	419,2	159,3	6200
6	980,4	23,1	107,9	274,1	532,8	191,8	7880
7	990,8	42,5	81,2	217,9	518,5	165,2	5794
8	998	25,7	108,1	251	533,3	193,7	6005
9	970,8	36,5	140,3	298,7	534,6	196,8	5904
10	962,8	32,3	81,1	294,7	520,3	166,3	6005
Δ , %	20,48	75,28	80,94	42,68	13,07	17,59	15,61
$N_{\text{it}}=5000$							
1	969,9	32,6	79,9	256,1	520,2	164,3	28315
2	979,7	196,9	31,1	193,6	425,1	164,8	32797
3	979,6	64,1	112,3	297,3	521,1	166,1	38233
4	994,9	31,9	115,7	299,4	532,9	184,5	43256
5	977,4	20,5	69,2	266,5	522	166	48421
6	993,6	86,4	11,3	84,3	413,3	159,7	12186
7	981,6	104,4	14	254	419,2	159,9	11967
8	994,4	39,5	81,6	277	520,4	168,7	12878
9	954,5	18,2	94,5	276	528,6	186,8	11713
10	996,8	28,5	80	278,7	524,2	164,2	12719
Δ , %	2,17	83,08	82,20	56,06	12,64	7,82	61,04

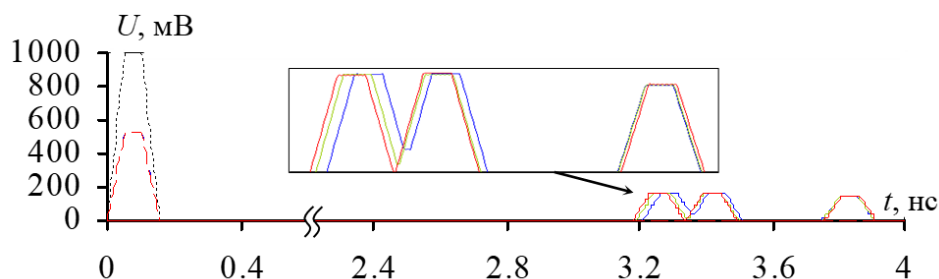


Рисунок 3.8 – Формы ЭДС (···), напряжений на входе (---) и выходе (—) МФ 1 при оптимизации с использованием ЭС (—), ГА (—) и СП (—)

Из таблиц 3.9–3.11 и рисунка 3.8 видно, что наилучшие результаты, удовлетворяющие критериям оптимизации, получены при $N_{\text{it}}=1000$ при оптимизации с помощью ЭС ($U_{\text{вх}}=525,1$ мВ, $U_{\text{max}}=162,8$ мВ), при $N_{\text{it}}=5000$ для ГА ($U_{\text{вх}}=521,8$ мВ, $U_{\text{max}}=162,4$ мВ), при $N_{\text{it}}=5000$ для СП ($U_{\text{вх}}=520,2$ мВ, $U_{\text{max}}=164,3$ мВ). Для ЭС все запуски останавливались по достижению максимального числа вычислений. Примечательно, что в отличие от ГА и СП, ЭС нашли наилучшее решение уже при $N_{\text{it}}=1000$. При этом, отклонение параметров и ЦФ уменьшается с ростом числа вычислений, что говорит об их лучшей сходимости решений. Кроме того, решения ЭС стремятся к диапазону 999,2–1000 мкм для h , 24,2–33,4 мкм для t , 78,2–89,1 мкм для s_1 , 297,4–300 мкм для s_2 . Решения ГА стремятся к 987,5–1000 мкм для h , 21,6–90,8 мкм для t , 71,4–89,6 мкм для s_1 , 256,8–300 мкм для s_2 . Решения СП стремятся к 954,5–996,8 мкм для h , 18,2–196,9 мкм для t , 11,3–115,7 мкм для s_1 , 84,3–299,4 мкм для s_2 . У наилучшего результата при оптимизации посредством ЭС импульсы мод 1 и 2 частично

накладываются из-за малой Δt_1 (143,4 пс при $t_2=150$ пс). Тем не менее, это никак не повлияло на итоговое значение $U_{\max}$.

3.3.1.3 Оптимизация по одному и двум критериям в экстремальных условиях

Здесь приведены результаты моделирования и оптимизации трехпроводного МФ при экстремальных температурах (-50°C , 150°C) и комнатной (25°C), а также при влиянии влаги (конденсат в виде случайных капель воды различного размера).

Результаты моделирования и оптимизации МФ при влиянии температуры

Поперечное сечение МФ 1 представлено на рисунке 2.1а, а эквивалентная схема – на рисунке 2.2а. Параметры воздействующего СКИ, а также l и R , взяты, как в подразделе 2.1. Интересует смещение глобального экстремума, соответствующего оптимальным характеристикам МФ, при влиянии температуры и влаги. Для ГА и ЭС диапазоны оптимизируемых параметров: 100–300 мкм для h , 20–200 мкм для t , 100–300 мкм для s_1 , 400–600 мкм для s_2 . Начальные решения для ЭС: $h=200$ мкм, $t=100$ мкм, $s_1=200$ мкм, $s_2=500$ мкм. Остальные параметры приняты неизменными: $w=1000$ мкм (при однокритериальной оптимизации) и 500 мкм (при двухкритериальной оптимизации), расстояние от проводников до края структуры $d=3w$ при $\epsilon_r=4,6$. Настройки алгоритмов соответствуют приведенным в подразделе 3.2. Критерии оптимизации: амплитудный (посредством ГА и ЭС); амплитудному и согласования (для ГА). Общая ЦФ для одновременной оптимизации по двум критериям соответствует (3.23). Использована простая температурная модель вида $P(T)$, где P – какая-либо из характеристик структуры, а T – текущая температура окружающей среды. Модель термического изменения каждого из параметров МФ имеет вид

$$x=x_0(1+\alpha\Delta T), \quad (3.24)$$

где x – значение параметра МПЛП с учетом термического расширения; x_0 – исходное значение этого параметра; α – коэффициент линейного термического расширения материала; ΔT – разница температур. Значение α для меди принято равным $17 \cdot 10^{-6}$ ($1/^\circ\text{C}$) в соответствии с [134], а для диэлектрической основы, в качестве которой взят материал FR-4, по оси Z – $70 \cdot 10^{-6}$ ($1/^\circ\text{C}$), а по осям X и Y – $17 \cdot 10^{-6}$ ($1/^\circ\text{C}$) [135]. Температурная зависимость ϵ_r учтена аналогично. Для FR-4 коэффициент α получен следующим образом. На основе данных из работы [136] вычислен абсолютный коэффициент изменения ϵ_r от T как

$$\alpha_0 = \frac{\epsilon_{r\max} - \epsilon_{r\min}}{T_{\max} - T_{\min}}, \quad (3.25)$$

где $T_{\max}$ и $T_{\min}$ – максимальное и минимальное из значений диапазона температур, а $\epsilon_{r\max}$ и $\epsilon_{r\min}$ – максимальное и минимальное из значений диэлектрической проницаемости для крайних

точек диапазона T . На рисунке 3.9 приведены зависимости ε_r от T для разных частот, из которых следует, что $\alpha_0 = -0,003$ ($1/^\circ\text{C}$). Тогда, разделив α_0 на среднее значение $\varepsilon_r = 5,6$ (при $T \approx 25^\circ\text{C}$), получим $\alpha = -5,35 \cdot 10^{-4}$ ($1/^\circ\text{C}$).

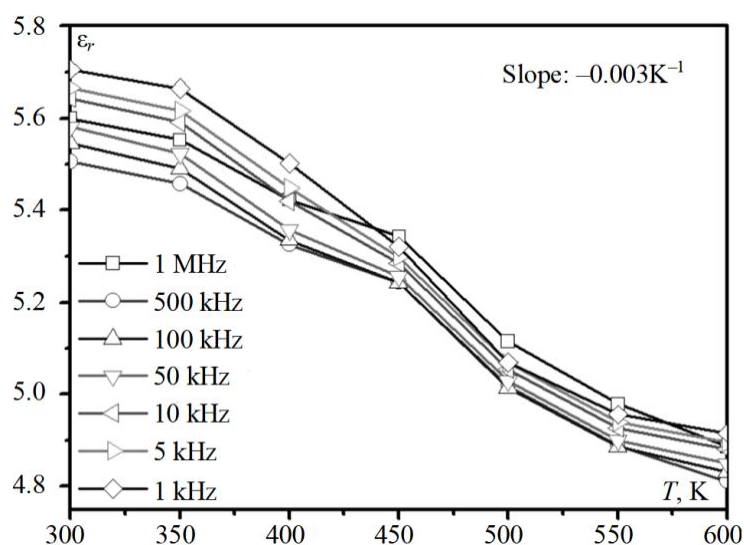


Рисунок 3.9 – Зависимость $\varepsilon_r(T)$ для разных частот из [136]

Далее приведены результаты исследования МФ 1 с использованием температурной модели. МФ оптимизировался при крайних (минус 50°C и 150°C) и среднем (25°C) значениях температур. Для начала выполнена оптимизация только по амплитудному критерию. Её результаты представлены в таблице 3.12, где m – среднее значение параметров. На рисунке 3.10 показаны формы ЭДС и напряжения на входе и выходе МФ после оптимизации.

Таблица 3.12 – Результаты оптимизации МФ 1 посредством ГА при -50 , 25 и 150°C по амплитудному критерию при 500 вычислениях

N	h , МКМ			t , МКМ			s_1 , МКМ		
	-50°	25°	150°	-50°	25°	150°	-50°	25°	150°
1	99,5	100,8	100,9	167,3	139,3	161,5	287,8	299,2	300,6
2	100,3	100,0	102,5	154,6	147,0	199,0	290,2	296,9	283,3
3	100,3	100,8	100,9	198,3	168,9	124,1	280,0	282,0	298,2
4	101,1	101,6	100,9	185,0	199,3	151,6	292,5	291,4	275,5
5	99,5	100,8	103,3	173,7	159,1	198,3	278,4	274,9	281,0
m	100,1	100,8	101,7	175,8	162,7	166,9	285,8	288,9	287,2
$\Delta, \%$	0,4	0,8	1,2	12,4	17,7	23,2	2,5	4,2	4,4
	s_2 , МКМ			$U_{\text{вых}}$, мВ			Время, с		
	-50°	25°	150°	-50°	25°	150°	-50°	25°	150°
1	416,0	436,1	439,3	114,8	117,8	120,0	2018	1962	1939
2	423,7	429,8	416,6	115,1	116,2	120,2	1999	1983	1950
3	405,8	409,4	433,8	114,7	116,7	120,3	1500	1950	1952
4	421,5	425,1	404,6	115,3	116,8	119,9	2019	1972	1931
5	407,3	406,3	410,3	114,4	117,3	120,0	1459	1948	1929
m	414,9	421,3	420,9	114,9	117,0	120,1	1799	1963	1940
$\Delta, \%$	2,2	3,5	4,1	0,4	0,7	0,2	16,1	0,9	0,6

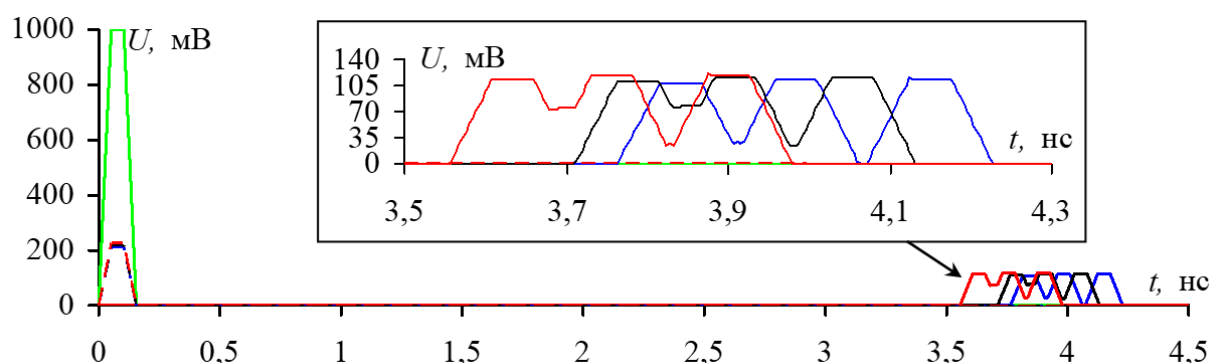


Рисунок 3.10 – Формы ЭДС (—) и напряжения на входе МФ при минус 50 (---), 25 (—), 150 (—) °С и выходе МФ при минус 50 (—), 25 (—), 150 (—) °С после оптимизации посредством ГА по амплитудному критерию при 500 вычислениях

Из таблицы 3.12 видно, что с ростом температуры (от минус 50°С до 150°С) t для всех оптимизируемых параметров незначительно увеличиваются (например, на 1,53% для h). Также, ввиду учета термического расширения всех параметров МПЛ, аналогично увеличиваются значения фиксированных параметров w и d (с 998,7 до 1002 мкм и с 299,2 до 301,2 мкм, соответственно). $U_{\text{вых}}$ также растет: с ростом температуры на 40°С, в среднем, на 1 мВ. После оптимизации получен минимум $U_{\text{вых}}=114,4$ мВ (при минус 50°С), что в 2 раза меньше $U_{\text{вх}}$. При этом максимум Δ наблюдается у t , поскольку его изменение мало влияет (по сравнению с другими параметрами) на достижение экстремума данной ЦФ, состоящей из одного критерия. В то же время, для $U_{\text{вых}}$ $\Delta < 1\%$, что показывает хорошую сходимость. Значение t для времени одного запуска при $T=-50^\circ\text{C}$ составило 1799 с, 25°C – 1963 с, а 150°C – 1940 с. Из рисунка 3.10 видно, что, несмотря на частичное наложение фронтов и спадов импульсов разложения, $U_{\text{вых}} \leq 120,3$ мВ для 150°C , а критерий достигается при выравнивании амплитуд мод импульсов разложения.

Далее выполнена аналогичная оптимизация, но при 1000 вычислениях (10 особей и 100 поколений), результаты которой представлены в таблице 3.13. На рисунке 3.11 показаны формы ЭДС, напряжения на входе и выходе МФ после оптимизации.

Таблица 3.13 – Результаты оптимизации МФ 1 посредством ГА при -50, 25 и 150°С по амплитудному критерию при 1000 вычислениях

N	h , мкм			t , мкм			s_1 , мкм		
	-50°	25°	150°	-50°	25°	150°	-50°	25°	150°
1	99,5	100,0	100,9	170,1	163,3	199,0	277,6	278,0	287,3
2	99,5	100,0	100,9	190,6	178,8	176,4	284,7	287,5	287,3
3	99,5	100,0	102,5	174,4	192,9	187,7	276,1	276,5	281,8
4	100,3	100,0	100,9	198,3	181,6	127,6	280,0	293,7	292,8
5	100,3	100,8	100,9	196,2	195,8	165,0	277,7	292,2	294,3
m	99,8	100,2	101,2	185,9	182,5	171,1	279,2	285,6	288,7
$\Delta, \%$	0,4	0,4	0,8	7,6	9,1	21,9	1,5	3	2,2

	s_2 , МКМ			$U_{\text{вых}}$, мВ			Время, с		
1	405,8	404,7	418,1	114,3	116,4	118,9	3962	3871	3902
2	412,0	416,5	417,4	114,7	116,6	118,8	3927	3856	3874
3	404,2	407,8	412,6	114,7	116,9	120,0	3838	3873	4180
4	406,5	425,1	425,2	114,8	116,3	119,9	3864	3850	4254
5	403,4	425,9	426,0	114,4	116,7	119,7	3914	3852	4316
m	406,4	416,0	419,9	114,6	116,6	119,5	3901	3860	4105
Δ , %	1,1	2,6	1,6	0,2	0,3	0,5	1,6	0,3	5,4

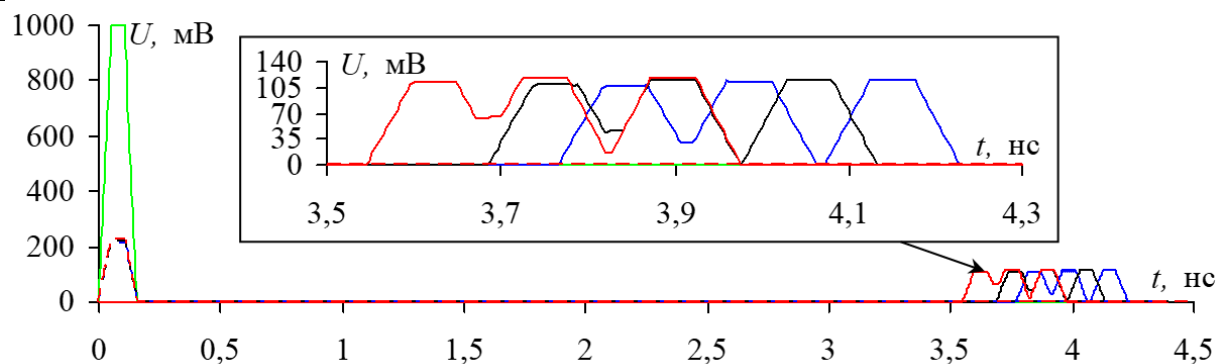


Рисунок 3.11 – Формы ЭДС (—) и напряжения на входе МФ при минус 50 (---), 25 (---), 150 (---) °C и выходе МФ при минус 50 (—), 25 (—), 150 (—) °C после оптимизации посредством ГА по амплитудному критерию при 1000 вычислениях

Видно, что, в сравнении с 500 вычислениями, Δ для оптимизируемых параметров уменьшается (например, с 0,8 до 0,4% для h , с 17,7 до 9,1% для t , с 4,2 до 3% для s_1 , с 3,5 до 2,6% для s_2 при 25°C). Для ЦФ Δ также уменьшается при температурах минус 50°C и 25°C и во всех случаях также остается в пределах 1%. Однако, при большем числе вычислений, время расчетов увеличивается примерно в 2 раза (значение m для одного запуска при температуре минус 50°C – 3900 с, при 25°C – 3860 с, при 150°C – 4105 с). Минимум $U_{\text{вых}}$ наблюдается также $T = -50^\circ\text{C}$ и составляет 114,3 мВ, что в 2 раза меньше уровня $U_{\text{вх}}$. Из представленных таблиц 3.12–3.13 видно, что ГА сходится к одному и тому же значению ЦФ уже при 500 вычислениях. Это подтверждает нахождение глобального экстремума ЦФ, который изменяется при крайних значениях температуры.

Из рисунков 3.10 и 3.11 видно, что при оптимизации, импульсы 1 и 2 (а в некоторых случаях также импульсы 2 и 3) на выходе МФ частично накладываются друг на друга. Также видно, что температура 150°C является причиной более раннего прихода импульсов в конец МФ (около 3,56 нс), по сравнению с 25°C (около 3,71 нс) и минус 50°C (около 3,764 нс). В то же время, из рисунков 3.10 и 3.11 видно, что имеет место рассогласование линии с трактом ввиду несоблюдения условия равенства напряжения на входе половине ЭДС источника (критерий согласования). Кроме этого, видно, что во всех случаях сходимость ЦФ достигалась при полном рассогласовании МФ с трактом (при ЭДС 1 В $U_{\text{вх}} \approx 0,2$ В). Поэтому важно также оценить возможность минимизации $U_{\text{вых}}$ при согласовании МФ с трактом.

Для этого выполнена двухкритериальная оптимизация: одновременно по амплитудному критерию и критерию согласования. Ее результаты при 500 вычислениях представлены в таблице 3.14. Значения m для $U_{\text{вх}}$ для минус 50°C, 25°C и 150°C составили 501,2, 509,1 и 517,7 мВ, соответственно. На рисунке 3.12 показаны формы ЭДС, напряжения на входе и выходе МФ после оптимизации.

Таблица 3.14 – Результаты оптимизации МФ 1 посредством ГА при –50, 25 и 150°C по амплитудному критерию при 500 вычислениях

N	h , мкм			t , мкм			s_1 , мкм		
	-50°	25°	150°	-50°	25°	150°	-50°	25°	150°
1	296,8	299,2	297,1	20,7	24,9	20,0	280,0	293,7	200,0
2	297,6	300,0	301,0	27,1	20,7	30,0	276,1	292,9	264,5
3	296,8	299,2	301,0	29,2	25,6	22,1	193,1	292,9	209,4
4	296,8	297,6	302,6	24,2	28,5	23,3	205,6	299,2	299,8
5	298,4	296,1	301,8	20,0	24,2	23,5	251,1	298,4	268,4
m	297,3	298,4	300,7	24,2	24,8	23,8	241,2	295,4	248,4
Δ , %	0,3	0,6	0,9	18,7	15,9	20	18,4	1,1	20
	s_2 , мкм			$U_{\text{вых}}$, мВ			Время, с		
	-50°	25°	150°	-50°	25°	150°	-50°	25°	150°
1	558,5	552,9	453,5	172,8	170,3	173,3	1974	1957	1953
2	530,3	559,2	540,7	170,6	170,8	174,8	2059	1948	1950
3	451,2	552,2	477,9	175,9	169,3	174,5	1982	2006	1951
4	450,4	543,5	583,2	170,6	168,0	173,9	1987	1986	1959
5	506,7	552,9	539,1	170,2	169,6	173,2	1925	1995	1948
m	499,4	552,1	518,9	172,0	169,6	173,9	1985	1978	1952
Δ , %	10,7	1,4	12,5	0,7	0,8	0,5	3,4	1,5	0,3

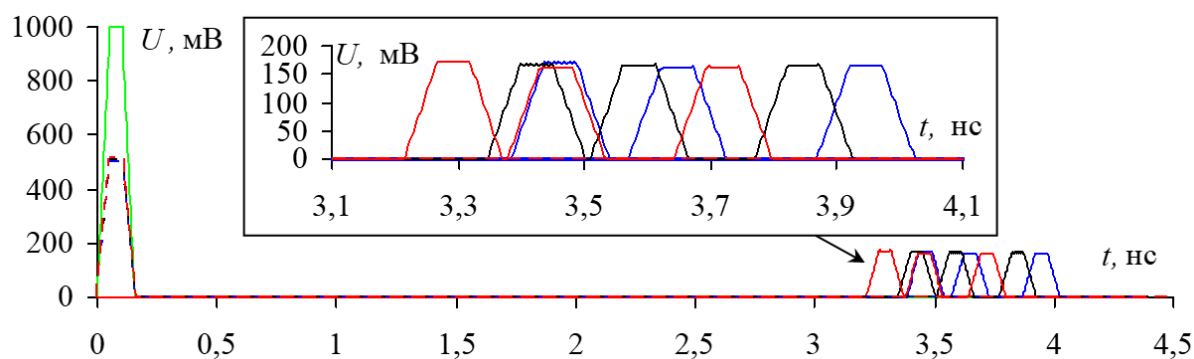


Рисунок 3.12 – Формы ЭДС (—) и напряжения на входе МФ при минус 50 (---), 25 (---), 150 (---) °C и выходе МФ при минус 50 (---), 25 (---), 150 (---) °C после оптимизации посредством ГА по двум критериям при 500 вычислениях

Из таблицы 3.14 видно, что для оптимизируемых параметров Δ выросло (максимум 20% для t и s_1) в сравнении с одним критерием, однако оно находится в допустимых пределах, поскольку для $U_{\text{вх}}$ и $U_{\text{вых}}$ $\Delta < 1\%$ для 25°C и 150°C, а для минус 50°C – $\Delta < 2\%$. При этом для $U_{\text{вх}}$ $\Delta \leq 1\%$. Тем не менее, в сравнении с одним критерием Δ для $U_{\text{вых}}$ увеличилось, что связано с введением дополнительного критерия в ЦФ при оптимизации. Минимум $U_{\text{вых}} = 168$ мВ для $T = 25^\circ\text{C}$. В общем случае, при двухкритериальной оптимизации алгоритм пытается определить

«золотую середину» между результатами (ввиду задания весовых коэффициентов по 0,5 для каждого критерия). Однако, при оптимизации, достижение одного критерия может противоречить достижению другого. Это может быть причиной роста Δ . Также из таблицы 3.14 и рисунка 3.12 видно, что $U_{\text{вх}} \approx 500$ мВ, т.е. 0,5 ЭДС источника, обеспечивая тем самым согласование, а затраты времени на оптимизацию по одному и двум критериям (при 500 вычислениях) сопоставимы. Результаты аналогичной оптимизации при 1000 вычислениях представлены в таблице 3.15. Значения m для $U_{\text{вх}}$ для минус 50, 25 и 150°C составили 503, 509,5 и 520,5 мВ, соответственно. На рисунке 3.13 показаны формы ЭДС и напряжения на входе и выходе МФ после оптимизации.

Таблица 3.15 – Результаты оптимизации МФ 1 посредством ГА при -50, 25 и 150°C по амплитудному критерию при 1000 вычислениях

N	h , мкм			t , мкм			s_1 , мкм		
	-50°	25°	150°	-50°	25°	150°	-50°	25°	150°
1	297,6	300,0	302,6	22,1	20,0	21,4	297,2	278,0	243,2
2	297,6	300,0	302,6	20,0	24,2	20,7	289,4	278,8	290,4
3	298,4	300,0	302,6	27,0	24,9	20,0	244,0	293,7	244,8
4	298,4	298,4	302,6	24,2	20,7	20,0	224,4	284,3	275,5
5	297,6	299,2	302,6	23,5	20,7	22,8	273,0	220,0	295,9
m	297,9	299,5	302,6	23,4	22,1	21,0	265,6	271,0	270,0
Δ , %	0,1	0,3	0	9,5	10,9	6,5	14	14,3	9,8
	s_2 , мкм			$U_{\text{вых}}$, мВ			Время, с		
	-50°	25°	150°	-50°	25°	150°	-50°	25°	150°
1	533,0	562,4	505,4	169,8	174,1	171,7	4018	3841	3837
2	548,3	535,7	571,4	169,9	170,0	172,6	3922	3861	3801
3	502,1	563,1	498,4	172,7	172,2	170,3	4647	3857	3806
4	470,8	542,0	543,8	170,8	169,8	170,6	3824	3860	3809
5	522,4	472,9	569,0	169,2	171,8	172,3	3794	3841	3804
m	515,3	535,2	537,6	170,5	171,6	171,6	4041	3852	3811
Δ , %	7,6	8,7	6,8	1,0	1,3	0,7	10,1	0,3	0,5

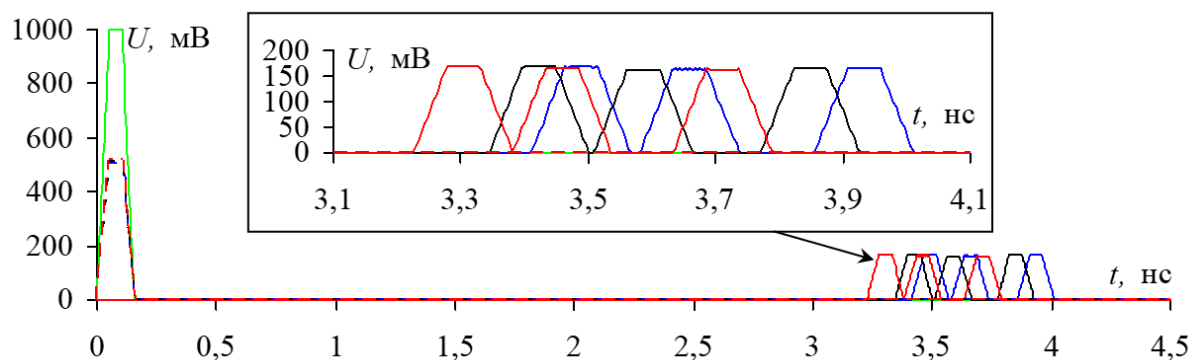


Рисунок 3.13 – Формы ЭДС (—) и напряжения на входе МФ при минус 50 (---), 25 (---), 150 (---) °C и выходе МФ при минус 50 (---), 25 (---), 150 (---) °C после оптимизации посредством ГА по двум критериям при 1000 вычислениях

Из таблицы 3.15 видно, что, по сравнению с оптимизацией при 500 вычислениях, Δ для оптимизируемых параметров уменьшается (максимум 14,3% для s_1) по аналогии с

однокритериальной оптимизацией. Значение Δ для $U_{вх}$ и $U_{вых}$ также уменьшается (максимум 1,3% для $U_{вых}$ при 25°C). При необходимости $\Delta < 1\%$ для $U_{вых}$ нужен рост числа вычислений. Время расчетов, в сравнении с однокритериальной оптимизацией, почти не меняется. Также, минимум $U_{вых}$ для двухкритериальной оптимизации при 1000 вычислениях находится на уровне 169,2 мВ для $T = -50^\circ\text{C}$, тогда как при однокритериальной оптимизации он составляет 114,3 мВ (что естественно при достижении критерия согласования, увеличивающего $U_{вх}$). Для $T = 25^\circ\text{C}$ при двухкритериальной оптимизации это значение составляет 168 мВ, для однокритериальной – 116,2 мВ, а при 150°C для двухкритериальной – 170,3 мВ и для однокритериальной – 118,8 мВ. Из рисунка 3.13 и таблицы 3.15 также видно, что $U_{вх} \approx 500$ мВ, что свидетельствует о согласовании. Как и для однокритериальной оптимизации, при 150°C импульсы разложения приходят раньше (около 3,22 нс), чем при 25°C (около 3,346 нс) и минус 50°C (около 3,412 нс). Наконец, видно, что, по аналогии с однокритериальной оптимизацией, минимум $U_{вых}$ достигим при выравнивании амплитуд импульсов разложения, однако при двухкритериальной нет частичного наложения импульсов мод на выходе МФ.

Результаты аналогичной оптимизации посредством ЭС представлены в таблице 3.16. На рисунке 3.14 показаны формы ЭДС и напряжения на входе и выходе МФ после оптимизации. Как отмечалось ранее, оптимизация посредством ЭС выполнялась по амплитудному критерию при 1000 вычислениях.

Таблица 3.16 – Результаты оптимизации МФ 1 посредством ЭС при -50, 25 и 150°C по амплитудному критерию

N	h , мкМ			t , мкМ			s_1 , мкМ		
	-50°	25°	150°	-50°	25°	150°	-50°	25°	150°
1	99,5	100,1	100,9	172,7	160,8	127,0	293,7	279,9	300,2
2	99,5	100,0	100,9	173,1	191,0	189,5	293,5	295,6	288,2
3	99,5	100,0	100,9	94,2	186,2	189,5	294,2	281,3	288,2
4	99,8	100,1	100,9	140,8	187,2	121,5	292,8	280,8	290,1
5	99,7	100,0	100,9	94,4	104,5	189,1	293,6	280,0	287,6
m	99,6	100,0	100,9	135,0	165,9	163,3	293,6	283,5	290,9
$\Delta, \%$	0,2	0,1	0	29,5	29,3	21,9	0,3	2,7	2,1
	s_2 , мкМ			$U_{вых}$, мВ			Время, с		
1	423,5	409,0	433,3	113,9	116,0	119,8	5657	4892	4150
2	423,6	426,6	418,0	114,0	115,9	118,6	5100	5120	4112
3	427,0	408,6	418,0	114,7	115,6	118,6	4729	5262	4123
4	422,7	408,6	421,3	115,5	115,8	120,3	5038	5211	4186
5	426,8	410,0	417,1	114,9	116,4	118,7	4148	5190	4178
m	424,7	412,6	421,5	114,6	115,9	119,2	4934	5135	4150
$\Delta, \%$	0,5	2,2	1,9	0,7	0,3	0,7	15,6	3,6	0,9

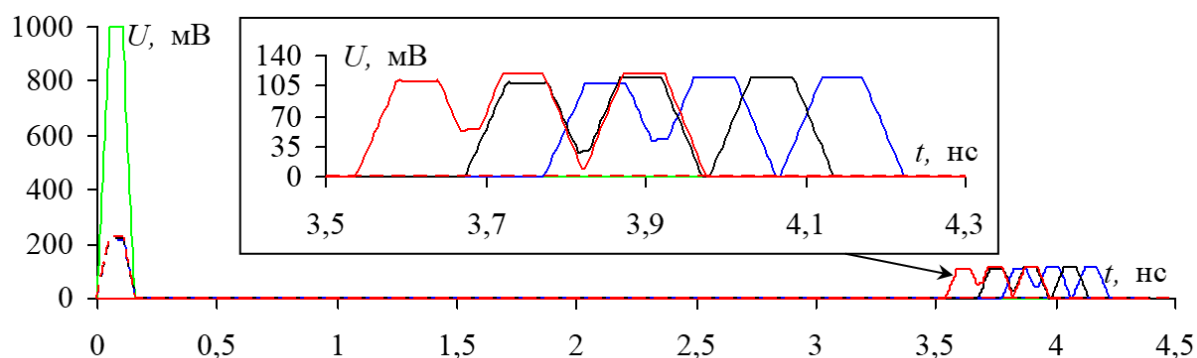


Рисунок 3.14 – Формы ЭДС (—) и напряжения на входе МФ при минус 50 (---), 25 (---), 150 (---) °C и выходе МФ при минус 50 (—), 25 (—), 150 (—) °C после оптимизации посредством ЭС по амплитудному критерию

Из таблицы 3.16 и рисунка 3.14 видно, что результаты ЭС и ГА во многом схожи. Максимум Δ наблюдается у t (29,5% при температуре минус 50°C), поскольку, как отмечалось ранее, он мало влияет (по сравнению с другими параметрами) на достижение экстремума данной ЦФ, состоящей из одного критерия. Обычно, при оптимизации МФ при помощи классического алгоритма ЭС (без возможности задания диапазонов оптимизируемых параметров), сходимость ЦФ или оптимизируемых параметров достигается, в среднем, уже при 1500 вычислениях, показывая хорошие результаты, даже по сравнению с ГА (в основном, за счет значительного выигрыша по времени вычисления). Однако, при модифицированном алгоритме ЭС достаточно 1000 вычислений (а может и меньше), чтобы было $\Delta \leq 0,7\%$ для $U_{\text{вых}}$. Более того, минимум $U_{\text{вых}}$ получены при ЭС и составили 113,9 мВ при минус 50°C (тогда как лучший результат при однокритериальной оптимизации посредством ГА, при той же температуре, составил 114,4 мВ), 115,8 мВ при 25°C (116,2 мВ при ГА) и 118,8 мВ (119,9 мВ при ГА). При этом затраты времени ЭС и ГА сопоставимы.

Результаты моделирования и оптимизации МФ при влиянии влаги

Есть 3 варианта моделирования воздействия влаги на МФ в системе TUSUR.EMC: при моделировании полагается, что вдоль поверхности МФ образован конденсат в виде случайных капель воды различного размера, образующий «дорожки» воды (рисунок 3.15а); при двухмерном моделировании полагается, что на отдельных сегментах МФ (например, в начале и в конце) образован конденсат в виде случайных капель воды различного размера (например, в эквивалентной схеме из рисунка 3.15б, МПЛП 1 и 3 соответствуют поперечные сечения из рисунка 2.1а, а МПЛП 2 – из рисунка 3.15а); при трёхмерном моделировании полагается, что на поверхности МФ образован конденсат в виде случайных капель воды различного размера (рисунок 3.15б).

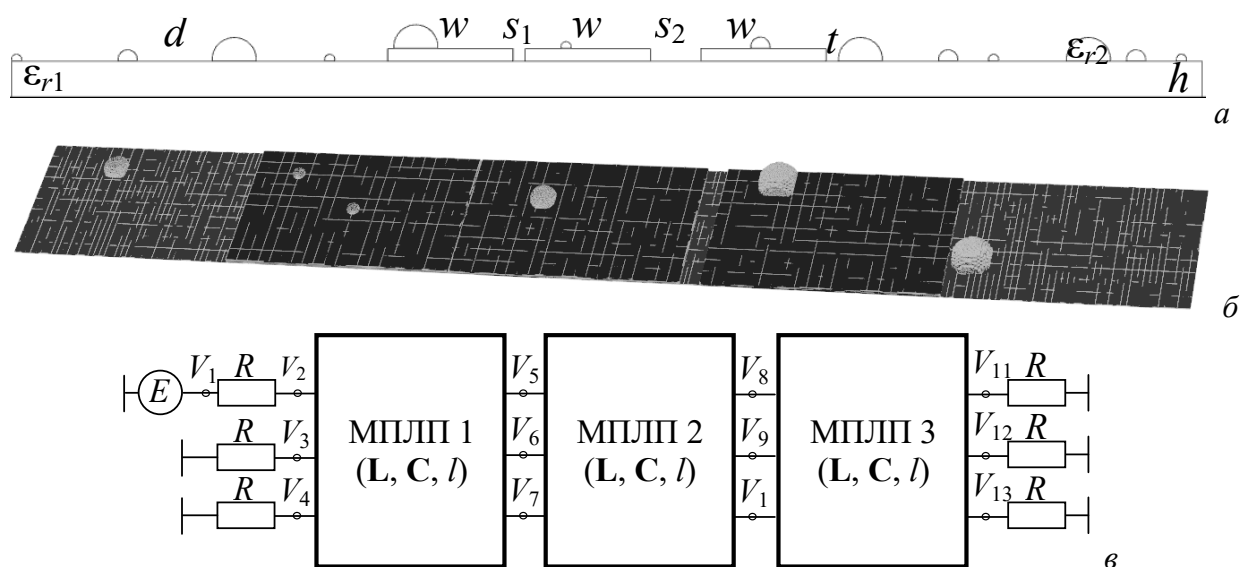


Рисунок 3.15 – Поперечное сечение МФ на основе 3-проводной МПЛ с учетом влаги в модулях двухмерного (а) и трёхмерного (б) моделирования TUSUR.EMC и эквивалентная схема с разграничением сегментов МФ (в)

Рассмотрим оптимизацию посредством ГА и ЭС воздействия влаги на МФ по варианту 1. Геометрическая модель поперечного сечения МФ 1 представлена на рисунке 3.15а, где $\epsilon_{r1}=4,4$, а $\epsilon_{r2}=80$. Эквивалентная схема МФ представлена на рисунке 3.15в. В таблице 3.17 представлены результаты оптимизации по амплитудному критерию посредством ЭС и ГА при 500 вычислениях, а также по двум критериям посредством ГА при 1000 вычислениях. Значение m для $U_{\text{вх}}$ составило 473,8 мВ. На рисунках 3.16–3.18 показаны формы ЭДС и напряжения на входе и выходе МФ после оптимизации.

Таблица 3.17 – Результаты одно- и двухкритериальной оптимизации МФ 1 посредством ГА при 500 (ГА 1) и 1000 (ГА 2) вычислениях и ЭС с учетом влияния влаги

N	h , мкм			t , мкм			s_1 , мкм		
	ГА 1	ГА 2	ЭС	ГА 1	ГА 2	ЭС	ГА 1	ГА 2	ЭС
1	100,0	300,0	100,1	195,8	102,6	196,7	294,5	298,4	297,7
2	100,8	300,0	100,0	199,3	87,8	199,7	293,7	289,8	299,7
3	101,6	300,0	100,1	192,2	108,2	196,5	292,9	289,8	294,8
4	100,0	300,0	100,1	197,2	130,8	186,4	298,4	293,7	299,3
5	100,0	300,0	101,8	195,8	102,6	199,6	298,4	297,6	203,3
m	100,5	300,0	100,4	196,1	106,4	195,8	295,6	293,9	279,0
$\Delta, \%$	0,8	0,0	0,9	1,8	19,7	3,4	0,9	1,5	19,2
	s_2 , мкм			$U_{\text{вых}}$, мВ			Время, с		
	ГА 1	ГА 2	ЭС	ГА 1	ГА 2	ЭС	ГА 1	ГА 2	ЭС
1	407,8	403,1	400,7	131,8	244,4	130,3	8388	7965	8248
2	401,6	400,0	401,7	131,2	252,5	130,2	8422	7906	8023
3	400,0	401,6	516,6	132,1	240,1	146,2	8284	7899	8095
4	402,4	405,5	400,2	130,5	231,0	131,1	8348	7927	7800
5	407,1	402,5	408,9	131,8	244,3	143,7	8491	7938	7894
m	403,8	402,5	425,6	131,5	242,5	136,3	8387	7927	8012
$\Delta, \%$	1,0	0,7	12,7	0,6	4,4	5,8	1,2	0,4	2,8

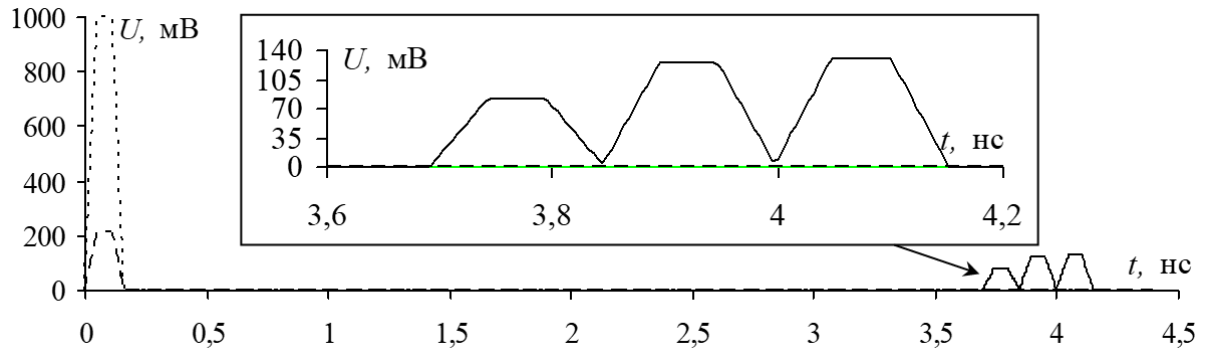


Рисунок 3.16 – Формы ЭДС (···) и напряжения на входе (---) и выходе (—) МФ 1 после оптимизации посредством ГА по амплитудному критерию при 500 вычислениях

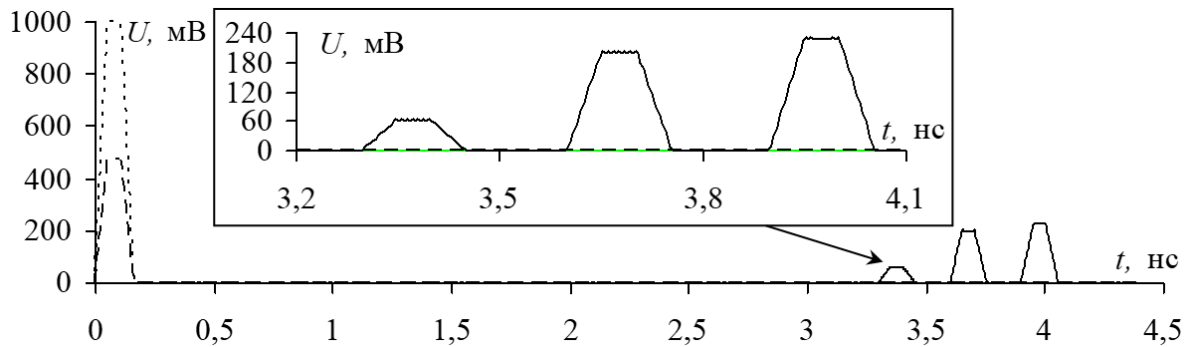


Рисунок 3.17 – Формы ЭДС (···) и напряжения на входе (---) и выходе (—) МФ 1 после оптимизации посредством ГА по двум критериям при 1000 вычислениях

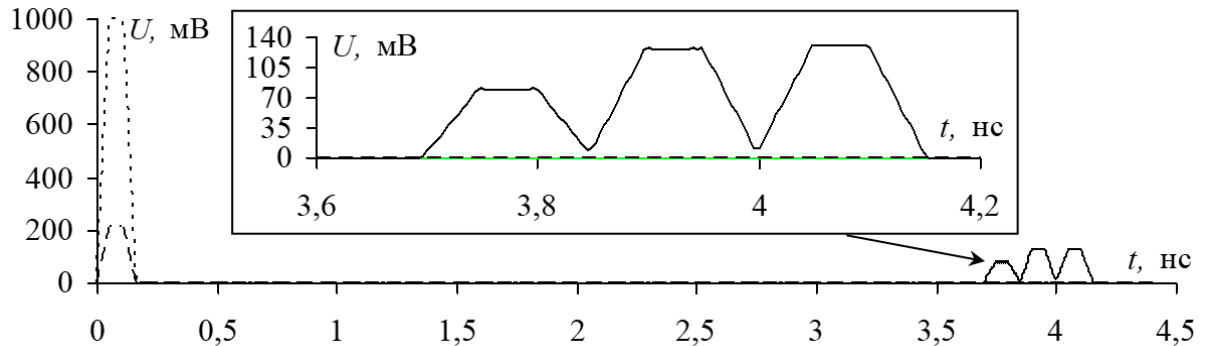


Рисунок 3.18 – Формы ЭДС (···) и напряжения на входе (---) и выходе (—) МФ 1 после оптимизации посредством ЭС по амплитудному критерию

Как видно из таблицы 3.17, $\Delta < 2\%$ (даже для параметра t , который мало влияет на ЦФ). Время, затраченное на один запуск, в среднем 8386 с (что в 4 раза больше, чем у ГА, при 500 вычислениях, с использованием температурной модели). Тем не менее, для $U_{\text{вых}}$ $\Delta \leq 1\%$. Из рисунка 3.16 видно, что достижение амплитудного критерия, в данном случае, возможно за счет выравнивания амплитуд не всех, а лишь импульсов мод 2 и 3. При этом минимум $U_{\text{вых}}$ составляет 130,5 мВ (114,4 мВ при температурной модели, оптимизации по одному критерию и 500 вычислениях). Также видно, что импульсы разложения не накладываются друг на друга.

Из таблицы 3.17 и рисунка 3.17 видно, что $U_{\text{вх}} \approx 475$ мВ, что близко к 0,5 ЭДС источника и свидетельствует о согласовании линии с тактом. Кроме того, разницы задержек соседних

импульсов разложения возросли по сравнению с рисунком 3.16 (с 0,15 и 0,15 нс до 0,304 и 0,299 нс между импульсами мод 1, 2 и 2, 3, соответственно). Максимум Δ для t составляет 19,7%, $U_{\text{вх}} - 1\%$, а $U_{\text{вых}} - 5\%$. Время оптимизации немного меньше (в среднем, на 5,48%) аналогичного при однокритериальной оптимизации.

Как видно из таблицы 3.17 и рисунков 3.16 и 3.18, для h при ГА и ЭС $\Delta \leq 1\%$, что говорит о хорошей сходимости. Тем не менее, при ЭС, Δ остальных параметров возросло (от 1,8 до 3,4% для t , от 0,9 до 19,2% для s_1 и от 1 до 12,7% для s_2). Также видно, что Δ для $U_{\text{вых}}$ возросло до 5,8%, однако на выходе МФ наблюдаются импульсы мод 2 и 3 с равными амплитудами (по аналогии с ГА). Минимум $U_{\text{вых}}$ при ЭС составил 130,2 мВ (при однокритериальной оптимизации с помощью ГА – 130,5 мВ). Наконец, затрачивалось близкое время на один запуск для ЭС и ГА при 1000 вычислениях, что подчеркивает тот факт, что использование модифицированного алгоритма ЭС приближает вычисления к точности ГА при большем времени оптимизации, в отличие от классического алгоритма ЭС.

3.3.1.4 Оптимизация по частотным критериям

Апробация сформулированных в подразделе 3.1 частотных критериев (3.4) и (3.6) выполнялась на МФ 1. Поперечное сечение МФ 1 представлено на рисунке 2.1а, а эквивалентная схема – на рисунке 2.2а. Оптимизировались h , t , s_1 и s_2 с диапазонами: 200–1000 мкм для h , 18–200 мкм для t , 10–300 мкм для s_1 и s_2 . Не изменялись: $w=1000$ мкм, $d=3w$, $\epsilon_r=4,5$ и $\text{tg}\delta=0,025$. Значения ϵ_r и $\text{tg}\delta$ соответствуют материалу FR-4 диэлектрической подложки МФ. Значения l и R взяты, как в подразделе 2.1. Частотные характеристики получены при воздействии источника гармонической ЭДС 2 В. Начальные решения для ЭС: $h=500$ мкм, $t=30$ мкм, $s_1=200$ мкм, $s_2=200$ мкм, а шаг – $\sigma=10$ мкм. Результаты оптимизации по критерию максимизации полосы пропускания для ГА, ЭС и СП представлены в таблицах 3.18–3.20, куда сведены итоговые значения оптимизируемых параметров (h , t , s_1 и s_2), значения $f_{\text{ср}}$, максимумы U_{max} , время на единичный расчет, а также отклонение результатов 5 запусков алгоритмов при конкретном числе вычислений.

Таблица 3.18 – Результаты максимизации полосы пропускания по ЭС

N	h , мкм	t , мкм	s_1 , мкм	s_2 , мкм	U_{max} , мВ	$f_{\text{ср}}$, МГц	Время, с
$N_{\text{ит}}=500$							
1	264,8	19,1	277,9	216,5	259,4	448	5918
2	243,8	19,8	297,3	287,4	237	452,4	5383
3	232,5	19,5	297,9	164,8	283,5	453,9	5214
4	204,1	18,2	297,5	211	260,3	508,2	5240
5	248,5	25,6	297,9	11,1	344,3	516,6	4934
Δ , %	12,95	16,9	3,47	92,56	18,46	7,11	9,06
$N_{\text{ит}}=1000$							
1	292,4	26,2	282	13,7	346	451	3443

N	h , мкм	t , мкм	s_1 , мкм	s_2 , мкм	$U_{\max}$, мВ	$f_{\text{ср}}$, МГц	Время, с
2	237,8	18	296,1	122,5	299,4	504,2	3535
3	257,1	18,2	296,5	36,8	333,8	510,7	3533
4	208,9	20	297,3	22,7	334,2	511	3684
5	237,9	22,2	290	11,7	342,9	516	3781
Δ , %	16,66	18,55	2,64	82,56	7,22	6,72	4,68
$N_{\text{ит}}=2500$							
1	250,3	18,1	293,2	23,8	339,9	513,3	8748
2	237,5	19,3	297,3	14,6	343,8	516,2	8321
3	236,3	21	297,7	17,3	342,2	515,2	8500
4	264,8	20,1	291,1	11,7	345,7	516,1	8939
5	257,1	20,4	290	11,6	346,3	516,3	8446
Δ , %	5,69	7,42	1,31	34,46	0,93	0,29	3,58
$N_{\text{ит}}=5000$							
1	232,2	21,4	295,3	10,4	344,8	516,4	22179
2	259,6	21,9	295,6	10,7	344,7	516,7	24629
3	235	18,6	295,2	32,8	332,8	511,3	12262
4	242,9	19,2	297,8	10,5	346,2	517,5	14135
5	257,6	18,3	299,8	11	345,4	518,2	16368
Δ , %	5,57	8,96	0,77	51,85	13,45	0,67	33,14

Таблица 3.19 – Результаты максимизации полосы пропускания по ГА

N	h , мкм	t , мкм	s_1 , мкм	s_2 , мкм	$U_{\max}$, мВ	$f_{\text{ср}}$, МГц	Время, с
$N_{\text{ит}}=5/10$							
1	338	23	288,6	204,5	272,3	434,6	380
2	209,4	20,9	253,4	130,5	279,7	439,2	511
3	222	20,1	261,3	10	338,8	446	340
4	425,9	27,3	284,1	165,8	285,6	399	360
5	278,4	57,3	299	35	339,5	441,2	363
Δ , %	34,08	48,06	8,25	90,68	11	5,56	20,09
$N_{\text{ит}}=10/10$							
1	338	20,9	290,9	279,5	248,7	437,2	454
2	347,5	22,3	293,2	23,6	344,1	447,6	741
3	237,6	20,1	293,2	19,1	340,9	452	822
4	209,4	20,9	292	273,8	233,5	450,6	740
5	234,5	18	270,4	174,9	270,3	446,3	683
Δ , %	24,8	10,67	4,05	87,21	19,15	1,66	28,84
$N_{\text{ит}}=10/100$							
1	222	22,3	295,5	13,4	341,5	515	6203
2	206,3	19,4	299	18	338	512	6016
3	203,1	18	297,7	245,4	246,7	509,5	5797
4	243,9	18	294,3	10	344,9	517,6	5763
5	297,3	22,3	297,7	10	350,5	461,1	2818
Δ , %	18,82	10,67	0,79	92,17	17,38	5,77	37,52

N	h , мкм	t , мкм	s_1 , мкм	s_2 , мкм	$U_{\max}$, мВ	$f_{\text{ср}}$, МГц	Время, с
$N_{\text{ит}}=50/100$							
1	237,6	22,3	296,6	12,3	344,4	516,4	12676
2	275,3	20,9	296,6	13,5	344,9	459,8	12592
3	212,5	19,4	300	257,9	243,4	509	12868
4	253,3	18,7	293,2	12,3	346	517	13208
5	215,7	19,4	300	15,7	338,6	514,3	13532
Δ , %	12,87	8,78	1,15	90,9	14,41	5,86	3,6

Таблица 3.20 – Результаты максимизации полосы пропускания по СП

N	h , мкм	t , мкм	s_1 , мкм	s_2 , мкм	$U_{\max}$, мВ	$f_{\text{ср}}$, МГц	Время, с
$N_{\text{ит}}=500$							
1	261,2	29,6	298,1	174,2	282,5	444,7	5558
2	278,8	24	248,9	260	233,6	434	5306
3	307,4	30,6	291,3	255,3	252,9	435,8	7271
4	221,5	29,3	272,1	219,2	249,9	441	4752
5	241,8	22,7	282,5	86,4	309,8	445,3	4473
Δ , %	16,24	14,82	8,99	50,12	14,02	1,29	23,82
$N_{\text{ит}}=1000$							
1	260,9	21,3	259,6	189,7	263,6	441,1	13019
2	320,5	53,7	276,6	12,3	345,8	439,4	8948
3	231,5	38	288,6	266,9	239,2	441	8981
4	227,7	34,1	270,2	219,8	251	438,5	9091
5	265,7	20,7	270,2	162,2	278	443,4	9094
Δ , %	16,93	44,35	5,29	91,19	18,22	0,56	18,53
$N_{\text{ит}}=2500$							
1	268,7	21	287	285,7	237	447,2	6031
2	325,5	43,2	287,1	24,7	344,4	442	6540
3	217,5	24,3	281,8	188,5	267	446	7610
4	237,9	20,6	299,1	134,7	296,5	453,3	8399
5	230,4	20,3	295,9	71,6	319	505,8	8761
Δ , %	19,89	36,06	2,98	84,1	18,47	6,73	18,46
$N_{\text{ит}}=5000$							
1	209	22,2	286,8	189	266,4	446,5	13396
2	266,2	18,3	284,5	28,8	335,8	449,2	12669
3	211	18,7	299	94,1	309	505,3	13611
4	230,4	19,2	293,2	120,1	299,4	452,2	15732
5	217,5	21,4	289,6	201,4	264,5	448,6	19018
Δ , %	12,04	9,63	2,49	74,98	11,88	6,18	20,04

Из таблицы 3.18 следует, что максимум полосы пропускания для ЭС получен при $N_{\text{ит}}=5000$ и составляет 518,2 МГц, для ГА – при $N_{\text{ит}}=5000$ и 517 МГц, а для СП – при $N_{\text{ит}}=2500$ и 505,8 МГц. Также видно, что с ростом $f_{\text{ср}}$ увеличивается $U_{\max}$. Для всех алгоритмов максимум Δ (для оптимизируемых параметров) у s_2 (от 34,46 до 92,56%). Это указывает на то, что его изменение мало влияет на ЦФ. Минимум Δ соответствует s_1 (от 0,77 до 8,99%), что указывает на его существенное влияние на ЦФ.

Между тем из таблицы 3.19 видно, что минимум Δ для ГА наблюдается при $N_{\text{ит}}=10/10$ и составляет 1,66%, однако при большем числе вычислений сходимость ухудшается и $f_{\text{ср}}$ растет.

Это указывает на локальный экстремум, в который попадает ГА при недостаточном числе вычислений. При этом миновать его можно ростом числа вычислений (в данном случае, до 5000). Отклонение f_{cp} при ЭС достигает 7,11% и 6,72% при $N_{it}=500$ и 1000, однако далее достигает всего 0,29% при $N_{it}=2500$ и 0,67% при $N_{it}=5000$. Такое поведение говорит о том, что алгоритму ЭС достаточно 2500 вычислений для достижения глобального экстремума (разница между наилучшими значениями f_{cp} при 2500 и 5000 вычислениях меньше 0,2%). Отклонения f_{cp} не превышают 6% при ГА и 7% – при СП. В общем случае, при максимизации f_{cp} ее сходимость увеличилась только для ЭС. Тем не менее, отклонение f_{cp} не превышает 7% для всех алгоритмов, что приемлемо. Отметим, что сходимость оптимизируемых параметров и ЦФ у СП ниже, чем у эволюционных алгоритмов, что вполне ожидаемо, учитывая его специфику.

Из таблиц 3.18–3.20 видно, что во всех используемых алгоритмах с ростом числа вычислений растет f_{cp} , достигая глобального экстремума ЦФ (увеличение полосы пропускания). Вместе с тем, растет U_{max} , что естественно с ростом полосы пропускания. Примечательно, что при СП для t , при $N_{it}=500$, 1000 и 2500, Δ достигает 44,35%, тогда как при $N_{it}=5000$ – снижается до 9,63%. Это говорит о важности оптимизации посредством СП с большим числом вычислений.

Результаты оптимизации по критерию контроля полосы пропускания с использованием тех же алгоритмов представлены в таблицах 3.21–3.23. Для его апробации f_x (целевое значение f_{cp}) установлено на уровне 425 МГц.

Таблица 3.21 – Результаты оптимизации по критерию контроля полосы пропускания, полученные с помощью ЭС

N	h , мкм	t , мкм	s_1 , мкм	s_2 , мкм	U_{max} , мВ	f_{cp} , МГц	Время, с
$N_{it}=500$							
1	334,4	22,3	231,9	75,7	307,9	424	1584
2	466,5	18,1	297,9	196,9	278,1	406,1	1573
3	376,5	19,5	287,2	215,3	269	425,9	1558
4	397,3	21,6	292,1	128,3	300	424,5	1540
5	266,9	48,8	277,4	193,3	270,4	425,8	1567
Δ , %	27,22	45,89	12,46	47,97	6,74	2,38	1,41
$N_{it}=1000$							
1	384,4	28,6	274,5	59,2	327,3	425,9	3066
2	356,3	24,8	266,2	114,9	300	423,6	3099
3	413,9	29,6	277,8	36,8	338,3	425	3037
4	349,7	20,3	269,7	207,3	266,4	426	3120
5	368	21,2	286,8	233,6	263,5	425,36	3087
Δ , %	8,41	18,64	3,73	72,78	12,43	0,28	1,35
$N_{it}=2500$							
1	246,6	55,7	269	137,4	289	425,5	6260
2	476	25,3	289,3	14,2	349,3	425,3	13730
3	338,7	26,6	260,6	119,2	296,7	424,6	14344
4	422,8	29,2	287,3	40,2	338,1	425,4	7444

N	h , мкм	t , мкм	s_1 , мкм	s_2 , мкм	$U_{\max}$, мВ	$f_{\text{ср}}$, МГц	Время, с
5	332,9	29,6	272,6	154,4	286,8	424,6	7791
Δ , %	31,75	37,53	5,22	83,16	9,83	0,11	39,24
$N_{\text{ит}}=5000$							
1	317,5	28,6	267,1	230,3	256	424	4155
2	343,4	36,8	292,9	135,8	300,9	425,2	13102
3	302,1	41,7	290,1	271,4	246,9	424	7383
4	404	19	296	176,6	284,5	423,7	12522
5	391,9	23,4	283,4	93,5	311,5	424,8	9133
Δ , %	14,43	37,4	5,13	48,75	11,57	0,18	51,85

Таблица 3.22 – Результаты оптимизации по критерию контроля полосы пропускания, полученные с помощью ГА

N	h , мкм	t , мкм	s_1 , мкм	s_2 , мкм	$U_{\max}$, мВ	$f_{\text{ср}}$, МГц	Время, с
$N_{\text{ит}}=5/10$							
1	382	28,7	292	86,2	318,5	427,1	419
2	272,2	50,8	288,6	277,3	241	424,8	395
3	987,5	27,3	290,9	47,5	328	395,4	432
4	385,1	29,4	278,4	69,1	323,6	424,1	416
5	294,1	74,4	282,9	111,2	309,8	371,3	473
Δ , %	56,78	46,31	2,38	70,75	15,29	6,99	8,99
$N_{\text{ит}}=10/10$							
1	287,8	41,6	264,7	132,8	292,9	425,5	776
2	265,9	29,4	230,6	160,1	266,2	424,7	1006
3	237,6	43,7	263,6	222,7	248,6	430,8	978
4	360	23,7	287,5	284,1	247,1	422,3	897
5	479,2	27,3	300	25,9	344	420	741
Δ , %	33,71	29,67	13,08	83,29	16,39	1,27	15,17
$N_{\text{ит}}=10/100$							
1	391,4	22,3	261,3	58,9	322,9	424,1	5959
2	237,6	35,1	226,1	113,5	283,4	425,3	6263
3	275,3	55,1	273,8	122,6	300,5	425,2	6236
4	262,7	25,1	215,8	136,2	269,4	424,5	6239
5	319,2	53	285,2	95,3	316,9	424,6	6226
Δ , %	24,45	42,38	13,85	39,62	9,03	0,14	2,49
$N_{\text{ит}}=50/100$							
1	269	22,3	196,5	69,1	298,2	425,4	34101
2	394,5	28,7	272,7	54,4	328,5	423,5	32235
3	366,3	35,1	294,3	101	312,5	425	32229
4	369,4	18	256,8	101	301,5	424,8	35064
5	287,8	44,4	271,6	140,8	291,8	425,5	12820
Δ , %	18,91	42,3	19,93	44,26	5,92	0,24	46,45

Таблица 3.23 – Результаты оптимизации по критерию контроля полосы пропускания, полученные с помощью СП

N	h , мкм	t , мкм	s_1 , мкм	s_2 , мкм	$U_{\max}$, мВ	$f_{\text{ср}}$, МГц	Время, с
$N_{\text{ит}}=500$							
1	313,5	35,5	272,4	144,4	290,8	425,5	1545
2	298,3	36,7	267	156,6	282	425,5	1569
3	329,4	23	263,8	273,8	240,5	423,4	1650

N	h , мкм	t , мкм	s_1 , мкм	s_2 , мкм	$U_{\max}$, мВ	$f_{\text{ср}}$, МГц	Время, с
4	219	59,8	272,3	141,9	285,1	376,3	1653
5	417,1	26	263,5	19,5	344	429,6	1700
Δ , %	31,14	44,44	1,66	86,7	17,71	6,61	4,78
$N_{\text{ит}}=1000$							
1	325,9	22,3	246,3	120	291,4	425,8	3099
2	367,1	55,8	280,8	10,4	347,8	428,1	3171
3	298,2	36,3	277,8	198,5	270,4	428	3155
4	205,3	47,3	253,4	66,3	308,4	427,8	3128
5	209,9	42	248	90,9	296,2	427,2	3085
Δ , %	28,27	42,89	6,55	90,04	12,52	0,27	1,37
$N_{\text{ит}}=2500$							
1	422,5	36,8	282,2	15,7	348,4	424,8	7724
2	250,2	45,8	260,8	22,4	335,8	440,2	8159
3	298,9	33,9	243,1	91,2	304,8	425,6	8579
4	283,4	39,9	262,1	158,8	280,4	424,6	7691
5	249,5	33	221,6	105,2	287,3	424,9	8228
Δ , %	25,74	16,24	12,03	82	10,81	1,8	5,46
$N_{\text{ит}}=5000$							
1	228	38,1	229,7	108,8	285,7	425,3	16036
2	430,5	18,2	249	26,1	336,9	423,5	15941
3	416	19,5	279,4	71,6	319	424,3	16372
4	277,5	58,5	289,6	152,4	290,9	425	16506
5	305,8	29,2	229,7	83,6	302,2	423,7	15860
Δ , %	30,75	52,54	11,53	70,76	8,22	0,21	2

Из таблиц 3.21–3.23 следует, что все алгоритмы достигли глобального экстремума (425 МГц). Важно то, что при любом $N_{\text{ит}}$ для всех алгоритмов, так или иначе, достигается глобальный экстремум ЦФ. Кроме этого, отклонение $f_{\text{ср}}$ при оптимизации посредством ЭС, ГА и СП достигает 2,38, 6,99 и 6,61% при $N_{\text{ит}}=500$, однако далее достигает всего 0,18, 0,24 и 0,21% при $N_{\text{ит}}=5000$. Это показывает, что алгоритмам, в общем случае, достаточно 500 вычислений для достижения глобального экстремума (разница между наилучшими значениями $f_{\text{ср}}$ при 1000, 2500 и 5000 вычислениях меньше 0,2% для ЭС, 0,4% для ГА и 1,8% для СП). Аналогично, для всех алгоритмов максимум Δ (для оптимизируемых параметров) у s_2 (от 39,62 до 90,04%), а минимум у s_1 (от 1,66 до 19,93%). Отклонения $f_{\text{ср}}$ не превышают 3% для ЭС и 7% – для ГА и СП. Так, отклонение $f_{\text{ср}}$ не превышает 7% для всех алгоритмов, что приемлемо.

Из таблиц 3.21–3.23 видно, что во всех алгоритмах с ростом числа вычислений результат приближается к искомому значению 425 МГц. Примечательно, что при оптимизации по критерию контроля полосы пропускания, большинство вычислений для ЭС (при $N_{\text{ит}}=1000$, 2500 и 5000) заканчивалось по достижению сходимости ЦФ. Для полноты исследования, на рисунке 3.19а приведены формы напряжений на входе и выходе МФ 1 после оптимизации по амплитудному и частотным критериям. Оптимизация по амплитудному критерию выполнена в подпункте 3.3.1.1, а минимум $U_{\max}$ достигнут при: $h=990,6$ мкм, $t=191,4$ мкм, $s_1=10$ мкм,

$s_2=55,5$ мкм. Для МФ после максимизации полосы пропускания взят результат запуска ЭС (при $N_{it}=5000$) с параметрами: $h=257,6$ мкм $t=18,3$ мкм $s_1=299,8$ мкм, $s_2=11$ мкм. Для МФ после оптимизации по критерию контроля полосы пропускания взят результат запуска ГА (при $N_{it}=50/100$) с параметрами: $h=366,3$ мкм, $t=35,1$ мкм, $s_1=294,3$ мкм, $s_2=101$ мкм. Для анализа во временной области параметры воздействующего СКИ, а также l и R , взяты, как в подразделе 2.1. На рисунке 3.19б представлены зависимости коэффициента передачи $|S_{21}|$ при оптимизации МФ по трем различным критериям.

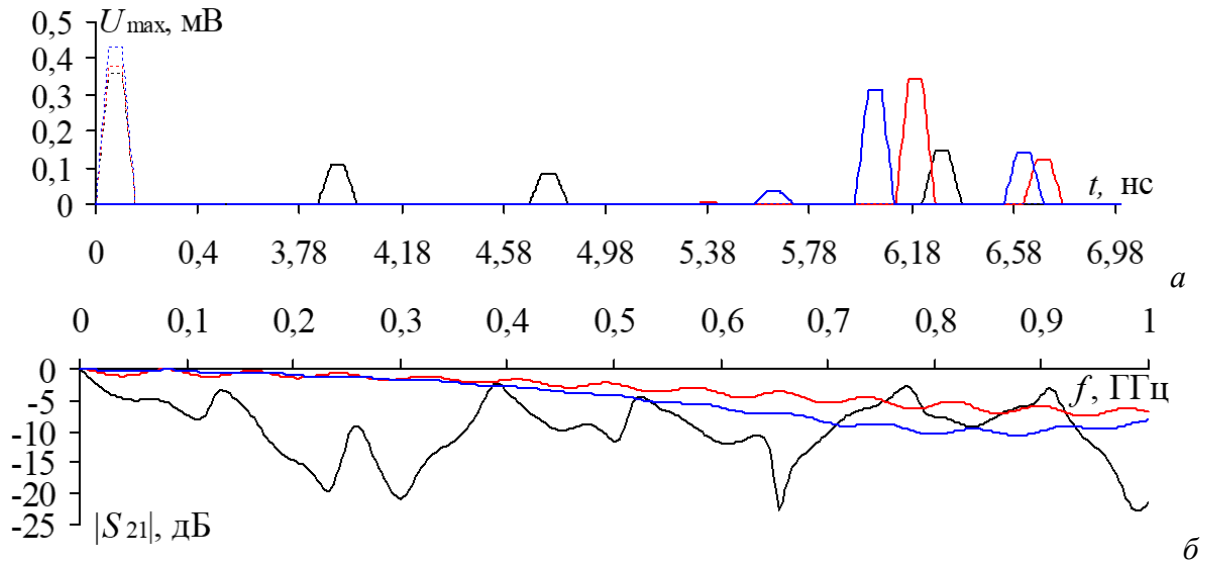


Рисунок 3.19 – Формы напряжений на входе (---) и выходе (—) МФ при оптимизации по амплитудному критерию (—), по критерию максимизации полосы пропускания (—), по критерию контроля полосы пропускания (—) (а); $|S_{21}|$ МФ после оптимизации по амплитудному критерию (—), по критерию максимизации полосы пропускания (—), по критерию контроля полосы пропускания (—) (б)

Из рисунка 3.19а видно, что формы выходных напряжений для МФ с параметрами, полученными в результате оптимизации по амплитудному и частотным критериям, существенно разнятся. В частности, минимум $U_{\max}$ на выходе МФ, оптимизированного по амплитудному критерию, составляет 145 мВ (ослабление СКИ на входе МФ составляет 2,5 раза при моделировании без учета потерь), а разности погонных задержек импульсов разложения ($\Delta\tau$) составляют 0,832 и 1,536 нс/м (между модами 1 и 2, 2 и 3, соответственно). В то же время, для МФ, оптимизированных по критериям максимизации и контроля полосы пропускания минимумы $U_{\max}$ составили 345 и 312 мВ (ослабление СКИ на входе МФ – 1,1 и 1,4 раза при моделировании без учета потерь), а $\Delta\tau$ – 0,772, 0,512 нс/м, 0,392 и 0,58 нс/м, соответственно. Очевидно, что защитные характеристики (в части максимального ослабления $U_{\max}$ на выходе и $\Delta\tau$) лучше у МФ, оптимизированного по амплитудному критерию.

Из рисунка 3.19б следует, что форма $|S_{21}|$ МФ после максимизации полосы пропускания осциллирует. Причиной этого может являться частичное рассогласование линии с включаемым

трактом, что также следует из формы входного воздействия (которая в случае согласования должна достигать 0,5 от уровня ЭДС) на рисунке 3.19а. Этот факт подтверждают временные зависимости для МФ, полученные при оптимизации по критерию контроля полосы пропускания, где осцилляции меньше. Так, напряжение на входе МФ при оптимизации по критерию контроля полосы пропускания составило 431 мВ, тогда как при максимизации полосы пропускания – 385 мВ. Тем не менее, $f_{\text{ср}}$ у МФ, оптимизированного по амплитудному критерию, составляет всего 20,9 МГц, в то время как для МФ, оптимизированных по критериям максимизации и контроля полосы пропускания – 518,2 и 425 МГц.

3.3.1.5 Минимизация амплитуды с учетом распространения помехи с двух направлений

Поперечное сечение МФ 1 представлено на рисунке 2.1а. Оптимизируются h , t , s_1 и s_2 как основные, оказывающие непосредственное влияние на форму выходного напряжения. Оптимизация s_1 и s_2 выполнялась в диапазоне 75–500 мкм, а для t и h взяты значения изготовителей ПП: 18, 35, 50, 70, 105 и 200 мкм для t и 100, 150, 200, 250, 360, 510, 710, 1000, 1500 мкм для h . Остальные параметры: $w=1000$ мкм, $d=3w$, $\epsilon_r=4,5$ и $\text{tg}\delta=0,025$.

Эквивалентная схема данного МФ представлена на рисунке 3.20. Длина МФ – $l=0,6$ м. При моделировании и оптимизации рассматривались два случая воздействий одновременно с двух направлений: два одинаковых СКИ и два СКИ, различных по длительности, форме и амплитуде. При одинаковых использовалось воздействие трапецевидного СКИ с ЭДС 1 В и длительностями фронта, плоской вершины и спада по 50 пс, так что общая длительность составила 150 пс для обоих источников E_1 и E_2 . При таком воздействии сопротивления R_{Γ} , R_{H} и R взяты по 50 Ом. При разных СКИ их параметры соответствуют сигналам с генераторов IRA II (E_1) и SINUS-160 (E_2) из [12]. Амплитуда ЭДС для обоих СКИ понижена в 10^4 раз (для упрощения анализа) и составила 5647 мВ для IRA II и 2575 мВ для SINUS-160. Формы ЭДС показаны на рисунке 3.21. Для источника E_1 узел V_2 является входным, а V_5 – выходным, тогда как для E_2 наоборот (V_5 – вход, V_2 – выход). R_{Γ} и R между узлами V_3/V_4 и землей взяты по 50 Ом, а R_{H} и R между узлами V_6/V_7 и землей – по 30 Ом (для случая использования МФ в рассогласованном электрическом тракте).

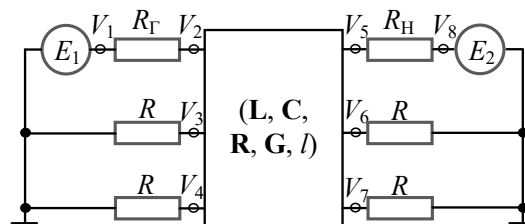


Рисунок 3.20 – Эквивалентная схема МФ 1

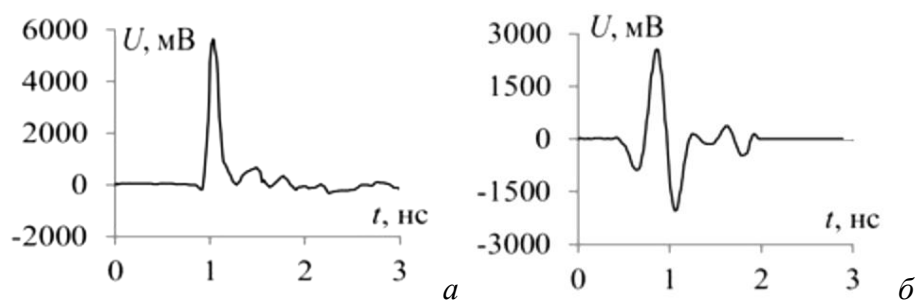


Рисунок 3.21 – Формы ЭДС с IRA II (а) и SINUS-160 (б) [12]

Использовался ГА с турнирным отбором на этапе селекции. Как отмечалось ранее, h и t задавались дискретно, а s_1 и s_2 – диапазоном. Первое реализовано за счет введения дополнительного условия на этапе создания популяции. Если параметры заданы списком, то они выбираются из списка. Если диапазон указан верхней и нижней границами поиска, то выбор будет из значений в данном диапазоне. Коэффициент мутации ГА брался 0,1 (или 10%), а коэффициент кроссовера определялся случайным выбором точки разрыва внутри длины генома родителей (одноточечный кроссовер). Количество особей для турнира – 3. При оптимизации был последовательный рост числа вычислений N_{it} : 50 (5 особей и 10 поколений), 100 (10 особей и 10 поколений) и 1 000 (10 особей и 100 поколений). Для каждого N_{it} было по 5 запусков.

Результаты оптимизации сведены в таблицу 3.24, где N – номер запуска, N_{it} – число итераций (особей/поколений) на запуск, T – затрачиваемое на запуск время, U_{max} – максимальное напряжение в МФ с учетом его разделения на 50 подсекций (полужирным выделен оптимальный набор параметров).

Таблица 3.24 – Результаты оптимизации МФ 1 при одинаковых воздействиях с двух направлений

N	h , мкм	t , мкм	s_1 , мкм	s_2 , мкм	U_{max} , мВ	Время, с
$N_{it}=5/10$						
1	200	70	286,8	436,3	320,3	545
2	100	35	148,1	230	262,6	553
3	100	18	216,8	311,5	303,8	484
4	200	200	235,1	236,6	312,2	502
5	150	35	285	444,6	353	502
Δ , %	33,3	84,5	31,9	31,8	14,7	5,65
$N_{it}=10/10$						
1	100	18	123,1	481,3	242,9	689
2	200	70	149,9	237,8	255	636
3	100	35	80,5	106,5	213,8	828
4	150	70	126,7	335,4	212,8	842
5	100	105	231,8	197,1	277,1	728
Δ , %	33,3	70,7	48,4	63,8	13,1	13,9
$N_{it}=10/100$						
1	100	200	119	307	167	7866
2	100	200	108	261,6	162,4	7880
3	100	200	78,3	191,4	159,8	7521

N	h , мкм	t , мкм	s_1 , мкм	s_2 , мкм	$U_{\max}$, мВ	Время, с
4	100	200	75,8	208	162,6	7277
5	100	200	154	176,9	193	6974
Δ , %	0	0	34	26,9	9,4	6,1

На рисунке 3.22 приведены формы напряжений в подсекции 25 до (при распространении СКИ только со стороны источника E_1 и минимизации максимального напряжения в узле V_5) и после (с учетом распространения СКИ со стороны источников E_1 и E_2) оптимизации МФ по амплитудному критерию. Для СКИ только со стороны E_1 взят результат, ранее полученный в подпункте 3.3.1.1 посредством оптимизации ГА при 5000 вычислениях по амплитудному критерию с параметрами: $h=990,6$ мкм, $t=191,4$ мкм, $s_1=10$ мкм, $s_2=55,5$ мкм. Рисунок 3.23 показывает формы напряжений на выходе МФ до (в узле V_5 для генератора E_1) и после (в узлах V_2 для E_2 и в V_5 для E_1) оптимизации. На рисунке 3.24 представлено поперечное сечение с оптимальным набором параметров при одинаковых воздействиях с двух направлений.

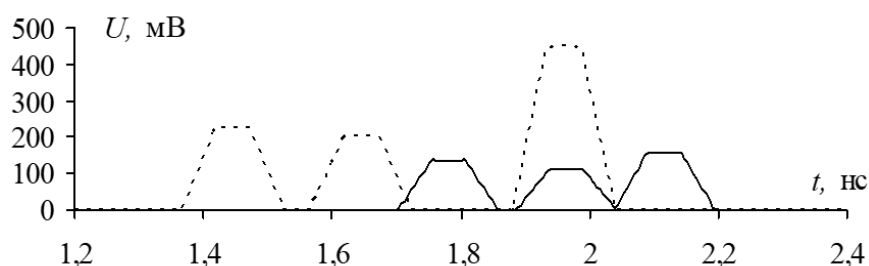


Рисунок 3.22 – Формы напряжений в подсекции 25 до (.....) и после (—) оптимизации

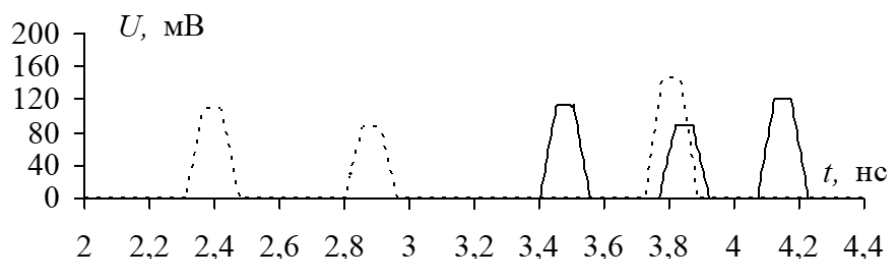


Рисунок 3.23 – Формы напряжений в узле V_5 до (····) и в узлах V_2 и V_5 после (—) оптимизации

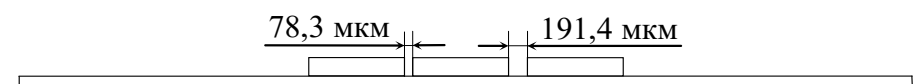


Рисунок 3.24 – Поперечное сечение МФ 1 с оптимальным набором параметров при одинаковых воздействиях с двух направлений

Из таблицы 3.24 и рисунка 3.22 видно, что наименьший уровень напряжения в линии (в подсекции 25, где происходит суперпозиция трех импульсов разложения, распространяющихся с двух направлений) после оптимизации составил $U_{\max}=159,8$ мВ, тогда как до оптимизации $U_{\max}=451,7$ мВ (в 2,8 раза больше). Также таблица 3.24 демонстрирует закономерное уменьшение максимального напряжения и его среднего отклонения с ростом

числа вычислений. Так, среднее $U_{\max}$ в линии составило 308,6 мВ при $N_{it}=5/10$ ($\Delta=14,7\%$), 240,3 мВ при $N_{it}=10/10$ ($\Delta=13,1\%$) и 169 мВ при $N_{it}=10/100$ ($\Delta=9,4\%$). Уменьшение Δ с 14,7 до 9,4% показывает улучшение сходимости. Среднее время вычислений при $N_{it}=10/100$ составило 7503 с, а при $N_{it}=5/10$ – 517 с.

Из рисунка 3.23 видно, что ослабление воздействующих помех также достижимо в крайних узлах МФ (V_2 и V_5). При этом различимы три импульса разложения: для случая до оптимизации это импульсы на выходе МФ в узле V_5 , а после – в узлах V_2 и V_5 (ввиду идентичного воздействия с двух направлений). Примечательно, что до оптимизации МФ $U_{\max}$ на выходе МФ (узел V_5) составило 146 мВ, а после – 122 мВ (в узлах V_2 и V_5).

Из таблицы 3.24 видно, что h и t , задаваемые дискретно, не выходят за рамки заданных значений в процессе оптимизации. Так, h уже при $N_{it}=10/100$ стремится к 100 мкм, а t – к 200 мкм. В то же время при меньшем числе вычислений параметры принимают оптимальные значения в диапазоне 100–200 мкм для h и 18–200 мкм для t . Увеличение сходимости также подтверждается нулевым значением Δ для h и t при максимальном числе вычислений, в то время как при $N_{it}=5/10$ $\Delta=33,3\%$ для h и 84,5% для t . Наибольший разброс у s_1 и s_2 (34 и 26,9% соответственно) при $N_{it}=10/100$. Для s_1 оптимум в диапазоне 75,8–154 мкм, а для s_2 – 176,9–307 мкм.

В таблице 3.25 представлены результаты оптимизации МФ при воздействии двух разных СКИ (полужирным выделен оптимальный набор параметров). На рисунке 3.25 приведены формы максимальных напряжений до (в подсекции 24) и после (в подсекции 22) оптимизации МФ. Рисунок 3.26 демонстрирует формы напряжений на выходе МФ до (в узле V_5 для генератора E_1) и после (в узлах V_2 для E_2 и в V_5 для E_1) оптимизации. На рисунке 3.27 представлено поперечное сечение с оптимальным набором параметров при разных воздействиях с двух направлений.

Таблица 3.25 – Результаты оптимизации конструкции МФ 1 при разных воздействиях с двух направлений

N	h , мкм	t , мкм	s_1 , мкм	s_2 , мкм	$U_{\max}$, мВ	Время, с
$N_{it}=5/10$						
1	200	105	117,2	316,3	999	266
2	100	105	204,2	432,8	1164	282
3	100	200	204,2	370,5	809	291
4	200	105	364	345,2	1764	285
5	100	200	257,9	332	1101	289
Δ , %	33,3	31,1	51,3	15,6	37,1	4,5
$N_{it}=10/10$						
1	150	200	168,2	277	818	382
2	150	105	139,5	294,1	906	400
3	150	200	107,6	326,6	914	426
4	150	200	115,2	332,2	917	384

N	h , мкм	t , мкм	s_1 , мкм	s_2 , мкм	$U_{\max}$, мВ	Время, с
5	150	105	177,7	271,9	886	431
Δ , %	0	31,1	24,6	10	5,7	6
$N_{it}=10/100$						
1	100	200	107,8	209,9	729	5425
2	100	200	150,1	221,3	740	5436
3	100	200	109,8	210,7	717	5454
4	100	200	97,1	209,8	733	5483
5	150	200	103,9	165,7	727	5330
Δ , %	20	0	21,4	14,4	1,6	1,4

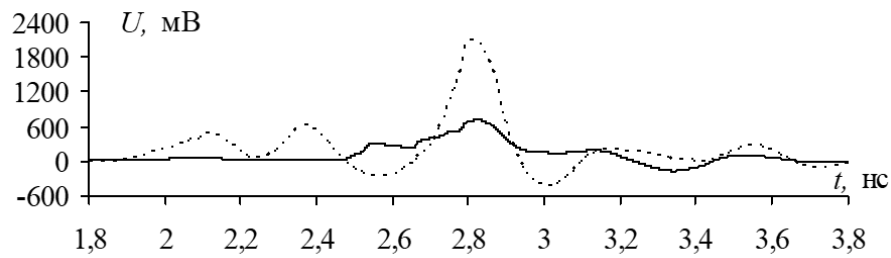


Рисунок 3.25 – Формы напряжения в подсекции 24 до (---) и в подсекции 22 после (—) оптимизации

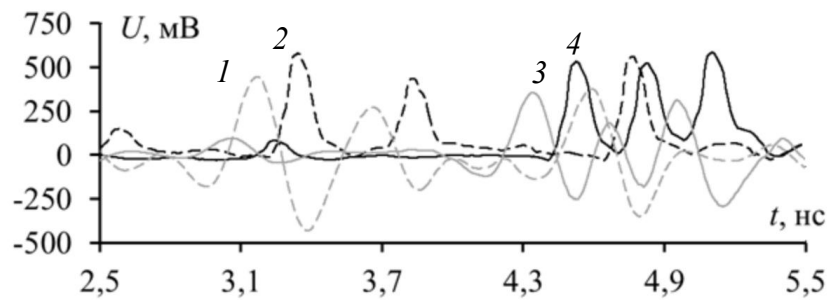


Рисунок 3.26 – Формы напряжения в узлах V_2 и V_5 до (1 и 3) и после (2 и 4) оптимизации

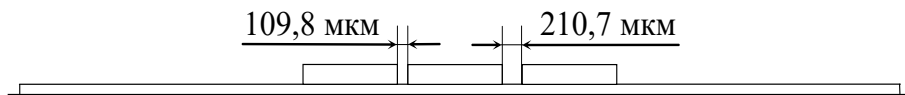


Рисунок 3.27 – Поперечное сечение МФ 1 с оптимальным набором параметров при разных воздействиях с двух направлений

Из таблицы 3.25 и рисунка 3.25 видно, что из-за различия R на концах МФ (50 и 30 Ом), а также воздействующих СКИ, суперпозиция импульсов с наибольшей амплитудой смещается из подсекции 25 в 24 (до оптимизации) и 22 (после оптимизации). Так, минимум напряжения в МФ составил 2102 мВ до оптимизации по критерию (3.8) и 717 мВ после (в 2,9 раза меньше). Результат получен при $N_{it}=10/100$. Минимизация напряжения в МФ достигается в том числе за счет суперпозиции напряжений разной полярности, как видно из рисунка 3.25.

Таблица 3.25 по аналогии с таблицей 3.24 демонстрирует уменьшение максимума напряжения и его среднего отклонения с ростом числа вычислений. Среднее $U_{\max}$ в линии составило 1167,4 мВ при $N_{it}=5/10$ ($\Delta=37,1\%$), 888,2 мВ при $N_{it}=10/10$ ($\Delta=5,7\%$) и 729,2 мВ при

$N_{it}=10/100$ ($\Delta=1,6\%$). Уменьшение Δ с 37,1 до 1,6% показывает улучшение сходимости. Среднее время вычислений при $N_{it}=10/100$ составило 5425 с, а при $N_{it}=5/10$ – 282,6 с. Кроме того, сохранена сходимость параметров h и t , аналогично с таблицей 3.24. Также улучшается сходимость s_1 (от 51,3% при $N_{it}=5/10$ до 21,4% при $N_{it}=10/100$). Для s_2 изменены диапазоны результатов с ростом N_{it} (316–433 мкм при $N_{it}=5/10$, 271–333 мкм при $N_{it}=10/10$, 165–222 мкм при $N_{it}=10/100$).

Из рисунка 3.26 заметно, что минимумы выходных напряжений получены благодаря выравниванию импульсов мод. Так, для узла V_2 (источник E_2) $U_{\max}=446$ мВ при $U_{\text{вх}}=1147$ мВ до оптимизации и $U_{\max}=354$ мВ при $U_{\text{вх}}=807$ мВ после. Ослабление МФ составило 2,57 до и 2,28 после оптимизации (отклонение меньше 6%). Для узла V_5 (источник E_1) $U_{\max}=579$ мВ при $U_{\text{вх}}=2008$ мВ до оптимизации и $U_{\max}=585$ мВ при $U_{\text{вх}}=1507$ мВ после. Ослабление составило 3,47 до и 2,57 после оптимизации (отклонение меньше 15%). Примечательно, что минимизация максимума напряжения в МФ (с учетом 50 подсекций) также позволила получить близкие (с оптимизацией при распространении СКИ только со стороны источника E_1 и минимизации максимума напряжения в узле V_5) значения напряжений на выходе МФ.

3.3.1.6 Оптимизация по глазковому критерию

Сначала апробирован критерий (3.13) максимизации высоты глаза, поскольку он увеличивает и его ширину за счёт концентрации переходных процессов в пределах процентильных границ. Критерий (3.15), минимизации времени перехода между уровнями сигнала, здесь не используется, ввиду возможного неучёта искажений форм полезных сигналов вне выбранных переходных участков. В этой связи целесообразна апробация критерия (3.13) (косвенно обеспечивающего второй) и дальнейшая корректировка критерия (3.15).

Оптимизируемые параметры МФ 1: h , t , s_1 и s_2 . Их диапазоны: 200–1000 мкм для h , 18–200 мкм для t , 10–300 мкм для s_1 и s_2 . Начальные решения для ЭС: $h=500$ мкм, $t=30$ мкм, $s_1=200$ мкм, $s_2=200$ мкм, а шаг – $\sigma=10$ мкм. Остальные параметры приняты неизменными: $w=1000$ мкм, $d=3w$, $\varepsilon_r=6,15$ и $\text{tg}\delta=0,0027$. Электрофизические параметры соответствуют материалу Rogers. Длина МФ принята $l=1$ м, а значения R_{Γ} , $R_{\text{Н}}$ и R взяты по 50 Ом. Воздействовала псевдослучайная битовая последовательность, представленная во временной области в виде сигнала длительностью 50 мкс с временным шагом 10 пс. Эти параметры соответствуют цифровым сигналам с битовой скоростью 100 Мбит/с, характерным для среднескоростных интерфейсов, таких как Fast Ethernet (100BASE-T) или промышленные сети.

Результаты представлены в таблице 3.26, где $\Delta U_P = U_{P90} - U_{P10}$ – разность процентилей напряжения (для оценки раскрытия глаза). Так, чем выше ΔU_P , тем больше высота раскрытия глаза (и наоборот). Глазковые диаграммы до оптимизации по критерию максимизации высоты

глаза (параметры МФ получены при оптимизации по амплитудному критерию из подпункта 3.3.1.1) при $h=990,6$ мкм, $t=191,4$ мкм, $s_1=10$ мкм, $s_2=55,5$ мкм представлены на рисунке 3.28, а после – на рисунке 3.29.

Таблица 3.26 – Результаты оптимизации МФ 1 по глазковому критерию

N	h , мкм	t , мкм	s_1 , мкм	s_2 , мкм	ΔU_P , мВ	Время, с
$N_{it}=50$						
1	529,5	98,3	280,6	244,9	496,1	783
2	640,8	131,2	296,3	136	496,5	790
3	530,4	108,3	232,5	177,7	495,8	784
4	560,8	107,6	288,7	236,7	496,3	795
5	531,8	112,1	288,8	259,2	496,2	805
Δ , %	9,51	14,33	12,1	31,17	0,07	1,38
$N_{it}=100$						
1	711,8	173,7	283,3	128,8	496,5	1473
2	639,6	151,5	288,4	96,6	496,5	1468
3	681,6	136,4	298	174,3	496,5	1480
4	653,9	152,5	295,3	243,2	496,5	1479
5	547,3	126,4	297,3	179,1	496,3	1468
Δ , %	13,06	15,76	2,53	43,14	0,02	0,41
$N_{it}=300$						
1	716,7	185,6	298,6	121,3	496,6	2953
2	727,3	190,3	298,1	181,6	496,6	2948
3	719,3	174,8	297,5	243,5	496,6	2919
4	725,8	173,5	299,2	202,7	496,6	4751
5	690,3	175,9	299,7	297,8	496,6	4003
Δ , %	2,61	4,62	0,37	42,11	0	23,9
$N_{it}=500$						
1	730	199	300	178,6	496,6	7569
2	655,7	153,8	299,6	11,3	496,7	7539
3	741	197,6	299,9	230,2	496,6	7475
4	712,7	16,8	299,7	201,2	496,6	7987
5	668,8	155	298,5	28,9	496,7	6613
Δ , %	6,11	84,43	0,25	90,64	0,01	9,41

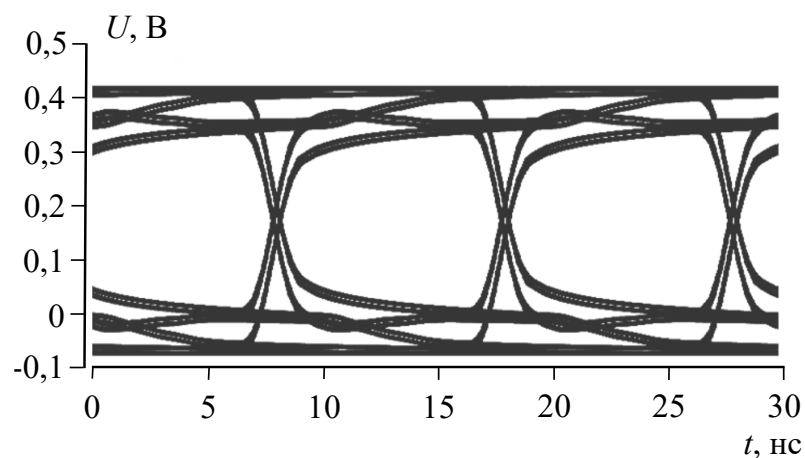


Рисунок 3.28 – Глазковая диаграмма до оптимизации МФ 1

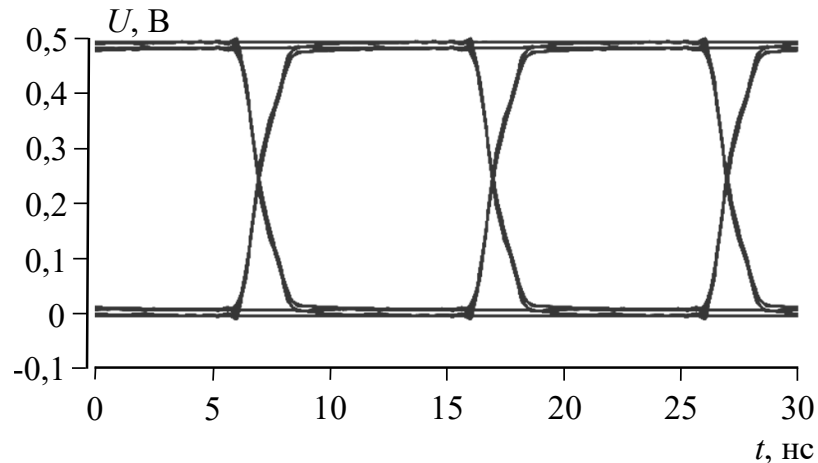


Рисунок 3.29 – Глазковая диаграмма после оптимизации МФ 1

Из таблицы 3.26 видно, что s_1 стремится к верхней границе диапазона (300 мкм) с $\Delta=0,25\%$ при $N_{it}=500$, а h – к диапазону 650–730 мкм ($\Delta=6,11\%$ при $N_{it}=500$), тогда как для t и s_2 разброс велик (с $\Delta=84,43\%$ и $\Delta=90,64\%$ при $N_{it}=500$, соответственно). Это свидетельствует о слабом влиянии t и s_2 на ЦФ и сильном влиянии s_1 и h . Кроме того, с ростом числа вычислений от 50 до 500 заметно уменьшение Δ для h (от 9,51 до 6,11%) и s_1 (от 12,1 до 0,25%), а также ΔU_P (от 0,07 до 0,01%).

Из рисунка 3.28, а после оптимизации – из рисунка 3.29 видно, что раскрытие глазковой диаграммы увеличилось после оптимизации. До оптимизации разность процентилей составила $\Delta U_P=469,6$ мВ, а после – $\Delta U_P=496,7$ мВ (больше на 2,8%). Наилучшее решение (496,7 мВ) получено с параметрами $h=655,7$ мкм, $t=153,8$ мкм, $s_1=299,6$ мкм, $s_2=11,3$ мкм при $N_{it}=500$ за 7539 с. При этом уже при $N_{it}=50$ (в среднем, за 791 с) алгоритм находит решение в диапазоне 495,8–496,5 мВ (Δ от лучшего результата меньше 0,1%). Это свидетельствует о том, что для приемлемого результата для МФ 1 достаточно уже 50 вычислений. Критерий достигается в т.ч. за счет улучшения согласования МФ с трактом 50 Ом, а также отсутствия модальных искажений сигнала.

Анализ полученных результатов показал, что для МФ 1 оптимизация расширила глазковую диаграмму: увеличила высоту на 2,8% (с 469,6 мВ до 496,7 мВ). При этом результат приемлем (разница с лучшим решением менее 0,1%) уже при 50 вычислениях (при среднем времени расчета 791 с). Отметим, что с ростом числа вычислений от 50 до 500 увеличилась сходимость s_1 (с 12,1% до 0,25%) и h (9,51% до 6,11%). Максимизация высоты глаза для МФ 1 достижима в т.ч. за счёт улучшения согласования МФ с трактом 50 Ом и отсутствия модальных искажений сигнала.

3.3.2 Оптимизация микрополосковой защитной структуры алгоритмами ветвей и границ, имитации отжига и симплицальной гомологии

Поперечное сечение МФ 1 представлено на рисунке 2.1а, а эквивалентная схема – на рисунке 2.2а. Фиксированные (геометрические и электрофизические) параметры, диапазоны изменения оптимизируемых параметров и начальные решения для ЭС при оптимизации, а также l , R и параметры воздействующего СКИ взяты, как в подпункте 3.3.1.1, поскольку одной из целей работы является сравнение работы алгоритмов с эволюционными и стохастическим алгоритмами из ранних исследований. Оптимизация выполнялась по амплитудному критерию. Работа алгоритмов детально описана в подразделе 1.4.1.

Результаты оптимизации посредством трех алгоритмов сведены в таблицах 3.27–3.29, а формы выходного напряжения приведены на рисунке 3.30. В качестве КО SHGO использованы предельные время вычисления $t_{\text{lim}}=3600$ с и число вычислений N_{pass} . Результаты SHGO сведены в таблицу 3.27, где D – число выборок. D изменялось от 10 до 1000, а N_{pass} – от 1 до 100. Поскольку последовательные запуски с одинаковыми настройками алгоритма дают идентичные результаты, в таблице 3.27 сведены результаты единичных запусков для разных D и N_{pass} , а также КО для каждого запуска, где I – достижение предела вычислений, Т – превышение предельного времени вычисления.

Для ВГ пространство поиска делилось на N_{sp} подпространств (ветвей). При этом затраты времени растут с ростом N_{sp} . Поскольку при поиске глобального экстремума многоэкстремальной ЦФ оптимизируются одновременно несколько параметров (всего 4), целесообразен минимальный рост числа N_{sp} , во избежание высоких вычислительных затрат. Для ВГ, по аналогии с SHGO, в таблице 3.28 сведены результаты единичных запусков для разных N_{sp} .

Для ИО начальная температура взята равной 100, скорость охлаждения 5% (это значит, что с каждой итерацией температура системы будет уменьшаться на 5% от текущей). В отличие от SHGO и ВГ, для ИО последовательные запуски алгоритма при одинаковых N_{it} дают разные результаты (вероятностный поиск). Поэтому в таблице 3.29 сведены результаты 5 запусков для каждого значения N_{it} . На рисунке 3.30 для наглядности также сведены результаты оптимизации МФ 1 посредством простого ГА, ЭС и СП из подпункта 3.3.1.1.

Таблица 3.27 – Результаты оптимизации МФ 1 посредством SHGO

N_{pass}	h , мкм	t , мкм	s_1 , мкм	s_2 , мкм	U_{max} , мВ	Время, с	КО
$D=10$							
1	215,7	18	83,6	231,1	151,9	269	I
10	1000	200	10	155	146,4	1414	I
100	1000	200	10	155	146,4	3628	T

N_{pass}	h , мкм	t , мкм	s_1 , мкм	s_2 , мкм	U_{max} , мВ	Время, с	КО
$D=100$							
1	1000	200	10	155	146,4	105	I
10	1000	200	10	155	146,4	1942	I
100	1000	200	10	155	146,4	3648	T
$D=1000$							
1	999,8	154,4	10	82,5	146,2	5160	I, T
10	999,8	154,4	10	82,5	146,2	5200	T
100	999,8	154,4	10	82,5	146,2	5190	T

Таблица 3.28 – Результаты оптимизации МФ 1 посредством ВГ

N_{sp}	h , мкм	t , мкм	s_1 , мкм	s_2 , мкм	U_{max} , мВ	Время, с	КО
2	1000	200	10	300	148,3	2554	I
3	1000	200	10	155	146,5	12398	I
4	1000	200	10	106,7	147,1	31289	I
5	1000	154,5	10	82,5	146,3	17156	I
Δ , %	0	12,83	0	56,86	0,68	84,9	

Таблица 3.29 – Результаты оптимизации МФ 1 посредством ИО

N	h , мкм	t , мкм	s_1 , мкм	s_2 , мкм	U_{max} , мВ	Время, с	КО
$N_{\text{it}}=10$							
1	904,3	49,3	94,1	232,1	174	109	I
2	329,6	36,5	84,4	247,4	160,7	101	I
3	318,9	73,9	104,9	270,3	161,2	102	I
4	258,2	24,1	99,1	175,6	190,3	80	I
5	552,7	130	111,4	291,8	161,6	89	I
Δ , %	55,58	68,72	13,79	24,86	8,43	15,34	
$N_{\text{it}}=100$							
1	790,4	165,3	15,2	65,2	156,4	994	I
2	984,8	180,4	12,8	222,4	148,2	726	I
3	249,8	76,2	102,8	278,8	159,1	728	I
4	673,8	178,7	87,7	204,4	159,7	724	I
5	894,8	129,2	36,8	79,2	153,4	1009	I
Δ , %	59,53	40,61	77,85	62,09	3,73	16,45	
$N_{\text{it}}=500$							
1	983,1	183,1	13,1	24,2	147,9	1560	I
2	928	107,6	12,1	65	150,8	1551	I
3	210,8	57,6	126,6	263,2	153,2	4217	I
4	854	149,7	11,5	218,5	153,4	3952	I
5	889	176,2	12,2	85,1	151	3954	I
Δ , %	64,69	52,14	83,35	83,16	1,83	46,22	
$N_{\text{it}}=1000$							
1	948,4	146,6	11,4	237,5	150,7	2997	I
2	923,8	190,3	10,2	179,5	150,4	3056	I
3	904,9	131,5	12,7	234,8	151,8	3105	I
4	999,9	141,5	15,4	36,3	148,5	3038	I
5	999,8	109,5	24,3	48,1	149,1	3036	I
Δ , %	4,99	26,95	40,87	73,48	1,10	1,77	

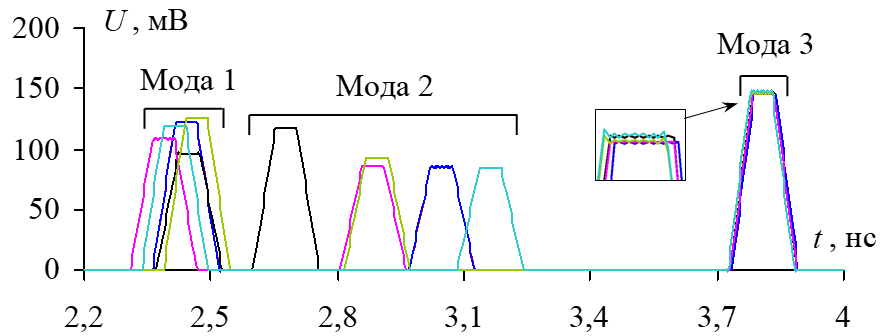


Рисунок 3.30 – Формы выходного напряжения для наилучшего результата оптимизации МФ 1 посредством SHGO (—), ВГ (—), ИО (—), ГА (—), ЭС (—), СП (—)

Из таблицы 3.27 и рисунка 3.30 видно, что минимум $U_{\max}$ посредством SHGO получен при $D=1000$ и составляет 146,2 мВ, что совпадает с результатом ГА (146,2 мВ), меньше, чем у ЭС (147,4 мВ) на 0,41% и СП (149,1 мВ) на 0,98%, а также на 0,03% меньше ВГ (146,3 мВ) и на 0,58% меньше ИО (147,9 мВ). При этом затрачено времени, в среднем, 5193 с на запуск, что на 52% меньше среднего времени для наилучшего результата ГА (16500 с), на 45% меньше, чем у ЭС (13789 с) и на 49% меньше, чем у СП (15317 с). При этом из таблицы 3.27 видно, что время расчетов алгоритма выходит за установленное значение $t_{\lim}=3600$ с, что особенно заметно при $D=1000$. Это объясняется тем, что затраты времени увеличиваются с ростом D , поскольку алгоритму необходимо просчитать больше значений за одну итерацию. Поскольку алгоритм проверяет достижимость КО (п. 1.1 на рисунке 1.15) после применения методов локальной оптимизации (п. 1.7 на рисунке 1.15) и перед запуском следующей итерации (п. 1.2 на рисунке 1.15), он не завершает работу до окончания вычислений в пределах i -итерации. Это наглядно следует из расчетов при $N_{\text{pass}}=1$ и $D=1000$, где время на одну итерацию составило 5160 с, после чего был выдан результат.

Из таблицы 3.28 и рисунка 3.30 видно, что минимум $U_{\max}$ посредством ВГ получен при разбиении пространства поиска на 5 (максимум N_{sp}) и составляет 146,3 мВ (на 0,03% больше результатов ГА и SHGO, на 0,37% меньше ЭС, на 0,95% меньше СП и на 0,54% меньше ИО). Временные затраты при этом составили 17156 с, что на 1,95% больше временных затрат ГА при максимальном числе вычислений (5000). Таблица 3.28 также демонстрирует, что запуск при $N_{\text{sp}}=4$ занял больше времени, чем при $N_{\text{sp}}=5$. Это связано с тем, что расчеты выполнялись на разных ПК с разной производительностью и загруженностью. Тем не менее, рост времени вычислений с ростом N_{sp} сохраняется при использовании одного ПК ($N_{\text{sp}}=2, 3$ и 5). Значение Δ для $U_{\max}$, рассчитанное по (3.22), при разных значениях N достигает 0,68%. Также, из таблицы 3.28 заметно, что $U_{\max}$ при $N_{\text{sp}}=4$ больше, чем при $N_{\text{sp}}=3$. Это связано с тем, что пространство поиска делится на равные подпространства, а значения в узлах рассчитываются для крайних значений и центральной точки подпространства. Соответственно, для нахождения

глобального экстремума необходимо, чтобы один из узлов находился в непосредственной близости к глобальному экстремуму (чего при данном разбиении не происходит). Вероятность его нахождения в этом случае возрастает с ростом числа «ветвей», однако при этом сильно растет время расчета. Тем не менее, видно, что алгоритм ВГ определит глобальный экстремум для сложной многоэкстремальной ЦФ с незначительно меньшей эффективностью, по сравнению с ГА. Это связано с требованием корректного разбиения пространства поиска для эффективной оптимизации, которое сложно выполнить до оптимизации.

Из таблицы 3.29 и рисунка 3.30 видно, что минимум $U_{\max}$ посредством ИО получен при $N_{it}=500$ и составляет 147,9 мВ (на 0,58% больше результатов ГА и SHGO, на 0,17% больше, чем у ЭС и на 0,4% меньше, чем у СП). Затраты времени 1560 с, что в 11 раз меньше, чем у алгоритма ВГ. В среднем же, алгоритм тратит 3046 с при $N_{it}=1000$. Из таблицы 3.29 видно, что рост N_{it} равномерно приближает алгоритм к экстремуму ЦФ. Так, Δ максимального и минимального значений $U_{\max}$ при $N_{it}=10$ составило 8,43%, а при $N_{it}=1000$ – 1,1%. Однако дальнейший рост числа вычислений, температуры системы или же уменьшение процента охлаждения при настройке алгоритма не приближает результат ИО к глобальному экстремуму ЦФ (в нашем случае – 146,2 мВ), а оставляет в локальном. Причиной этому может служить вероятностная специфика алгоритма, которая не совсем подходит для задачи, решаемой в контексте данной работы. Поскольку классический алгоритм ИО использует в качестве вероятностной модели распределение Гиббса по (1.35), а вероятность принятия решений при этом зависит от отношения ΔE к T , то вероятность принятия худшего решения должна уменьшаться по мере уменьшения T (при охлаждении). Известно, что для принятия решения алгоритм сравнивает случайное число в диапазоне от 0 до 1 с рассчитанным по (1.35) значением вероятности. Однако в качестве ΔE принимается разность лучшего (наименьшего) и текущего (вычисленного на конкретной итерации) значений $U_{\max}$ в мВ. Поэтому ΔE будет исчисляться в пределах близких к 0,0001–0,1 В, тогда как начальное значение T превышает эти значения на несколько порядков. По этой причине охлаждение алгоритма проходит медленно, ввиду того, что значения вероятности будут ближе к 1, чем к 0. Иными словами, при оптимизации заданной ЦФ, значения, рассчитанные по (1.35), при максимальной температуре в среднем изменяются в пределах от 10^{-5} до 10^{-2} , а при минимальной – от 0,0001 до 0,1. Как следствие, при сравнении со случайным числом от 0 до 1, вероятность принятия худшего решения будет выше, чем его непринятия.

С учетом результатов из подпункта 3.3.1.1, важно отметить, что все алгоритмы определили результаты, близкие к глобальному экстремуму ЦФ. Так, Δ лучшего ($U_{\max}=146,2$ мВ для алгоритмов ГА и SHGO) и худшего ($U_{\max}=149,1$ мВ для алгоритма СП) результатов составляет всего 0,98%. Поэтому отклонения наилучших результатов для алгоритмов ВГ и ИО

от глобального экстремума ЦФ меньше 1%. С учетом этого, при оптимизации структуры с модальными явлениями на основе МПЛ (характеризующейся многоэкстремальной ЦФ), наравне с эволюционными алгоритмами рекомендуется применение метаэвристических алгоритмов, основанных на детерминированном и вероятностном поиске: СП, SHGO, ВГ и ИО. При этом, несмотря на простоту реализации алгоритмов ВГ и ИО, вероятность их приближения к глобальному экстремуму ЦФ велика, тогда как точность его определения несколько ниже (особенно у ИО). Кроме этого, в случае алгоритма ВГ возможны большие затраты времени.

3.3.3 Оптимизация микрополосковой защитной структуры алгоритмом адаптивного усечения секций

Поперечное сечение МФ 1 представлено на рисунке 2.1а, а эквивалентная схема – на рисунке 2.2а. Оптимизация выполнялась без учета потерь, по амплитудному критерию. Оптимизируемые параметры и их диапазоны приняты такими же, как в подпункте 3.3.1.1. Параметры воздействующего СКИ, l и R такие же, как в подпункте 3.3.1.1. Поскольку размерность задачи в данном случае $d=4$ (по числу оптимизируемых параметров), то для баланса вычислительных затрат и точности, принято $N_{it}=10$ и $N_{sec}=5$, изменялось значение N_{sol} от 2 до 4 с шагом 1. Значение $N_{sec}=5$ не менялось, поскольку, согласно рекомендациям в пункте 3.2.2, данный параметр оказывает наибольшее влияние на точность алгоритма. Результаты представлены в таблице 3.30. Формы выходного напряжения для наилучшего результата приведены на рисунке 3.31, для сравнения, вместе с полученными посредством ГА, ЭС и СП в подпункте 3.3.1.1.

Таблица 3.30 – Результаты оптимизации МФ 1 посредством АУС при $N_{pass}=10$, $N_{sec}=5$

N	h , мкм	t , мкм	s_1 , мкм	s_2 , мкм	U_{max} , мВ	Время, с
$N_{sol}=2$ ($N_{total}=2490$)						
1	973,1	156	15,9	119,8	148,5	5540
2	974	183,4	12,1	130	148,9	5674
3	976,7	192,5	11,3	109,2	148,4	5623
4	999,3	172,9	18	150,5	148	5118
5	991,8	126,3	10,3	116,1	148,3	5733
Δ , %	1,33	20,77	27,21	15,9	0,3	5,67
$N_{sol}=3$ ($N_{total}=3735$)						
1	998,7	183,7	12,9	175,8	147,8	8057
2	999,6	138,1	11,9	205	147,6	10233
3	985,7	139,9	11,5	75	147,6	8544
4	993,3	172,9	10,7	159,1	147,1	7853
5	996,4	163,2	13,8	221,1	148,1	8496
Δ , %	0,70	14,17	12,65	49,34	0,34	13,16

N	h , мкм	t , мкм	s_1 , мкм	s_2 , мкм	$U_{\max}$, мВ	Время, с
$N_{\text{sol}}=4$ ($N_{\text{total}}=4980$)						
1	202	123,5	157,2	294,6	148,3	11727
2	996,6	174,2	10,8	104,7	146,9	11081
3	979,4	141,7	15,7	60,1	148,3	11657
4	969,1	194	18,3	93,3	148,6	10996
5	991,2	156,2	12,6	121,4	147,7	10188
Δ , %	66,29	22,20	87,14	66,11	0,58	7,02

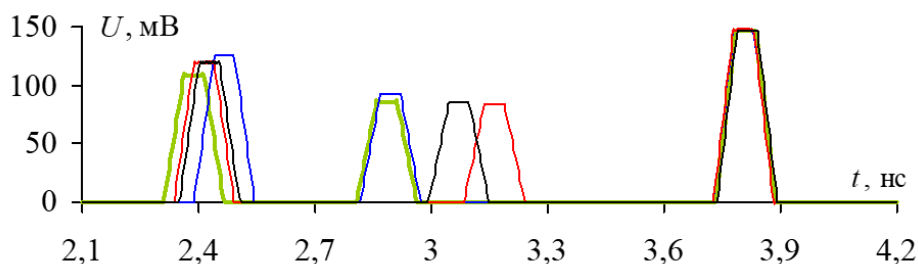


Рисунок 3.31 – Формы выходного напряжения для наилучшего результата оптимизации МФ 1 с использованием ЭС (—), ГА (—), СП (—) и АУС (—)

Как видно из таблицы 3.30 и рисунка 3.31, лучшее решение получено при $N_{\text{sol}}=4$ и составило 146,9 мВ (на 0,24% больше полученного ГА и на 0,98% и 0,41% меньше полученного алгоритмами СП и ЭС). При этом $U_{\text{вх}}=375,5$ мВ, что показывает рассогласование с трактом 50 Ом (по результатам работы всех алгоритмов). Это объясняется выбором лишь амплитудного критерия при оптимизации. Наилучшее решение получено за 11081 с, тогда как в среднем при $N_{\text{sol}}=4$ алгоритм тратит, в среднем, 11130 с, при $N_{\text{sol}}=3$ – 8637 с, при $N_{\text{sol}}=2$ – 5538 с. При $N_{\text{sol}}=2$ $N_{\text{total}}=2500$, при $N_{\text{sol}}=3$ $N_{\text{total}}=3700$, а при $N_{\text{sol}}=4$ $N_{\text{total}}=5100$. Несмотря на то, что Δ для параметров и ЦФ при $N_{\text{sol}}=4$ имеет самое высокое значение, лучшее решение было найдено именно при $N_{\text{sol}}=4$. Заметно, что с ростом N_{sol} среднее значение $U_{\max}$ уменьшается (148,42 мВ при $N_{\text{sol}}=2$ и 147,96 мВ при $N_{\text{sol}}=4$).

Кроме того, при сравнении рисунков 3.31 и 3.30 заметно, что формы выходных импульсов сопоставимы для всех алгоритмов, а амплитуды и τ_3 для импульса 3 (отличаются менее 1%). Из таблицы 3.30 также заметно, что Δ при $N_{\text{total}}=4980$ самая высокая и для оптимизируемых параметров, и для ЦФ из-за результатов запуска 1. Для $U_{\max}$ Δ растет с ростом N_{total} за счет получения алгоритмом более низкого уровня $U_{\max}$, тогда как при $N_{\text{total}}=2490$ значение остается в диапазоне 148–148,9 мВ. Такая тенденция нетипична в сравнении с другими алгоритмами, но вполне закономерна: с ростом N_{sec} алгоритм с меньшей вероятностью отсекает перспективные секции, в которых может находиться глобальный оптимум. Именно поэтому важно грамотно выбирать значения N_{sec} и N_{sol} в зависимости от d и общей сложности задачи.

Несмотря на то, что АУС демонстрирует приемлемые результаты, сопоставимые с другими алгоритмами по точности нахождения решения и вычислительным затратам, он может

совершенствоваться. В частности, возможно уточнения границ путём анализа смежных секций: если наилучшее найденное решение расположено на стыке секций, и при этом в соседней, ранее отсечённой области, обнаружено более предпочтительное решение, такая секция может быть возвращена в активную выборку. Также возможно внедрить более гибкие критерии отсечения секций с целью сохранения потенциально перспективных областей поиска.

3.3.4 Оптимизация защитной структуры с лицевой связью генетическим алгоритмом, эволюционными стратегиями и алгоритмом случайного поиска

3.3.4.1 Оптимизация по амплитудному критерию

Поперечное сечение МФ 2 представлено на рисунке 2.1б, а эквивалентная схема – на рисунке 2.2б. Оптимизация выполнялась с учетом потерь, по амплитудному критерию алгоритмами ГА, ЭС и СП в диапазонах оптимизируемых параметров: 100–1000 мкм для h , 30–175 мкм для t , 200–2000 мкм для s . Начальные решения для ЭС: 500 мкм для h , 100 мкм для t , 1 мм для s . Настройки алгоритмов соответствуют приведенным в подразделе 3.2. Шаг автоматической сегментации границ поперечного сечения здесь и далее принят $t/3$. Параметры воздействующего СКИ, l и R такие же, как в подпункте 3.3.1.1. Результаты продемонстрированы в таблицах 3.31–3.33, а формы выходного напряжения для наилучших результатов оптимизации двумя алгоритмами – на рисунке 3.32.

Таблица 3.31 – Результаты оптимизации МФ 2 по амплитудному критерию для ГА

N	h , мкм	t , мкм	s , мкм	$U_{\max}$, мВ	Время, с	h , мкм	t , мкм	s , мкм	$U_{\max}$, мВ	Время, с
	$N_{it}=5/10$					$N_{it}=10/10$				
1	269,4	34	1943,5	88,7	262	142,4	67,5	1978,8	89,8	296
2	156,5	36,3	1872,9	88,8	171	103,5	32,3	1908,2	87,5	692
3	103,5	43,1	1752,9	90,2	210	251,8	30,6	1618,8	91,9	164
4	315,3	34,5	1858,8	90,1	356	124,7	33,4	1971,7	87,1	317
5	325,9	70,9	1936,5	92,1	188	117,6	31,7	1950,6	87,1	710
Δ , %	51,79	35,18	5,16	1,88	35,1	41,74	37,61	10	2,68	62,47
	$N_{it}=10/100$					$N_{it}=50/100$				
1	107,1	30	2000	86,3	6806	100	30	2000	86,2	28028
2	107,1	30	1985,9	86,5	6397	110,2	30	2000	86,3	26480
3	100	30	1992,9	86,3	5980	100	30	2000	86,2	20036
4	131,8	30	1992,9	86,6	6577	100	30	2000	86,2	24928
5	100	30,6	2000	86,3	6888	111,4	30	2000	86,3	23779
Δ , %	13,72	0,99	0,35	0,17	7,06	5,39	0	0	0,06	16,63

Таблица 3.32 – Результаты оптимизации МФ 2 по амплитудному критерию для ЭС

N	h , мкм	t , мкм	s , мкм	$U_{\max}$, мВ	Время, с	h , мкм	t , мкм	s , мкм	$U_{\max}$, мВ	Время, с
	$N_{it}=500$					$N_{it}=1000$				
1	100,9	32,2	1972	86,8	2742	100,5	30,4	1998	86,4	7529
2	451	31,2	994,5	104,2	4256	207,8	30,4	1998,3	87,4	8045
3	103,8	30	1998	86,4	3414	116,3	30,4	1988,7	86,6	7669
4	430,4	30,2	1999,4	89,1	4159	102,6	30,1	1988,2	86,5	7087

N	h , мкм	t , мкм	s , мкм	$U_{\max}$, мВ	Время, с	h , мкм	t , мкм	s , мкм	$U_{\max}$, мВ	Время, с
5	441,4	30,3	1996	89,2	3479	102,9	30,9	1987	86,6	7248
Δ , %	63,44	3,54	33,56	9,34	21,63	34,8	1,31	0,28	0,57	6,33
$N_{it}=2500$						$N_{it}=5000$				
1	131	30	1999,8	86,6	20577	100,9	30,1	1999,6	86,3	45132
2	102,6	30	1999,3	86,3	22345	101	30,1	1998,3	86,4	42337
3	100,7	30,5	1998,6	86,4	22007	100,6	30,1	1999,7	86,3	45404
4	100,8	30,1	2000	86,3	17548	103,5	30	1997,9	86,4	45303
5	100,7	30,3	1997,5	86,4	24166	101,5	30	1999,6	86,3	50225
Δ , %	13,08	0,83	0,06	0,17	15,87	1,42	0,17	0,05	0,06	8,52

Таблица 3.33 – Результаты оптимизации МФ 2 по амплитудному критерию для СП

N	h , мкм	t , мкм	s , мкм	$U_{\max}$, мВ	Время, с	h , мкм	t , мкм	s , мкм	$U_{\max}$, мВ	Время, с
$N_{it}=500$						$N_{it}=1000$				
1	161,1	123,2	1955,8	93	1416	125,2	32,8	1643	90,1	2977
2	224,2	37,8	1934,4	88,9	1446	149	86,8	1877,1	92,2	27,45
3	140,8	56,8	1912	89,8	1578	156,1	103	1816	93,8	2746
4	151,4	95,8	1882,3	92,5	1300	138,4	52,8	1788,5	91	2705
5	162	172,1	1715	98,3	1458	143,5	61,8	1910	90,2	2957
Δ , %	22,85	63,98	6,56	5,02	9,66	10,98	51,69	7,51	2,012	98,17
$N_{it}=2500$						$N_{it}=5000$				
1	156,4	126	1960	93	6399	140,3	53	1944,2	89,2	14158
2	137,5	40,7	1990	87,8	6653	136,5	36,8	1847,8	88,9	12580
3	159,8	113	1970,5	92,4	6496	140	43,1	1921	88,7	12757
4	143,6	45,1	1911	89	6717	135,2	30,3	1947,9	87,2	12575
5	129,5	31,5	1983,2	86,9	6693	165,1	150,1	1976	93,9	13675
Δ , %	10,47	60	2,03	3,39	2,42	9,96	66,41	3,35	3,7	5,9

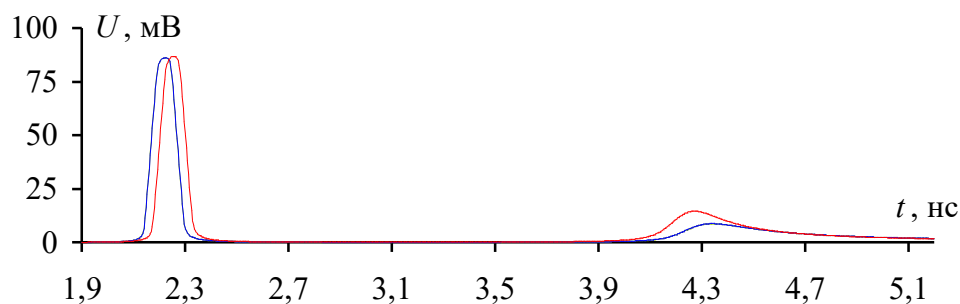


Рисунок 3.32 – Формы выходного напряжения для наилучшего результата оптимизации МФ 2 с использованием ГА (—), ЭС (—) и СП (—)

Как видно из рисунка 3.32, формы выходного напряжения для ЭС и ГА очень близки: отклонение максимумов менее 0,06%. При СП минимум выходного напряжения 86,9 мВ, тогда как при ЭС – 86,3 мВ, а ГА – 86,2 мВ. Временные затраты на один запуск СП составили, в среднем, 13150 с при 5000 вычислениях, что меньше, чем у ГА, при том же числе вычислений (в среднем, 24650 с) и значительно меньше, чем у ЭС (45680,2 с). Оптимизация тремя алгоритмами подтвердила, что при данных фиксированных параметрах и диапазонах амплитуды импульсов разложения не выравниваются.

3.3.4.2 Оптимизация по двум критериям

Далее показана возможность оптимизации МФ 2 по двум (амплитудному и согласования) критериям одновременно. Поперечное сечение МФ 2 представлено на рисунке 2.1б, а эквивалентная схема – на рисунке 2.2б. Моделирование и оптимизация посредством ЭС, ГА и СП выполнены с учетом потерь. Было по 10 запусков для всех значений N_{it} . Результаты приведены в таблицах 3.34–3.36, а формы выходного напряжения – на рисунке 3.33.

Таблица 3.34 – Результаты оптимизации МФ 2 по двум критериям, полученные с помощью ГА

N	h , мкм	t , мкм	s , мкм	$U_{вх}$, мВ	U_{max} , мВ	Время, с
$N_{it}=5/10$						
1	1000	31,1	1901,2	614,4	99,1	260
2	964,7	39,7	1548,2	605,4	102,5	240
3	904,7	53,9	1774,1	603,9	107,1	52
4	876,5	32,3	1992,9	606,3	95,9	210
5	887,1	56,7	2000	605,7	108	185
6	950,6	80,6	1816,5	606,5	113,6	77
7	961,2	36,8	1922,3	611,5	102	59
8	996,5	34	1710,6	611	100,3	203
9	982,4	40,2	1887,1	612,3	104,5	160
10	971,8	67,5	1858,8	609,4	112,5	85
Δ , %	6,58	44,32	12,73	0,86	8,45	66,67
$N_{it}=10/10$						
1	922,4	43,1	1992,9	609,2	104,4	202
2	940	31,7	1682,4	606,7	98,5	203
3	901,2	49,3	1548,2	600	104,4	218
4	982,4	30	1710,6	610,3	98,4	408
5	957,6	43,1	1922,4	610,8	105,3	320
6	982,4	30,6	1837,7	612,3	97,8	308
7	971,8	40,2	1964,7	612,6	104,4	260
8	961,2	35,1	1950,6	612	101	283
9	820	31,1	1978,8	601,5	92,9	385
10	989,4	30	1724,7	611	98,3	326
Δ , %	9,36	24,34	12,56	1,04	6,26	33,77
$N_{it}=10/100$						
1	1000	30	1929,4	614,9	98,2	5065
2	982,4	30	1992,9	614,6	97,9	6427
3	992,9	31,1	2000	615,3	99,2	3709
4	985,9	30	2000	614,9	98	5744
5	1000	30	1992,9	615,8	98,4	6242
6	1000	30	1985,9	615,7	98,4	5019
7	1000	30,6	1978,8	615,6	98,9	6682
8	996,5	30,6	1985,9	615,4	98,8	4988
9	996,5	30	1978,8	615,4	98,3	4958
10	996,5	30	1971,8	615,3	98,3	6121
Δ , %	0,89	1,8	1,8	0,1	0,66	28,61

N	h , мкм	t , мкм	s , мкм	$U_{вх}$, мВ	U_{max} , мВ	Время, с
$N_{it}=50/100$						
1	1000	30	1985,9	615,7	98,4	17003
2	1000	30,6	1985,9	615,7	98,9	16092
3	1000	30,6	1992,9	615,8	99	15803
4	1000	30	1992,9	615,8	98,4	16435
5	1000	30,6	2000	615,9	98,4	15962
6	992,9	31,1	2000	615,3	99,2	14188
7	1000	30	1929,4	614,9	98,2	14870
8	1000	30	2000	615,9	98,4	14686
9	1000	30	1964,7	615,4	98,3	16952
10	1000	30	1964,7	615,4	98,3	16084
Δ , %	0,36	1,8	1,8	0,08	0,51	9,03

Таблица 3.35 – Результаты оптимизации МФ 2 по двум критериям, полученные с помощью ЭС

N	h , мкм	t , мкм	s , мкм	$U_{вх}$, мВ	U_{max} , мВ	Время, с
$N_{it}=500$						
1	996,5	31,2	1997	615,5	99,5	3466
2	976,7	37,6	1460,1	613,6	103,3	3448
3	975,5	30,2	1903,9	612,8	97,5	2577
4	998,8	32,1	1628,1	609,9	100,4	3467
5	975,5	31,7	1921,7	613	98,8	4725
6	997,3	30,6	1990,8	615,5	98,9	3490
7	999,3	31	1736	611,8	98,4	3194
8	961,1	36,4	1539,2	605,2	102,1	2811
9	966,9	30,4	1971,9	613,1	97,6	3386
10	979,6	30	1999,1	614,5	97,8	4066
Δ , %	1,95	11,24	15,58	0,84	2,89	29,42
$N_{it}=1000$						
1	984,4	30,2	1997,4	614,8	98,1	9575
2	999,5	30,1	1498,8	607,7	103	9471
3	998,9	30,1	1978,5	615,5	98,4	9603
4	999,4	30,2	1991,2	615,7	98,6	10965
5	999,5	30	1905,7	614,6	98,1	8765
6	998,5	30,2	1996,7	615,8	98,6	8524
7	997,7	31,1	1989	615,5	99,3	9702
8	994,3	30,1	1979,4	615,2	98,3	8266
9	993,2	30	1999,6	615,4	98,3	8328
10	996,1	30,9	1992,5	615,5	99,1	9138
Δ , %	0,76	1,8	14,32	0,66	2,44	14,03
$N_{it}=2500$						
1	999,5	30,1	1999,5	615,9	98,5	22015
2	998,9	30,1	1980,1	615,6	98,4	22049
3	999,5	30,2	1987,9	615,7	98,6	26752
4	998,7	30	1998,1	615,8	98,4	27442
5	999,8	30	1989,9	615,8	98,4	30037
6	999,8	30,1	1999,6	615,9	98,5	26754
7	997,1	30	1991,2	615,6	98,3	21671
8	999,4	30	1978,9	615,6	98,4	21170
9	987,7	30	1965,9	614,6	98	25035

N	h , мкм	t , мкм	s , мкм	$U_{\text{вх}}$, мВ	U_{max} , мВ	Время, с
10	992,4	30	1999,4	615,4	98,2	25044
Δ , %	0,61	0,33	0,85	0,11	0,31	17,32
$N_{\text{it}}=5000$						
1	999,4	30	1993,4	615,8	98,4	50901
2	999,2	30	1999,6	615,8	98,4	49257
3	999,4	30	1999,5	615,9	98,4	54595
4	1000	30,1	2000	615,9	98,5	51087
5	999,5	30	1999,9	615,9	98,5	49257
6	999,8	30,3	1994,7	615,8	98,8	49420
7	998,6	30,2	1999,4	615,8	98,6	49388
8	999,7	30,2	1965,9	615,4	98,5	58200
9	1000	30	1999,4	615,6	98,4	49810
10	999,8	30,1	1997,1	615,9	98,5	48685
Δ , %	0,07	0,5	0,86	0,04	0,2	8,90

Таблица 3.36 – Результаты оптимизации МФ 2 по двум критериям, полученные с помощью СП

N	h , мкм	t , мкм	s , мкм	$U_{\text{вх}}$, мВ	U_{max} , мВ	Время, с
$N_{\text{it}}=500$						
1	589,5	71,3	1992,5	576	95,8	1078
2	568,9	64,8	1865,3	572,2	94,9	1248
3	630,7	133	1860,4	576,2	103,3	989
4	643,7	137,3	1895,3	577,9	104,2	968
5	623,7	130,5	1968,6	577	103,1	1095
6	664	149,4	1964,2	580,6	105,7	1074
7	658,8	150,6	1982	580,2	105,4	928
8	632,5	150,1	1934,6	576,7	103,7	972
9	593,6	65,2	1884,1	575,4	94,9	1012
10	587,4	128,2	1670	568,6	101,6	945
Δ , %	7,71	39,83	8,81	1,04	5,38	14,71
$N_{\text{it}}=1000$						
1	657,4	149,2	1996,9	580,3	105,3	1985
2	652,5	166	1907,3	578	104,9	2106
3	595,5	70,4	1961,7	576,3	96,1	1989
4	651,3	134,5	1975,3	579,9	104,9	1897
5	622,5	145,1	1833	574,5	102,8	2008
6	585,3	51,1	1985,9	576,4	92,6	1852
7	622,8	125,9	1998,8	577,5	103,1	1807
8	646,1	149,6	1977,3	578,8	104,7	2076
9	625,1	151,8	1879,1	575,1	103,1	1924
10	619,9	132,6	1935,4	576,1	102,8	2116
Δ , %	5,8	52,92	4,33	0,5	6,42	7,88
$N_{\text{it}}=2500$						
1	646,8	126,7	1982,9	579,9	104,6	4903
2	586,2	44,6	1999,8	577,1	91,9	5086
3	610,1	96,4	1995,8	577,2	102,2	5223
4	609,1	78,9	1978,4	577,7	98,4	5594
5	649,2	150,6	1971,3	579	104,8	5700
6	642,7	168,1	1890	576,5	104,3	4962
7	603,2	74,9	1951,6	576,7	97,3	5188

N	h , мкм	t , мкм	s , мкм	$U_{\text{вх}}$, мВ	U_{max} , мВ	Время, с
8	633,1	123,1	1986,5	578,6	103,7	4740
9	621,8	117,9	1928	576,8	102,9	5730
10	667,8	161,3	1997,1	581	106	4882
Δ , %	6,51	58,06	2,82	0,39	7,12	9,46
$N_{\text{it}}=5000$						
1	664,7	172,2	1993,1	580,2	105,9	12284
2	666	161,8	1992,3	580,7	105,9	13520
3	624,1	115,5	1917,9	577	103	13608
4	641,1	135,5	1984,7	579	104,3	14400
5	667,7	161	1988	580,9	106	14458
6	653,3	136,6	1993,2	580,3	105,1	16178
7	623,1	95,1	1997	578,7	103	16312
8	632	116,3	1993,5	578,8	103,7	19254
9	651,4	157,6	1943,1	578,6	104,9	19723
10	651,6	164,3	1989,6	579	105	22826
Δ , %	3,46	28,84	2,02	0,34	1,44	30,03

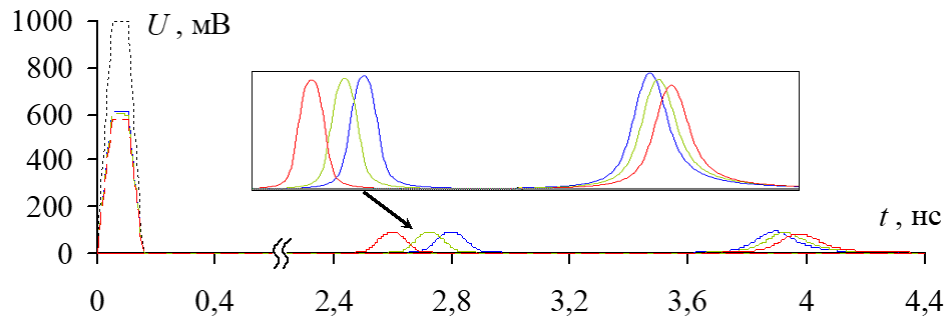


Рисунок 3.33 – Формы ЭДС (---), напряжения на входе (—) и выходе (—) МФ 2 при оптимизации посредством ГА (—), ЭС (—) и СП (—)

Из таблиц 3.34–3.36 и рисунка 3.33 видно, что наилучшие результаты получены при $N_{\text{it}}=500$ для ЭС ($U_{\text{вх}}=612,8$ мВ, $U_{\text{max}}=97,5$ мВ), при $N_{\text{it}}=100$ для ГА ($U_{\text{вх}}=601,5$ мВ, $U_{\text{max}}=92,9$ мВ), при $N_{\text{it}}=2500$ для СП ($U_{\text{вх}}=577,1$ мВ, $U_{\text{max}}=91,9$ мВ). Видно, что алгоритм ЭС определил наилучшее решение при минимальном (для него) числе вычислений (при $N_{\text{it}}=500$). При этом Δ параметров (при $N_{\text{it}}=500$: 1,95% для h , 11,24% для t , 15,58% для s ; при $N_{\text{it}}=5000$: 0,07% для h , 0,5% для t , 0,86% для s) и ЦФ (при $N_{\text{it}}=500$: 0,84% для $U_{\text{вх}}$, 2,89% для U_{max} ; при $N_{\text{it}}=5000$: 0,04% для $U_{\text{вх}}$, 0,2% для U_{max}) уменьшается с ростом числа вычислений, что свидетельствует о лучшей сходимости решений. Аналогичная ситуация наблюдается и с ГА: наилучшее решение алгоритм находит при числе особей/поколений 10/10. Δ параметров (при $N_{\text{it}}=10/10$: 9,36% для h , 24,34% для t , 12,56% для s ; при $N_{\text{it}}=50/100$: 0,36% для h , 1,8% для t , 1,8% для s) и ЦФ (при $N_{\text{it}}=10/10$: 1,04% для $U_{\text{вх}}$, 6,26% для U_{max} ; при $N_{\text{it}}=50/100$: 0,08% для $U_{\text{вх}}$, 0,5% для U_{max}) также уменьшается с ростом числа вычислений. Между тем Δ наилучших результатов, полученных при низком и среднем числе вычислений, от максимального незначительны (меньше 0,5% для всех алгоритмов). При СП наилучшее решение достигается при среднем числе вычислений. Δ параметров (при $N_{\text{it}}=500$: 7,7% для h , 39,8% для t , 8,8% для s ; при $N_{\text{it}}=5000$: 3,46% для h , 28,8%

для t , 2% для s) и ЦФ (при $N_{it}=500$: 1,04% для $U_{вх}$, 5,38% для U_{max} ; при $N_{it}=5000$: 0,34% для $U_{вх}$, 1,44% для U_{max}) уменьшается с ростом числа вычислений. Достигнуто выравнивание амплитуд мод 1 и 2 (чего не было при одном критерии). При этом $U_{вх}$ близко к половине ЭДС, что обеспечивает согласование. Данные результаты подтверждают предыдущие, демонстрируя большее значение U_{max} при выравненных амплитуды импульсов напряжениях мод 1 и 2 (86,3 мВ при однокритериальной и 97,5 мВ при 2-критериальной оптимизации). Разности задержек импульсов мод (Δt) составили 1,084 нс для ЭС, 1,189 нс для ГА и 1,367 нс для СП. Среднее время расчетов при 5000 вычислениях составило 15808 с для ГА, 51060 с для ЭС и 16256 с для СП.

3.3.4.3 Оптимизация по глазковому критерию

Оптимизация МФ 2 по глазковому критерию выполнялась с использованием ЭС. Выбор алгоритма обоснован его доказанной эффективностью в задачах оптимизации структур с модальными явлениями, а также преимуществами реализации на *Python*, предоставляющей широкие возможности для модификации ЦФ в соответствии с требованиями к ней. Было по 5 запусков при $N_{it}=50, 100, 300$ и 500. Оптимизируемые параметры (h, t, s) в диапазонах: 10–2000 мкм для h , 18–175 мкм для t , 10–1000 мкм для s . Начальные решения для ЭС: $h=500$ мкм, $t=100$ мкм, $s=200$ мкм, а шаг – $\sigma=10$ мкм. Остальные параметры неизменны: $w=2$ мм, $d=w$, ε_r и $\text{tg}\delta$ такие же, как и для МФ 1 в подпункте 3.3.1.6, как и входное воздействие, l и R . Результаты оптимизации представлены в таблице 3.37. Глазковые диаграммы до оптимизации по критерию максимизации высоты глаза (3.13) (параметры МФ получены при оптимизации по амплитудному критерию из подпункта 3.3.1.1) при $h=100$ мкм, $t=30$ мкм, $s=2$ мм представлены на рисунке 3.34, а после оптимизации – на рисунке 3.35.

Таблица 3.37 – Результаты оптимизации МФ 2 по глазковому критерию

N	h , мкм	t , мкм	s , мкм	ΔU_P , мВ	Время, с	h , мкм	t , мкм	s , мкм	ΔU_P , мВ	Время, с
	$N_{it}=50$					$N_{it}=100$				
1	106,9	81,3	12,8	239,9	380	17,5	106,8	364,5	211,5	1080
2	182,9	53,4	56,1	204,2	373	124,3	89,9	11,1	232,3	1165
3	14,2	136,2	34,9	243,5	392	67,9	94,6	82	222,9	763
4	240,9	74,8	93,4	180,3	367	65,3	128,2	36,1	245	726
5	75,9	111,2	59,3	232,3	400	141,5	161,4	61,8	230,6	734
Δ , %	88,87	43,67	75,9	14,91	4,3	77,99	28,45	94,1	7,34	23,2
	$N_{it}=300$					$N_{it}=500$				
1	56,9	95,1	21,8	245,5	2167	97,8	106,7	10,1	236,6	5468
2	50	174,3	22,3	255,3	2059	51,1	174,8	23,3	255,3	5183
3	36,2	155,3	18,8	253,1	2041	57,6	175	24,1	254,9	5201
4	115,2	169,8	10,7	231,8	2138	64,9	151	13,6	248	5245
5	39,9	174,5	20,8	255	2933	51	175	23,8	255,4	5212
Δ , %	52,18	29,45	35,15	4,82	17,9	31,45	24,25	40,94	3,82	2,7

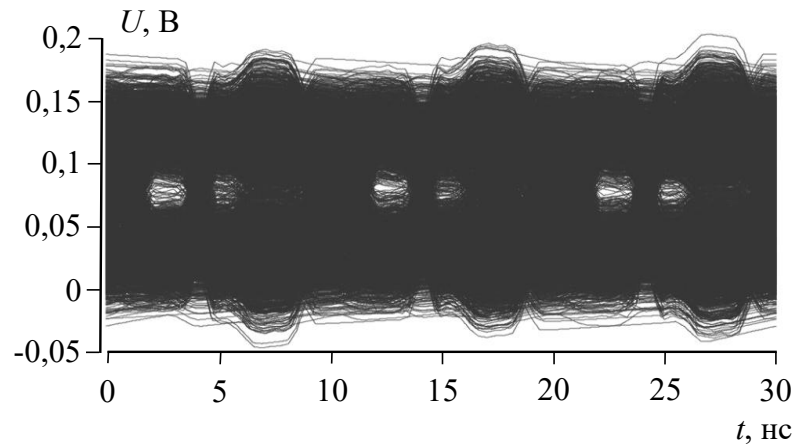


Рисунок 3.34 – Глазковая диаграмма до оптимизации МФ 2

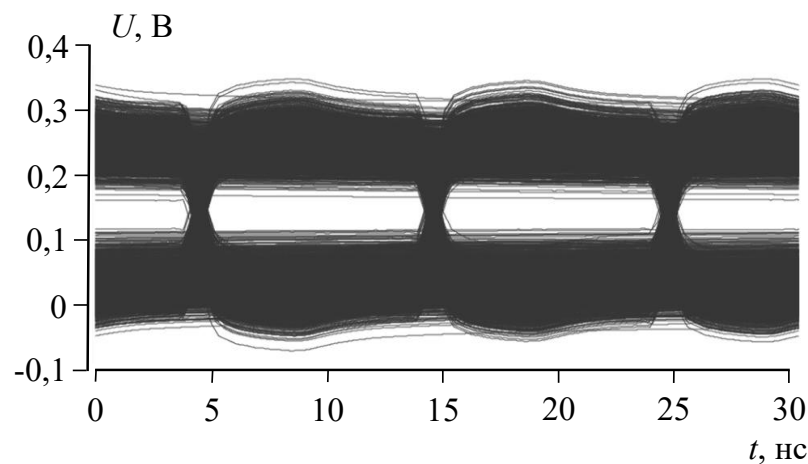


Рисунок 3.35 – Глазковая диаграмма после оптимизации МФ 2

Из таблицы 3.37 видно, что с ростом N_{it} s стремится к нижней границе диапазона (10–24 мкм), о чем свидетельствует уменьшение Δ с 75,9% при $N_{it}=50$ до 40,94% при $N_{it}=500$. В то же время h стремится к диапазону 50–100 мкм ($\Delta=88,87\%$ при $N_{it}=50$ и $\Delta=31,45\%$ при $N_{it}=500$), а t – к 106–175 мкм ($\Delta=43,67\%$ при $N_{it}=50$ и $\Delta=24,25\%$ при $N_{it}=500$). Однако, поскольку алгоритм оптимизации имеет вероятность попадания в локальные экстремумы, а Δ рассчитывается с учетом минимального и максимального значений, отклонение все еще высоко. Тем не менее, диапазон значений сужается с ростом N_{it} . Аналогично и для ΔU_P , для которого Δ уменьшается с 14,91% до 3,82%. Можно сделать вывод о том, что параметр s оказывает наименьшее влияние на ЦФ, а разница с другими параметрами не так велика.

Из рисунка 3.34 видно, что до оптимизации МФ глазковая диаграмма практически не раскрыта ($\Delta U_P=125,8$ мВ), а после (рисунок 3.35) разность процентилей растёт до $\Delta U_P=255,4$ мВ, увеличивая высоту глаза на 34%. Наилучшее решение (255,4 мВ) получено при $h=51$ мкм, $t=175$ мкм, $s=23,8$ мкм при $N_{it}=500$ за 5212 с. При этом даже в наихудшем случае (при $N_{it}=50$ за 367 с) раскрытие глаза больше на 17,8%. В среднем, при $N_{it}=500$ время одного запуска составляет 5262 с, а ΔU_P находится в диапазоне 236,6–255,4 мВ.

Однако, полного раскрытия глазковой диаграммы нет, что объясняется выбранными граничными условиями (диапазоны оптимизируемых параметров, фиксированные геометрические и электрофизические параметры), которые не позволяют оценить более широкое пространство решений. Тем не менее, показана работоспособность апробируемого критерия.

Таким образом, получены результаты оптимизации двух полосковых МФ по одному и двум критериям с использованием глобальных алгоритмов оптимизации: ГА, ЭС, СП, ВГ, ИО, SHGO и АУС. При оптимизации МФ 1 по амплитудному критерию удалось достигнуть $U_{max}=146,2$ мВ посредством ГА и SHGO, при этом результаты, полученные другими алгоритмами, включая разработанный АУС, отличается менее, чем на 1%. При оптимизации МФ 2 по амплитудному критерию удалось получить $U_{max}=86,2$ мВ посредством ГА, тогда как результаты, полученные другими алгоритмами, отличаются менее, чем на 1%. При апробации частотных критериев на примере МФ 1 удалось увеличить f_{cp} с 20,9 до 518,2 МГц (в 24,8 раз), а также достичь целевого значения $f_{cp}=425$ МГц посредством ГА, ЭС и СП. При оптимизации МФ 1 по критерию минимизация амплитуды с учетом распространения помехи с двух направлений удалось снизить U_{max} в области суперпозиции импульсов разложения в 2,8 раз (с 451,7 мВ до 159,8 мВ) при воздействии СКИ, а также в 2,9 раз (с 2102 мВ до 717 мВ) при воздействии с генераторов IRA II и SINUS-160 (относительно оптимизации по амплитудному критерию). При оптимизации МФ 1 по глазковому критерию удалось раскрыть глазковую диаграмму на 2,8% (увеличение разности процентилей с 469,6 до 496,7 мВ), для МФ 2 – на 34% (с 125,8 до 255,4 мВ) относительно оптимизации по амплитудному критерию. При оптимизации МФ 1 по двум критериям (амплитудный и согласования) получено $U_{max}=162,4$ мВ (посредством ГА) при $U_{ex}=521,8$ мВ (тогда как при согласовании с трактом 50 Ом должно быть $U_{ex}=500$ мВ), для МФ 2 – $U_{max}=91,9$ мВ (посредством СП) при $U_{ex}=577,1$ мВ. При этом максимальное отличие результатов, полученных посредством ГА, ЭС и СП, составляет 3%.

3.4 Кабельные защитные структуры

Здесь представлены результаты оптимизации кабельных МФ по одному и двум критериям, посредством ГА, ЭС и СП [124, 125]. МФ на основе круглого кабеля оптимизировались с использованием предложенного в подразделе 2.3 подхода посредством ЭС [101, 102, 126], а плоского – ГА, ЭС и СП [125].

3.4.1 Оптимизация трехпроводного круглого кабеля эволюционными стратегиями

3.4.1.1 Оптимизация по амплитудному критерию

Поперечное сечение МФ 3 представлено на рисунке 2.7а, а эквивалентная схема – на рисунке 2.2а. Оптимизация выполнялась без учета потерь по амплитудному критерию посредством ЭС с использованием подхода из подраздела 2.3. Оптимизировались r_{12} , r_{13} , h_{10} , $R_{П1}$, $R_{П2}$, φ_1 и φ_2 (рисунок 2.20), при фиксированных $r_{10}=r_{11}=0,9$ мм и $\varphi_A=95^\circ$. При этом, r_2 и r_3 зависят от оптимизируемого h_{10} и определяются как

$$\begin{aligned} r_2 &= r_{10} + h_{10}, \\ r_3 &= r_2 + 2r_{11} + z, \end{aligned} \quad (3.26)$$

где z – величина, предотвращающая наложение элементов поперечного сечения в процессе оптимизации (принята равной 0,05 мм).

При моделировании использована автоматическая сегментация границ поперечного сечения 25 мкм. Диапазоны параметров: r_{12} и r_{13} от 0,5 до 0,9 мм; h_{10} от 0,1 до 0,7 мм; $R_{П1}$ и $R_{П2}$ от $(r_2 + r_{12}/r_{13} + 25$ мкм) до $(r_3 - r_{12}/r_{13} - 25$ мкм); φ_1 от 10° до границы, определяемой (2.2), φ_2 от границы, определяемой (2.2) до 350° . Начальные решения для ЭС: $r_{12}=0,7$ мм, $r_{13}=0,7$ мм, $h_{10}=0,5$ мм, $R_{П1}=2,45$ мм, $R_{П2}=2,45$ мм, $\varphi_1=45^\circ$, $\varphi_2=260^\circ$, а шаг – $\sigma=0,1$ мм. Значения l и R такие же, как в подразделе 2.2. Воздействовал СКИ с ЭДС 5 В и общей длительностью 150 пс. В таблице 3.38 приведены результаты оптимизации семи параметров МФ 3 посредством ЭС. Формы выходного напряжения для наилучшего результата ЦФ показаны на рисунке 3.36 вместе с полученными в подразделе 2.2 результатами ЭП.

Таблица 3.38 – Результаты оптимизации МФ 3 по амплитудному критерию

N	r_{12} , мм	r_{13} , мм	h_{10} , мм	$R_{П1}$, мм	$R_{П2}$, мм	φ_1 , град	φ_2 , град	$U_{\max}$, В	Время, с
$N_{it}=500$									
1	0,585	0,891	0,543	2,663	2,363	56,9	260	0,81	1598
2	0,502	0,889	0,117	1,927	1,933	28,5	271,9	0,85	1493
3	0,625	0,892	0,214	2,265	2,035	44,5	260	0,84	1562
4	0,846	0,861	0,63	2,477	2,435	50,3	150,9	0,82	1500
5	0,511	0,883	0,214	2,296	2,037	56,6	312,4	0,82	1492
Δ , %	25,52	1,77	68,67	16,03	11,49	33,26	34,86	2,41	3,43
$N_{it}=1000$									
1	0,735	0,9	0,26	2,196	2,085	45	260	0,84	3308
2	0,673	0,898	0,591	2,631	2,418	56,4	260,4	0,79	3061
3	0,722	0,897	0,131	1,874	1,953	40,6	170,3	0,8	3026
4	0,753	0,9	0,687	2,548	2,512	45	260	0,88	3564
5	0,695	0,846	0,105	1,921	1,878	44	265,5	0,67	3053
Δ , %	5,61	3,09	73,48	16,80	14,44	16,29	21,84	13,55	8,16

N	$r_{12}, \text{ мм}$	$r_{13}, \text{ мм}$	$h_{10}, \text{ мм}$	$R_{n1}, \text{ мм}$	$R_{n2}, \text{ мм}$	$\varphi_1, \text{ град}$	$\varphi_2, \text{ град}$	$U_{\max}, \text{ В}$	Время, с
$N_{it}=2500$									
1	0,75	0,898	0,126	2,072	1,953	45	260	0,67	8367
2	0,545	0,9	0,126	1,968	1,95	42,4	306,9	0,77	8133
3	0,547	0,899	0,258	2,13	2,084	52,6	259,2	0,77	8357
4	0,551	0,898	0,674	2,806	2,498	62,2	165,9	0,76	8259
5	0,735	0,897	0,162	2,141	1,986	45	260	0,68	8241
$\Delta, \%$	15,83	0,17	68,50	17,55	12,32	18,93	29,82	6,94	1,42
$N_{it}=5000$									
1	0,676	0,894	0,169	2,14	1,988	48,2	302,7	0,69	11311
2	0,883	0,898	0,165	1,98	1,99	18,2	284,3	0,78	12474
3	0,698	0,896	0,125	2,083	1,953	48	268,8	0,61	13309
4	0,556	0,899	0,671	2,79	2,496	62	178,6	0,75	11594
5	0,702	0,894	0,123	2,051	1,946	46,7	281,3	0,65	13341
$\Delta, \%$	22,72	0,28	69,02	16,98	12,38	54,61	25,78	12,23	8,23

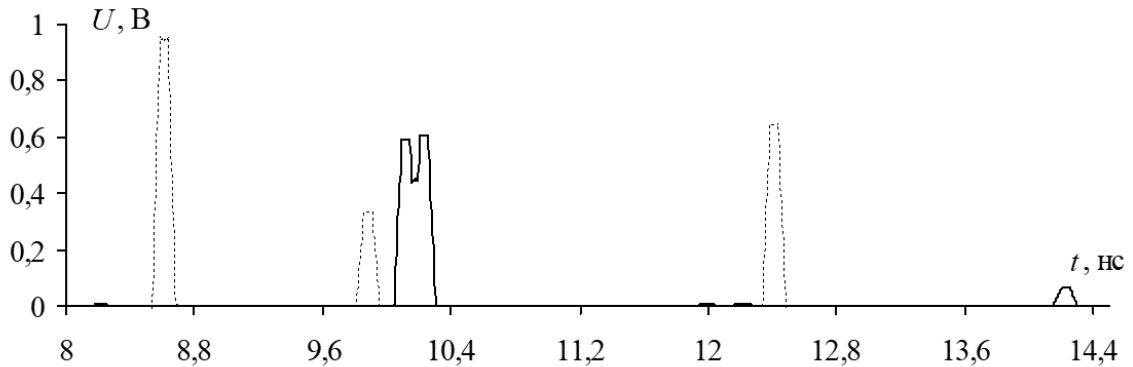


Рисунок 3.36 – Формы напряжения на выходе МФ 3 при оптимизации ЭС (—) и ЭП (···)

Из таблицы 3.38 видно, что уже при 500 вычислениях в ЭС можно получить меньший или соразмерный с оптимизацией ЭП уровень $U_{\max}$. После оптимизации минимум $U_{\max}$ составил 0,61 В (в 1,56 раза меньше, чем значения после ЭП). При этом $U_{\text{вх}}=0,93$ В (в согласованном случае $U_{\text{вх}}=2,5$ В). Время, затраченное при $N_{it}=5000$, в среднем, составило 12405 с. Тогда как ЭП дал минимум $U_{\max}=0,95$ В при $U_{\text{вх}}=1,78$ В.

Рисунок 3.36 показывает результативность и целесообразность применения предложенного в подразделе 2.2 подхода при оптимизации МФ 3. Отметим, что для приближения к глобальному экстремуму в данной структуре, алгоритму требуется 2500–5000 вычислений и 8000–12000 с (при том же числе оптимизируемых параметров и ЦФ). Значения τ_i после ЭП составляют 8,54 нс/м, 9,81 нс/м и 12,34 нс/м, а после ЭС – 10 нс/м, 10,16 нс/м и 14,15 нс/м. Следовательно, $\Delta\tau_i$ составляют 1,27 нс/м и 2,53 нс/м по результатам ЭП и 0,11 нс/м и 4 нс/м по результатам ЭС. Примечательно, что при ЭС минимум Δt меньше длительности воздействующего импульса, что приводит к частичному наложению мод импульсов 1 и 2. Тем не менее, это не важно для достигаемого критерия.

3.4.1.2 Оптимизация по двум критериям

Оптимизации по двум критериям (амплитудному и согласования) также выполнялась без учета потерь. При этом фиксируемые и оптимизируемые параметры, а также их диапазоны остались без изменений (как в подпункте 3.4.1.1). Диапазоны оптимизации для проводников и начальные решения для ЭС, а также параметры воздействующего СКИ такие же, как в подпункте 3.4.1.1. Результаты оптимизации по двум критериям сведены в таблицу 3.39. Форма ЭДС, а также входное и выходное напряжения для наилучшего значения показаны на рисунке 3.37.

Таблица 3.39 – Результаты оптимизации МФ 3 с использованием ЭС по двум критериям

<i>N</i>	<i>r</i> ₁₂ , мм	<i>r</i> ₁₃ , мм	<i>h</i> ₁₀ , мм	<i>R</i> _{п1} , мм	<i>R</i> _{п2} , мм	φ ₁ , град	φ ₂ , град	<i>U</i> _{вх} , В	<i>U</i> _{max} , В	Время, с
<i>N</i> _{ит} =500										
1	0,538	0,879	0,699	2,463	2,505	45	260	1,856	0,913	933
2	0,529	0,9	0,697	2,381	2,522	45	260	1,853	0,907	931
3	0,526	0,891	0,694	2,547	2,513	45	260	1,859	0,911	970
4	0,504	0,897	0,694	2,534	2,517	45	260	1,865	0,91	1002
5	0,508	0,899	0,699	2,475	2,524	45	260	1,865	0,908	982
6	0,510	0,899	0,698	2,545	2,523	45	260	1,867	0,91	909
7	0,525	0,899	0,696	2,634	2,521	45	260	1,866	0,909	937
8	0,6	0,897	0,694	2,635	2,517	45	260	1,845	0,896	1001
9	0,505	0,896	0,699	2,528	2,523	45	260	1,868	0,913	1001
10	0,503	0,895	0,694	2,364	2,515	45	260	1,858	0,915	1158
Δ, %	8,79	1,18	0,36	5,42	0,38	0	0	0,62	1,05	12,05
<i>N</i> _{ит} =1000										
1	0,503	0,9	0,7	2,632	2,524	45	260	1,874	0,903	1955
2	0,508	0,9	0,698	2,779	2,523	45	260	1,879	0,913	1981
3	0,508	0,898	0,694	2,499	2,52	45	260	1,863	0,912	2100
4	0,5	0,9	0,699	2,546	2,524	45	260	1,87	0,91	2073
5	0,576	0,899	0,7	2,666	2,524	45	260	1,858	0,898	2185
6	0,5	0,899	0,7	2,499	2,524	45	260	1,869	0,91	1899
7	0,5	0,899	0,7	2,424	2,524	45	260	1,866	0,911	1996
8	0,505	0,899	0,699	2,842	2,524	45	260	1,884	0,921	1864
9	0,502	0,897	0,7	2,54	2,523	45	260	1,87	0,91	1928
10	0,548	0,9	0,692	2,562	2,517	45	260	1,853	0,902	2014
Δ, %	7,06	0,17	0,57	7,94	0,14	0,00	0,00	0,83	1,26	7,93
<i>N</i> _{ит} =2500										
1	0,519	0,9	0,7	2,482	2,523	45	260	1,863	0,896	6780
2	0,603	0,859	0,662	2,486	2,497	13,16	282,95	1,99	1	5469
3	0,746	0,809	0,693	2,381	2,43	12,64	261,14	1,998	0,878	4627
4	0,515	0,847	0,688	2,408	2,51	22,34	259,96	1,987	1,045	6005
5	0,502	0,898	0,698	2,465	2,523	45	260	1,865	0,914	9431
6	0,514	0,898	0,699	2,586	2,523	45	260	1,869	0,91	4766
7	0,502	0,899	0,7	2,601	2,524	45	260	1,873	0,909	5078
8	0,509	0,9	0,7	2,679	2,525	45	260	1,875	0,91	4772
9	0,5	0,899	0,7	2,524	2,524	45	260	1,87	0,91	4866

N	$r_{12}, \text{ мм}$	$r_{13}, \text{ мм}$	$h_{10}, \text{ мм}$	$R_{п1}, \text{ мм}$	$R_{п2}, \text{ мм}$	$\varphi_1, \text{ град}$	$\varphi_2, \text{ град}$	$U_{вх}, \text{ В}$	$U_{max}, \text{ В}$	Время, с
10	0,652	0,892	0,638	2,249	2,46	18,43	260	1,939	0,91	4987
$\Delta, \%$	19,74	5,32	4,63	8,73	1,92	56,14	4,23	3,50	8,68	34,17
$N_{it}=5000$										
1	0,75	0,735	0,7	2,428	2,362	12,39	223,95	1,989	0,961	9696
2	0,735	0,898	0,699	2,364	2,523	14,8	245,31	1,989	0,893	11350
3	0,657	0,9	0,699	2,403	2,524	19,71	260,64	1,987	0,914	13183
4	0,505	0,9	0,699	2,79	2,524	45	260	1,881	0,916	10774
5	0,646	0,9	0,68	2,458	2,505	14,18	239,68	1,985	0,964	10374
6	0,873	0,823	0,67	2,504	2,446	10,92	273,33	1,975	0,902	10039
7	0,5	0,9	0,7	2,846	2,525	45	260	1,886	0,919	10185
8	0,823	0,889	0,69	2,455	2,513	15,49	258,36	1,975	0,869	9979
9	0,5	0,9	0,699	2,568	2,524	45	260	1,871	0,91	10416
10	0,5	0,879	0,7	2,651	2,504	45	260	1,876	0,917	10473
$\Delta, \%$	27,17	10,09	2,19	9,25	3,34	60,94	9,93	3,06	5,18	15,24

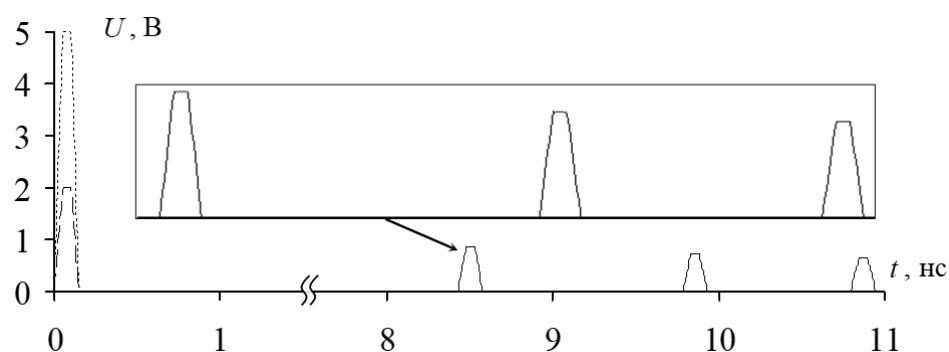


Рисунок 3.37 – Формы ЭДС ($\cdots$), напряжений на входе ($- -$) и выходе ($—$) МФ 3 при оптимизации по двум критериям

Из рисунка 3.37 видно, что наилучший результат получен при $N_{it}=2500$ ($U_{вх}=1,998$ В, $U_{max}=0,878$ В). Затраты времени ЭС на один запуск, в среднем, а также 982 с при $N_{it}=500$, 2000 с при $N_{it}=1000$, 5678 с при $N_{it}=2500$ и 10648 с при $N_{it}=5000$. Значения τ_i составили 8,429 нс/м, 9,783 нс/м и 10,795 нс/м, соответственно ($\Delta\tau_1=1,354$ нс/м, $\Delta\tau_2=1,012$ нс/м). Кроме этого, видно неполное достижение согласования (равенства $U_{вх}$ половине ЭДС источника) в отличие от МФ 1, 2. Это связано с узкими диапазонами оптимизируемых параметров, выбор которых обоснован некоторыми типовыми размерами распространенных кабелей. По той же причине, оптимум ЦФ найден при среднем числе вычислений ($N_{it}=2500$).

3.4.2 Оптимизация трехпроводного кабеля с изолированными проводниками эволюционными стратегиями

Для МФ 7, поперечное сечение и эквивалентная схема которого показаны на рисунках 2.7д и 2.2а, проводники А и О фиксированы, а оптимизируются значений r_{12} и r_{13} , $R_{п1}$, $R_{п2}$, φ_1 , φ_2 , h_{10} , h_{11} , h_{12} и h_{13} . Это представлено на рисунке 3.38.

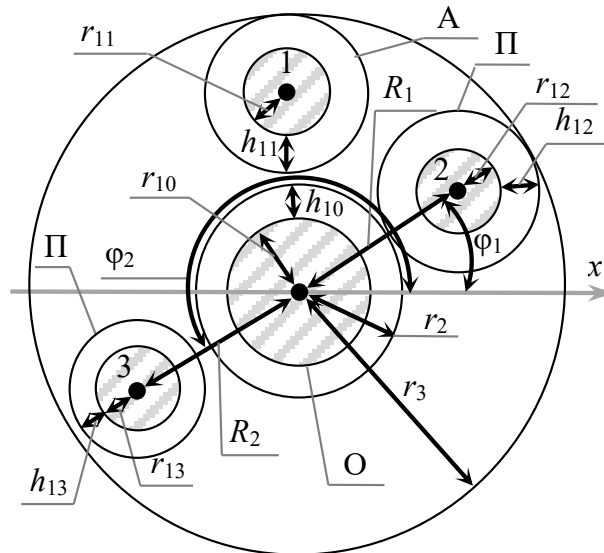


Рисунок 3.38 – Варьируемые параметры МФ 7

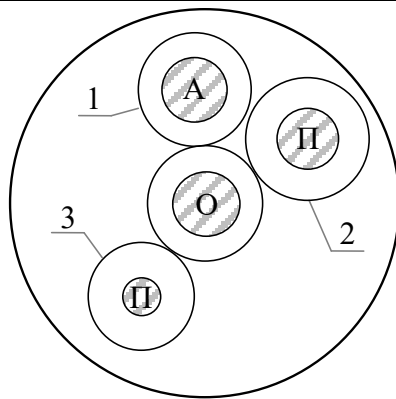
В таблице 3.40 приведены результаты оптимизации МФ 7 посредством ЭС по амплитудному критерию: r_{12} , r_{13} , h_{11} , h_{12} , h_{13} , h_{10} , $R_{П1}$ и $R_{П2}$ в мм, φ_1 и φ_2 в градусах, $U_{\max}$ в В, время расчета и КО. Фиксированы $\varepsilon_{r1}=1$, $\varepsilon_{r2}=2,4$, $\varepsilon_{r3}=4,2$, $r_{10}=r_{11}=0,9$ мм. Параметры входного воздействия, длины и нагрузок на концах МФ приняты такими же, как в пункте 3.4.1.

Диапазоны для оптимизируемых параметров: r_{12} и r_{13} от 0,5 до 0,9 мм, h_{10} от 0,1 до 0,7 мм, h_{11} , h_{12} и h_{13} от 0,1 до 1 мм, $R_{П1}$ и $R_{П2}$ от $(r_2 + r_{12/13} + h_{12/13} + 25 \text{ мкм})$ до $(r_3 - r_{12/13} - h_{12/13} + 25 \text{ мкм})$, φ_1 от 10° до границы, определяемой по (2.2), φ_2 от границы, определяемой формулой (2.2) до 350° . Начальные решения: $r_{12}=r_{13}=0,7$ мм, $h_{10}=h_{11}=h_{12}=h_{13}=0,5$ мм, $R_{П1}=2,45$ мм, $R_{П2}=2,45$ мм, $\varphi_1=45^\circ$, $\varphi_2=260^\circ$ (с шагом – $\sigma=0,1$ мм). На рисунке 3.39 показаны формы напряжения на МФ 7, а также его поперечное сечение после оптимизации 10 параметров, для наилучшего результата.

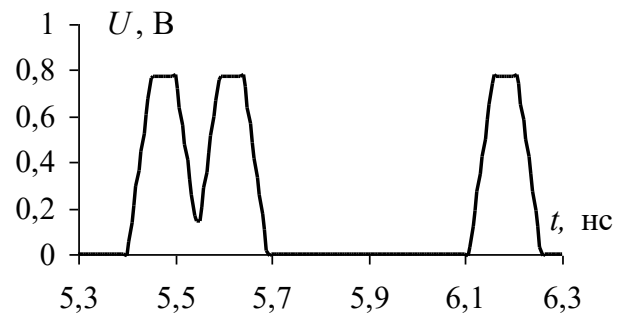
Таблица 3.40 – Результаты оптимизации МФ 7

N	r_{12}	r_{13}	h_{11}	h_{12}	h_{13}	h_{10}	$R_{П1}$	$R_{П2}$	φ_1	φ_2	$U_{\max}$	Время
$N_{it}=500$												
1	0,518	0,549	0,284	0,465	0,288	0,648	2,61	2,463	38	260	0,83	4568
2	0,879	0,852	0,79	0,978	0,589	0,582	3,393	3,617	25,7	280,8	0,91	4455
3	0,531	0,651	0,415	0,592	0,388	0,516	2,811	2,965	40,4	338,8	0,84	4560
4	0,553	0,642	0,363	0,371	0,553	0,637	2,556	2,926	21,6	260	0,87	4530
5	0,882	0,717	0,472	0,597	0,575	0,499	2,927	2,93	30	260	0,83	4512
Δ	26	21,63	47,11	45,00	34,32	12,99	14,07	18,98	30,32	13,16	4,60	1,25
$N_{it}=1000$												
1	0,744	0,679	0,175	0,23	0,231	0,649	2,817	2,756	46	281,9	0,81	9200
2	0,574	0,539	0,484	0,398	0,742	0,599	2,539	3,257	22,8	283,3	0,84	9210
3	0,666	0,678	0,349	0,551	0,495	0,594	2,881	2,801	39,1	260	0,84	9140
4	0,84	0,657	0,42	0,54	0,56	0,574	2,985	2,848	31,2	280,6	0,84	9110
5	0,703	0,841	0,772	0,963	0,675	0,443	3,119	2,912	13,7	260	0,87	9133
Δ	18,81	21,88	63,04	61,44	52,52	18,86	10,25	8,33	54,10	4,29	3,57	0,55

N	r_{12}	r_{13}	h_{11}	h_{12}	h_{13}	h_{10}	$R_{П1}$	$R_{П2}$	φ_1	φ_2	$U_{\max}$	Время
$N_{it}=2500$												
1	0,582	0,757	0,576	0,544	0,898	0,458	2,579	3,158	23,8	246,5	0,8	14075
2	0,776	0,655	0,593	0,817	0,713	0,59	3,138	3,127	30	288,2	0,79	15242
3	0,69	0,582	0,592	0,797	0,734	0,528	3,002	2,772	27,4	213	0,83	16992
4	0,797	0,518	0,755	0,955	0,896	0,68	3,453	3,028	21,4	227	0,81	18699
5	0,602	0,513	0,716	0,942	0,752	0,691	3,272	3,15	17,2	271,1	0,8	20222
Δ	15,59	19,21	13,45	27,42	11,48	20,28	14,49	6,51	27,12	15,00	2,47	17,92
$N_{it}=5000$												
1	0,706	0,62	0,648	0,852	0,708	0,694	3,396	3,076	28,9	300	0,79	32947
2	0,656	0,701	0,389	0,534	0,633	0,5	2,711	2,798	39,4	193,6	0,79	29278
3	0,841	0,53	0,67	0,895	0,979	0,675	3,397	3,134	32,2	235,6	0,78	42332
4	0,845	0,526	0,761	0,962	0,919	0,678	3,474	3,254	24,2	280,3	0,78	33748
5	0,751	0,556	0,658	0,874	0,71	0,641	3,353	2,992	27,4	299,1	0,79	51281
Δ	12,59	14,26	32,35	28,61	21,46	16,25	12,34	7,53	23,90	21,56	0,64	27,31



а



б

Рисунок 3.39 – Поперечное сечение (а) и форма выходного напряжения (б)
МФ 7 после оптимизации ЭС

Из таблицы 3.40 видно, что минимум посредством $U_{\max}$ составляет 0,78 В (при 5000 вычислениях), а после ЭП – 0,83 В. Как видно, данные значения довольно близки (разница в 3,1%). При этом из таблицы 3.40 видна сходимость ЦФ с ростом числа вычислений. Из рисунка 3.39б видно, что импульсы разложения частично наложены, но это не влияет на $U_{\max}$, поскольку минимум $U_{\max}$ достигнут за счет выравнивания амплитуд напряжения импульсов мод 1, 2 и 3. Так, при ЭДС 5 В, $U_{ex}=2,87$ В (тогда как в согласованном случае он бы стремился к 2,5 В). τ_i составляют 5,4, 5,54 и 6,11 нс/м, а $\Delta\tau_i$ – 0,14 и 0,57 нс/м. Во всех случаях остановка происходила по окончании заданного числа вычислений. Так, для решения алгоритму требуется порядка 5000 вычислений и около 37900 с на один запуск.

3.4.3 Оптимизация четырехпроводного круглого кабеля эволюционными стратегиями

При оптимизации МФ 4, поперечное сечение и эквивалентная схема которого показаны на рисунках 2.7б и 2.8: проводники А и О фиксированы, оптимизируются r_{12} , r_{13} , r_{14} , $R_{П1}$, $R_{П2}$, $R_{П3}$, φ_1 , φ_2 , φ_3 между осью x и $R_{П1/П2/П3}$ (определяющих расположение пассивных проводников) и h_{10} . Визуализация этого представлена на рисунке 3.40. Фиксированы: $\varepsilon_{r1}=1$, $\varepsilon_{r2}=2,4$, $\varepsilon_{r3}=4,2$,

$r_{10}=r_{11}=0,9$ мм. Параметры входного воздействия, длины и нагрузок на концах МФ приняты такими же, как в пункте 3.4.1. В таблице 3.41 приведены результаты оптимизации МФ 4 посредством ЭС по амплитудному критерию.

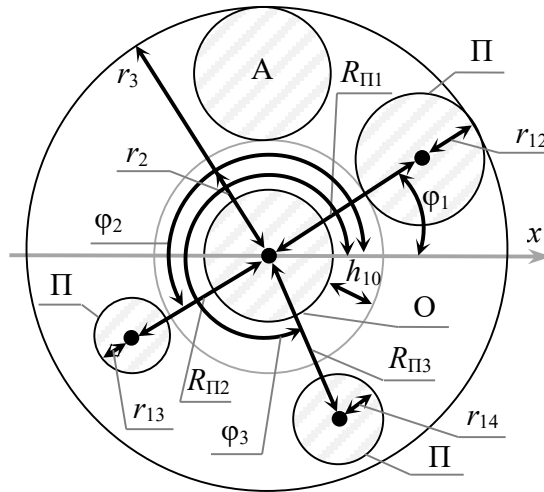


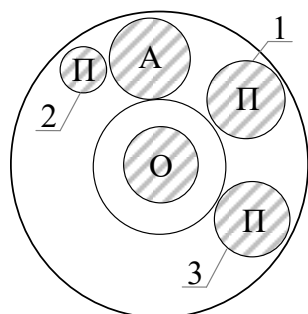
Рисунок 3.40 – Оптимизируемые параметры МФ 4

В таблице 3.41 сведены значения φ_1 , φ_2 , φ_3 в градусах (остальные в мм), $U_{\max}$ в вольтах, а также время расчета в секундах и КО. Диапазон для оптимизируемых параметров: r_{12} , r_{13} и r_{14} от 0,5 до 0,9 мм, h_{10} от 0,1 до 0,7 мм, $R_{П1}$, $R_{П2}$ и $R_{П3}$ от $(r_2 + r_{12/13/14} + 25 \text{ мкм})$ до $(r_3 - r_{12/13/14} - 25 \text{ мкм})$, φ_1 от 10° до границы, определяемой по (2.2), φ_2 от границы, определяемой по (2.2), до 260° , для φ_3 обе границы определяются по (2.2). Начальные решения: $r_{12}=r_{13}=r_{14}=0,7$ мм, $h_{10}=0,5$ мм, $R_{П1}=2,45$ мм, $R_{П2}=2,45$ мм, $R_{П3}=2,45$ мм, $\varphi_1=45^\circ$, $\varphi_2=260^\circ$, $\varphi_3=315^\circ$ (шагом $\sigma=0,1$ мм). На рисунке 3.41 показаны формы напряжения на выходе МФ 4, а также его поперечное сечение после оптимизации 10 параметров, для наилучшего результата.

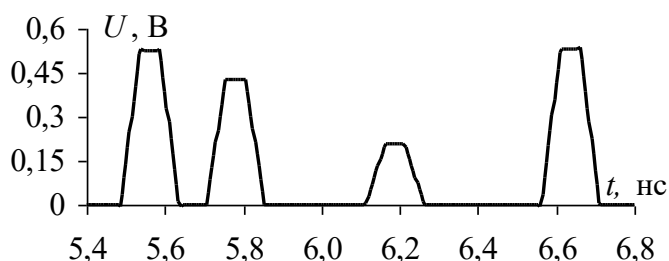
Таблица 3.41 – Результаты оптимизации МФ 4

N	r_{12}	r_{13}	r_{14}	h_{10}	$R_{П1}$	$R_{П2}$	$R_{П3}$	φ_1	φ_2	φ_3	$U_{\max}$	Время
$N_{it}=500$												
1	0,876	0,529	0,853	0,59	2,436	2,764	2,395	37,8	128,4	330,2	0,53	1483
2	0,576	0,678	0,884	0,418	2,445	2,3	2,241	44,1	137,4	189,3	0,65	1491
3	0,506	0,867	0,873	0,583	2,697	2,437	2,419	47,3	140,6	190,2	0,63	1505
4	0,6	0,618	0,539	0,599	2,639	2,521	2,099	50	135,5	181,4	0,7	1532
5	0,841	0,594	0,567	0,338	2,109	2,087	1,874	31,7	146,1	345,2	0,7	1530
Δ	26,77	24,21	24,24	27,85	12,23	13,96	12,70	22,40	6,45	31,11	13,8	1,63
$N_{it}=1000$												
1	0,812	0,622	0,889	0,316	2,097	2,365	2,134	33,9	136,3	314,9	0,6	2534
2	0,863	0,614	0,863	0,335	2,181	2,3	2,126	40,6	138,8	339,4	0,61	2574
3	0,847	0,708	0,787	0,261	2,062	2,268	1,992	43,4	143,5	352,6	0,68	2694
4	0,852	0,725	0,831	0,206	1,992	1,995	1,992	25,8	160,8	331,7	0,74	2729
5	0,618	0,794	0,703	0,654	2,656	2,555	2,293	58,2	158	225,4	0,6	2824
Δ	16,54	12,78	11,68	52,09	14,29	12,31	7,02	38,57	8,25	22,01	10,5	5,41

N	r_{12}	r_{13}	r_{14}	h_{10}	$R_{\Pi 1}$	$R_{\Pi 2}$	$R_{\Pi 3}$	φ_1	φ_2	φ_3	$U_{\max}$	Время
$N_{it}=2500$												
1	0,866	0,714	0,864	0,635	2,482	2,465	2,429	36,9	150,2	342,8	0,58	6479
2	0,673	0,652	0,897	0,677	2,342	2,293	2,5	40,4	151,4	343	0,64	6981
3	0,694	0,872	0,808	0,584	2,386	2,397	2,412	53,3	141,9	356,3	0,62	7670
4	0,59	0,547	0,824	0,534	2,393	2,531	2,295	33	130,9	343,5	0,62	9015
5	0,821	0,523	0,833	0,607	2,415	2,795	2,423	25,2	128,1	181,2	0,67	6599
Δ	18,96	25,02	5,22	11,81	2,90	9,87	4,28	35,80	8,34	32,58	7,2	16,37
$N_{it}=5000$												
1	0,63	0,639	0,9	0,692	2,416	2,719	2,517	40,3	161,4	334,2	0,67	14592
2	0,873	0,718	0,9	0,558	2,361	2,482	2,383	40,6	145,6	348,1	0,55	17919
3	0,51	0,678	0,876	0,539	2,651	2,337	2,354	60,3	141,7	289,4	0,58	22559
4	0,713	0,542	0,89	0,463	2,389	2,639	2,291	38,5	131,2	341,6	0,59	14376
5	0,718	0,808	0,899	0,682	2,341	2,582	2,506	27,1	167	320,8	0,59	18403
Δ	26,25	19,70	1,35	19,83	6,21	7,56	4,70	37,99	12,01	9,21	9,84	22,16



а



б

Рисунок 3.41 – Поперечное сечение (а) и форма напряжения (б) на выходе МФ 4 после оптимизации ЭС

Таблица 3.41 и рисунок 3.41 показывают, что минимум посредством $U_{\max}$ составляет 0,53 В (при 500 вычислениях). Для сравнения, после ЭП для МФ 4 минимум $U_{\max}$ составил 1 В (что в 1,9 раз больше, чем после ЭС). При оптимизации посредством ЭС уровень $U_{\text{вх}}=1,83$ В (1,98 В после ЭП). При этом τ_i составляют 5,49, 5,71, 6,11 и 6,56 нс/м, а $\Delta\tau_i$ – 0,22 нс/м, 0,4 нс/м и 0,45 нс/м. Во всех случаях останов по окончании заданного числа вычислений. Так, при 5000 вычислений алгоритму требуется порядка 17570 с на один запуск, однако наилучший результат получен при меньшем числе итераций (500).

3.4.4 Оптимизация трехпроводного плоского кабеля генетическим алгоритмом, эволюционными стратегиями и алгоритмом случайного поиска по двум критериям

Поперечное сечение МФ 12 представлено на рисунке 2.13г, а эквивалентная схема – на рисунке 2.2б. Выполнялась оптимизация с учетом потерь тремя алгоритмами по амплитудному критерию и критерию согласования. Фиксированы $r_{10}=1,3$ мм и $h_{10}=0,8$ мм. При этом радиусы изоляции вокруг активного и пассивного проводников r_{41} и r_{42} зависят от значений r_{11} и r_{12} и определяются как

$$\begin{aligned} r_{41} &= r_{11} + h_{11}, \\ r_{42} &= r_{12} + h_{12}, \end{aligned} \quad (3.27)$$

где $h_1=h_2=0,8$ мм. Оптимизировались r_{11} , r_{12} , s_1 , s_2 и h_3 в диапазонах реальных параметров одножильных проводов Н07V-U: 0,5–1,8 мм для r_{11} , r_{12} , s_1 и s_2 и 0,1–1 мм для h_3 . Начальные решения для ЭС: 1,1 мм для r_{11} , r_{12} и s_1 и s_2 , 0,5 мм для h_3 (с шагом $\sigma=0,1$ мм). Длина сегментации границ поперечного сечения – 150 мкм. Параметры воздействующего СКИ I и R такие же, как в подпункте 3.4.1.1. Результаты показаны в таблицах 3.42–3.44, а формы ЭДС и напряжений на входе и выходе – на рисунке 3.42.

Таблица 3.42 – Результаты оптимизации МФ 12 по двум критериям с помощью ГА

N	r_{11} , мм	r_{12} , мм	s_1 , мм	s_2 , мм	h_3 , мм	$U_{вх}$, мм	U_{max} , мВ	Время, нс
$N_{it}=5/10$								
1	0,505	0,908	1,759	0,658	0,555	723,9	87,1	98
2	0,556	1,667	1,79	1,045	0,269	718,3	78,4	86
3	0,546	1,494	1,713	0,537	0,629	715,6	77	74
4	0,536	1,423	1,784	0,755	0,185	724,2	78,6	83
5	0,531	0,918	1,795	1,28	0,312	725,3	81,3	91
Δ , %	4,81	29,48	2,34	40,89	54,55	0,67	6,15	13,95
$N_{it}=10/10$								
1	0,531	1,249	1,662	0,903	0,227	722,6	78,8	129
2	0,5	0,694	1,749	1,779	0,76	721,5	76,5	172
3	0,582	1,387	1,8	1,127	0,29	720,2	77,5	146
4	0,592	1,076	1,79	1,525	0,192	721,9	78,7	174
5	0,505	0,831	1,775	1,305	0,128	729,4	83,4	135
Δ , %	8,42	33,30	3,99	32,66	71,17	0,63	4,32	14,85
$N_{it}=10/100$								
1	0,505	1,096	1,8	1,127	0,192	728,8	78	1423
2	0,5	0,847	1,8	1,688	0,188	729,3	76,4	1569
3	0,505	0,826	1,8	1,724	0,188	728,9	76,6	1382
4	0,51	0,999	1,8	1,458	0,135	729,2	78,6	1492
5	0,5	1,214	1,8	0,826	0,107	730,3	80,3	1631
Δ , %	0,99	19,02	0	35,22	28,43	0,1	2,49	8,26
$N_{it}=50/100$								
1	0,51	0,852	1,795	1,734	0,104	729,7	78,3	3116
2	0,5	0,897	1,8	1,611	0,107	730,4	78,3	4127
3	0,505	1,03	1,79	1,326	0,104	729,7	78,8	3526
4	0,5	0,796	1,795	1,734	0,104	730,4	77,5	17798
5	0,5	0,816	1,795	1,734	0,125	730	77	16981
Δ , %	0,99	12,81	0,28	13,33	9,17	0,05	1,16	70,2

Таблица 3.43 – Результаты оптимизации МФ 12 по двум критериям с помощью ЭС

N	r_{11} , мм	r_{12} , мм	s_1 , мм	s_2 , мм	h_3 , мм	$U_{вх}$, мм	U_{max} , мВ	Время, нс
$N_{it}=500$								
1	0,5	1,096	1,794	1,024	0,253	728,3	76,4	356
2	0,505	0,966	1,752	1,343	0,233	727,2	74,9	406
3	0,503	0,899	1,774	1,588	0,3	726,9	75,5	501
4	0,504	1,164	1,789	1,126	0,851	721	73,1	397

N	$r_{11}, \text{ мм}$	$r_{12}, \text{ мм}$	$s_1, \text{ мм}$	$s_2, \text{ мм}$	$h_3, \text{ мм}$	$U_{\text{вх}}, \text{ мм}$	$U_{\text{max}}, \text{ мВ}$	Время, нс
5	0,505	1,084	1,798	1,145	0,129	729,6	78,4	425
$\Delta, \%$	0,50	12,85	1,3	21,59	73,67	0,59	3,5	16,92
$N_{\text{it}}=1000$								
1	0,503	0,914	1,798	1,5	0,103	730,2	77,5	852
2	0,507	1,254	1,773	1,013	0,204	727,6	79,2	873
3	0,5	1,171	1,789	1,045	0,125	729,7	78,9	902
4	0,501	1,204	1,8	1,046	0,297	727,5	76,7	891
5	0,503	1,355	1,793	0,819	0,137	728,4	79,1	814
$\Delta, \%$	0,7	19,44	0,76	29,37	48,5	0,19	1,6	5,13
$N_{\text{it}}=2500$								
1	0,501	1,118	1,798	1,283	0,339	726,9	76,8	2145
2	0,501	1,017	1,8	1,286	0,148	729,7	77,4	2035
3	0,5	0,838	1,8	1,666	0,101	730,5	77,3	2597
4	0,5	1,093	1,8	1,146	0,1	730,4	78,3	2378
5	0,5	1,125	1,795	1,064	0,116	730	78,3	2269
$\Delta, \%$	0,1	14,62	0,14	22,05	54,44	0,25	0,97	12,13
$N_{\text{it}}=5000$								
1	0,501	1,097	1,798	1,138	0,105	730,2	78,3	4096
2	0,5	0,924	1,797	1,478	0,102	730,4	77,8	4541
3	0,5	0,916	1,796	1,515	0,11	730,2	77,7	3987
4	0,51	1,011	1,8	1,518	0,177	728,6	78,9	4152
5	0,5	1,226	1,796	0,898	0,115	730	78,6	4064
$\Delta, \%$	0,99	14,47	0,11	25,66	26,88	0,12	0,77	6,5

Таблица 3.44 – Результаты оптимизации МФ 12 по двум критериям с помощью СП

N	$r_{11}, \text{ мм}$	$r_{12}, \text{ мм}$	$s_1, \text{ мм}$	$s_2, \text{ мм}$	$h_3, \text{ мм}$	$U_{\text{вх}}, \text{ мм}$	$U_{\text{max}}, \text{ мВ}$	Время, нс
$N_{\text{it}}=500$								
1	0,501	1,16	1,657	0,927	0,751	718,8	74,6	345
2	0,543	1,267	1,797	0,761	0,301	724,1	82,1	397
3	0,506	0,758	1,714	1,739	0,373	724,4	76,8	352
4	0,511	1,522	1,788	1,195	0,151	724,9	82,4	403
5	0,526	1,64	1,755	1,318	0,782	715,1	76,6	369
$\Delta, \%$	4,02	36,78	4,05	39,12	67,63	0,68	4,97	7,75
$N_{\text{it}}=1000$								
1	0,54	0,927	1,643	1,508	0,155	724	78,3	705
2	0,526	1,246	1,693	1,016	0,177	724	77,8	693
3	0,506	1,36	1,779	0,771	0,417	724,6	76,4	781
4	0,507	0,956	1,746	1,346	0,602	722,8	75,9	759
5	0,505	1,375	1,674	0,56	0,165	726	80	811
$\Delta, \%$	3,35	19,46	3,97	45,84	59,05	0,22	2,63	7,85
$N_{\text{it}}=2500$								
1	0,512	0,736	1,643	1,798	0,141	725,1	77,5	1843
2	0,502	1,037	1,693	1,058	0,193	726,3	79,1	1824
3	0,502	0,743	1,779	1,73	0,461	725,4	77,6	1921
4	0,526	1,157	1,746	0,942	0,112	726,8	81,1	1979
5	0,513	0,805	1,674	1,766	0,173	725,3	78,3	1896
$\Delta, \%$	2,33	22,24	3,97	31,24	60,91	0,12	2,27	4,08
$N_{\text{it}}=5000$								
1	0,508	1,472	1,792	0,604	0,408	723,3	76,5	3784

N	$r_{11}, \text{ мм}$	$r_{12}, \text{ мм}$	$s_1, \text{ мм}$	$s_2, \text{ мм}$	$h_3, \text{ мм}$	$U_{\text{вх}}, \text{ мм}$	$U_{\text{max}}, \text{ мВ}$	Время, нс
2	0,54	1,217	1,793	1,088	0,119	726,6	79,1	3810
3	0,507	0,906	1,797	1,111	0,443	725,8	82	3873
4	0,521	0,782	1,774	1,768	0,162	727,4	78,2	3871
5	0,51	1,055	1,737	1,12	0,2	726,8	78,7	3942
$\Delta, \%$	3,15	30,61	1,70	49,07	57,65	0,28	3,47	2,05

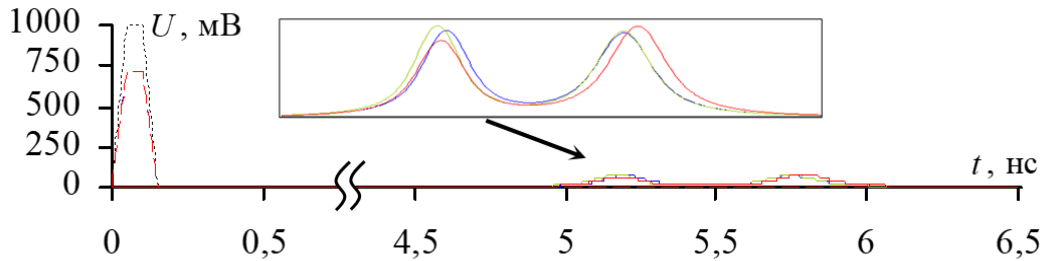


Рисунок 3.42 – Формы ЭДС (—) и напряжения на входе (---) и выходе (—) МФ 12 после оптимизации посредством ЭС (—), ГА (—) и СП (—)

Из таблиц 3.42–3.44 видно, что наилучшие результаты получены при $N_{\text{ит}}=500$ для ЭС ($U_{\text{вх}}=721$ мВ, $U_{\text{max}}=73,1$ мВ), при $N_{\text{ит}}=50$ для ГА ($U_{\text{вх}}=715,6$ мВ, $U_{\text{max}}=77$ мВ), при $N_{\text{ит}}=500$ для СП ($U_{\text{вх}}=715,1$ мВ, $U_{\text{max}}=76,6$ мВ). Как и в случае МФ 2, ГА определил наилучшее решение при малом числе вычислений (5/10). Между тем ЭС и СП также получили наилучшие решения при минимум вычислений. При этом отклонение параметров (при $N_{\text{ит}}=5/10$: 4,81% для r_1 , 29,48% для r_2 , 2,34% для s_1 , 40,89% для s_2 , 54,54% для h_3 ; при $N_{\text{ит}}=50/100$: 0,99% для r_1 , 12,81% для r_2 , 0,28% для s_1 , 13,33% для s_2 , 9,17% для h_3) и ЦФ (при $N_{\text{ит}}=10/10$: 0,67% для $U_{\text{вх}}$, 6,15% для U_{max} ; при $N_{\text{ит}}=50/100$: 0,05% для $U_{\text{вх}}$, 1,16% для U_{max}) также меньше при максимуме вычислений, что говорит о лучшей сходимости решений. При $N_{\text{ит}}=50/100$ алгоритм тратил от 3116 до 17798 с при расчетах на разных ПК с незначительной разницей в загруженности и мощности. Такая разница обусловлена наличием множества локальных экстремумов в диапазоне поиска оптимума ЦФ.

Как отмечено ранее, лучшие результаты ЭС получены при малом числе вычислений ($N_{\text{ит}}=500$). Однако тенденция уменьшения отклонения параметров (при $N_{\text{ит}}=500$: 0,5% для r_1 , 12,85% для r_2 , 1,3% для s_1 , 21,6% для s_2 , 73,67% для h_3 ; при $N_{\text{ит}}=5000$: 0,99% для r_1 , 14,47% для r_2 , 0,11% для s_1 , 25,66% для s_2 , 26,88% для h_3) с ростом числа вычислений не наблюдается для ряда параметров. В случае ЦФ тенденция сохраняется (при $N_{\text{ит}}=500$: 0,6% для $U_{\text{вх}}$, 3,5% для U_{max} ; при $N_{\text{ит}}=5000$: 0,12% для $U_{\text{вх}}$, 0,77% для U_{max}). Алгоритм тратит, в среднем, 4168 с на один запуск при $N_{\text{ит}}=5000$.

Результаты СП также получены при малом числе вычислений ($N_{\text{ит}}=500$). Отклонение параметров и ЦФ для СП также не всегда уменьшается с ростом числа вычислений, что ожидаемо ввиду специфики алгоритма. Так, минимум значение отклонения для ЦФ (0,12% для $U_{\text{вх}}$, 2,27% для U_{max}) получены при $N_{\text{ит}}=2500$, а максимума (0,68% для $U_{\text{вх}}$, 4,97% для U_{max}) – при $N_{\text{ит}}=500$. Алгоритм тратил, в среднем, 3856 с на один запуск при $N_{\text{ит}}=5000$.

Из рисунка 3.42 видно, что при оптимизации посредством всех алгоритмов, минимизация $U_{\max}$ достигнута за счет выравнивания амплитуд напряжения импульсов мод 1 и 2. Между тем наилучшие результаты оптимизации близки как по значениям критериев в составе ЦФ (отклонения для $U_{\text{вх}}$ и $U_{\max}$ не превышают 3%), так и по формам напряжений на входе и выходе структуры. Кроме того, все алгоритмы при максимуме числа вычислений стремятся к уровню примерно 730 мВ для $U_{\text{вх}}$ и 78 мВ для $U_{\max}$. Так, критерий согласования в данном случае обеспечивается слабо, несмотря на равные весовые коэффициенты обоих критериев (так же как и для МФ 3 в подпункте 3.4.1.2).

На первый взгляд, такая тенденция кажется странной, особенно, с учетом того, что алгоритмы определяют подходящие значения ЦФ при малом числе итераций, при которых оба критерия достигают лучших результатов. Причиной этого, вероятно, служит обратная зависимость критериев друг от друга (по аналогии с оптимизацией по одному критерию МФ 1 и 2).

Таким образом, апробирован подход к оптимизации МФ на основе круглых кабелей. В результате оптимизации МФ 3, 4 и 7 алгоритмом ЭС удалось снизить $U_{\max}$ на 44,5%, 40,45% и 35,3% (610, 530 и 780 мВ) относительно результатов оптимизации посредством ЭП (950, 1000 и 830 мВ). При оптимизации МФ 3 по двум критериям (амплитудному и согласования) удалось снизить $U_{\max}$ на 3,94% (с 950 до 878 мВ) при увеличении $U_{\text{вх}}$ на 5,77% (с 1780 до 1998 мВ, тогда как при согласовании с трактом должно быть 2500 мВ) относительно результатов ЭП. При оптимизации МФ 12 удалось снизить $U_{\max}$ на 16,6% (с 107,2 до 76,6 мВ), а $U_{\text{вх}}$ – на 1,11% (с 731,2 до 715,1 мВ, тогда как при согласовании с трактом должно быть 500 мВ) относительно результатов ЭП. При этом, результаты всех трех алгоритмов отличаются менее, чем на 3%

3.5 Рекомендации по оптимизации модальных фильтров

3.5.1 Защитные структуры

Для всестороннего анализа эффективности используемых алгоритмов оптимизации и оценки качества полученных решений для различных конфигураций МФ (по одному и нескольким критериям) здесь обобщены и систематизированы представленные ранее результаты. Для наглядности в таблицу 3.45 сведены лучшие значения ЦФ, состоящих из отдельных критериев для ряда МФ. Представлены критерии: амплитудный (для минимизации $U_{\max}$ на выходе МФ), максимизации (приведение $f_{\text{ср}}$ к максимуму) и контроля (приведение $f_{\text{ср}}$ к 425 МГц) полосы пропускания, амплитудный при распространении помехи с двух направлений (для минимизации $U_{\max}$ вдоль МФ) и глазковый (для раскрытия глазковой диаграммы).

Таблица 3.45 – Лучшие результаты оптимизации МФ 1–4, 7 по отдельным критериям

Критерий	МФ 1	МФ 2	МФ 3	МФ 4	МФ 7
Амплитудный, мВ	146,2	86,2	610	530	780
Максимизация полосы пропускания, МГц	518,2	–	–	–	–
Контроль полосы пропускания, МГц	425	–	–	–	–
Минимизация амплитуды при помехе с двух направлений, мВ	159,8	–	–	–	–
Глазковый, мВ	496,7	255,4	–	–	–

Оптимизация по амплитудному критерию уменьшила уровень $U_{\max}$ на 2,11, 18,5, 44,5, 40,45 и 35,3% для МФ 1–4 и МФ 7, соответственно, по сравнению с результатами ЭП (152,5, 125,3, 950, 1000, 830 мВ для МФ 1–4 и МФ 7). После оптимизации МФ 1 по критерию максимизации полосы пропускания она расширилась в 24,8 раза, а также достигла целевого значения $f_{\text{ср}}=425$ МГц при оптимизации по критерию контроля полосы пропускания. После оптимизации МФ 1 по критерию минимизации максимальной амплитуды СКИ при их распространении с двух направлений в 2,8 раза уменьшено $U_{\max}$ в подсекции, где происходит суперпозиция импульсов разложения. После оптимизации по глазковому критерию увеличено раскрытие глазковой диаграммы на 2,8 и 34% для МФ 1 и 2, соответственно.

Далее внимание уделено оптимизации ряда МФ по амплитудному критерию различными алгоритмами. Как отмечалось ранее, амплитудный критерий является основным, поскольку в наибольшей степени отражает защитные свойства МФ. В то время как круглые кабельные МФ (3, 4 и 7) оптимизировались только посредством ЭС (по причинам, описанным в подразделе 2.3), для полосковых МФ (1 и 2) использованы и иные алгоритмы. Сводные данные для МФ 1 и 2 ($U_{\max}$ и время, за которое был получен лучший результат) сведены в таблицу 3.46.

Таблица 3.46 – Результаты оптимизации МФ 1 и 2 по амплитудному критерию посредством разных алгоритмов из подраздела 3.3

	ГА	ЭС	СП	SHGO	ИО	ВГ	АУС
МФ 1							
$U_{\max}$, мВ	146,2	147,4	149,1	146,2	147,9	146,3	146,9
Время, с	16396	3639	3108	5200	1560	17156	11081
МФ 2							
$U_{\max}$, мВ	86,2	86,3	86,9	86,2	87,5	86,2	86,8
Время, с	20036	45404	6693	116	3167	97	2690

Из таблицы 3.46 видно, что глобальные экстремумы ЦФ в выбранных диапазонах оптимизируемых параметров для МФ 1 и 2 составляют 146,2 и 86,2 мВ, соответственно. Для МФ 1 глобальный экстремум ЦФ достигнут алгоритмами SHGO и ГА за 5200 и 16396 с, соответственно. Наихудшее значение $U_{\max}$ среди лучших решений (149,1 мВ) получено посредством СП, однако отличие от наилучшего менее 1%. Быстрее всего оптимум найден алгоритмом ИО, а дольше всего – посредством ВГ. Для МФ 2 глобальный экстремум ЦФ (86,2 мВ) найден ГА, SHGO и ВГ за 20036, 116 и 97 с, соответственно, но наихудший результат,

полученный ИО (87,5 мВ) и отличающийся лишь на 0,7%, найден за 3167 с (в 6 и 14 раз быстрее ГА и ЭС, соответственно). Алгоритмы SHGO и ВГ нашли решения за наименьшее число итераций и, соответственно, с наименьшими временными затратами. Это обусловлено тем, что малого числа ветвей (для ВГ) и выборок (для SHGO) в диапазонах оптимизируемых параметров (которых меньше, чем у МФ 1) оказалось достаточно.

По полученным данным из подраздела 3.3 выполнен однофакторный (для МФ 1 и 2 по отдельности) дисперсионный анализ (ANOVA) для оценки влияния выбора алгоритма оптимизации на результат [137, 138]. Для расчета ANOVA вычислены общее среднее $\bar{X}$ для $U_{\max}$, а также суммы квадратов внутри групп (Sum of Squares Within, SSW), представляющих собой совокупность запусков одного алгоритма, и между этими группами (Sum of Squares Between, SSB).

$$\bar{X} = \frac{1}{N_A} \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} X_{ij}, \quad (3.28)$$

$$SSB = \sum_{i=1}^k n_i (\bar{X}_i - \bar{X})^2, \quad (3.29)$$

$$SSW = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} (X_{ij} - \bar{X}_i)^2, \quad (3.30)$$

где X_{ij} – значение ЦФ ($U_{\max}$) в j -й реализации i -го алгоритма; n_i – число наблюдений в i -й группе; k – число групп (алгоритмов); N_A – общее число наблюдений во всех алгоритмах; $\bar{X}_i$ – среднее значение внутри i -й группы. SSB характеризует различия между средними значениями разных алгоритмов, а SSW – разброс значений внутри одного алгоритма, соответственно.

Далее был рассчитан критерий Фишера (F -статистика), как

$$F = \frac{MSB}{MSW}, \quad (3.31)$$

где MSB (Mean Square Between) – дисперсия, связанная с различиями между средними значениями групп, а MSW (Mean Square Within) – дисперсия, связанная с разбросом значений внутри каждой группы. Метрики рассчитываются как

$$MSB = \frac{SSB}{df_B}, \quad (3.32)$$

$$MSW = \frac{SSW}{df_W}, \quad (3.33)$$

где $df_B = k - 1$ – число степеней свободы для межгрупповой вариации, $df_W = N_A - k$ – число степеней свободы для внутригрупповой вариации.

Из полученных метрик вычислена вероятность (p -value) того, что при нулевой гипотезе (выбор алгоритма оптимизации не оказывает влияния на итоговый результат, т.е. все алгоритмы в среднем дают одинаковое значение ЦФ) наблюдаемая или ещё более экстремальная величина F могла бы возникнуть случайно:

$$p = P(F_{df_B, df_W} \geq F), \quad (3.34)$$

где F_{df_B, df_W} – случайная величина, распределённая по закону Фишера–Снедекора с параметрами df_B и df_W . При $p < 0,05$ нулевая гипотеза отвергается, что указывает на наличие статистически значимых различий между группами, а при $p \geq 0,05$ различия между средними не подтверждаются статистически. Полученные данные сведены в таблицу 3.47.

Таблица 3.47 – ANOVA для МФ 1 и 2

Источник вариации	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>p-value</i>
МФ 1					
Между группами (B)	585,93	6	97,66	8,67	1,3·10 ⁻⁷
Внутри групп (W)	1137,54	101	11,26		
МФ 2					
Между группами (B)	466,47	6	77,75	7,38	1,47·10 ⁻⁶
Внутри групп (W)	1063,05	101	10,52		

Из таблицы 3.47 видно, что для МФ 1 межгрупповая дисперсия существенно выше внутригрупповой ($MSB=97,66$ против $MSW=11,26$), что подтверждается значением критерия Фишера $F=8,67$ при уровне значимости $p\text{-value} < 0,001$. Межгрупповая сумма квадратов $SSB=585,93$, а внутригрупповая $SSW=1137,54$, что соответствует 34% объяснённой вариации от суммы SSB и SSW (1723,47). Это означает, что почти треть разброса значений $U_{\max}$ объясняется именно тем, какой алгоритм использовался. Для МФ 2 аналогично: $MSB=77,75$ превышает $MSW=10,52$, а также $F=7,38$ и $p\text{-value} < 0,001$. Межгрупповая сумма квадратов $SSB=585,93$, а внутригрупповая $SSW=1137,54$, что соответствует 31% от суммы SSB и SSW (1529,52). Для обоих МФ сравнивались 7 алгоритмов ($df_B=6$), а общее количество наблюдений составило 108 ($df_W=101$). Эти данные подтверждают, что для обоих МФ различия между средними значениями $U_{\max}$ для разных алгоритмов статистически значимы.

Лучшие результаты для обоих МФ продемонстрировали алгоритмы SHGO и ВГ (средние значения находились наименьшими среди всех групп), при этом различия между SHGO и ВГ не являются статистически значимыми. Хорошие результаты показал алгоритм АУС, который в среднем уступает SHGO и ВГ, но превосходит большинство остальных методов. ГА показал меньший разброс значений по сравнению с алгоритмами ЭС, СП и ИО, однако разброс значительно уменьшается с увеличением числа особей и поколений. Худшие результаты зафиксированы у методов СП и ИО, для которых наблюдается повышенная дисперсия результатов, что указывает на нестабильность их работы в условиях ограниченного числа

итераций. Такие результаты связаны с детерминированной и стохастической природой алгоритмов.

Далее оценена оптимизация МФ 1–3 и 12 по двум критериям (согласования и амплитудному) посредством ГА, ЭС и СП. Основные результаты сведены в таблицу 3.48, где для каждого из МФ лучшее решение выделено полужирным.

Таблица 3.48 – Лучшие результаты оптимизации МФ 1–3 и 12 по двум критериям (подпункты 3.3.1.2, 3.3.4.2 и 3.4.1.2)

Алгоритм	Характеристика	МФ 1	МФ 2	МФ 3	МФ 12
ГА	$U_{вх}$, мВ	521,8	601,5	–	715,6
	U_{max} , мВ	162,4	92,9	–	77
ЭС	$U_{вх}$, мВ	525,1	612,8	1998	721
	U_{max} , мВ	162,8	97,5	878	73,1
СП	$U_{вх}$, мВ	520,2	577,1	–	715,1
	U_{max} , мВ	164,3	91,9	–	76,6

Из таблицы 3.48 видно, что при оптимизации МФ 2 и 12 по двум критериям, наилучшие результаты, обеспечивающие компромисс между двумя критериями, получены посредством СП, а для МФ 1 – ГА. Для МФ 1 на 5000 вычислений для такой оптимизации время расчетов составило 14303 с для ГА, 18730 с для ЭС и 25248 с для СП. При оптимизации МФ 2 среднее время на 5000 вычислений составило 15808 с для ГА, 51060 с для ЭС и 16256 с для СП. Так, время запуска СП соразмерно с ГА, тогда как ЭС показывает наибольшее время. Однако на МФ 12 алгоритм СП тратил, в среднем, 3856 с при 5000 вычислениях, тогда как ЭС – 4168 с, а ГА – от 3116 с до 17798 с (с учетом выполнения вычислений на разных машинах). Для МФ 3, оптимизированного только посредством ЭС, среднее время на 5000 вычислений составило 10647 с (с учетом наибольшего числа оптимизируемых параметров среди всех рассмотренных структур (4, 3, 7 и 5 для МФ 1–3 и 12). Примечательно, что время на 2-критериальную оптимизацию МФ 3 соразмерно с 1-критериальной оптимизацией по амплитудному критерию (разница среднего времени при $N_{it}=5000$ на 7,6%). Однако полученное значение $U_{вх}$ отличается от половины ЭДС (2500 мВ), нарушая согласование. Как отмечалось ранее, причина этому – выбор небольших диапазонов оптимизируемых параметров, обоснованный типовыми размерами кабелей. Помимо этого, достижение двух критериев (амплитудного и согласования) частично противоречит друг другу, поскольку при оптимизации только по амплитудному критерию, одним из ресурсов для достижения оптимума является рассогласование линии с трактом. По этой причине алгоритм находит компромиссное решение, удовлетворяющее обоим критериям в равной степени (при равных весовых коэффициентах), но не достигая глобального оптимума ни по одному из них.

Между тем наблюдается общая тенденция роста времени расчетов для всех алгоритмов при последовательных запусках оптимизации в TUSUR.EMC. Например, при оптимизации

МФ 1, для ГА время расчетов может увеличиваться до 2 раз, для ЭС – до 3 раз, тогда как для СП существенной разницы нет. При этом важную роль играют настройки исполняемого файла, содержащего модели конкретного МФ, такие как сегментация, шаг дискретизации и др.

С поиском глобального оптимума МФ 1 и 2 при 1- и 2-критериальной оптимизации лучше справляются ГА и ЭС с разницей результатов не более 3%. Для МФ 12 все три алгоритма дают результаты с отклонением менее 3%. Эволюционные алгоритмы, как правило, сходятся к узкому диапазону значений (с максимальным отклонением 2,49%) с ростом числа вычислений (уже до 1000). Тогда поиск глобального экстремума можно продолжить в зауженном диапазоне параметров. Наибольшую эффективность такой подход дает при 1-критериальной оптимизации защитных структур. Однако при двух критериях сходимость к одним значениям параметров и ЦФ с ростом числа вычислений не всегда дает достижение глобального экстремума. Так, для МФ 12 при 2-критериальной оптимизации наилучшие результаты достигнуты уже при небольшом числе вычислений (500 и 1000 для ЭС, 5/10 и 10/10 для ГА). Это говорит о важности тщательного выбора и обоснования числа оптимизируемых параметров и их диапазонов. Также немаловажны понимание специфики отдельных критериев в составе общей ЦФ, оценка их особенностей и выявление возможных противоречий при их достижении.

Для оценки оптимальности результатов оптимизации 4 МФ посредством представленных алгоритмов используем коэффициент оптимальности k_{opt} из (3.1). Как отмечалось ранее, он призван оценить степень близости результатов конкретного запуска алгоритма к эталонным (оптимальным). В нашем случае применяются критерии согласования (по $U_{\text{вх}}$) и амплитудный (по U_{max}). Поэтому в качестве f_i приняты $U_{\text{вх}}$ и U_{max} , полученные в конкретном решении, а в качестве $f_{i \text{ opt}}$ – эталонные значения $U_{\text{вх}}$ (50% от уровня ЭДС) и U_{max} (в данном случае – 10% от $U_{\text{вх}}$). Также, в случае различных оптимизируемых величин, соответствующих отдельным критериям, важна нормировка f_i и $f_{i \text{ opt}}$. Тем не менее, здесь f_i и $f_{i \text{ opt}}$ определяются по $U_{\text{вх}}$ и U_{max} , поэтому нормировкой можно пренебречь. Тогда (3.1) примет вид

$$k_{\text{opt}} = \frac{1}{|U_{\text{in}} - U_{\text{in opt}}| + 1} + \frac{1}{|U_{\text{in}} - U_{\text{max opt}}| + 1}. \quad (3.35)$$

Полученные данные, рассчитанные по (3.35) (для лучшего решения, а также диапазоны разброса k_{opt} при $N_{\text{it}}=500$ и 5000), и время расчета, сведены в таблицу 3.49.

Таблица 3.49 – Значения k_{opt} для МФ1–3 и 12 для результатов, полученных посредством ГА, ЭС и СП по двум критериям

Алгоритм	k_{opt}	Диапазон k_{opt} при $N_{it}=500$	Диапазон k_{opt} при $N_{it}=5000$
МФ 1			
ЭС	0,0471	0,0416–0,0472	0,045–0,0465
ГА	0,0527	0,0251–0,1725	0,043–0,1483
СП	0,0558	0,0207–0,0618	0,0204–0,0558
МФ 2			
ЭС	0,0294	0,0271–0,0294	0,0286–0,0288
ГА	0,0325	0,0248–0,0306	0,0285–0,0289
СП	0,0361	0,0299–0,0354	0,0297–0,0313
МФ 3			
ЭС	1,28	1,2096–1,2148	1,2156–1,2734
МФ 12			
ЭС	0,046	0,0384–0,046	0,0378–0,0392
ГА	0,0403	0,0307–0,0403	0,0379–0,0400
СП	0,0408	0,0344–0,0436	0,0347–0,0408

Для МФ 2 разброс k_{opt} уменьшается с ростом N_{it} , что подтверждает факт нахождения алгоритмом экстремума ЦФ. Однако, исходя из полученных результатов, можно предположить попадание всех алгоритмов в локальный оптимум (свой для каждого алгоритма) в близких окрестностях глобального. ЭС дают $k_{opt} \approx 0,0287$, а ГА, имея больший разброс k_{opt} , стремится к тому же значению, тогда как для СП $k_{opt} \approx 0,0304$. Для МФ 1, аналогично МФ 2, разброс k_{opt} уменьшается с ростом N_{it} . При этом ЭС стремятся к $k_{opt} \approx 0,0448$, ГА – $k_{opt} \approx 0,0584$, а СП – $k_{opt} \approx 0,0397$, что также свидетельствует о попадании алгоритмов в отдельные локальные экстремумы.

У МФ 3 ситуация обратна предыдущим: с ростом N_{it} от 500 до 5000 разброс k_{opt} увеличивается. Предположительно, это обусловлено сложностью задачи, вызванной большим числом оптимизируемых параметров и их диапазонами. В этой связи, алгоритму не хватает 500 вычислений для роста шага поиска каждого из параметров. В то же время, с ростом N_{it} данный недостаток нивелируется, предоставляя алгоритму большее пространство для поиска оптимума. Отсюда можно сделать вывод, что для МФ 3 вероятность нахождения глобального оптимума выше при $N_{it} \geq 2500$. Для МФ 12 разброс k_{opt} , аналогично МФ 1 и 2, уменьшается с ростом N_{it} .

Таким образом, при оптимизации МФ 1 рекомендуется использовать: SHGO и ГА, если важна точность нахождения глобального экстремума; СП, если важна скорость получения результата при удовлетворительной точности; АУС, если нужен баланс между точностью расчетов и затрачиваемым временем. Однако стоит учитывать, что СП имеет стохастическую природу, что не всегда гарантирует получение хорошего результата. При 1- и 2-критериальной оптимизации МФ 2 наиболее предпочтительны ГА и СП (ЭС уступает им по времени вычисления и точности нахождения глобального экстремума ЦФ при 2-критериальной

оптимизации). МФ на основе круглых кабелей на данный момент возможно оптимизировать в TUSUR.EMC только с использованием ЭС, ввиду ряда ограничений. МФ 12 рекомендуется оптимизировать с использованием ЭС и СП, поскольку они могут дать лучшие значения ЦФ за малое число вычислений.

3.5.2 Алгоритмы глобальной оптимизации

Здесь сравнены алгоритмы оптимизации. В таблице 3.46 представлены результаты, демонстрирующие различия алгоритмов (по нахождению глобального экстремума ЦФ и времени, за которое он найден) на примере МФ 1 и 2. Приведенные данные получены на разных вычислительных машинах, с разными характеристиками и степенью загруженности. Поэтому для корректной оценки, не привязанной к вычислительной мощности машины, использована метрика нормированного времени расчета T_{norm} для каждого алгоритма

$$T_{\text{norm}} = \frac{T_{\text{opt}}}{N_{\text{it}}}, \quad (3.36)$$

где T_{opt} – время оптимизации, рассчитанное как среднее арифметическое для N запусков. Такой подход позволит оценить время, затрачиваемое каждым алгоритмом на один вызов ЦФ.

Для расчета метрики выполнено по 5 запусков оптимизации МФ 1 для алгоритмов ГА, ЭС, СП, ВГ, ИО, SHGO и АУС на одном ПК при $N_{\text{it}}=93-224$ (переменная аналогична N_{total} для АУС и SHGO). Далее для каждого алгоритма рассчитывалось T_{opt} . Характеристики ПК для расчетов: процессор Intel(R) Core i3-8100 3.60GHz, ОЗУ 16 Гб, видеоадаптер Intel UHD Graphics 630. Полученные результаты сведены в таблицу 3.50.

Таблица 3.50 – Вычислительные характеристики алгоритмов оптимизации

	ГА	ЭС	СП	SHGO	ИО	ВГ	АУС
$T_{\text{opt}}, \text{с}$	471,2	446	390,2	1612	436,8	885	353
$N_{\text{it}} (N_{\text{total}})$	100	100	100	100	100	224	93
$T_{\text{norm}}, \text{с}$	4,712	4,46	3,902	16,12	4,368	3,95	3,8

Из таблицы 3.50 видно, что наименьшее T_{norm} у алгоритма АУС, тогда как наивысшее – у SHGO. Однако, отличительной особенностью алгоритма SHGO (по сравнению с другими) является нахождение глобального экстремума ЦФ за небольшое число вычислений для МФ 1 (иными словами, приближение к оптимуму достигается уже при $N_{\text{total}}=100$), что делает его перспективным в дальнейшем использовании. В то же время, ГА, который тратит на 1 расчет ЦФ на 10,7% больше времени, чем АУС, имеет более высокую точность ($\Delta=0,37$ при $N_{\text{it}}=50/100$ и $\Delta=0,58$ при $N_{\text{total}}=4980$), что свидетельствует о его надежности.

Для наглядного представления и обобщения различных алгоритмов глобальной оптимизации, в таблицу 3.51 сведены ключевые критерии оценки алгоритмов, полезные для разработчиков полосковых и кабельных защитных структур. В качестве критериев

представлены: T_{norm} для оценки скорости работы алгоритмов; минимум N_{it} (N_{total} для АУС и SHGO) для достижения глобального экстремума ЦФ; точность нахождения глобального экстремума ЦФ (относительно лучшего найденного решения среди всех алгоритмов); возможность оптимизации МФ на основе круглых кабелей в ПО, ограниченных построением в декартовой системе координат, без дополнительных модификаций алгоритмов; число настраиваемых пользователем параметров для запуска оптимизации (характеризует простоту использования для не подготовленного пользователя); устойчивость к многоэкстремальным ЦФ (описывает применимость алгоритмов при множестве локальных экстремумов и ранжируется, как высокая – находит глобальный экстремум, средняя – находит глобальный, но может застрять в локальном и низкая – высокая вероятность попадания в локальный).

Таблица 3.51 – Вычислительные характеристики алгоритмов

Критерий оценки	ГА	ЭС	СП	SHGO	ИО	ВГ	АУС
T_{norm} , с	4,712	4,46	3,902	16,12	4,368	3,95	3,8
$N_{\text{it}}/N_{\text{total}}$ для достижения глобального экстремума	от 1000	от 500	от 2500	от 1000	от 500	от 4000	от 4980
Точность, %	до 100	до 99,9	до 99,6	до 100	до 99,4	до 99,6	до 99,8
Оптимизация МФ на основе круглых кабелей	–	+	–	–	–	–	–
Число настраиваемых пользователем параметров	8	2	1	2	3	1	3
Устойчивость к многоэкстремальным ЦФ	Высок.	Высок.	Средн.	Средн.	Средн.	Низк.	Средн.

Как видно из таблицы 3.51, самый быстрый алгоритм – АУС, самый медленный – SHGO (с учетом дополнительных уточнений посредством локального алгоритма). Больше всего вычислений для нахождения близкого к глобальному экстремуму ЦФ требуется АУС, ВГ и СП, меньше всего – ЭС и ИО, однако и с помощью СП и АУС также можно получить высокие результаты при малом числе вычислений. Точность нахождения оптимума в данном случае оценивалась относительно наилучших решений МФ 1 и 2, полученных в результате оптимизации (146,2 и 86,2 мВ). Оптимизация МФ на основе круглых кабелей возможна с использованием ЭС ввиду его особенностей задания диапазонов оптимизируемых параметров, которые позволяют учитывать зависимости от других оптимизируемых параметров, что важно при оптимизации круглых кабельных МФ.

Наименьшее число настраиваемых пользователем параметров (не считая диапазоны оптимизируемых параметров и КО) у СП и ВГ, где для запуска достаточно задать лишь $N_{\text{it}}/N_{\text{sp}}$. Наибольшее число параметров, которые (в общем виде алгоритма) должны быть заданы (не учитывая версии алгоритмов, где по умолчанию задано большинство параметров) соответствуют ГА (8 параметров), среди которых: коэффициенты мутации и кроссовера, типы мутации, отбора и скрещивания, число особей и поколений, а также число бит для кодирования.

Для ЭС необходимо задать начальные точки для оптимизируемых параметров и шаг изменения параметров, тогда как коэффициенты мутации и кроссовера изменяются адаптивно в процессе работы алгоритма и не требуют явного задания. SHGO требует задания D , N_{it} . Для ИО – начальная температура, скорость охлаждения и N_{it} , а для АУС – N_{pass} , N_{sec} , N_{sol} .

Высокая устойчивость к многокритериальным ЦФ наблюдается у ГА и ЭС, поскольку эволюционный оператор мутации у обоих алгоритмов позволяет избегать локальных экстремумов. Низкая устойчивость характерна для алгоритма ВГ ввиду его детерминированной природы. Средняя устойчивость, когда алгоритм может найти как глобальный, так и локальный экстремумы, наблюдается у СП, SHGO, ИО и АУС, однако SHGO способен преодолевать локальный оптимум с ростом D .

Таким образом, сравнены результаты оптимизации полосковых и кабельных МФ по ряду критериев глобальными алгоритмами. Отмечены их ключевые особенности и различия. Выполнен однофакторный дисперсионный анализ для результатов однокритериальной оптимизации МФ 1 и 2, показавший статистически значимые различия между алгоритмами (для обоих МФ $p\text{-value} < 0,001$). Рассчитано значение T_{norm} для всех алгоритмов, минимальное значение получено для АУС – 3,8 с, максимальное для SHGO – 16,12 с, что обусловлено дополнительными уточнениями ЦФ с использованием локальных методов оптимизации. Рассчитан k_{opt} для результатов 2-критериальной оптимизации для МФ 1–3 и 7, полученных посредством ГА, ЭС и СП, при этом результаты, полученные тремя разными алгоритмами для каждого из МФ, не превышают 10%. Разработана система практических рекомендаций по использованию алгоритмов для различных конфигураций МФ.

3.6 Основные результаты раздела

1. Сформулированы критерии оптимизации и нормировочные коэффициенты для них. Они учитывают частотные характеристики МФ, целостность передаваемого сигнала, а также двустороннее воздействие помехового сигнала.

2. Модифицирован алгоритм ЭС, путем реализации задания диапазонов оптимизируемых параметров, что предотвращает получение некорректных результатов оптимизации. Разработан новый алгоритм АУС, объединяющий в себе достоинства алгоритмов СП и ВГ. Он основан на равномерном разбиении исходной области на секции, внутри каждой из которых случайным образом формируется набор решений. По оценке пригодности решений отбрасывается половина секций с худшими показателями, что экспоненциально сужает последующее пространство поиска и тем самым значительно сокращает суммарные вычислительные затраты. Так, алгоритм АУС формализует гибридный подход, соединяющий стохастическую генерацию

решений с систематическим геометрическим сжатием исследуемой области, обеспечивая вычислительно эффективный механизм глобальной оптимизации.

3. Получены результаты оптимизации двух полосковых МФ по одному и двум критериям с использованием глобальных алгоритмов оптимизации: ГА, ЭС, СП, ВГ, ИО, SHGO и АУС. При оптимизации МФ 1 по амплитудному критерию удалось достигнуть $U_{\max}=146,2$ мВ посредством ГА и SHGO, при этом результаты, полученные другими алгоритмами, включая разработанный АУС, отличается менее, чем на 1%. При оптимизации МФ 2 по амплитудному критерию удалось получить $U_{\max}=86,2$ мВ посредством ГА, тогда как результаты, полученные другими алгоритмами, отличаются менее, чем на 1%. При апробации частотных критериев на примере МФ 1 удалось увеличить $f_{\text{ср}}$ с 20,9 до 518,2 МГц (в 24,8 раз), а также достичь целевого значения $f_{\text{ср}}=425$ МГц посредством ГА, ЭС и СП. При оптимизации МФ 1 по критерию минимизация амплитуды с учетом распространения помехи с двух направлений удалось снизить $U_{\max}$ в области суперпозиции импульсов разложения в 2,8 раз (с 451,7 мВ до 159,8 мВ) при воздействии СКИ, а также в 2,9 раз (с 2102 мВ до 717 мВ) при воздействии с генераторов IRA II и SINUS-160 (относительно оптимизации по амплитудному критерию). При оптимизации МФ 1 по глазковому критерию удалось раскрыть глазковую диаграмму на 2,8% (увеличение разности процентилей с 469,6 до 496,7 мВ), для МФ 2 – на 34% (с 125,8 до 255,4 мВ) относительно оптимизации по амплитудному критерию. При оптимизации МФ 1 по двум критериям (амплитудный и согласования) получено $U_{\max}=162,4$ мВ (посредством ГА) при $U_{\text{вх}}=521,8$ мВ (тогда как при согласовании с трактом 50 Ом должно быть $U_{\text{вх}}=500$ мВ), для МФ 2 – $U_{\max}=91,9$ мВ (посредством СП) при $U_{\text{вх}}=577,1$ мВ. При этом максимальное отличие результатов, полученных посредством ГА, ЭС и СП, составляет 3%.

4. Апробирован подход к оптимизации МФ на основе круглых кабелей. В результате оптимизации МФ 3, 4 и 7 алгоритмом ЭС удалось снизить $U_{\max}$ на 44,5%, 40,45% и 35,3% (610, 530 и 780 мВ) относительно результатов оптимизации посредством ЭП (950, 1000 и 830 мВ). При оптимизации МФ 3 по двум критериям (амплитудному и согласования) удалось снизить $U_{\max}$ на 3,94% (с 950 до 878 мВ) при увеличении $U_{\text{вх}}$ на 5,77% (с 1780 до 1998 мВ, тогда как при согласовании с трактом должно быть 2500 мВ) относительно результатов ЭП. При оптимизации МФ 12 удалось снизить $U_{\max}$ на 16,6% (с 107,2 до 76,6 мВ), а $U_{\text{вх}}$ – на 1,11% (с 731,2 до 715,1 мВ, тогда как при согласовании с трактом должно быть 500 мВ) относительно результатов ЭП. При этом, результаты всех трех алгоритмов отличаются менее, чем на 3%.

5. Сравнены результаты оптимизации полосковых и кабельных МФ по ряду критериев глобальными алгоритмами. Отмечены их ключевые особенности и различия. Выполнен однофакторный дисперсионный анализ для результатов однокритериальной оптимизации МФ 1 и 2, показавший статистически значимые различия между алгоритмами (для обоих МФ p -

value<0,001). Рассчитано значение $T_{\text{порт}}$ для всех алгоритмов, минимальное значение получено для АУС – 3,8 с, максимальное для SHGO – 16,12 с, что обусловлено дополнительными уточнениями ЦФ с использованием локальных методов оптимизации. Рассчитан $k_{\text{орт}}$ для результатов 2-критериальной оптимизации для МФ 1–3 и 7, полученных посредством ГА, ЭС и СП, при этом результаты, полученные тремя разными алгоритмами для каждого из МФ, не превышают 10%. Разработана система практических рекомендаций по использованию алгоритмов для различных конфигураций МФ.

4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КАБЕЛЬНЫХ МОДАЛЬНЫХ ФИЛЬТРОВ

Здесь представлены результаты экспериментальных исследований МФ на основе кабельных структур. Представлены моделирование в системах квазистатического и электродинамического анализа, выбор материалов, этапы изготовления и измерение характеристик прототипов МФ на основе круглого и плоского кабелей [139–141]. Сравнены результаты моделирования и измерений.

4.1 Модальный фильтр на основе круглого кабеля

Здесь подробно рассматривается методика создания прототипа МФ на основе круглого кабеля, включающая выбор и обоснование подходящей структуры и материалов для изготовления, а также этапы изготовления прототипа и измерения его характеристик [139].

4.1.1 Моделирование и выбор материалов

Предварительно рассмотрены 4 кабельных МФ: МФ 5–8 (подраздел 2.2). Для проводников взят одножильный провод ПВ-1 с медной жилой и изоляцией из ПВХ-пластиката, обладающий большой вариативностью сечений. Поскольку диапазоны радиусов сечений проводящей медной жилы варьируются в широких пределах, 0,4–4 мм (площадь сечения 0,5–50 мм²), для оптимизации выбран диапазон наиболее распространенных – 0,5–1,8 мм при толщине изоляции 0,6–1 мм.

Моделирование и оптимизация выполнялись в системе квазистатического анализа TUSUR.EMC [70]. МФ оптимизированы посредством модифицированного алгоритма ЭС по методике, описанной в подразделе 2.3. Оптимизация выполнялась одновременно критериям: амплитудному, диапазонно-временному и согласования (подраздел 1.4.1). Оптимизируемыми параметрами для всех МФ выбраны: радиусы пассивных проводников (r_{12} и r_{13}), а также радиусы (R_i) и углы их расположения относительно начала координат (φ_i). Фиксированными параметрами при оптимизации приняты радиусы активного (r_{11}) и опорного (r_{10}) проводников, толщина изоляции вокруг опорного (h_{10}) и активного (h_{11}), а также угол расположения активного относительно начала координат (φ_A). Толщина изоляции вокруг пассивных проводников (h_{12} и h_{13}) в процессе оптимизации изменялись в соответствии с r_{12} и r_{13} . Так, если r_{1i} находится в диапазоне 0,5–0,55 мм, то h_{1i} = 0,6 мм, для 0,55–1 мм – 0,7 мм, для 1–1,6 мм – 0,8 мм и для 1,6–1,8 мм – 1 мм. Радиус внешнего диэлектрика (r_3) изменялся в соответствии с размерами проводников во избежание их наложения при построении. Эти показаны на примере 3-проводного МФ на рисунке 4.1 [13]. Для всех МФ опорный проводник располагался в центре, а параметры активного проводника приняты: $\varphi=95^\circ$, $r_{11}=1,4$ мм (при $h_{11}=0,8$ мм). Для 3-

проводных МФ $r_{10}=0,5$ мм (при $h_{10}=0,6$ мм), для 2-проводного – $r_{10}=1,4$ мм (при $h_{10}=0,8$ мм), а для экранированного 2-проводного МФ – $r_{10}=1,8$ мм (при $h_{10}=1$ мм). Поперечные сечения исследуемых МФ представлены на рисунке 2.7а, их эквивалентные схемы – на рисунке 2.8. В экранированных структурах экран моделировался как проводник, расположенный поверх структуры и закороченный на землю, как показано на рисунке 2.8б, г. Длину всех МФ $l=1$ м, сопротивления на концах проводников $R_{\Gamma}=R_{\Pi}=R=50$ Ом. Воздействовал СКИ, с ЭДС 5 В, длительностями фронта, плоской вершины и спада по 50 пс, а общая – 150 пс.

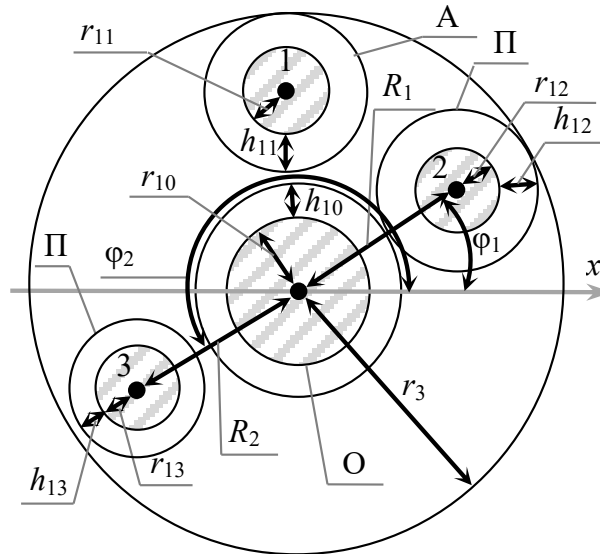


Рисунок 4.1 – Геометрические параметры МФ

Результаты оптимизации посредством ЭС частично корректировались посредством ЭП для учета технологических допусков материалов при изготовлении. Помимо прочего, для всех МФ $r_3 = 1$ мм для соответствия внутреннему диаметру тefлоновой трубки (используемой при разработке прототипа МФ для стабилизации его формы). Поскольку алгоритм выдает результаты в допустимом диапазоне с высокой точностью (до 15 знаков после запятой), полученные значения округлялись, например, $R_1=4,517989272896422$ мм и $\varphi=274,8931077125756$ до $R_1=4,5$ мм и $\varphi=275^\circ$.

После оптимизации получено: для 2-проводного МФ без экрана $r_{12}=1,4$ мм, $R_1=4,5$ мм, $\varphi=275^\circ$; для 2-проводного МФ с экраном $r_{12}=1,8$ мм, $R_1=5,9$ мм, $\varphi=275^\circ$; для 3-проводного МФ без экрана $r_{12}=1,1$ мм, $R_1=4,9$ мм, $\varphi_1=5^\circ$, $r_{13}=1,8$ мм, $R_2=3,94$ мм, $\varphi_2=285^\circ$; для 3-проводного МФ с экраном: $r_{12}=0,5$ мм, $R_1=3,34$ мм, $\varphi_1=352^\circ$, $r_{13}=1,8$ мм, $R_2=4$ мм, $\varphi_2=259^\circ$. Полученные формы напряжений на входе и выходе всех МФ представлены на рисунке 4.2. В таблице 4.1 сведены напряжение на входе ($U_{\text{вх}}$), максимальное напряжение на выходе (U_{max}) и разности погонных задержек мод ($\Delta\tau_i$) исследуемых МФ.

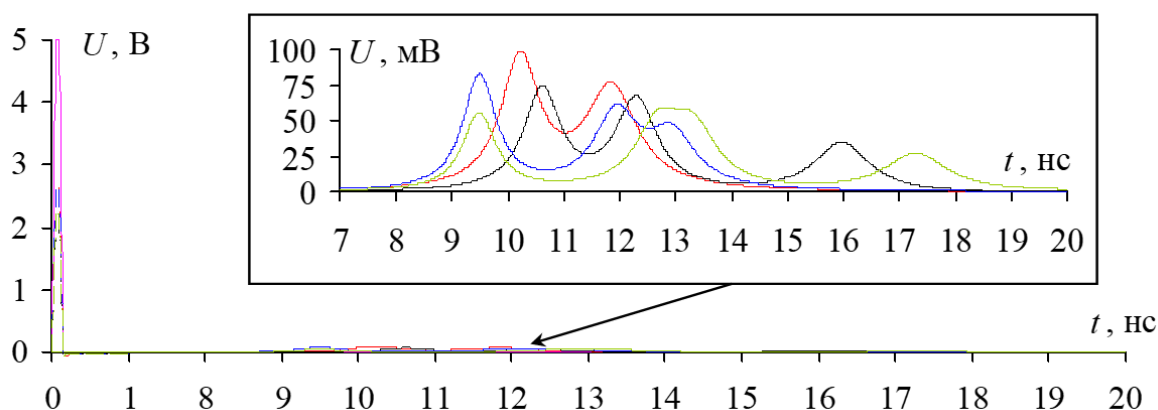


Рисунок 4.2 – Формы ЭДС (---) и напряжений на входе (---) и выходе (—): 2-проводного МФ с экраном (—) и без (—), а также 3-проводного МФ с экраном (—) и без (—)

Таблица 4.1 – Выходные параметры исследуемых МФ

МФ	$U_{вх}, В$	$U_{max}, мВ$	$\Delta\tau_1, нс/м$	$\Delta\tau_2, нс/м$	$\Delta\tau_3, нс/м$
2-проводный без экрана	2,66	99,2	1,63	—	—
2-проводный с экраном	2,21	74,6	1,67	3,67	—
3-проводный без экрана	2,64	82,8	0,99	2,45	—
3-проводный с экраном	2,25	59,5	3,19	0,64	3,97

Как видно из таблицы 4.1, наименьший уровень (59,5 мВ) U_{max} получен для экранированного 3-проводного МФ, но согласование с трактом 50 Ом лучше для 3-проводного МФ без экрана. При этом, U_{max} для 2-проводного МФ является самым высоким (99,2 мВ, отличаясь на 21,56% от наименьшего), но согласование с трактом 50 Ом близко к наилучшему результату 3-проводного МФ (отличаясь лишь на 0,38%). Наихудшее согласование у экранированного 2-проводного МФ, однако U_{max} ближе всего к лучшему результату (экранированный 3-проводный МФ) с отличием в 11,26%. Минимум $\Delta\tau$ получены для 3-проводных МФ с экраном и без и составили 0,64 нс/м (между импульсами 2 и 3) и 0,99 нс/м (между импульсами 1 и 2), соответственно. Помимо прочего, асимметричное расположение проводников в 3-проводных МФ, а также наличие внешнего экрана, дополнительно усложняют изготовление таких МФ. Между тем можно предположить, что демонстрация эффективной защиты посредством 2-проводного МФ (который проще всего реализовать) может означать достижимость того же для 3-проводных МФ (по аналогии с ростом числа сигнальных проводников полосковых МФ). Исходя из этого, для прототипирования выбран 2-проводный МФ без экрана (рисунок 2.7а).

4.1.2 Разработка прототипа на основе круглого кабеля

Для прототипа использованы: трубка фторопластовая с внутренним диаметром 2 см и толщиной стенки 2 мм (рисунок 4.3а); провод марки ПВ-1 радиусом сечения 2,2 мм (рисунок 4.3б); лист фторопласта 4×300×300 мм; компаунд на основе радиопоглощающего материала (РПМ) ЗИПСИЛ 410 РПМ-Л с отвердителем (рисунок 4.3в, г).

Начальная длина МФ $l=100$ мм, что достаточно для проверки ослабления воздействующего СКИ, поскольку существенное влияние потерь затруднит демонстрацию полного разложения в явном виде даже при $l=1$ м.

С использованием станка с числовым программным управлением (ЧПУ), из листа фторопласта изготовлены круглые пластины с отверстиями (рисунок 4.4а), которые служат для фиксации проводов в общей конструкции кабеля по всей длине. Для МФ $l=100$ мм использовано 6 пластин (толщиной 4 мм каждая), располагаемых через 18 мм (± 1 мм) (рисунок 4.4б). Далее, как показано на рисунке 4.5а, в, конструкция помещена внутрь фторопластовой трубки через специальное отверстие (шириной 1,5 мм в статичном состоянии), также выполненное при помощи станка с ЧПУ и позволяющее, помимо прочего, заполнить каждую секцию прототипа МФ требуемым изоляционным материалом (в данном случае, РПМ). С учетом используемых пластин, итоговая длина МФ составила 113 мм.



Рисунок 4.3 – Трубка фторопластовая (а), провод ПВ-1 (б) и РПМ (в, г)

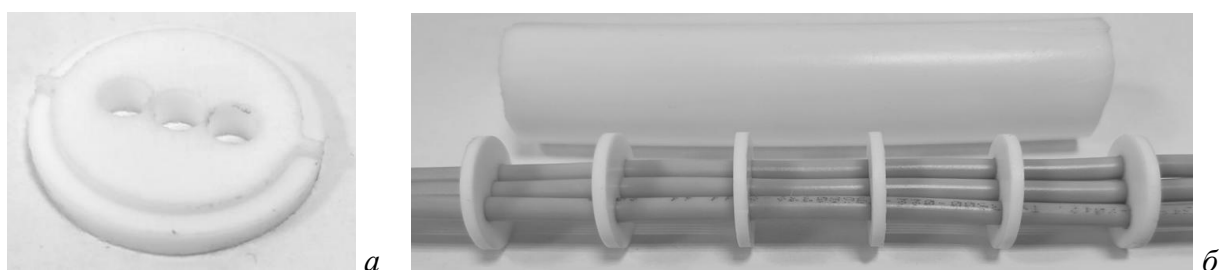


Рисунок 4.4 – Фторопластовая пластина для крепления проводов (а) и провода, фиксируемые пластинами (б)

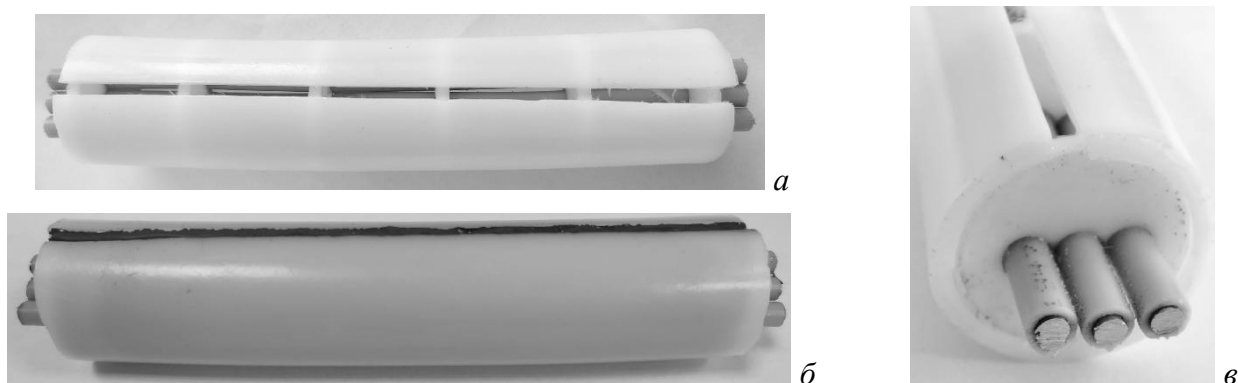


Рисунок 4.5 – Внешний вид прототипа МФ без РПМ (а, в) и с ним (б)

Для заполнения прототипа, РПМ массой 150 г разведен с 2 г отвердителя. Далее РПМ заливался внутрь конструкции МФ (при помощи шприца) через продольное отверстие. Заполненный прототип оставлен на сутки до застывания РПМ, после чего он очищен от лишнего РПМ, оставшегося на поверхности в процессе заполнения. Прототип МФ с застывшим РПМ показан на рисунке 4.5б.

Для измерения прототипа МФ надо соединить его с SMA-соединителями. Для этого изготовлены ПП, соединяемые с МФ на концах (рисунок 4.6а). Как отмечалось ранее, в МФ центральный проводник принят опорным. Так, на концах активного проводника ПП установлены SMA-соединители для соединения МФ с измерительным трактом. Готовая плата (с металлизированным слоем на обратной стороне) с SMA-соединителем на одной стороне МФ показана на рисунке 4.6б. Общий вид модели кабеля с двумя платами показан на рисунке 4.7а, а изготовленного прототипа – на рисунке 4.7б.

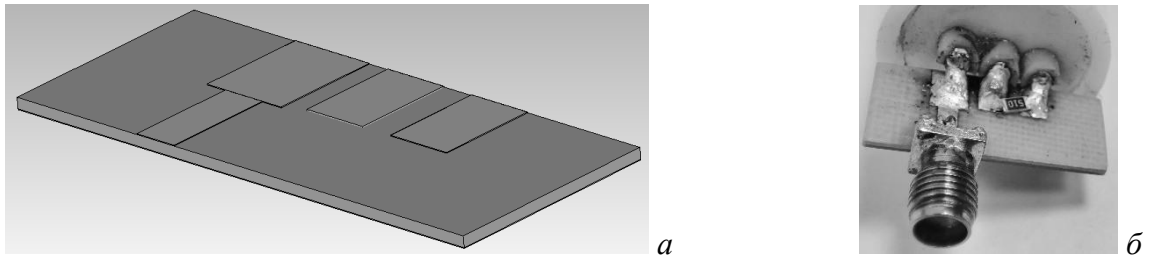


Рисунок 4.6 – 3D модель ПП (а) и МФ с платой и SMA-соединителем (б)



Рисунок 4.7 – Геометрическая модель МФ с ПП (а) и прототип МФ (б)

Измерение частотных зависимостей коэффициента передачи $|S_{21}|$ МФ осуществлялось векторным анализатором электрических цепей (ВАЦ) Р4М-18 (рисунок 4.8). На основе измеренных зависимостей S -параметров далее будут получены формы напряжения во временной области. Перед измерениями, для устранения систематической погрешности и влияния кабельных сборок, выполнена двухпортовая SOLT-калибровка в частотном диапазоне от 10 МГц до 20 ГГц. Измерения и моделирование МФ с ПП выполнялись в тракте 50 Ом.

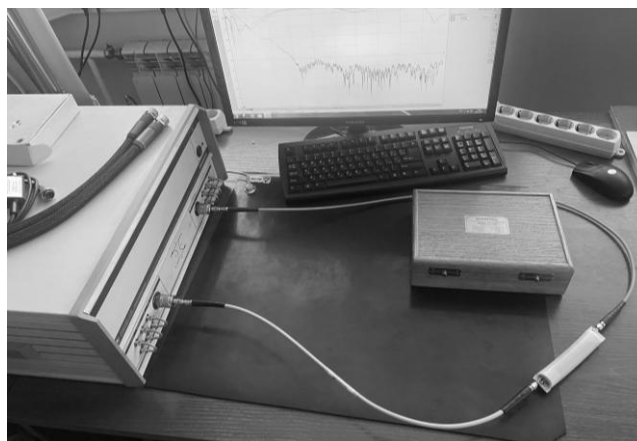


Рисунок 4.8 – Измерение частотных характеристик МФ с помощью ВАЦ Р4М-18

Второй вариант монтажа SMA-соединителей: на концах одного из сигнальных проводников для соединения МФ с трактом без ПП. При этом в МФ центральный проводник также принят опорным. Общий вид модели кабеля без ПП показан на рисунке 4.9а, а его прототип – на рисунке 4.9б. На рисунке 4.10 также представлены увеличенные фрагменты модели и прототипа МФ, где проводники А – активный, П – пассивный и О – опорный. Частотные зависимости $|S_{21}|$ МФ измерялись так же. Измерение частотных зависимостей $|S_{21}|$ прототипа МФ без ПП показано на рисунке 4.11.

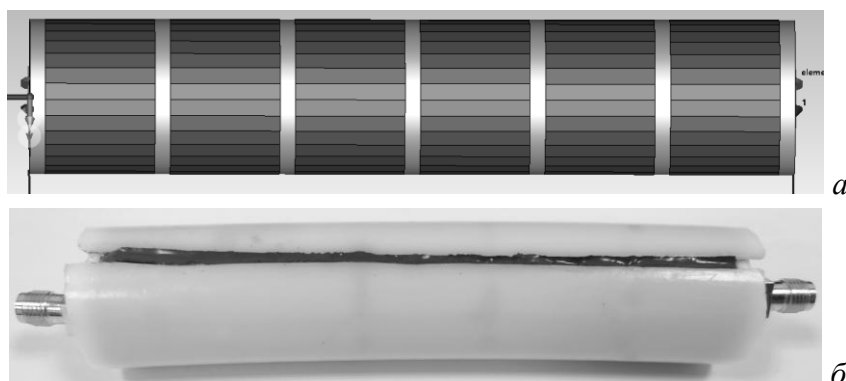


Рисунок 4.9 – Модель МФ (а) и общий вид прототипа МФ (б) без ПП



Рисунок 4.10 – Увеличенные модель (а) и прототип (б) МФ без ПП



Рисунок 4.11 – Измерение частотных характеристик МФ без ПП с помощью ВАЦ Р4М-18

4.1.3 Результаты моделирования и измерений

4.1.3.1 Исследование с переходными печатными платами

На рисунке 4.12 показаны частотные зависимости прототипа МФ с ПП, измеренные с помощью ВАЦ Р4М-18. На рисунке 4.13 сведены зависимости $|S_{21}|$ до частоты 2 ГГц, полученные посредством моделирования МФ с ПП в системах квазистатического и электродинамического анализа, а также измерения.

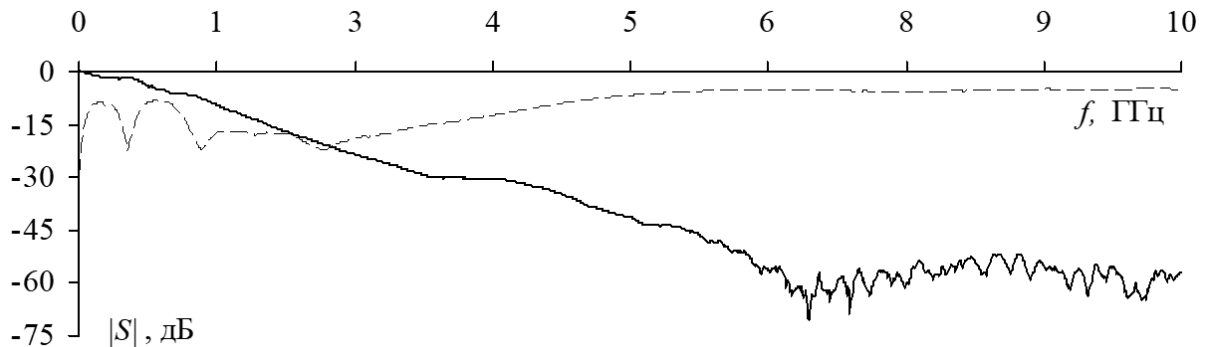


Рисунок 4.12 – Измеренные частотные зависимости $|S_{11}|$ (---) и $|S_{21}|$ (—) МФ с ПП

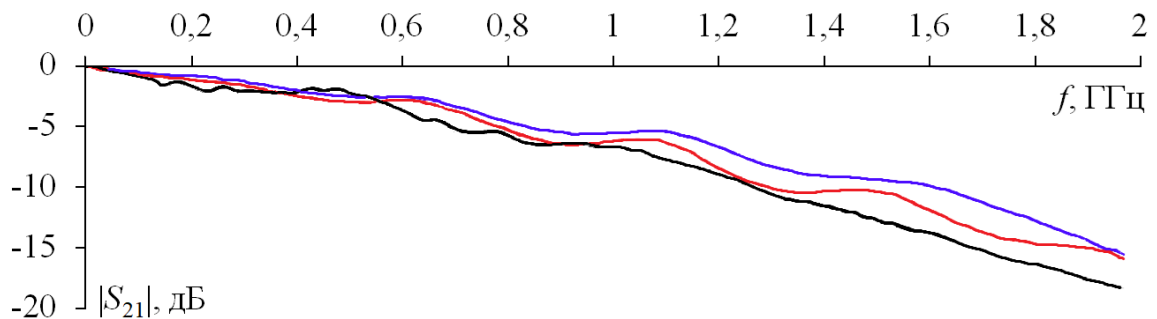


Рисунок 4.13 – Частотные зависимости $|S_{21}|$ исследуемого МФ, полученные в системах квазистатического (—) и электродинамического (—) анализа и измерением (—)

Из рисунка 4.12 следует, что по измерениям до 1 ГГц $|S_{11}| < -8$ дБ, а во всем диапазоне (до 10 ГГц) — $|S_{11}| < -5$ дБ. Рисунок 4.13 демонстрирует схожий характер зависимостей $|S_{21}|$ МФ до 2 ГГц для всех видов анализа. Полоса пропускания МФ (по уровню

минус 3 дБ) составила 680 МГц при квазистатическом моделировании, 700 МГц при электродинамическом и 580 МГц при измерении. Максимальное отклонение 2,3 дБ для двух видов анализа наблюдается на частоте 1,8 ГГц, 2,7 дБ для измерений и квазистатического анализа на частоте 2 ГГц и 4 дБ для измерений и электродинамического анализа на частоте 1,6 ГГц.

ПП из рисунка 4.6 моделировалась в системе квазистатического анализа двумя отрезками линии передачи (2-проводным отрезком П1 и 1-проводным – П2) по 5 мм. Схема соединения макета кабельного МФ (К) с ПП (П1 и П2) представлена на рисунке 4.14. На рисунке 4.15 сведены результаты измерения и моделирования в системах электродинамического и квазистатического анализа. Поскольку для РПМ заявлено $\epsilon_r=20$, предварительное моделирование выполнялось именно с этим значением. Однако после сравнения с измеренной задержкой выявлено, что значение ϵ_r меньше заявленного и составляет 17 (приведено на рисунке 4.15). При моделировании во временной области, в качестве воздействия использовался гауссов импульс с амплитудой ЭДС 1 В, длительностями фронта и спада – 58 пс и плоской вершины – 31 пс (по уровням 0,1–0,9), а общей длительностью (по уровню 0,5) – 80,5 пс. Длина МФ 113 мм, а сопротивления на концах проводников 50 Ом.

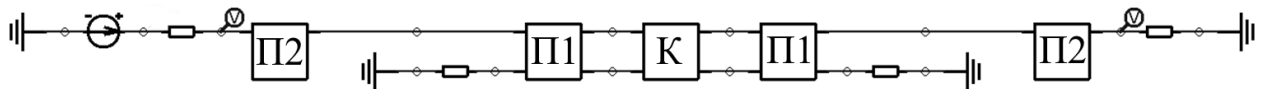


Рисунок 4.14 – Схема соединения МФ с ПП в системе квазистатического анализа

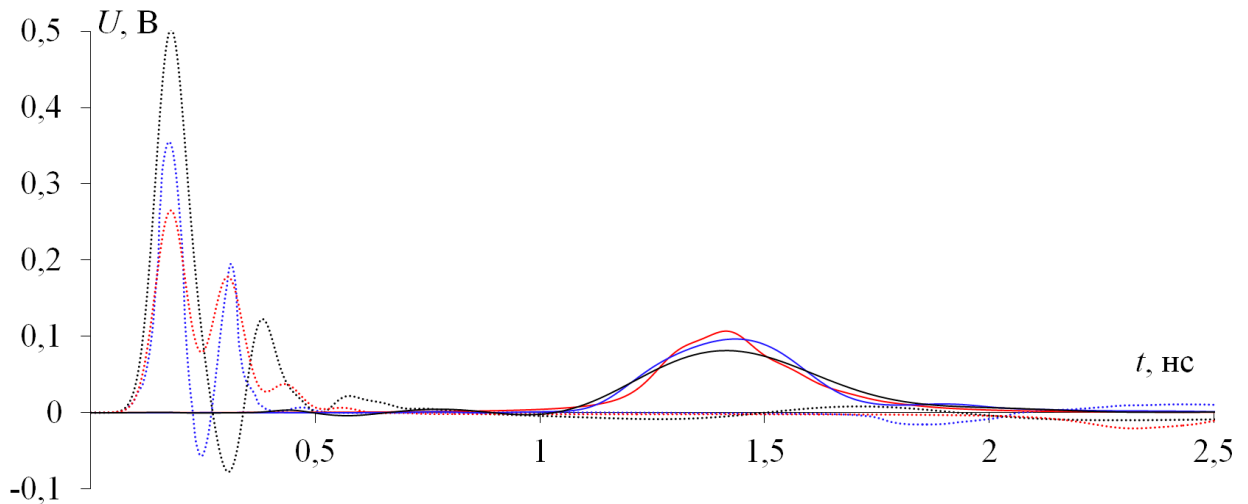


Рисунок 4.15 – Формы напряжения на входе/выходе МФ, полученные в системах квазистатического (··· / —) и электродинамического (··· / —) анализа и при измерении (··· / —)

Из рисунка 4.15 видно, что формы напряжения на выходе МФ, полученные моделированием и измерением, сопоставимы друг с другом (по амплитудам и задержкам). Так, амплитуды напряжения на выходе МФ составили 0,107 В в системе квазистатического анализа

и 0,096 В – электродинамического, а также 0,081 В при измерении. При этом в начале МФ наблюдаются импульсы, вызванные отражениями от неоднородностей (ПП-SMA-соединители), схожей формы и близкие по задержкам, но разной амплитуды. В результате, созданный МФ ослабил помеху общей длительностью 80,5 пс (по уровню 0,5) в 4,67 раза по результатам моделирования в системе квазистатического анализа, в 5,2 раза электродинамического и в 6,17 раза по измерениям. Причинами различий являются погрешности компьютерного моделирования и различие частотных зависимостей электрофизических характеристик используемых диэлектрических материалов.

4.1.3.2 Исследование без переходных печатных плат

На рисунке 4.16 показаны частотные зависимости прототипа МФ без ПП в диапазоне от 0 до 10 ГГц, измеренные прибором ВАЦ Р4М-18, а на рисунке 4.17 – полученные в системах квазистатического и электродинамического анализа, а также измерением до 2 ГГц.

Из рисунка 4.16 следует, что по измерениям до 10 ГГц $|S_{11}| < -7,5$ дБ. Как видно из рисунка 4.17, характер зависимостей $|S_{21}|$ до 2 ГГц схож, однако имеются незначительные отличия с 1,2 ГГц. Максимальное отклонение $|S_{21}|$ 12 дБ для двух видов анализа наблюдается на частоте 2 ГГц, 6,4 дБ – для измерений и квазистатического анализа на частоте 2 ГГц и 5,6 дБ – для измерений и электродинамического анализа на частоте 2 ГГц. Полоса пропускания МФ составила 581 МГц при моделировании в системе квазистатического анализа и 572 МГц – электродинамического, а также 585 МГц при измерении. Заметно, что до 0,1 ГГц зависимость $|S_{21}|$ по электродинамическому анализу осциллирует (от 0 до 60 МГц). Это связано с особенностями моделирования МФ (настройка сетки, учет параметров РПМ и др.). Схема соединения прототипа МФ на основе кабельной структуры (К) в системе квазистатического анализа представлена на рисунке 4.18. Полученные формы напряжения, при воздействии и параметрах МФ из подпункта 4.1.3.1, сведены на рисунке 4.19.

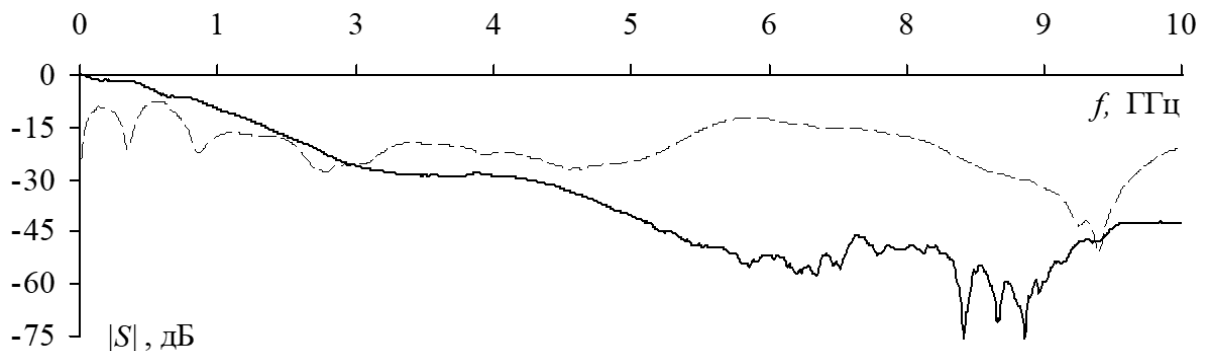


Рисунок 4.16 – Измеренные частотные зависимости $|S_{11}|$ (---) и $|S_{21}|$ (—) МФ без ПП

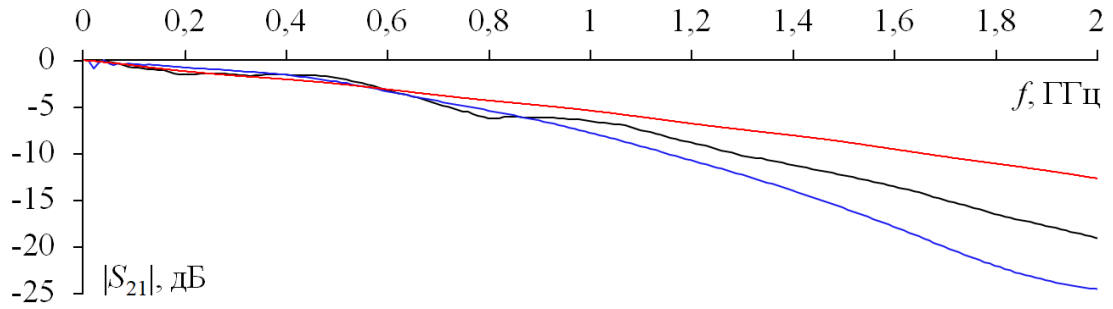


Рисунок 4.17 – Частотные зависимости $|S_{21}|$ МФ без ПП, полученные в системах квазистатического (—) и электродинамического (—) анализа и при измерении (—)

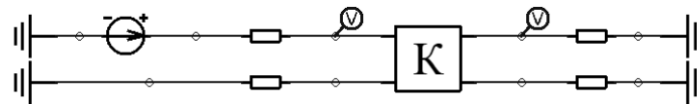


Рисунок 4.18 – Схема МФ без ПП в системе квазистатического анализа

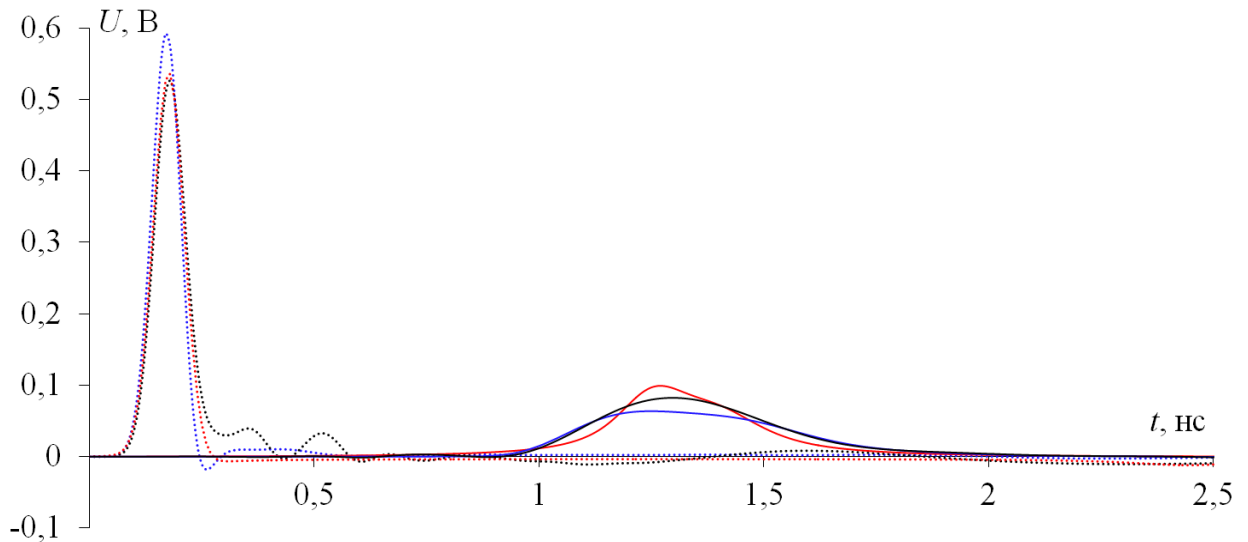


Рисунок 4.19 – Формы напряжения на входе/выходе МФ, полученные в системах квазистатического (··· / —) и электродинамического (··· / —) анализа и при измерении (··· / —)

Из рисунка 4.19 видно, что формы напряжения на выходе МФ, полученные моделированием и измерением, сопоставимы друг с другом (как по амплитудам, так и по задержкам). Так, амплитуды на выходе МФ составили 0,099 В в системе квазистатического анализа и 0,064 В – электродинамического, а также 0,082 В при измерении. Также видно значительное уменьшение отражений от неоднородностей (в отличие от МФ с ПП) в начале МФ (рисунок 4.15). В результате, созданный МФ способен ослабить воздействующую помеху общей длительностью 80,5 пс (по уровню 0,5) в 5,05 раза по квазистатическому анализу, в 7,8 раза – электродинамическому и в 6,1 раза по измерению. Различия обусловлены причинами, описанными в подпункте 4.1.3.1.

Таким образом, создан макет МФ на основе круглого кабеля из доступных материалов: фторопластовой трубки, листа фторопласта, провода ПВ-1 и РПМ. Детализирована общая

методика прототипирования и измерения МФ на основе круглого кабеля. ВАЦ Р4М-18 измерены частотные характеристики прототипа МФ в двух вариантах (с использованием соединительных ПП и без них), на основе которых получены отклики во временной области. Сравнены результаты измерений и моделирования МФ в системах квазистатического и электродинамического анализа.

Из частотных характеристик видно, что МФ на основе круглого кабеля обладает свойствами фильтра нижних частот. С переходными ПП характер зависимостей $|S_{21}|$ МФ в полосе частот до 2 ГГц схож для всех видов анализа. Полоса пропускания МФ находится в пределах 580–700 МГц для измерения и двух видов анализа. При этом МФ способен ослабляет воздействующую помеху общей длительностью 80,5 пс (по уровню 0,5) в 6,17 раза по результатам измерения. Однако при этом в начале временного отклика МФ наблюдаются отражения от неоднородностей. Без переходных ПП уровень отражений значительно ниже. Характер зависимостей $|S_{21}|$ данного МФ в полосе частот до 2 ГГц также схож для всех случаев при малых отличиях с 1,2 ГГц. Полоса пропускания МФ находится в пределах 572–585 МГц по моделированию и измерениям. При этом МФ способен ослабить ту же воздействующую помеху в 6,1 раза по результатам измерения. При этом до 1 ГГц, по измерениям $|S_{11}| < -7,5$ дБ для обоих вариантов исполнения МФ.

Различия в результатах обусловлены погрешностями компьютерного моделирования в системах электродинамического и квазистатического анализа, отличием частотных зависимостей электрофизических характеристик используемых диэлектрических материалов от реальных, а также непостоянной плотностью РПМ (поскольку ручное смешивание жидкого компонента и отвердителя не гарантирует их равномерного распределения). Также видно, что, несмотря на удобство измерений МФ с ПП, их наличие влияет на результат. Так, в начале вычисленного временного отклика МФ с ПП наблюдаются импульсы, вызванные отражениями от неоднородностей (ПП-SMA-соединители), схожей формы и близкие по задержкам, но разной амплитуды. Кроме этого, существует различие в значениях полосы пропускания МФ с ПП и без них: 7,85% при квазистатическом и 10,06% при электродинамическом анализе, а также 0,43% при измерениях. Также есть различие амплитуд выходных напряжений МФ: 3,88% при квазистатическом и 20% при электродинамическом анализе, а также 0,61% при измерениях.

4.2 Модальный фильтр на основе плоского кабеля

Здесь подробно рассматривается методика создания прототипа МФ на основе плоского кабеля, включающая выбор и обоснование подходящей структуры и материалов для изготовления, а также этапы изготовления прототипа и измерения его характеристик.

4.2.1 Моделирование и выбор материалов

Предварительно рассмотрены 4 структуры МФ на основе 2-проводных (без учета опорного проводника) плоских кабелей для определения наиболее подходящего к изготовлению (МФ 9–12). Поперечные сечения рассматриваемых МФ в общем виде представлены на рисунке 2.13, а эквивалентная схема – на рисунке 2.26. Для определения наиболее подходящей конфигурации выполнен многовариантный анализ с учетом реальных размеров провода ПуВнг(А)-LS с многопроволочной медной жилой и изоляцией из ПВХ-пластиката, обладающего высокой гибкостью, вариативностью в размерах сечений жилы и небольшой ценой. Поскольку диапазоны радиусов сечений проводящей медной жилы варьируются в пределах 0,4–12,6 мм (площадь сечения 0,5–500 мм²), для многовариантного анализа выбран диапазон наиболее распространенных жил: 0,5–1,8 мм при толщине изоляции 0,6–1 мм.

В результате многовариантного анализа выявлено, что наилучшее согласование линии с трактом 50 Ом достигается при диаметре провода ПуВнг(А)-LS 2,2 мм (площадь сечения – 4 мм², толщина изоляции – 0,8 мм). Для всех МФ, кроме МФ 10, в качестве однородного диэлектрического заполнения выбран РПМ (при $\epsilon_{r3}=20$, $\text{tg}\delta_3=0,13$, $\mu_3=2,7$). Исполнение МФ 10 предполагалось с термоусадочной трубкой из ПВХ (при $\epsilon_{r3}=3$, $\text{tg}\delta_3=0,02$, $\mu_3=1$). Кроме того, выявлено, что для полного разложения для всех МФ достаточна длина 0,2 м, кроме МФ 10, для которого требуется не менее 0,4 м. Так, в результате многовариантного анализа для всех МФ получены значения $r_{10}=r_{11}=r_{12}=1,1$ мм (при $h_{10}=h_{11}=h_{12}=0,8$ мм). Изоляцией проводов полагался ПВХ-пластикат с $\epsilon_{r2}=4,2$, $\text{tg}\delta_2=0,07$, $\mu_2=1$. Для МФ 9 толщина изоляции $h_3=1$ мм, а ширина перемычек – $s_1=s_2=0,9$ мм. Для МФ 10 толщина общей изоляции – $h_3=0,95$ мм, а расстояние между изоляцией проводов отсутствует. Для МФ 11 расстояния между проводниками $s_1=1,6$ мм, $s_2=2,2$ мм, а $h_3=1$ мм, а для МФ 12 – $s_1=s_2=2$ мм и $h_3=1$ мм. Длина МФ 10 принята $l=0,4$ м, а для остальных – $l=0,2$ м. Сопротивления на концах проводников $R_1=R_H=R=50$ Ом. Воздействовал СКИ с ЭДС 1 В, длительностями фронта, плоской вершины и импульса по 100 пс, а общей – 300 пс. Полученные формы напряжений на входе и выходе всех МФ представлены на рисунке 4.20. В таблице 4.2 сведены напряжение на входе ($U_{\text{вх}}$), максимальное напряжение на выходе (U_{max}) и разности погонных задержек мод ($\Delta\tau$) исследуемых МФ.

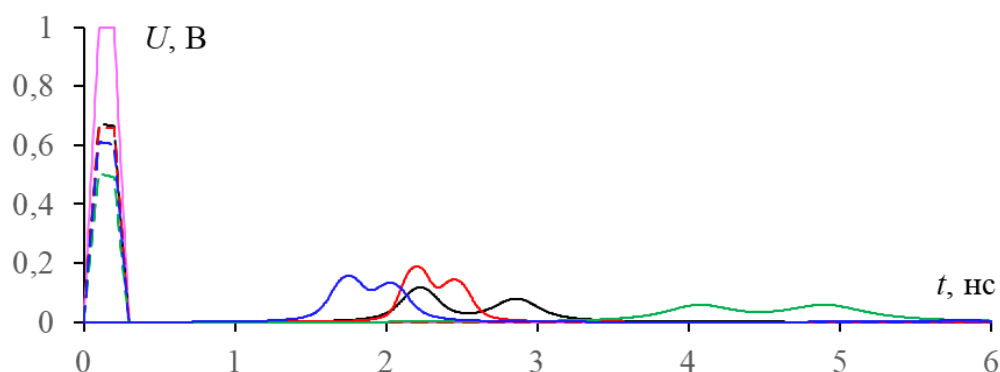


Рисунок 4.20 – Формы ЭДС (---) и напряжений на входе (---) и выходе (—) МФ 9 (—), 10 (—), 11 (—) и 12 (—), полученные в ходе многовариантного анализа

Таблица 4.2 – Выходные параметры МФ

МФ	$U_{\text{вх}}, \text{ мВ}$	$U_{\text{max}}, \text{ мВ}$	$\Delta\tau, \text{ нс/м}$
9	673,4	118,3	3,18
10	660,8	188,7	0,66
11	504	59,2	4,17
12	611,4	158,2	1,48

Как видно из таблицы 4.2 и рисунка 4.20, наименьший уровень U_{max} (59,2 мВ), максимальная $\Delta\tau$ (4,17 нс/м) и наилучшее согласование (504 мВ на входе, что наиболее близко к половине ЭДС) получены для МФ 11. Самый высокий уровень U_{max} (188,7 мВ, что на 52,2% больше, чем у МФ 11) и наименьшая $\Delta\tau$ (0,66 нс/м) у МФ 10. Наихудшее согласование (673,4 мВ на входе) наблюдается у МФ 9, уровень U_{max} (118,3 мВ) на 33,3% больше, чем у МФ 11, а $\Delta\tau$ (3,18 нс/м) на 13,5% меньше лучшего результата. Для МФ 12 уровень U_{max} (158,2 мВ) на 45,5% больше МФ 11, $\Delta\tau$ (1,48 нс/м) на 47,6% меньше, а согласование с трактом (611,4 мВ на входе) хуже, чем у МФ 11, но лучше остальных МФ.

Для изготовления лучше МФ 11 и 12, так как МФ 9 имеет наименьшее согласование с трактом, а МФ 10 имеет наихудшие U_{max} и $\Delta\tau$. Между тем реализация МФ 9 и МФ 11 требует избавиться от собственной изоляции проводов (чтобы реализовать диэлектрическое заполнение РПМ), что может привести к неоднородностям и дополнительным искажениям сигнала. Исходя из этого, несмотря на высокие характеристики МФ 11, для первой реализации МФ на основе плоского кабеля выбран МФ 12 (рисунок 2.13з). Моделирование и оптимизация выполнялись в системе TUSUR.EMC [70]. Поперечное сечение представлено на рисунке 2.13з, а эквивалентная схема – на рисунке 2.8а.

Далее выполнена оптимизация выбранного МФ посредством простого ГА по ЦФ из трех критериев: амплитудного, согласования, диапазонно-временного (подраздел 1.4.1). Настройки алгоритма такие же, как в подразделе 3.2. Оптимизировались параметры s_1 , s_2 , h_3 в диапазонах от 0,5 до 5 мм. Фиксированные параметры: $r_{10}=r_{11}=r_{12}=1,1$ мм, $h_{10}=h_{11}=h_{12}=0,8$ мм, $\epsilon_{r1}=1$, $\epsilon_{r2}=4,2$, $\epsilon_{r3}=20$, $\text{tg}\delta_1=0$, $\text{tg}\delta_2=0,07$, $\text{tg}\delta_3=0,13$ и $\mu_1=\mu_2=1$, $\mu_3=2,7$. После оптимизации выполнен ЭП для

корректировки полученных значений в соответствии с установившимися критериями и возможностями реализации прототипа МФ. В результате, получено $s_1=5$ мм, $s_2=1$ мм, $h_3=0,885$ мм (рисунок 2.13з). У МФ – $l=0,2$ м, а $R_{\Gamma}=R_{\Pi}=R=50$ Ом. Воздействовал СКИ с ЭДС 1 В, длительностями фронта, плоской вершины и импульса по 100 пс, а общей – 300 пс.

4.2.2 Разработка прототипа на основе плоского кабеля

Для создания прототипа использованы лист фторопласта $10 \times 250 \times 100$ мм, провод марки ПуВнг(А)-LS с диаметром проводника 2,2 мм и толщиной изоляции 0,8 мм (рисунок 4.21а) и компаунд на основе РПМ ЗИПСИЛ 410 РПМ-Л с отвердителем (рисунок 4.21б, в). Сначала взято $l=200$ мм для проверки ослабления СКИ, поскольку влияние потерь затруднит демонстрацию полного разложения в явном виде при $l=1$ м. На станке с ЧПУ из листа фторопласта изготовлены формы для фиксации и заливки проводов (рисунок 4.22).



Рисунок 4.21 – Провод марки ПуВнг(А)-LS (а) и РПМ ЗИПСИЛ 410 РПМ-Л (б) с отвердителем (в)

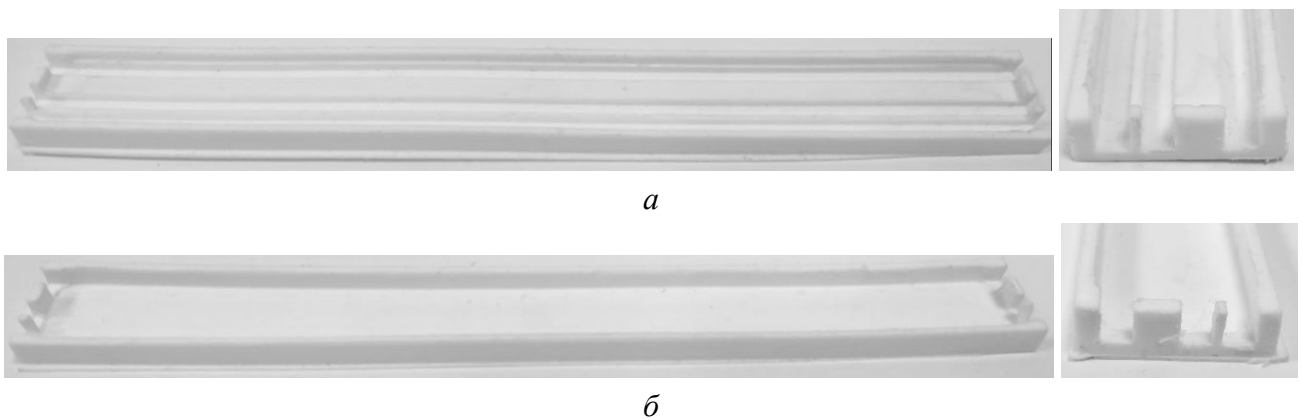


Рисунок 4.22 – Внешний вид формы 1 (а) (с углублениями для проводов) и формы 2 (б)

На первом этапе провода размещались в специальные углубления, предусмотренные в форме 1 (рисунок 4.22а). Это позволило обеспечить равные расстояния между проводами по всей длине кабеля, как показано на рисунке 4.23а. После этого конструкция заполнялась предварительно подготовленным РПМ. Для предотвращения стекания материала за пределы структуры края формы герметизировались с использованием полимерной глины (рисунке 4.23б). После застывания РПМ, конструкция отделялась от формы 1 и укладывалась в

форму 2 (рисунок 4.22б), также заливаясь РПМ. Наконец, итоговый кабель шлифовался (бумагой со средним и мелким зерном) для выравнивания толщины покрытия по всей длине.



Рисунок 4.23 – Размещение проводов во фторопластовой форме (а) и их заливка РПМ (б)

Монтаж SMA-соединителей выполнялся непосредственно на концах одного из сигнальных проводников для соединения МФ с измерительным трактом. Центральный проводник принят опорным. Общий вид модели МФ на основе плоского кабеля показан на рисунке 4.24а, а его прототип – на рисунке 4.24б. На рисунке 4.25 также представлены увеличенные фрагменты модели и прототипа МФ. Длина МФ после изготовления составила $l=225$ мм (дополнительные 12,5 мм с каждой стороны оставлены для удобства монтажа и измерений).

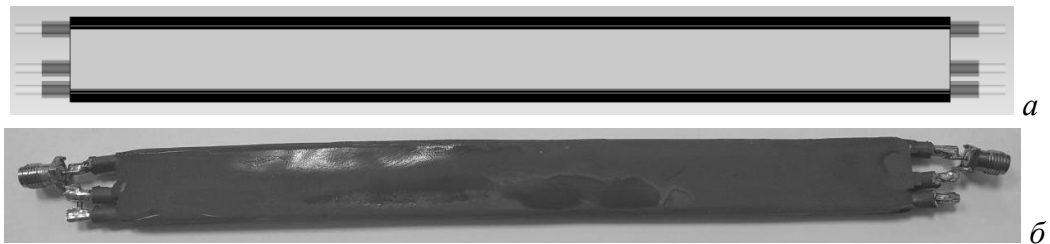


Рисунок 4.24 – Модель (а) и общий вид прототипа (б) МФ

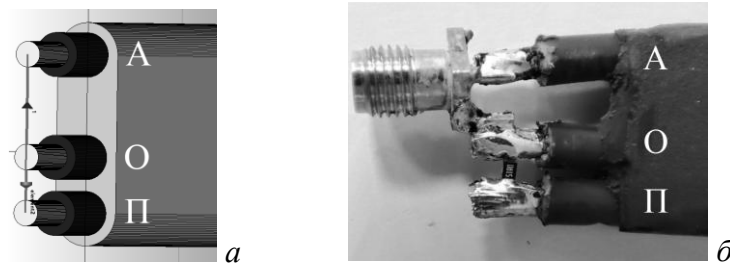


Рисунок 4.25 – Увеличенные модель (а) и прототип (б) МФ

Измерение частотных зависимостей $|S_{21}|$ осуществлялось ВАЦ Р4М-18 (рисунок 4.26). Из них будут получены формы напряжений во временной области. Перед измерениями, для устранения систематической погрешности и влияния кабельных сборок, выполнена двухпортовая SOLT-калибровка в частотном диапазоне от 10 МГц до 20 ГГц. Измерения и моделирование прототипа МФ на основе плоского кабеля выполнялись в тракте 50 Ом.

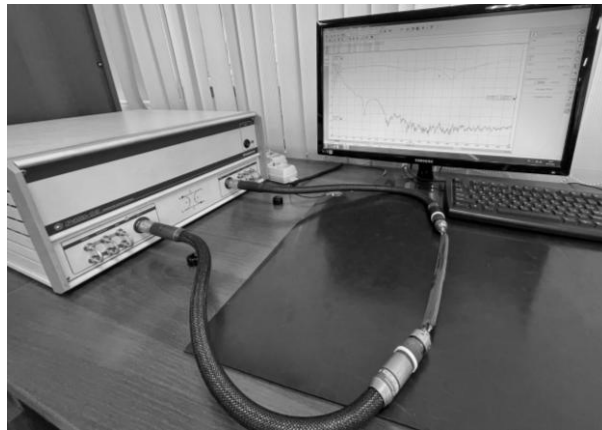


Рисунок 4.26 – Установка для измерения частотных характеристик МФ на основе плоского кабеля с помощью ВАЦ Р4М-18

4.2.3 Результаты моделирования и измерений

На рисунке 4.27 показаны частотные зависимости для прототипа МФ на основе плоского кабеля, измеренные с помощью ВАЦ Р4М-18. На рисунок 4.28 сведены зависимости $|S_{21}|$ до частоты 2 ГГц, полученные посредством моделирования МФ в системах квазистатического и электродинамического анализа, а также измерения.

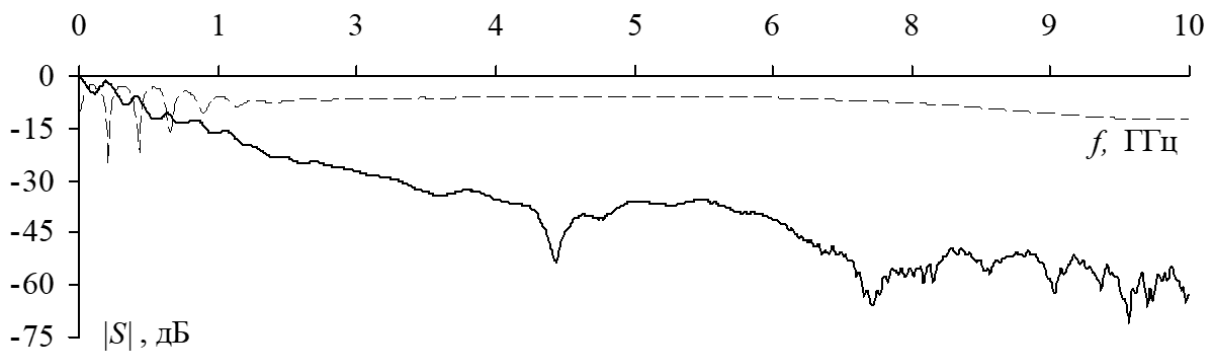


Рисунок 4.27 – Измеренные частотные зависимости $|S_{11}|$ (---) и $|S_{21}|$ (—) МФ

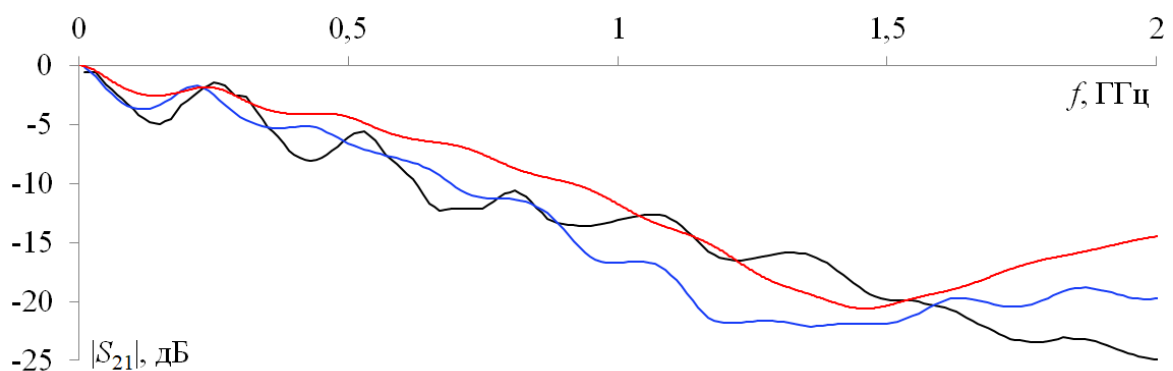


Рисунок 4.28 – Частотные зависимости $|S_{21}|$ исследуемого МФ, полученные в системах квазистатического (—) и электродинамического (—) анализа и при измерении (—)

Из рисунка 4.27 следует, что при измерениях до 1 ГГц $|S_{11}| < -2,4$ дБ, а во всем диапазоне (до 10 ГГц) – $|S_{11}| < -7,4$ дБ. Характер зависимостей $|S_{21}|$, показанных на рисунке 4.28,

схож для всех видов анализа с максимальным отклонением 5,2 дБ (на частоте 650 МГц для квазистатического анализа и измерений) в полосе до 2 ГГц. Полоса пропускания МФ составила 310 МГц для квазистатического анализа, 75,3 МГц – для электродинамического и 83,3 МГц при измерении. Из частотных характеристик видно, что МФ обладает свойствами фильтра нижних частот. Отличие квазистатического моделирования от других видов анализа обусловлено осцилляциями у последних. На рисунке 4.29 приведены формы напряжений на входе и выходе МФ для разных видов анализа.

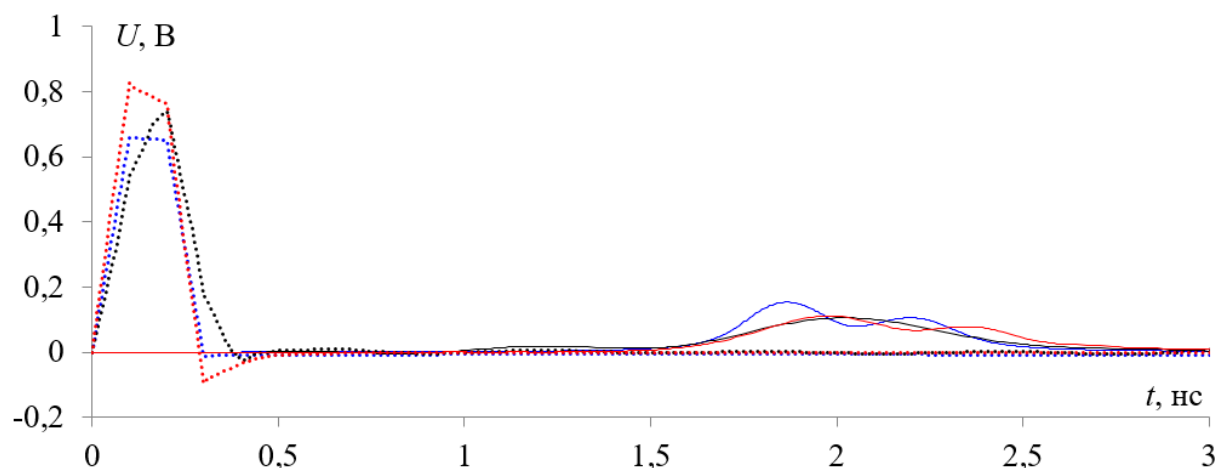


Рисунок 4.29 – Формы напряжения на входе/выходе МФ, полученные в системе электродинамического (··· / —) и квазистатического (··· / —) анализа и при измерении (··· / —)

Рисунок 4.29 показывает сопоставимость форм напряжений на выходе МФ по задержкам и амплитудам. Заметно, что в системах квазистатического и электродинамического анализа на выход МФ приходят два импульса, тогда как при измерении разложения не наблюдается. Уровень максимального напряжения на выходе МФ составил 0,153 В при квазистатическом анализе, 0,111 В – при электродинамическом и 0,105 В при измерении, что результат измерений на 18,6% меньше, чем квазистатического анализа и на 2,8% – электродинамического. Уровень входного напряжения составил 0,657 В для квазистатического анализа, 0,827 В – для электродинамического и 0,738 В для измерения. В результате, разработанный МФ способен ослабить СКИ общей длительностью 200 пс (по уровню 0,5) в 4,3 раза при квазистатическом анализе, 7,45 раза) – электродинамическом и в 7,03 раза при измерении. Различия в результатах обусловлены погрешностями компьютерного моделирования в системах электродинамического и квазистатического анализа, отличием частотных зависимостей электрофизических характеристик используемых диэлектрических материалов от реальных, а также непостоянной плотностью РПМ (поскольку ручное смешивание жидкого компонента и отвердителя не гарантирует их равномерного распределения).

В результате, детализирована общая методика прототипирования и измерения МФ на основе плоского кабеля. С помощью ВАЦ Р4М-18 измерены частотные характеристики прототипа МФ, на основе которых получены отклики во временной области. Сравнены результаты измерений и моделирования МФ в системах квазистатического и электродинамического анализа.

Из частотных характеристик видно, что МФ на основе плоского кабеля обладает свойствами фильтра нижних частот. Характер зависимостей $|S_{21}|$ МФ схож для всех видов анализа с максимальным отклонением 5,2 дБ (на частоте 650 МГц для квазистатического анализа и результатов измерений) в полосе до 2 ГГц. Полоса пропускания МФ находится в пределах 75–310 МГц по результатам моделирования и измерения. МФ способен ослабить СКИ общей длительностью 200 пс (по уровню 0,5) в 7 раз по результатам измерения. Различия в результатах обусловлены теми же факторами, что и для МФ на основе круглого кабеля.

4.3 Основные результаты раздела

1. Из частотных характеристик МФ на основе круглого кабеля видно, что он обладает свойствами фильтра нижних частот. С переходными ПП характер зависимостей $|S_{21}|$ МФ в полосе частот до 2 ГГц схож для всех видов анализа. Полоса пропускания МФ находится в пределах 580–700 МГц для измерения и двух видов анализа. При этом МФ способен ослабляет воздействующую помеху общей длительностью 80,5 пс (по уровню 0,5) в 6,17 раза по результатам измерения. Однако при этом в начале временного отклика МФ наблюдаются отражения от неоднородностей. Без переходных ПП уровень отражений значительно ниже. Характер зависимостей $|S_{21}|$ данного МФ в полосе частот с 1,2 ГГц до 2 ГГц также схож для всех случаев при малых отличиях. Полоса пропускания МФ находится в пределах 572–585 МГц по моделированию и измерениям. При этом МФ способен ослабить ту же воздействующую помеху в 6,1 раза по результатам измерения. При этом до 1 ГГц, по измерениям $|S_{11}| < -7,5$ дБ для обоих вариантов исполнения МФ.

Различия в результатах обусловлены погрешностями компьютерного моделирования в системах электродинамического и квазистатического анализа, отличием частотных зависимостей электрофизических параметров, используемых диэлектрических материалов от реальных, а также непостоянной плотностью РПМ (поскольку ручное смешивание жидкого компонента и отвердителя не гарантирует их равномерного распределения). Также видно, что, несмотря на удобство измерений МФ с ПП, их наличие влияет на результат. Так, в начале вычисленного временного отклика МФ с ПП наблюдаются импульсы, вызванные отражениями от неоднородностей (ПП-SMA-соединители), схожей формы и близкие по задержкам, но разной амплитуды. Кроме этого, существует различие в значениях полосы пропускания МФ с ПП и без

них: 7,85% при квазистатическом и 10,06% при электродинамическом анализе, а также 0,43% при измерениях. Также есть различие амплитуд выходных напряжений МФ: 3,88% при квазистатическом и 20% при электродинамическом анализе, а также 0,61% при измерениях.

2. Из частотных характеристик видно, что МФ на основе плоского кабеля обладает свойствами фильтра нижних частот. Характер зависимостей $|S_{21}|$ МФ схож для всех видов анализа с максимальным отклонением 5,2 дБ (на частоте 650 МГц для квазистатического анализа и результатов измерений) в полосе до 2 ГГц. Полоса пропускания МФ находится в пределах 75–310 МГц по результатам моделирования и измерения. МФ способен ослабить СКИ общей длительностью 200 пс (по уровню 0,5) в 7 раз по результатам измерения. Различия в результатах обусловлены теми же факторами, что и для МФ на основе круглого кабеля.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты работы, полученные с помощью проверенных методов, обширно апробированные и опубликованные, заключаются в следующем:

1. Выполнено предварительное моделирование двух полосковых МФ. Для стандартного набора параметров и найденного посредством ЭП вычислены матрицы $\mathbf{C}$, $\mathbf{L}$, $\boldsymbol{\tau}$ и $\mathbf{Z}$ и временные отклики. За счет оптимизации по амплитудному критерию посредством ЭП $U_{\max}$ уменьшено на 24,6% для МФ 1 и на 12,5% для МФ 2. Рекомендованы параметры полосковых МФ для оптимизации.

2. Выполнено предварительное моделирование 10 МФ на основе круглых и плоских кабелей. Для стандартного набора параметров и найденного посредством ЭП вычислены $\mathbf{C}$, $\mathbf{L}$, $\boldsymbol{\tau}$ и $\mathbf{Z}$ и временные отклики. После оптимизации по амплитудному критерию посредством ЭП удалось максимально уменьшить $U_{\max}$ на 32,52%, а минимально – на 1,94%. Отмечено положительное влияние асимметрии на разложение импульсов в круглых кабелях. Рекомендованы параметры для оптимизации кабельных МФ.

3. Сформулированы критерии оптимизации и нормировочные коэффициенты для них. Они учитывают частотные характеристики МФ, целостность передаваемого сигнала, а также двустороннее воздействие помехового сигнала.

4. Модифицирован алгоритм ЭС, путем реализации задания диапазонов оптимизируемых параметров, что предотвращает получение некорректных результатов оптимизации. Разработан новый алгоритм АУС, объединяющий в себе достоинства алгоритмов СП и ВГ. Он основан на равномерном разбиении исходной области на секции, внутри каждой из которых случайным образом формируется набор решений. По оценке пригодности решений отбрасывается половина секций с худшими показателями, что экспоненциально сужает последующее пространство поиска и тем самым значительно сокращает суммарные вычислительные затраты. Так, алгоритм АУС формализует гибридный подход, соединяющий стохастическую генерацию решений с систематическим геометрическим сжатием исследуемой области, обеспечивая вычислительно эффективный механизм глобальной оптимизации.

5. Получены результаты оптимизации двух полосковых МФ по одному и двум критериям с использованием глобальных алгоритмов оптимизации: ГА, ЭС, СП, ВГ, ИО, SHGO и АУС. При оптимизации МФ 1 по амплитудному критерию удалось достичь $U_{\max}=146,2$ мВ посредством ГА и SHGO, при этом результаты, полученные другими алгоритмами, включая разработанный АУС, отличается менее, чем на 1%. При оптимизации МФ 2 по амплитудному критерию получено $U_{\max}=86,2$ мВ посредством ГА, тогда как результаты, полученные другими алгоритмами, отличаются менее, чем на 1%. При апробации частотных критериев на примере МФ 1 удалось увеличить $f_{\text{ср}}$ с 20,9 до 518,2 МГц (в 24,8 раза), а также достичь целевого

значения $f_{cp}=425$ МГц посредством ГА, ЭС и СП. При оптимизации МФ 1 по критерию минимизации амплитуды с учетом распространения помехи с двух направлений удалось снизить U_{max} в области суперпозиции импульсов разложения в 2,8 раза (с 451,7 мВ до 159,8 мВ) при воздействии СКИ, а также в 2,9 раза (с 2102 мВ до 717 мВ) при воздействии с генераторов IRA II и SINUS-160 (относительно оптимизации по амплитудному критерию). При оптимизации МФ 1 по глазковому критерию удалось раскрыть глазковую диаграмму на 2,8% (увеличение разности процентилей с 469,6 до 496,7 мВ), для МФ 2 – на 34% (с 125,8 до 255,4 мВ) относительно оптимизации по амплитудному критерию. При оптимизации МФ 1 по двум критериям (амплитудный и согласования) получено $U_{max}=162,4$ мВ (посредством ГА) при $U_{bx}=521,8$ мВ (тогда как при согласовании с трактом 50 Ом должно быть $U_{bx}=500$ мВ), для МФ 2 – $U_{max}=91,9$ мВ (посредством СП) при $U_{bx}=577,1$ мВ. При этом максимальное отличие результатов, полученных посредством ГА, ЭС и СП, составляет 3%.

6. Апробирован подход к оптимизации МФ на основе круглых кабелей. В результате оптимизации МФ 3, 4 и 7 алгоритмом ЭС удалось снизить U_{max} на 44,5, 40,5 и 35,3% (610, 530 и 780 мВ) относительно результатов оптимизации посредством ЭП (950, 1000 и 830 мВ). При оптимизации МФ 3 по двум критериям (амплитудному и согласования) удалось снизить U_{max} на 3,94% (с 950 до 878 мВ) при увеличении U_{bx} на 5,77% (с 1780 до 1998 мВ, тогда как при согласовании с трактом должно быть 2500 мВ) относительно результатов ЭП. При оптимизации МФ 12 удалось снизить U_{max} на 16,6% (с 107,2 до 76,6 мВ), а U_{bx} – на 1,11% (с 731,2 до 715,1 мВ, тогда как при согласовании с трактом должно быть 500 мВ) относительно результатов ЭП. При этом, результаты всех трех алгоритмов отличаются менее, чем на 3%.

7. Представлено всестороннее сравнение результатов оптимизации полосковых и кабельных МФ по ряду критериев глобальными алгоритмами. Отмечены ключевые особенности и различия рассмотренных алгоритмов. Выполнен однофакторный дисперсионный анализ для результатов однокритериальной оптимизации МФ 1 и 2, показавший статистически значимые различия между алгоритмами (для обоих МФ $p\text{-value}<0,001$). Рассчитано значение T_{norm} для всех алгоритмов, минимальное значение получено для АУС – 3,8 с, максимальное для SHGO – 16,12 с, что обусловлено дополнительными уточнениями ЦФ с использованием локальных методов оптимизации. Рассчитан k_{opt} для результатов 2-критериальной оптимизации для МФ 1–3 и 7, полученных посредством ГА, ЭС и СП, при этом результаты, полученные посредством трех разных алгоритмов для каждого из МФ, не превышают 10%. Разработана система практических рекомендаций по использованию алгоритмов для различных конфигураций МФ.

8. Из частотных характеристик МФ на основе круглого кабеля видно, что он обладает свойствами фильтра нижних частот. С переходными ПП характер зависимостей $|S_{21}|$ МФ в

полосе частот до 2 ГГц схож для всех видов анализа. Полоса пропускания МФ находится в пределах 580–700 МГц для измерения и двух видов анализа. При этом МФ ослабляет воздействующую помеху общей длительностью 80,5 пс (по уровню 0,5) в 6,17 раза по результатам измерения. Однако при этом в начале временного отклика МФ наблюдаются отражения от неоднородностей. Без переходных ПП уровень отражений значительно ниже. Характер зависимостей $|S_{21}|$ данного МФ в полосе частот с 1,2 ГГц до 2 ГГц также схож для всех случаев при малых отличиях. Полоса пропускания МФ находится в пределах 572–585 МГц по моделированию и измерениям. При этом МФ способен ослабить ту же воздействующую помеху в 6,1 раза по результатам измерения. При этом до 1 ГГц, по измерениям $|S_{11}| < -7,5$ дБ для обоих вариантов исполнения МФ.

Различия в результатах обусловлены погрешностями компьютерного моделирования в системах электродинамического и квазистатического анализа, отличием частотных зависимостей электрофизических параметров, используемых диэлектрических материалов от реальных, а также непостоянной плотностью РПМ (поскольку ручное смешивание жидкого компонента и отвердителя не гарантирует их равномерного распределения). Также видно, что, несмотря на удобство измерений МФ с ПП, их наличие влияет на результат. Так, в начале вычисленного временного отклика МФ с ПП наблюдаются импульсы, вызванные отражениями от неоднородностей (ПП-SMA-соединители), схожей формы и близкие по задержкам, но разной амплитуды. Кроме этого, существует различие в значениях полосы пропускания МФ с ПП и без них: 7,85% при квазистатическом и 10,06% при электродинамическом анализе, а также 0,43% при измерениях. Также есть различие амплитуд выходных напряжений МФ: 3,88% при квазистатическом и 20% при электродинамическом анализе, а также 0,61% при измерениях.

9. Из частотных характеристик видно, что МФ на основе плоского кабеля обладает свойствами фильтра нижних частот. Характер зависимостей $|S_{21}|$ МФ схож для всех видов анализа с максимальным отклонением 5,2 дБ (на частоте 650 МГц для квазистатического анализа и результатов измерений) в полосе до 2 ГГц. Полоса пропускания МФ находится в пределах 75–310 МГц по результатам моделирования и измерения. МФ способен ослабить СКИ общей длительностью 200 пс (по уровню 0,5) в 7 раз по результатам измерения. Различия в результатах обусловлены теми же факторами, что и для МФ на основе круглого кабеля.

Таким образом, в соответствии с «Положением о присуждении ученых степеней» ВАК, в работе решена задача повышения характеристик полосковых и кабельных помехозащитных структур с модальным разложением за счёт совершенствования и использования глобальной оптимизации, имеющая значение для развития технических наук в части разработки и исследования методов и алгоритмов обработки сигналов и информации в радиотехнических устройствах при наличии помех с целью повышения помехоустойчивости, а также разработки и

исследования методов обеспечения электромагнитной совместимости радиотехнических систем и устройств, согласно п. 6 и 7 направлений исследований паспорта специальности 2.2.13. Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения.

Рекомендации

1. МФ на основе кабельных структур могут быть использованы при разработке специализированного электронного оборудования для защиты РЭС от СКИ по цепям питания и сигнальным цепям как в виде отдельного устройства, так и в совокупности с уже имеющимися.

2. Разработанные критерии и алгоритмы оптимизации, ввиду своей универсальности, могут быть использованы при оптимизации различных МФ.

3. Подходы к моделированию и оптимизации могут быть использованы в образовательном процессе высших учебных заведений.

Перспективы дальнейшей разработки темы

1. Одновременная оптимизация по критериям, реализованным во временной и частотной областях.

2. Дальнейшее развитие алгоритма АУС, направленное на внедрение дополнительных правил, способствующих ускорению сходимости и повышению точности оптимизации.

3. Расширение ряда возможных КО в алгоритме АУС, например, достижение сходимости ЦФ или ограничения по максимальному времени расчёта.

4. Оптимизация МФ на основе круглых и плоских кабелей под конкретные цепи и устройства для их дальнейшего внедрения.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

АУС	Адаптивное усечение секций
ВАЦ	Векторный анализатор цепей
ВГ	Ветви и границы
ГА	Генетический алгоритм
ИО	Имитация отжига
КО	Критерий останова
МФ	Модальный фильтр
МПЛ	Микрополосковая линия передачи
МПЛП	Многопроводная линия передач
ПдЭМВ	Преднамеренные силовые электромагнитные воздействия
ПК	Персональный компьютер
ПП	Печатная плата
РПМ	Радиопоглощающий материал
РЭС	Радиоэлектронные средства
СКИ	Сверхкороткий импульс
СП	Случайный поиск
СШП	Сверхширокополосный
ТС	Техническое средство
ЦФ	Целевая функция
ЭМИ	Электромагнитные излучения
ЭМВ	Электромагнитное воздействие
ЭМП	Электромагнитная помеха
ЭМС	Электромагнитная совместимость
ЭП	Эвристический поиск
ЭС	Эволюционные стратегии

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Nishiyama, H. Fundamental study on influence of intentional electromagnetic interference on IC communication / H. Nishiyama, T. Okamoto, Y. Kim, et al. // 12th International Workshop on the Electromagnetic Compatibility of Integrated Circuits (EMC Compo). – Hangzhou, China, October 21 –23, 2019. – P. 201–203.
2. ГОСТ 30804.4.4–2013. Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость к наносекундным импульсным помехам. – М.: Стандартинформ, 2014. – 27 с.
3. Волин, М.Л. Паразитные процессы в радиоэлектронной аппаратуре / М. Л. Волин. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Радио и связь, 1981. – 296 с.
4. Уайт, Д. Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств и непреднамеренные помехи: Внутрисистемные помехи и методы их уменьшения: пер. с англ. / Д. Уайт. – М. : Сов. радио, 1978. – Вып. 2. – 272 с.
5. Юхно, П.М. Преднамеренные оптические помехи высокоточному оружию / П.М. Юхно. – М.: Радиотехника, 2017. – 640 с.
6. Электромагнитный терроризм на рубеже тысячелетий / под ред. Т. Р. Газизова. – Томск: Том. гос. ун-т, 2002. – 206 с.
7. Conca, J. Can Nuclear Power Plants Resist Attack of Electromagnetic Pulse (EMP) // Forbes. – 2019.
8. Lakhina, G.S. Research on Historical Records of Geomagnetic Storms / G.S. Lakhina, S. Alex, B.T. Tsurutami, W.D. Gonzalez, // Coronal and Stellar Mass Ejections: Proceedings of the 226th Symposium of the International Astronomical Union Held in Beijing. – China, September 13–17, 2004. – P. 3–13.
9. Успенский, М.И. Основные понятия и пути влияния геомагнитных штормов на электроэнергетическую систему (Часть II) // Известия Коми научного центра УрО РАН. – 2017. – № 1(29). – С. 72–81.
10. Joshi, A. Superactive Region AR:5395 of SOLAR–CYCLE–22 // Solar Physics. – 1993. – Vol. 147, No. 2. – P. 269–285.
11. Левина, А.С. Полярное сияние над Крымом // Земля и Вселенная. – 1989. – № 4. – С. 13–35.
12. Mora, N. Study and Classification of Potential IEMI Sources / N. Mora, F. Vega, G. Lugrin, F. Rachidi, M. Rubinstein // System and Assessment Notes. – 2014. – № 41. – 92 p.

13. Гизатуллин, З.М. Помехоустойчивость средств вычислительной техники внутри зданий при широкополосных электромагнитных воздействиях / З.М. Гизатуллин. – Казань: Казан. гос. техн. ун-т им. А.Н. Туполева, 2012. – 254 с.
14. Егоров, А.Б. Воздействие мощного электромагнитного излучения на радиоэлектронные средства / А.Б. Егоров, А.М. Сотников, И.Ф. Рыбалко // Сборник научных трудов Донецкого института железнодорожного транспорта. – 2012. – № 29. – С. 49–54.
15. Mojert, C. UWB and EMP susceptibility of microprocessors and networks // Proc. of the 14th International Zurich Symposium on Electromagnetic Compatibility. – Zurich, Switzerland, 2001. – P. 47–52.
16. Балюк, Н.В. Мощный электромагнитный импульс: воздействие на электронные средства и методы защиты / Н.В. Балюк, Л.Н. Кечиев, П.В. Степанов. – М.: Группа ИДТ, 2009. – 478 с.
17. Воскобович, В.В. Воздействие электромагнитного излучения сверхширокополосного импульсного на персональные компьютеры / В.В. Воскобович, Л.О. Мырова // Сборник докладов Российской научно-технической конференции по ЭМС. – 2004. – С. 383–392.
18. Пименов, П.Н. Сравнительный анализ влияния сверхкороткого электромагнитного импульса на узкополосные, широкополосные, сверхширокополосные системы радиосвязи // Технологии ЭМС. – 2015. – Т. 52, № 1. – С. 13–16.
19. Gadetski, N.P. Personal computer functional disorders under effect of ultra-short duration electromagnetic pulses / N.P. Gadetski, K.A. Kravtsov, I.I. Magda // Microwave & Telecommunication Technology. 9th International Crimean Microwave Conference. – 1999. – P. 326–328.
20. Vance, E.F. Electromagnetic-Interference Control // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. – 1980. – Vol. EMC-22, no. 4. – P. 319–328. DOI: 10.1109/TEM.1980.8732948.
21. Frix, W.M. A circuital approach to estimate the magnetic field reduction of nonferrous metal shields / W.M. Frix, G.G. Karady // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. – 1997. – Vol. 39, no. 1. – P. 24–32. DOI: 10.1109/15.554692.
22. Adriano, U. Material efficiency in magnetic shielding at low and intermediate frequency / U. Adriano, O. Bottauscio, M. Zucca // IEEE Transactions on Magnetics. – 2003. – Vol. 39, no. 5. – P. 3217–3219. DOI: 10.1109/TMAG.2003.816235.
23. Nguyen, Q.D. Recent advances in multifunctional electromagnetic interference shielding materials / Q.D. Nguyen, C.G. Choi // Heliyon. – 2024. – Vol. 10, no. 9. – Article e31118. DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e31118.

24. Wang, R. A comprehensive review of electromagnetic interference shielding composite materials / R. Wang, J. Cui, Y. Wang, et al. // *Micromachines*. – 2024. – Vol. 15, no. 2. – Article 187. DOI: 10.3390/mi15020187.
25. Packer, M. Optimal inverse design of magnetic field profiles in a magnetically shielded cylinder / M. Packer, P.J. Hobson, N. Holmes, et al. // *Physical Review Applied*. – 2020. – Vol. 14, no. 5. – Article 054004. DOI: 10.1103/PhysRevApplied.14.054004.
26. Ouda, M. Advancing environmental sustainability: a comprehensive review of waste-based composite materials for efficient electromagnetic shielding and absorption / M. Ouda, A.A. Abu Sanad, A. Krishna, et al. // *IEEE Access*. – 2025. – Vol. 13. – P. 15028–15061. DOI: 10.1109/ACCESS.2025.3529280.
27. Huang, K. Grounding behavior and optimization analysis of electric multiple units in high-speed railways / K. Huang, Z. Liu, F. Zhu, et al. // *IEEE Transactions on Transportation Electrification*. – 2021. – Vol. 7, no. 1. – P. 240–255. DOI: 10.1109/TTE.2020.3006099.
28. Pearlston, C.B. Case and cable shielding, bonding, and grounding considerations in electromagnetic interference // *IRE Transactions on Radio Frequency Interference*. – 1962. – Vol. RFI-4, no. 3. – P. 1–16. DOI: 10.1109/RFI.1962.6540333.
29. Zhou, W. Power frequency interference and suppression in measurement of power transmission tower grounding resistance / W. Zhou, Y. Liu; G. Li, et al. // *IEEE Transactions on Power Delivery*. – 2015. – Vol. 30, no. 2. – P. 1016–1023. DOI: 10.1109/TPWRD.2014.2370037.
30. Baklezos, A.T. Electromagnetic emission modeling in case of shielded cabling with respect to the ground dielectric properties / A.T. Baklezos, C.D. Nikolopoulos, A.G. Katsouris, et al. // *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*. – 2016. – Vol. 58, no. 6. – P. 1694–1700. DOI: 10.1109/TEMC.2016.2588583
31. Kamat, V.N. Protection mechanism for modern telecommunications // *Proceedings of the International Conference on Electromagnetic Interference and Compatibility'99* (IEEE Cat. No. 99TH 8487). – Hyderabad, India, December 08–08, 1997. – P. 45–50. DOI: 10.1109/ICEMIC.1997.669756.
32. Zhang, Y. Multiple transient voltage suppressor diodes-based protection circuits with decreasing loading effect under high-power microwave pulses / Y. Zhang, L. Zhou // *IEEE Joint International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Signal & Power Integrity: EMC Japan/Asia-Pacific International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC Japan/APEMC Okinawa)*. – Ginowan, Okinawa, Japan, May 20–24, 2024. – P. 417–420. DOI: 10.23919/EMCJapan/APEMCOkinaw58965.2024.10585095.

33. Пат. на изобретение №8879230 США. IC EMI filter with ESD protection incorporating LC resonance tanks for rejection enhancement / A.Z. Wang, W.C. Wu, S. Wang, N. Zhang. – МПК H02H9/00; заявл. 29.01.2013; опубл. 04.11.2014.
34. Пат. на изобретение №U8098495 B2 США. Electromagnetic interference filter / H.Y. Ho. – МПК H05K7/00; №13/018366; заявл. 31.01.2011; опубл. 17.01.2012.
35. Пат. на изобретение №5592134 США. Integrated EMI filter and thermal heat sink / M.P.D. McCarthy. – МПК H05K9/00, H05K7/20, H05K009/00, H01P001/22; заявл. 07.05.1990; опубл. 09.07.1991.
36. Zhao, L. An integrated common mode and differential mode transmission line RF-EMI filter / L. Zhao, R. Chen, J.D. van Wyk // 35th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference. – Germany, Aachen, June 20–25, 2004. – P. 4522–4526.
37. Rong, H. Study of breakdown characteristics of 4H–SiC Schottky diode with improved 2–step mesa junction termination extension / H. Rong, Z. Mohammadi, Y.K. Sharma, et al. // 16th European Conference on Power Electronics and Applications. – Lappeenranta, Finland, August 26–28, 2014. – P. 1–10.
38. Brown, S. High–frequency gas–discharge breakdown // Proceedings of the IRE. – 1951. – Vol. 39, no. 12. – P. 1493–1501.
39. Заболоцкий, А.М. Теоретические основы модальной фильтрации / А.М. Заболоцкий, Т.Р. Газизов // Техника радиосвязи. – 2014. – № 3. – С. 79–83.
40. Gazizov, A.T. UWB pulse decomposition in simple printed structures / A.T. Gazizov, A.M. Zabolotsky, T.R. Gazizov // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. – 2016. – Vol. 58, no. 4. – P. 1136–1142.
41. Газизов, Т.Р. Модальное разложение импульса в отрезках связанных линий как новый принцип защиты от коротких импульсов / Т.Р. Газизов, А.М. Заболоцкий // Технологии ЭМС. – 2006. – № 4 (19). – С. 40–44.
42. Самотин, И.Е. Устройства защиты вычислительной техники и систем управления путем модального разложения импульсов помех в кабельных и полосковых структурах: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.05 / Самотин Иван Евгеньевич. – Томск, 2011. – 289 с.
43. Бевзенко, И.Г. Модальная фильтрация как средство защиты от сверхкоротких импульсов / И.Г. Бевзенко, А.М. Заболоцкий // Материалы 4–й Международной научно–практической конференции "Электронные средства и системы управления. Опыт инновационного развития". – Томск, 31 октября–3 ноября 2007. – С. 258–260.

44. Surovtsev, R.S. 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, et al. // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. – 2017. – Vol. 59, no. 6. – P. 1864–1871.
45. Sagiyeva, I.Y. Simple modal filter based on microstrip line / I.Y. Sagiyeva, T.R. Gazizov // Electrica. – 2023. – Vol. 23, no. 3. – P. 516–521.
46. Sagiyeva, I.Y. Modal filter based on a microstrip line with two side conductors grounded at both ends / I.Y. Sagiyeva, Y.S. Zhechev, Z.M. Kenzhegulova, et al. // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. – 2023. – Vol. 65, no. 5. – P. 1371–1378. DOI: 10.1109/TEMС.2023.3275388.
47. Пат. на изобретение №2750393 РФ. Способ трассировки проводников модального фильтра / А.О. Белоусов, Т.Р. Газизов. – Заявка №2020130253; заявл. 15.09.20; опубл. 28.06.21; Бюл. №19.
48. Носов, А.В. Ослабление влияния электростатического разряда витком меандровой линии с лицевой связью // Системы управления, связи и безопасности. – 2023. – № 2. – С. 1–22. – DOI: 10.24412/2410-9916-2023-2-1-22.
49. Malygin, K.P. Ultrashort pulse decomposition in a turn of a meander microstrip line with two passive conductors / K.P. Malygin, A.V. Nosov, R.S. Surovtsev // Microwave Review. – 2022. – Vol. 28, no. 2. – P. 28–32.
50. Заболоцкий, А.М. Способы совершенствования передачи импульсных сигналов в межсоединениях элементов и устройств вычислительной техники и систем управления: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.05 / Заболоцкий Александр Михайлович. – Томск, 2010. – 210 с.
51. Пат. на изобретение №2431897 РФ. Устройство для нарушения работы аппаратуры за счет разложения и восстановления импульсов / Т.Р. Газизов, А.М. Заболоцкий, И.Г. Бевзенко [и др.]. – Опубл. 20.10.11; Бюл. №29.
52. Пат. на полезную модель №79355 РФ. Модальный фильтр / Т.Р. Газизов, А.М. Заболоцкий [и др.]. – Заявка №2008127527/22; заявл. 07.07.08; опубл. 27.12.08; Бюл. №36.
53. Пат. на изобретение №2603851 РФ. Способ трассировки печатных проводников с дополнительным диэлектриком для цепей с резервированием / Т.Р. Газизов, П.Е. Орлов, В.Р. Шарафутдинов [и др.]. – Заявка №2015129263/07; заявл. 16.07.15; опубл. 10.12.16; Бюл. №34.

54. Заболоцкий, А.М. Электромагнитная совместимость: модальные технологии: учебное пособие / А.М. Заболоцкий, Т.Р. Газизов. – Томск: Изд-во Том. гос. ун-та систем упр. и радиоэлектроники, 2018. – 132 с.
55. Самойличенко, М.А. Влияние соединения опорных проводников на разложение сверхкороткого импульса в модальном фильтре на двухсторонней печатной плате / М.А. Самойличенко, Т.Р. Газизов // Журнал радиоэлектроники. – 2021. – № 12. – С. 1–19.
56. Заболоцкий, А.М. Модальные фильтры для защиты бортовой радиоэлектронной аппаратуры космического аппарата: монография / А.М. Заболоцкий, Т.Р. Газизов. – Томск: Изд-во Том. гос. ун-та систем упр. и радиоэлектроники, 2013. – 151 с.
57. Черникова, Е.Б. Зеркально-симметричные модальные фильтры и меандровые линии: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.05 / Черникова Евгения Борисовна. – Томск, 2021. – 241 с.
58. Черникова, Е.Б. Оптимизация параметров зеркально-симметричного модального фильтра по двум критериям / Е.Б. Черникова, А.О. Белоусов // Материалы всероссийской научно-технической конференции с международным участием студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР-2017». – Томск, 10–12 мая 2017. – С. 95–97.
59. Черникова, Е.Б. Оптимизация параметров зеркально-симметричного модального фильтра по двум критериям / Е.Б. Черникова, А.О. Белоусов // Материалы Всероссийской научно-технической конференции с международным участием студентов, аспирантов и молодых ученых "Научная сессия ТУСУР-2017". – Томск, 10–12 мая 2017. – С. 95–97.
60. Белоусов, А.О. Трехкритериальная оптимизация как ресурс для совершенствования зеркально-симметричного модального фильтра / А.О. Белоусов, Е.Б. Черникова, А.М. Заболоцкий // Материалы 23-й международной научно-практической конференции "Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири (Сибресурс-23-2017)". – Томск, 24 ноября 2017. – С. 150–154.
61. Свид. о гос. регистрации программы для ЭВМ №2019619026 РФ. Оптимизация четырехпроводного зеркально-симметричного модального фильтра / Е.Б. Черникова, А.О. Белоусов, А.М. Заболоцкий, Т.Р. Газизов. – Заявка №2019617572; зарег. 09.07.19.
62. Черникова, Е.Б., Белоусов А.О. Согласование зеркально-симметричного модального фильтра / Е.Б. Черникова, А.О. Белоусов // Тезисы докладов научно-технической конференции молодых специалистов "Электронные и электромеханические системы и устройства". – Томск, 12–13 апреля 2018. – С. 95–97.

63. Пат. на изобретение №2624465 РФ. Четырехпроводная зеркально–симметричная структура, защищающая от сверхкоротких импульсов / А.М. Заболоцкий, Т.Р. Газизов, С.П. Куксенко. – Заявка №2015137546; заявл. 02.09.15; опубл. 04.07.17; Бюл. №19.
64. Заболоцкий, А.М. Использование зеркальной симметрии для совершенствования модальной фильтрации // Доклады ТУСУР. – 2015. – № 2 (36). – С. 41–44.
65. Белоусов, А.О. Каскадирование трехпроводных модальных фильтров на основе структур с круговым сечением и микрополосковой линии // Радиотехника и электроника. – 2023. – № 5 (68). – С. 498–506. DOI: 10.31857/S0033849423050029.
66. Vlasova, N.O. Parametric Optimization of Modal Filters with a Circular Cross Section in the Real Geometric and Electrophysical Parameters / N.O. Vlasova, A.O. Belousov // Proc. of 23 International conference on micro/nanotechnologies and electron devices (EDM 2022). – Erlagol, Altai, June 30–July 4, 2022. – P. 1–5. DOI: 10.1109/EDM55285.2022.9855138.
67. Vlasova, N.O. Optimization of protective cables in the range of real geometric parameters / N.O. Vlasova, A.O. Belousov // Journal of Physics: conference Series [URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/2291/1/012012/pdf>]. – 2022. – Vol. 2291, no. 1. – P. 1–6. DOI: 10.1088/1742-6596/2291/1/012012.
68. CST Studio Suite [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.3ds.com/ru/produkty-i-uslugi/simulia/produkty/cst-studio-suite/> (дата обращения: 12.04.2025).
69. Ansys | Engineering Simulation Software [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.ansys.com/> (дата обращения: 10.05.2025).
70. Куксенко, С.П. Разработка программного обеспечения для моделирования радиоэлектронных средств с учетом электромагнитной совместимости в ТУСУР / С.П. Куксенко, Т.Р. Газизов, А.А. Квасников, А.В. Демаков и др. // Наноиндустрия. – 2023. – Т. 16. № S9–1 (119). – С. 170–178.
71. Jackson, J.D. Classical electrodynamics // New York: John Wiley & Sons, 1962. – 641 p.
72. Djordjevic, A.R. Time–domain response of multiconductor transmission lines / A.R. Djordjevic, T.K. Sarkar, R.F. Harrington // IEEE Proceedings. – 1987. – Vol. 75, no. 6. – P. 743–764.
73. Газизов, Т.Р. Уменьшение искажений электрических сигналов в межсоединениях и преднамеренных электромагнитных помех: дис. ... д-ра техн. наук: 05.12.07 / Газизов Тальгат Рашитович. – Томск, 2010. – 351 с.
74. DFS Algorithm [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://e-maxx.ru/algo/dfs> (дата обращения: 12.08.2024).

75. Заболоцкий, А.М. Временной отклик многопроводных линий передачи / А.М. Заболоцкий, Т.Р. Газизов. – Томск: Изд-во Том. гос. ун-та, 2007. – 152 с.
76. Норенков, И.П. Автоматизированное проектирование / И.П. Норенков. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000. – 320 с.
77. Shiryaev, V. Homogeneous algorithm for global optimization with adaptive model of objective function / V. Shiryaev, A. Tsybulevsky // 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing. – Chelyabinsk, 2016. – P. 1–4. DOI: 10.1109/ICIEAM.2016.7911617.
78. Belousov, A.O. Systematic approach to optimization for protection against intentional ultrashort pulses based on multiconductor modal filters / A.O. Belousov, T.R. Gazizov // Complexity. – 2018. – Vol. 2018. – Art. 5676504. – 15 p. DOI: 10.1155/2018/5676504.
79. Белоусов, А.О. Анализ и оптимизация многопроводных структур с модальным разложением для обработки импульсных сигналов: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.05 / Белоусов Антон Олегович. – Томск, 2020. – 178 с.
80. Jones, E.M. Coupled-strip-transmission-line filters and directional couplers / E.M. Jones, J.T. Bolljahn // IRE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 1956. – Vol. 4, no. 2. – P. 75–81.
81. Amemiya, H. Time-domain analysis of multiple parallel transmission lines // RCA Review. – 1967. – Vol. 28. – P. 241–276.
82. Белоусов, А.О., Гордеева В.О. Оптимизация помехозащитных структур с модальным разложением: монография / А.О. Белоусов, В.О. Гордеева. – Томск: Изд-во ТУСУР, 2023. – 136 с.
83. 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 // 2017 Siberian Symposium on Data Science and Engineering (SSDSE). – Novosibirsk, Russia, April 12–13, 2017. – P. 69–73. DOI: 10.1109/SSDSE.2017.
84. Holland, J.H. Adaptation in Natural and Artificial Systems / J.H. Holland. – Ann Arbor: University of Michigan Press, 1975. – 232 p.
85. Газизов, Р.Р. Математическая модель, численный метод и комплекс программ для выявления и локализации экстремумов сигнала в многопроводных линиях передачи: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.18 / Газизов Руслан Рифатович. – Томск, 2018. – 224 с.
86. Bäck, T. Michalewicz Z. Handbook of Evolutionary Computation / T. Bäck, D.B. Fogel. – Oxford: Oxford University Press, 1997. – 454 p.

87. Hansen, N. Python: module barecmaes2 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.cmap.polytechnique.fr/~nikolaus.hansen/barecmaes2.html> (дата обращения: 20.06.2024).
88. Pereira, V. Python: Random Search algorithm [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://github.com/Valdecy/pyMetaheuristic/blob/main/pyMetaheuristic/algorithm/random_search.py (дата обращения: 18.06.2024).
89. Anderson, R.L. Recent Advances in Finding Best Operating Conditions // *Journal of the American Statistical Association*. – 2012. – Vol. 107, no. 498. – P. 789–798.
90. Przybylski, A., Gandibleux X. Multi-objective branch and bound / A. Przybylski, X. Gandibleux // *European Journal of Operational Research*. – 2017. – Vol. 260. – P. 856–872. DOI: 10.1016/j.ejor.2017.01.032.
91. Morrison, D. Branch-and-bound algorithms: A survey of recent advances in searching, branching, and pruning / D. Morrison, S. Jacobson, J. Sauppe, E. Sewell // *Discrete Optimization*. – 2016. – Vol. 19. – P. 79–102.
92. Van Laarhoven, P.J. Simulated Annealing: Theory and Applications / P.J. Van Laarhoven, E.H. Aarts. – Springer, 1987.
93. Kirkpatrick, S. Optimization by Simulated Annealing / S. Kirkpatrick, C.D.Jr. Gelatt, M.P. Vecchi // *Science*. – 1983. – Vol. 220, no. 4598. – P. 671–680.
94. Endres, S.C. A Simplicial Homology Algorithm for Lipschitz Optimization: Dissertation for the Degree Master of Engineering / S.C. Endres. – Pretoria: University of Pretoria, 2016. – 96 p.
95. Прасолов, В.В. Элементы теории гомологий / В.В. Прасолов. – М.: МЦНМО, 2006. – 448 с.
96. Sperner, E. Neuer Beweis für die Invarianz der Dimensionszahl und des Gebietes // *Abhandlungen aus dem Mathematischen Seminar der Universität Hamburg*. – 1928. – Vol. 6. – P. 265–272. DOI: 10.1007/BF02940617.
97. Соболев, И.М. Распределение точек в кубе и приближенное вычисление интегралов // *вычислительная математика и математическая физика в СССР*. – 1967. – № 7. – С. 86–112.
98. Berblinger, M. Monte Carlo Integration with Quasi-random Numbers: Some Experience / M. Berblinger, C. Schlier // *Computer Physics Communications*. – 1991. – Vol. 66, no. 2–3. – P. 157–166.

99. Endres, S.C. SHGO: Python Implementation of the Simplicial Homology Global Optimisation Algorithm [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://bitbucket.org/upiamcompthermo/shgo> (дата обращения: 11.04.2024).
100. Endres, S.C. A Simplicial Homology Algorithm for Lipschitz Optimisation / S.C. Endres, C. Sandrock, W.W. Focke // Journal of Global Optimization. – 2018. – Vol. 72. – P. 1–38. DOI: 10.1007/s10898-018-0645-y.
101. Gordeyeva, V.O. Optimization of a 3-conductor modal filter with a circular cross section by evolutionary strategies with limitations / V.O. Gordeyeva, A.O. Belousov, N.O. Vlasova // Proceedings of 23rd International Conference on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM 2022). – Erlagol, Altai, 30 June – 4 July 2022. – P. 1–5. DOI: 10.1109/EDM55285.2022.9855187.
102. Belousov, A.O. Breaking the symmetry of cable structures as an instrument for improving modal decomposition to protect critical equipment against UWB pulses / A.O. Belousov, N.O. Vlasova, V.O. Gordeyeva, T.R. Gazizov // Symmetry. – 2022. – Vol. 14, no. 6, Art. 1228. – 34 p. DOI: 10.3390/sym14061228.
103. Белоусов, А.О. Сравнение генетического алгоритма и эволюционных стратегий при оптимизации полосковых модальных фильтров / А.О. Белоусов, В.О. Гордеева // Радиотехника и электроника. – 2023. – Т. 68, № 11. – С. 1079–1089. DOI: 10.31857/S0033849423110037.
104. Белоусов, А.О. Оптимизация модального фильтра на основе микрополосковой линии по частотным критериям / А.О. Белоусов, В.О. Гордеева, Г.Ю. Ким // Системы управления, связи и безопасности. – 2023. – № 4. – С. 219–242. DOI: 10.24412/2410-9916-2023-4-219-242.
105. Свид. о гос. регистрации программы для ЭВМ №2024660221 РФ. Оптимизация трехпроводного модального фильтра на основе микрополосковой линии по критерию максимизации полосы пропускания полезного сигнала / В.О. Гордеева, А.О. Белоусов. – Заявка №2024618752; зарег. 03.05.24.
106. Свид. о гос. регистрации программы для ЭВМ №2024660650 РФ. Оптимизация трехпроводного модального фильтра на основе микрополосковой линии по критерию контроля полосы пропускания полезного сигнала / В.О. Гордеева, А.О. Белоусов. – Заявка №2024618770; заявл. 23.04.24; зарег. 08.05.24.
107. Гордеева, В.О. Оптимизация конструкции модального фильтра при распространении сверхкоротких импульсов с двух направлений / В.О. Гордеева, А.О. Белоусов // Докл. Том. гос. ун-та систем упр. и радиоэлектроники. – 2024. – № 3 (27). – С. 48–55.

108. Свид. о гос. регистрации программы для ЭВМ №2024688250 РФ. Оптимизация трехпроводного модального фильтра на основе микрополосковой линии при распространении сверхширокополосной помехи с двух направлений / В.О. Гордеева, А.О. Белоусов. – Заявка №2024687280; заявл. 14.11.24; зарег. 26.11.24.
109. Гордеева, В.О. Оптимизация полосковых модальных фильтров с сохранением целостности полезных сигналов // Радиотехника. (принято к публикации)
110. Свид. о гос. регистрации программы для ЭВМ №2025664701 РФ. Оптимизация модального фильтра на основе трехпроводной микрополосковой линии по глазковому критерию / В.О. Гордеева. – Заявка №2025663737; заявл. 29.05.25; зарег. 05.06.25.
111. Белоусов, А.О. Оптимизация модального фильтра с лицевой связью по алгоритму эволюционных стратегий с ограничениями / А.О. Белоусов, В.О. Гордеева // Материалы XVII Международной научно–практической конференции «Электронные средства и системы управления». – Томск, ноябрь 19–21, 2021. – С. 13–17.
112. Gordeyeva, V.O. Optimization of a broad–side coupling modal filter by evolutionary strategy algorithm with setting the ranges of the optimization parameters / V.O. Gordeyeva, A.O. Belousov // Journal of Physics: Conference Series. – 2022. – Vol. 2291, no. 1. – P. 1–8. – DOI: 10.1088/1742–6596/2291/1/012014.
113. Свид. о гос. регистрации программы для ЭВМ №2022682728 РФ. Оптимизация эволюционными стратегиями с ограничениями трехпроводного модального фильтра с боковой связью / В.О. Гордеева, А.О. Белоусов. – Заявка №2022682305; заявл. 22.11.22; зарег. 25.11.22.
114. Гордеева, В.О. Разработка гибридного алгоритма оптимизации помехозащитных структур с модальным разложением / В.О. Гордеева, А.О. Белоусов // Радиотехника. (принято к публикации)
115. Gordeyeva, V.O. Optimization of strip modal filters by random search method / V.O. Gordeyeva, A.O. Belousov // Proceedings of International Siberian conference on control and communications (SIBCON–2022). – Russia, Tomsk, November 17–19, 2022. – P. 1–5, DOI: 10.1109/SIBCON56144.2022.10002986.
116. Свид. о гос. регистрации программы для ЭВМ №2023661306 РФ. Оптимизация трехпроводного модального фильтра на основе микрополосковой линии методом случайного поиска / В.О. Гордеева, А.О. Белоусов. – Заявка №2023660003; заявл. 19.05.23; зарег. 30.05.23.
117. Gordeyeva, V.O. Multicriteria Optimization of Modal Filters Using Evolutionary Algorithms and Random Search Method / V.O. Gordeyeva, A.O. Belousov // Proc. of 24 Int. conf. on

- micro/nanotechnologies and electron devices (EDM 2023). – Erlagol, Altai, June 29–July 3, 2023. – P. 1–6. – DOI: 10.1109/EDM58354.2023.10225018.
118. Свид. о гос. регистрации программы для ЭВМ №2023661858 РФ. Многокритериальная оптимизация трехпроводного модального фильтра на основе микрополосковой линии эволюционными стратегиями / В.О. Гордеева, А.О. Белоусов. – Заявка №2023619949; заявл. 19.05.23; зарег. 02.06.23.
 119. Свид. о гос. регистрации программы для ЭВМ №2023662109 РФ. Многокритериальная оптимизация трехпроводного модального фильтра на основе микрополосковой линии методом случайного поиска / В.О. Гордеева, А.О. Белоусов. – Заявка №2023660005; заявл. 22.05.23; зарег. 06.06.23.
 120. Белоусов, А.О. Анализ характеристик трёхпроводного модального фильтра в экстремальных условиях / А.О. Белоусов, В.О. Гордеева // Системы управления, связи и безопасности. – 2022. – № 4. – С. 64–82. DOI: 10.24412/2410–9916–2022–4–64–82.
 121. Belousov, A. Optimization of Microstrip Structures with Modal Phenomena Using Metaheuristic Iterative Global Optimization Algorithms / A. Belousov, V. Gordeyeva // IEEE Electromagnetic Compatibility Magazine. – 2025. – Vol. 14, no. 2. – P. 51–58, DOI: 10.1109/MEMC.2025.11134162.
 122. Свид. о гос. регистрации программы для ЭВМ №2025664990 РФ. Оптимизация модального фильтра на основе трехпроводной микрополосковой линии методом имитации отжига / В.О. Гордеева. – Заявка №2025663728; заявл. 29.05.25; зарег. 09.06.25.
 123. Свид. о гос. регистрации программы для ЭВМ №2025665785 РФ. Оптимизация модального фильтра на основе трехпроводной микрополосковой линии методом ветвей и границ / В.О. Гордеева. – Заявка №2025663771; заявл. 29.05.25; зарег. 19.06.25.
 124. Belousov, A.O. Optimization of Protective Devices with Modal Phenomena Using Global Optimization Algorithms / A.O. Belousov, V.O. Gordeyeva // Mathematical Models and Computer Simulations. – 2024. – Vol. 16, Suppl. 1. – P. S12–S35.
 125. Belousov, A.O. Basic Approaches to Optimization of Round and Flat Cable Structures for Protection against Ultra-Wideband Interference / A.O. Belousov, V.O. Gordeyeva // IEEE Letters on Electromagnetic Compatibility Practice and Applications. – 2025. – Vol. 7, no. 2. – P. 55–60. DOI: 10.1109/LEMCPA.2025.3554588.
 126. Свид. о гос. регистрации программы для ЭВМ №2022684197 РФ. Оптимизация эволюционными стратегиями с ограничениями трехпроводного модального фильтра с круговым сечением / В.О. Гордеева, А.О. Белоусов. – Заявка №2022682332; заявл. 22.11.22; зарег. 12.12.22.

127. Kim, G.Yu. Enhancing the Efficiency of Optimization of Modal Filters Based on Microstrip Lines Using Regression Machine Learning Models / G.Yu. Kim, A.O. Belousov, V.O. Gordeyeva // Proc. of 3rd International Conference on Problems of Informatics, Electronics and Radio Engineering (PIERE). – Russia, Novosibirsk, November 15–17, 2024. – P. 880–885. – DOI: 10.1109/PIERE62470.2024.10805055.
128. Белоусов, А.О. Применение современных моделей машинного обучения для повышения эффективности оптимизации полосковой и кабельной помехозащитных структур / А.О. Белоусов, Г.Ю. Ким, В.О. Гордеева // Радиотехника. – 2025. – № 4 (89). – С. 61–77. DOI: 10.18127/j00338486–202504–06.
129. Shibita, S. Optical Reflection Interference Equalization for Single–Wavelength Bidirectional WDM–PON Transmission System / S. Shibita, D. Hisano, K. Maruta, et al. // IEEE Photonics Journal. – 2021. – Vol. 13, no. 1. – P. 1–15. DOI: 10.1109/JPHOT.2020.3045049.
130. Rapp, L. Performance Impact of Signal Reflections in a Single–Fiber Bidirectional System / L. Rapp, F. Azendorf, M. Eiselt // IEEE Photonics Technology Letters. – 2021. – Vol. 33, no. 24. – P. 1411–1414. DOI: 10.1109/LPT.2021.3125524.
131. Peng, Z. Ion Electric Propulsion System Electric Breakdown Problems: Causes, Impacts and Protection Strategies / Z. Peng, Z. Li, F. Song, et al. // IEEE Access. – 2023. – Vol. 11. – P. 97340–97352. DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3312719.
132. Molga, M., Smutnicki, C. Test functions for optimization needs [Электронный ресурс]. – 2005. – Режим доступа: <http://www.zsd.ict.pwr.wroc.pl/files/docs/functions.pdf> (дата обращения: 05.06.2025).
133. Ackley, D.H. A connectionist machine for genetic hillclimbing / D.H. Ackley. – New York: Springer, 1987. – 260 p.
134. Ландсберг, Г.С. Элементарный учебник физики. Механика. Теплота. Молекулярная физика / Г.С. Ландсберг. – М.: Наука, 1985. – 606 с.
135. Новоттник, М. Высокотемпературные электронные модули на основе органических плат // Технологии в электронной промышленности. – 2009. – № 8. – С. 51–55.
136. Li, H.-M. Frequency and temperature dependence of the dielectric properties of a PCB substrate for advanced packaging applications / H.-M. Li, C.-H. Ra // Journal of the Korean Physical Society. – 2009. – Vol. 11, no. 3. – P. 1096–1099.
137. Fisher, R.A. Statistical Methods for Research Workers // New York: Springer, 1992. – P. 66–70. DOI:10.1007/978-1-4612-4380-9_6.
138. Montgomery, D.C. Design and Analysis of Experiments. 10th ed. – Wiley, 2020. – 688 p.

139. Гордеева, В.О. Экспериментальные исследования модального фильтра на основе круглой кабельной структуры / В.О. Гордеева, А.О. Белоусов // Системы управления, связи и безопасности. – 2024. – № 2. – С. 173–192. DOI: 10.24412/2410–9916–2024–2–173–192.
140. Пат. на изобретение №2828831 РФ. Способ трассировки проводников модального фильтра на основе кабельной структуры / А.О. Белоусов, В.О. Гордеева. – Заявка №2024112422; заявл. 07.05.24; опубл. 21.10.24; Бюл. №30.
141. Гордеева, В.О. Экспериментальные исследования модального фильтра на основе плоского кабеля / В.О. Гордеева, А.О. Белоусов // Радиотехника. (принято к публикации)

ПРИЛОЖЕНИЕ А
(СПРАВОЧНОЕ)
КОПИИ АКТОВ О ВНЕДРЕНИИ



«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по научной работе
и инновациям ФГАОУ ВО ТУСУРа

д.т.н., доцент

Куксенко С.П.

о внедрении (использовании) результатов диссертационной работы
Гордеевой Виктории Олеговны

Комиссия в составе:

– директора научно-исследовательского института микроэлектронных систем (НИИ МЭС), руководителя СЧ ОКР (шифр «САПР СВЧ ИС – Б»), д.т.н. Бабака Л.И.

– ведущего научного сотрудника научно-исследовательской лаборатории «Безопасность и электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств» (НИЛ «БЭМС РЭС»), ответственного исполнителя СЧ ОКР (шифр «САПР СВЧ ИС – Б»), к.т.н. Комнатнова М.Е.

составила настоящий акт, подтверждающий факт использования в СЧ ОКР (шифр «САПР СВЧ ИС – Б») следующих результатов диссертационной работы Гордеевой В.О.:

1. Комплексный обзор методов и алгоритмов оптимизации в современных САПР, а также их функциональных возможностей с детализацией их формул и псевдокодов.

2. Обзор программных средств задания целевых функций и отдельных критериев в их составе в современных САПР.

3. Описание предполагаемого математического обеспечения модуля параметрической оптимизации СВЧ ИС с выбором конкретных алгоритмов для дальнейшей реализации.

4. Разработка тестовых примеров для испытаний математического обеспечения модуля параметрической оптимизации СВЧ ИС.

Указанные результаты позволили выполнить эскизный проект в рамках договора № 998/531-Д/СК-ТУСУР (2025–2026 гг.) по выполнению СЧ ОКР.

Директор НИИ МЭС, руководитель СЧ ОКР
(шифр «САПР СВЧ ИС – Б»), д.т.н.

 Л.И. Бабак

Ведущий научный сотрудник НИЛ «БЭМС РЭС»,
ответственный исполнитель СЧ ОКР (шифр
«САПР СВЧ ИС – Б»), к.т.н.

 М.Е. Комнатнов



«УТВЕРЖДАЮ»

И.о. проректора по учебной работе
и международной деятельности
ФГАОУ ВО ТУСУРа

к.ф-м.н., доцент
Нариманова Г.Н.

АКТ

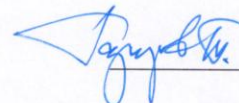
внедрения в учебный процесс результатов диссертационной работы
Гордеевой Виктории Олеговны

Мы, нижеподписавшиеся, заведующий кафедрой телевидения и управления (ТУ), д.т.н. Газизов Т.Р. и заместитель заведующего кафедрой ТУ по учебной работе, Бусыгина А.В. настоящим актом подтверждаем факт внедрения в учебный процесс кафедры ТУ следующих результатов диссертационной работы Гордеевой В.О.:

1. Построенные геометрические и схемные модели полосковых и кабельных линий.
2. Вычисленные матрицы погонных параметров полосковых и кабельных линий.
3. Вычисленные временные отклики на помеховое воздействие в полосковых и кабельных линиях.
4. Оптимизированные параметры полосковых и кабельных линий с использованием генетического алгоритма, эволюционных стратегий и метода случайного поиска.

Указанные результаты использованы при проведении практических и лабораторных работ по дисциплинам «Помехоподавляющие фильтры» и «Противодействие беспилотным летательным аппаратам и их защита» группам бакалавриата радиотехнического факультета по направлению «Радиотехника» в 2023–2024 и 2024–2025 учебных годах.

Заведующий каф. ТУ

 Т.Р. Газизов

Заместитель заведующего каф. ТУ по учебной работе

 А.В. Бусыгина

 Проректор по НРИИ
Куксенко С.П.



«УТВЕРЖДАЮ»

Ректор ТУСУР

Рулевский В.М.

внедрения (использования) результатов диссертационной работы

Гордеевой Виктории Олеговны

Мы, нижеподписавшиеся, заведующий кафедрой телевидения и управления (ТУ), д.т.н. Газизов Т.Р. и руководитель НИР по грантам РНФ № 22-29-01331, №24-29-00578 и гранту Президента Российской Федерации МК-900.2022.4, к.т.н. Белоусов А.О., настоящим актом подтверждаем факт использования следующих результатов диссертационной работы Гордеевой В.О. при выполнении НИР:

1. Моделирование и оптимизация полосковых и кабельных защитных структур алгоритмами глобальной оптимизации для защиты радиоэлектронных средств в составе беспилотного летательного аппарата Darwin 129. Указанные результаты использованы в отчёте по проекту в рамках гранта РНФ № 22-29-01331 «Методология обеспечения электромагнитной совместимости средств функционального поражения электромагнитным излучением с другими радиоэлектронными средствами в составе комплекса противодействия беспилотным летательным аппаратам» (этап 2, 2023 г.).

2. Анализ и систематизация известных методов оптимизации, а также распространенных конфигураций полосковых и кабельных защитных структур. Оптимизация модального фильтра (МФ) на основе 3-проводной микрополосковой линии (МПЛ) методами ветвей и границ, имитации отжига и симплициальной гомологии. Оптимизация МФ на основе 3-проводной МПЛ по частотным критериям и амплитудному при распространении сверхширокополосной помехи с двух направлений. Входные данные для обучения моделей машинного обучения, полученные посредством оптимизации МФ на основе 3-проводной МПЛ, МФ на основе 2-проводной полосковой линии с лицевой связью и МФ на основе 2-проводного плоского кабеля по амплитудному критерию посредством генетического алгоритма (ГА), эволюционных стратегий (ЭС) и метода случайного поиска (СП). Указанные результаты использованы в отчёте по проекту в рамках гранта РНФ № 24-29-00578 «Интеллектуальная оптимизация пассивных полосковых и кабельных структур для защиты радиоэлектронных средств от сверхширокополосных помех с использованием машинного обучения» (этап 1, 2024 г.).

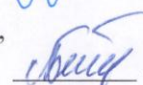
3. Сравнительный анализ работы ГА и ЭС на примере МФ на основе 3-проводной МПЛ и 2-проводной полосковой линии с лицевой связью. Вариант модификации алгоритма ЭС путем реализации возможности задания ограничений оптимизируемых параметров. Параметрическая оптимизация алгоритмом СП двух МФ по амплитудному критерию. Методика

оптимизации МФ с круговым сечением с помощью ЭС. Апробация методики посредством оптимизации двух МФ на основе 3-проводного круглого кабеля и МФ на основе 4-проводного круглого кабеля посредством ЭС. Создание макета МФ на основе круглой 3-проводной кабельной структуры из доступных материалов, а также измерение его характеристик. Указанные результаты использованы в отчёте по проекту в рамках гранта Президента Российской Федерации МК-900.2022.4 «Комплексное исследование кабельных и полосковых структур с модальными явлениями для защиты критичного оборудования от сверхкоротких импульсов» (этапы 1–2, 2022–2023 г.).

Заведующий каф. ТУ

 Т.Р. Газизов

Руководитель НИР по грантам РНФ № 22-29-01331,
№24-29-00578 и гранту Президента Российской
Федерации МК-900.2022.4

 А.О. Белоусов



Проректор по НИИ
Куксенко С.П.

«УТВЕРЖДАЮ»
Ректор ТУСУР

Рулевский В.М.

АКТ

внедрения (использования) результатов диссертационной работы

Гордеевой Виктории Олеговны

Мы, нижеподписавшиеся, заведующий кафедрой телевидения и управления (ТУ), д.т.н. Газизов Т.Р. и руководитель проектов в рамках госзадания FEWM-2020-0041, FEWM-2022-0001 и FEWM-2024-0005, д.т.н. Заболоцкий А.М., настоящим актом подтверждаем факт использования следующих результатов диссертационной работы Гордеевой В.О. при выполнении НИР:

1. Алгоритм эволюционных стратегий (ЭС) с реализованной возможностью задания диапазонов изменения оптимизируемых параметров. Одно- и двухкритериальная оптимизация генетическим алгоритмом (ГА) и ЭС модальных фильтров (МФ) на основе 3-проводной микрополосковой линии (МПЛ) с использованием температурной модели в диапазоне от минус 50 до 150 °С, а также с учетом воздействия влаги. Указанные результаты использованы в отчёте по проекту в рамках госзадания FEWM-2020-0041 «Комплекс фундаментальных исследований по электромагнитной совместимости» (этап 2, 2021 г.).

2. Геометрические и схемные модели МФ на основе круглых и плоских кабелей для базы данных помехозащитных структур. Детальный анализ МФ на основе 3-проводной МПЛ и 2-проводной полосковой линии с лицевой связью по результатам одно- и двухкритериальной оптимизации посредством ГА, ЭС и случайного поиска. Указанные результаты использованы в отчёте по проекту в рамках госзадания FEWM-2022-0001 «Теоретические основы создания перспективных систем автоматизированного проектирования радиоэлектронной аппаратуры, работающей в экстремальных условиях» (этап 2, 2023 г.).

3. Изготовленный прототип МФ на основе плоской 2-проводной кабельной структуры из доступных материалов. Разработанные этапы прототипирования и измерения такого МФ. Сравнение результатов измерения и моделирования в системах квазистатического и электродинамического анализа. Указанные результаты использованы в отчёте по проекту в рамках госзадания FEWM-2024-0005 «Методология автоматизированного проектирования радиоэлектронной аппаратуры, функционирующей в условиях деструктивных воздействий» (этап 1, 2024 г.).

Заведующий каф. ТУ

Т.Р. Газизов

Руководитель проектов в рамках госзадания

А.М. Заболоцкий

Проректор по НИИ
Куксенко С.П.



«УТВЕРЖДАЮ»

Ректор ТУСУР

Рулевский В.М.

внедрения (использования) результатов диссертационной работы

Гордеевой Виктории Олеговны

Мы, нижеподписавшиеся, заведующий кафедрой телевидения и управления (ТУ), д.т.н. Газизов Т.Р. и руководитель НИР по гранту РФФ № 22-79-00187, к.т.н. Черникова Е.Б., настоящим актом подтверждаем факт использования следующих результатов диссертационной работы Гордеевой В.О. при выполнении НИР:

1. Разработка целевых функций для параметрической оптимизации асимметричных структур, на выходе которых наблюдаются комбинационные импульсы.

2. Выполнение оптимизации геометрических параметров асимметричных полосковых структур по критериям выравнивания временных интервалов между всеми импульсами разложения, в том числе между комбинационными, и минимизации максимальной амплитуды на выходе для их дальнейшего эффективного использования в реализации устройств защиты с эффектом модального разложения.

Указанные результаты использованы в отчёте по гранту РФФ № 22-79-00187 «Теоретическое обоснование появления комбинационных импульсов в многопроводных линиях передачи с неоднородным диэлектрическим заполнением» (этап 2, 2023 г.).

Заведующий каф. ТУ

Т.Р. Газизов

Руководитель НИР по гранту РФФ № 22-79-00187

Е.Б. Черникова

Проректор по НИИ
Куксенко С.П.

ПРИЛОЖЕНИЕ Б
(СПРАВОЧНОЕ)
КОПИИ ОХРАННЫХ ДОКУМЕНТОВ



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2781266

СПОСОБ ИСПОЛНЕНИЯ МОДАЛЬНОГО ФИЛЬТРА
С УГОЛКОВЫМ ПАССИВНЫМ ПРОВОДНИКОМ

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники" (RU)*

Авторы: *Белоусов Антон Олегович (RU), Газизов Тальгат Рашитович (RU), Гордеева Виктория Олеговна (RU), Власова Наталья Олеговна (RU)*

Заявка № 2022109601

Приоритет изобретения 12 апреля 2022 г.

Дата государственной регистрации

в Государственном реестре изобретений

Российской Федерации 11 октября 2022 г.

Срок действия исключительного права

на изобретение истекает 12 апреля 2042 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

документ подписан электронной подписью

Сертификат 68b03077e14e4903a94e6bd24345d5c7

Владелец: *Зубов Юрий Сергеевич*

Действителен с 26.05.2022 по 28.05.2023

Ю.С. Зубов

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2022682728

**Оптимизация эволюционными стратегиями с
ограничениями трехпроводного модального фильтра с
боковой связью**

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

Авторы: *Гордеева Виктория Олеговна (RU), Белоусов Антон
Олегович (RU)*



Заявка № 2022682305

Дата поступления 22 ноября 2022 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 25 ноября 2022 г.

*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат 68b80077e14e10f0a94edbd24145d5c7
Владелец **Зубов Юрий Сергеевич**
Действителен с 20.05.2022 по 26.05.2023

Ю.С. Зубов

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2022684197

**Оптимизация эволюционными стратегиями с
ограничениями трехпроводного модального фильтра с
круговым сечением**

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

Авторы: *Гордеева Виктория Олеговна (RU), Белоусов Антон
Олегович (RU)*



Заявка № 2022682332

Дата поступления 22 ноября 2022 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 12 декабря 2022 г.

*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат 68b80077e14e40f0a94edbd24145d5c7
Владелец **Зубов Юрий Сергеевич**
Действителен с 20.05.2022 по 26.05.2023

Ю.С. Зубов

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2023661306

**Оптимизация трехпроводного модального фильтра на
основе микрополосковой линии методом случайного
поиска**

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

Авторы: *Гордеева Виктория Олеговна (RU), Белоусов Антон
Олегович (RU)*



Заявка № 2023660003

Дата поступления 19 мая 2023 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 30 мая 2023 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат 429bba0fe3853164baf96f83b73b4aa7
Владелец **Зубов Юрий Сергеевич**
Действителен с 10.05.2023 по 02.08.2024

Ю.С. Зубов

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2023661858

**Многокритериальная оптимизация трехпроводного
модального фильтра на основе микрополосковой линии
эволюционными стратегиями**

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

Авторы: *Гордеева Виктория Олеговна (RU), Белоусов Антон
Олегович (RU)*



Заявка № 2023619949

Дата поступления 19 мая 2023 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 02 июня 2023 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат 429b6a0fe3853164baf96f83b73b4aa7
Владелец **Зубов Юрий Сергеевич**
Действителен с 10.05.2023 по 02.08.2024

Ю.С. Зубов

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2023662109

**Многокритериальная оптимизация трехпроводного
модального фильтра на основе микрополосковой линии
методом случайного поиска**

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

Авторы: **Гордеева Виктория Олеговна (KZ), Белоусов Антон
Олегович (RU)**



Заявка № 2023660005

Дата поступления 22 мая 2023 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 06 июня 2023 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат 429b6a0fe3853164baf96f83b73b4aa7
Владелец **Зубов Юрий Сергеевич**
Действителен с 10.05.2023 по 02.08.2024

Ю.С. Зубов

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2024660221

**Оптимизация трехпроводного модального фильтра на
основе микрополосковой линии по критерию
максимизации полосы пропускания полезного сигнала**

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

Авторы: *Гордеева Виктория Олеговна (RU), Белоусов Антон
Олегович (RU)*



Заявка № 2024618752

Дата поступления 23 апреля 2024 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 03 мая 2024 г.

*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат 429b6a0fe3853164baf96f83b73b4aa7
Владелец **Зубов Юрий Сергеевич**
Действителен с 10.05.2023 по 02.08.2024

Ю.С. Зубов

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2024660650

**Оптимизация трехпроводного модального фильтра на
основе микрополосковой линии по критерию контроля
полосы пропускания полезного сигнала**

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

Авторы: *Гордеева Виктория Олеговна (RU), Белоусов Антон
Олегович (RU)*



Заявка № 2024618770

Дата поступления 23 апреля 2024 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 08 мая 2024 г.

*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат: 429b6a0fe3853164baf96f683b73b4aa7
Владелец: **Зубов Юрий Сергеевич**
Действителен с 10.05.2023 по 02.08.2024

Ю.С. Зубов

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2024688250

**Оптимизация трехпроводного модального фильтра на
основе микрополосковой линии при распространении
сверхширокополосной помехи с двух направлений**

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

Авторы: *Гордеева Виктория Олеговна (RU), Белоусов Антон
Олегович (RU)*



Заявка № 2024687280

Дата поступления 14 ноября 2024 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 26 ноября 2024 г.

*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ

Сертификат 0692e7c1a6300b154f240f670bca2026

Владелец **Зубов Юрий Сергеевич**

Действителен с 10.07.2024 по 03.10.2025

Ю.С. Зубов

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2025664701

**Оптимизация модального фильтра на основе
трехпроводной микрополосковой линии по глазковому
критерию**

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

Автор(ы): *Гордеева Виктория Олеговна (RU)*



Заявка № 2025663737

Дата поступления 29 мая 2025 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 05 июня 2025 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ

Сертификат 0692e7b1a6300b154f2401670bca2026

Владелец **Зубов Юрий Сергеевич**

Действителен с 10.07.2024 по 03.10.2025

Ю.С. Зубов

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2025664990

**Оптимизация модального фильтра на основе
трехпроводной микрополосковой линии методом
имитации отжига**

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

Автор(ы): *Гордеева Виктория Олеговна (RU)*



Заявка № **2025663728**

Дата поступления **29 мая 2025 г.**

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ **09 июня 2025 г.**

*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

документ подписан электронной подписью

Сертификат 0692e7c1a6300bf54f2401670bca2026

Владелец **Зубов Юрий Сергеевич**

Действителен с 10.07.2024 по 03.10.2025

Ю.С. Зубов

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2025665785

**Оптимизация модального фильтра на основе
трехпроводной микрополосковой линии методом ветвей
и границ**

Правообладатель: *федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Томский государственный университет систем
управления и радиотехники» (RU)*

Автор(ы): *Гордеева Виктория Олеговна (RU)*



Заявка № 2025663771

Дата поступления 29 мая 2025 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 19 июня 2025 г.

*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ

Сертификат 0692e701a6300b154f2401670bca2026
Владелец **Зубов Юрий Сергеевич**
Действителен с 10.07.2024 по 03.10.2025

Ю.С. Зубов

ПРИЛОЖЕНИЕ В
(СПРАВОЧНОЕ)
ДОСТИЖЕНИЯ И НАГРАДЫ



ДИПЛОМ



За высокие достижения в учебной и научной деятельности
стипендии Президента Томского государственного
университета систем управления и радиоэлектроники
в 2024 / 2025 учебном году удостоена

Гордеева Виктория Олеговна

аспирантка кафедры телевидения и управления ТУСУРа



Президент ТУСУРа

А.А. Шелупанов

Ноябрь 2024

Конкурс
на назначение
стипендий
президента
ТУСУРа
2024 / 2025