

УДК 621.372

Подходы к обеспечению электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств в составе комплекса функционального поражения беспилотных летательных аппаратов мощным электромагнитным излучением

Белоусов А. О.

Постановка задачи: В силу постоянного развития современных радиоэлектронных средств (РЭС), все большее внимание привлекает обеспечение должной электромагнитной обстановки для их надлежащего функционирования. Как известно, электромагнитные помехи (ЭМП) могут оказывать негативное влияние на работу критически важных компонентов РЭС. В этой связи, актуальна разработка эффективных методов и технологий для защиты РЭС от деструктивного воздействия ЭМП. В рамках данной работы, в качестве источников ЭМП рассматриваются средства функционального поражения (ФП) электромагнитным излучением (ЭМИ) с использованием генераторов мощного сверхвысокочастотного (СВЧ) излучения в задачах противодействия беспилотным летательным аппаратам (БПЛА). Сложность обеспечения «избирательности» генераторов СВЧ-излучения в составе средств ФП ЭМИ, в отношении поражаемых РЭС, может привести к сбоям в работе внутренних компонентов радиоэлектронных систем (приемников, передатчиков, генераторов сигналов, устройств управления, стабилизации и формирования команд, электронно-вычислительных устройств и др.). Поэтому актуально обеспечение электромагнитной совместимости (ЭМС) средств ФП ЭМИ с другими РЭС в составе комплекса противодействия БПЛА, в частном случае, «своими» БПЛА, которые могут находиться в области поражения средств ФП ЭМИ. **Целью работы** является представление предварительных результатов по созданию, структурированию и детализации новых подходов к обеспечению ЭМС РЭС в составе комплекса противодействия БПЛА средствами ФП ЭМИ. **Используемые методы:** при моделировании использована система квазистатического моделирования, основанная на методе моментов, а при оптимизации – простой генетический алгоритм, модифицированный алгоритм эволюционных стратегий и метод случайного поиска (СП). Оптимизация выполнялась по целевой функции, состоящей из двух критериев: амплитудного и критерия согласования. При измерениях использованы осциллограф Tektronix DSA 8300 и векторный анализатор электрических цепей «Панорама» P4226. **Новизна:** впервые предлагается совокупность разноплановых подходов к обеспечению ЭМС РЭС в составе комплекса противодействия БПЛА средствами ФП ЭМИ, в том числе теория решения изобретательских задач (ТРИЗ) в составе диверсионного подхода; модальные фильтры (МФ) на основе кабельных структур; программные средства с реализованными возможностями оптимизации МФ посредством эволюционных алгоритмов и методом СП. **Результат:** Продемонстрирована приемлемость предложенных подходов на примерах использования некоторых из них. В части использования ТРИЗ в составе диверсионного подхода, сформулированы основные принципы ТРИЗ и диверсионного подхода, применимые к решению поставленной задачи. Сформулирован приближенный алгоритм использования ТРИЗ в составе диверсионного подхода в задаче обеспечения ЭМС БПЛА при воздействии средствами ФП ЭМИ и детализированы два сценария воздействия сверхширокополосных (СШП) помех на внешнюю антенну и систему электрического соединения БПЛА. В части модальной фильтрации, отмечены основные МФ, применимые к решению поставленной задачи. В ча-

Библиографическая ссылка на статью:

Белоусов А. О. Подходы к обеспечению электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств в составе комплекса функционального поражения беспилотных летательных аппаратов мощным электромагнитным излучением // Системы управления, связи и безопасности. 2023. № 3. С. 134-196. DOI: 10.24412/2410-9916-2023-3-134-196

Reference for citation:

Belousov A. O. Electromagnetic Compatibility of Unmanned Aerial Vehicles and Countermeasure Systems. *Systems of Control, Communication and Security*, 2023, no. 3, pp. 134-196 (in Russian). DOI: 10.24412/2410-9916-2023-3-134-196

сти МФ на основе кабельных структур, выполнены моделирование и измерение характеристик экспериментальных макетов таких МФ при воздействии СШП-помех. Конкретизированы пути модернизации таких МФ для применения в реальных конфигурациях БПЛА. В части оптимизации, рассмотрена оптимизация двух МФ (с разной геометрией поперечного сечения) по двум критериям тремя алгоритмами. **Практическая значимость:** структурированные подходы к обеспечению ЭМС РЭС в составе комплекса противодействия БПЛА средствами ФП ЭМИ, а также технические решения, полученные на ее основе, могут являться инструментарием для разработчиков и инженеров комплексов средств ФП ЭМИ и БПЛА для обеспечения защиты РЭС от деструктивного воздействия ЭМП, который может применяться как на этапе производства, так и для модернизации существующих систем.

Ключевые слова: СШП-помехи, электромагнитная совместимость, беспилотные летательные аппараты, ТРИЗ, модальная фильтрация, оптимизация, функциональное поражение, электромагнитное излучение.

Актуальность

Период 2010-2023 гг. знаменуется стремительным развитием беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Это обусловлено разнообразием областей их применения, которые распространяется на геодезию, картографию, аграрную, нефтегазовую и лесную промышленность, мониторинг и дистанционное зондирование, кинопроизводство и др. [1, 2]. Важно понимать, что применение БПЛА также распространяется на террористические и преступные области: атака гражданских объектов при наличии боевой части (заряда); проникновение в особо контролируемые зоны и охраняемые объекты, в т.ч. на военные; неправомерная запись и передача фото-, видео- и аудиоинформации, относящейся к разряду конфиденциальной (шпионаж); транспортировка опасных веществ или материалов в т.ч. взрывчатых или ядерных и др. Это, в свою очередь, актуализирует задачу противодействия БПЛА, применяющихся в подобных областях [3-9].

Очевидно, что современные БПЛА обладают рядом преимуществ перед традиционными летательными аппаратами: меньшая себестоимость, возможность длительного полета на большой высоте, небольшой вес и компактность, а также возможность установки различных видов датчиков и оборудования для сбора данных и выполнения частных задач. Использование БПЛА существенно уменьшает затраты на дистанционное наблюдение и контроль за объектами в режиме реального времени по сравнению с традиционными космическими и авиационными системами [10]. Так, возможности современных БПЛА позволили расширить область их применения не только для гражданских целей, но и для военных [11].

В связи с широким применением БПЛА в военной области, начались интенсивные научные исследования в данном направлении. Так, особенное развитие научной деятельности отмечено в задачах обеспечения электромагнитной совместимости (ЭМС) БПЛА (например, при использовании БПЛА в условиях сложной электромагнитной обстановки) и противодействия им [12-17]. Для противодействия БПЛА используют различные методы, включая средства огневого поражения (противовоздушной обороны), радиоэлектронного подавления критических систем БПЛА, а также функциональное поражение (ФП) электромагнитным излучением (ЭМИ). Последний является наиболее перспектив-

ным, поскольку позволяет миновать недостатки комплексов противодействия БПЛА, основанных на радиоэлектронном подавлении (используемых, например, для вскрытия и подавления каналов навигации, управления и радиосвязи БПЛА), связанные с отсутствием однозначной реакции БПЛА на успешное подавление. Однако функционируют средства ФП ЭМИ с использованием генераторов мощного сверхвысокочастотного (СВЧ) и лазерного излучений. Примерами являются электромагнитные установки (пушки), взрывомагнитные генераторы, боевые части зенитных управляемых ракет, зенитные артиллерийские снаряды с излучателями мощных электромагнитных СВЧ-импульсов и др. Можно выделить образец военного комплекса ФП ЭМИ «Ранец-Э» разработки Московского радиотехнического института РАН. По заявлению Рособоронэкспорта этот комплекс предназначен для борьбы с малыми БПЛА, а также крылатыми ракетами высокоточного оружия. Мощность излучения – 500 МВт в импульсе длительностью 10-20 нс в X-диапазоне [3].

Так, высокая мощность создаваемого ЭМИ и сложность обеспечения его «избирательности» в отношении поражаемых радиоэлектронных средств (РЭС) способны ухудшить внутреннюю электромагнитную обстановку внутри комплекса противодействия БПЛА [10]. В частности, это может привести к нарушениям работоспособности элементов собственных РЭС (приемных и передающих устройств, генераторов сигналов, устройств управления, стабилизации и формирования команд, различных электронных вычислительных машин и др.). Причиной таких нарушений могут послужить: перекрытие спектров полезных сигналов помеховыми; наложение импульсов помех в цепях устройств на формируемые полезные сигналы и их суперпозиция во времени; наводки во внешних и внутренних цепях и схемах и др. Это остро ставит вопрос обеспечения ЭМС средств ФП ЭМИ с другими РЭС в составе комплекса противодействия БПЛА, в частном случае, «своими» БПЛА, которые могут оказаться в области поражения средств ФП ЭМИ.

Причина, по которой этот вопрос не поднимался раньше, вероятно, кроется в том, что цена малых БПЛА сама по себе не большая (по отношению к ценам на военную технику или боезапас). Однако при малой, по военным меркам, стоимости, малый БПЛА способен причинить несоизмеримый ущерб. Например, в 2017 году террористы посредством одного БПЛА, несущего взрывное устройство, смогли уничтожить целый склад боеприпасов сирийской правительственной армии в Дейр-эз-Зоре. Тем не менее, дополнительная живучесть БПЛА может стать серьезным «подспорьем» во время реальных боевых действий. Другая причина заключается в том, что обеспечение ЭМС комплексов противодействия БПЛА может потребовать больших затрат. Однако имеющиеся наработки автора впервые можно использовать для выявления путей решения этой задачи, причем, возможно, относительно дешевыми способами, или, по крайней мере, не прибегая к большим финансовым затратам.

Как отмечалось ранее, рассматриваемой проблеме защиты и противодействия БПЛА в сложной электромагнитной обстановке уделяется много внимания. Об этом свидетельствуют научные работы, представленные в [18]. Между тем отсутствуют научные или технические работы (стандарты), посвященные

детализации подходов к обеспечению ЭМС РЭС в составе комплекса противодействия БПЛА средствами ФП ЭМИ. Цель данной работы – восполнить данный пробел, представив предварительные результаты по созданию, структурированию и детализации новых подходов к обеспечению ЭМС РЭС в составе комплекса противодействия БПЛА средствами ФП ЭМИ. В работе приводятся результаты проработки ряда предлагаемых подходов в подтверждение их работоспособности и применимости (в продолжение работы [18]). Таким образом, общий вклад данной работы в развитие рассматриваемого научного направления обусловлен новыми эффективными подходами для обеспечения ЭМС, призванными устранить проблемы использования средств ФП ЭМИ, указанные выше.

Предлагаемые подходы

Автором предлагается разработка совокупности новых подходов для обеспечения ЭМС РЭС в составе комплекса противодействия БПЛА средствами ФП ЭМИ. Эти подходы представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Предлагаемые подходы

Название	Описание
1. Априорный учет «своего» воздействия, возможно, из базы данных (из открытых источников типа [19]) характеристик средств ФП ЭМИ	Априорное знание конкретных параметров наводимого помехового воздействия (например, опасного сверхкороткого импульса (СКИ)) на многочисленные РЭС, функционирующие в составе БПЛА, открывает возможность обеспечить функционирование «своего» БПЛА после воздействия на него средствами ФП ЭМИ.
2. Использование теории решения изобретательских задач (ТРИЗ) в составе диверсионного подхода [20]	ТРИЗ гарантирует выявление скрытых ресурсов. Теоретическим фундаментом ТРИЗ являются законы развития технических систем, сформулированные в результате анализа больших массивов патентов, изучения истории и логики развития технических систем. ТРИЗ строится как точная наука, имеющая свою область исследования, свои методы, свой язык, свои инструменты. Кроме того, ТРИЗ может быть эффективно использована в составе диверсионного подхода для выявления слабых мест при преднамеренных воздействиях.
3. Модальная фильтрация [21]	Данный способ подразумевает защиту критичных цепей РЭС за счет последовательного разложения воздействующего СКИ на последовательность импульсов (из-за различия задержек распространяющихся в линии передачи мод) с гораздо меньшим уровнем. Устройства на этой основе называются модальными фильтрами (МФ).

Название	Описание
4. Применение полых, тонких и уголковых пассивных проводников в МФ [22]	Предложенное использование полых, тонких и уголковых пассивных проводников уменьшает массу МФ. В частности, могут использоваться несущие конструкции БПЛА, размещение вдоль которых линий передачи может образовать защитную структуру.
5. Модальное резервирование (МР) цепей [23]	Комплексное резервирование цепей БПЛА на уровнях компонентов, плат и кабелей, с использованием модального разложения, для обеспечения живучести БПЛА. Ряд исследований, выполненных непосредственно по гибридизации резервирования и модальной фильтрации в единое целое, позволит результативно применить МР, использовать многокритериальную оптимизацию с целью улучшения защиты и уменьшения массы проводников и диэлектриков.
6. Учет возможности опасного воздействия СКИ, минуя средства защиты [24]	Защита на стыке отрезков связанных линий с противоположными знаками разностей погонных задержек четной и нечетной мод может оказаться бесполезной. Причиной этого может быть разложение СКИ на импульсы меньшей амплитуды на этом стыке и восстановление в конце структуры.
7. Использование спиральной шины питания [25]	Использование спиральной шины питания, предложенной для космического аппарата, для защиты БПЛА с минимальным увеличением массы. Такой подход позволит уменьшить массу и индуктивность шины при той же токовой нагрузке, обойтись минимальным числом соединителей и осуществить экранирование (внутри этой шины) других проводников, ведущих к критичным узлам.
8. Применение защитных меандровых линий (МЛ) [21, 26]	Воздушная МЛ отличается полным отсутствием диэлектрика, единичной амплитудно-частотной характеристикой в широкой полосе частот, но возможностью разложения СКИ неограниченного напряжения на 2 основных импульса меньшего напряжения. Микрополосковые МЛ позволяют разложить СКИ на 3 и даже 4 импульса.
9. Применение магнитодиэлектриков в составе корпусов БПЛА [27, 28]	Новые способы применения магнитодиэлектрических структур в составе БПЛА для их защиты от СШП-помех и/или снижения радиолокационной заметности. Так, возможны сдвиг или подавление объемных резонансов корпусов БПЛА и отдельных РЭС за счет перекрытия их щелей тонкими магнитодиэлектрическими структурами.

Название	Описание
10. Использование программных средств [29]	Средства, позволяющие комплексную оценку эффективности защиты от произвольных воздействий по критерию уменьшения 5 стандартных N -норм временного отклика, совместно с оптимизацией с любым набором критериев посредством генетического алгоритма (ГА), эволюционных стратегий (ЭС) и алгоритма случайного поиска (СП).

В общем случае, для апробации предлагаемых подходов также целесообразно использование квазистатического подхода и метода моментов в части:

- 1) построения геометрических моделей поперечного сечения исследуемых защитных структур и элементов цепей БПЛА;
- 2) вычисления погонных матриц L , C , R , G исследуемых защитных структур и элементов цепей БПЛА в диапазоне параметров;
- 3) вычисления частотного отклика в диапазоне параметров для оценки и контроля полосы пропускания полезного сигнала;
- 4) вычисления временного отклика (и его различных норм) на воздействие СКИ;
- 5) использования электрических и массогабаритного критериев оптимизации с их нормирующими и весовыми коэффициентами и целевой функции из них;
- 6) оптимизации эвристическим поиском, ГА и ЭС по одному или нескольким критериям.

Кроме того, для дальнейшей апробации предлагаемых подходов целесообразно использовать два вида эксперимента: вычислительный (для масштабного тестирования результатов моделирования квазистатическим подходом) и натурный (для измерений характеристик предлагаемых технических решений), в части экспериментального исследования помехоэмиссий и помехоустойчивости средств ФП ЭМИ и БПЛА. Далее продемонстрирована приемлемость предложенных подходов на примерах использования некоторых из них.

Далее рассмотрены вышеуказанные подходы, при этом их нумерация совпадает с нумерацией в таблице 1.

1. Априорный учет «своего» воздействия

Средства ФП ЭМИ обладают большим «площадным эффектом», обеспечивая относительно эффективное прекращение полета практически всех БПЛА, попадающих в зону их действия независимо от их типа, режима управления (дистанционное управление или автономный полет), типа навигационной системы. Эффективность ФП ЭМИ основана на изменениях электрофизических параметров полупроводниковых элементов многочисленных РЭС, функционирующих в составе БПЛА. Вместе с тем эффективность средств ФП ЭМИ имеет и обратную сторону. В частности, им свойственны другие существенные недостатки – высокая мощность создаваемого ЭМИ и сложность обеспечения его

«избирательности» в отношении поражаемых и находящихся в непосредственной близости от источников ФП ЭМИ РЭС [3, 10].

Посредством ФП ЭМИ ущерб РЭС причиняется путем необратимого (катастрофического) или обратимого (восстанавливаемого) изменения физико-химической структуры элементов РЭС вследствие воздействия электромагнитных полей на материалы, входящие в состав электронных и полупроводниковых приборов и других компонентов этих систем. Необратимые изменения свойств вещества, приводящие к качественно новым образованиям с иной электромагнитной структурой, происходят при значительной энергии воздействующего ЭМИ. В зависимости от мощности, длительности импульсов, рабочей частоты источника ЭМИ и расстояния до РЭС эффекты от электромагнитного воздействия могут быть различными: от кратковременного снижения качества функционирования и временной потери работоспособности РЭС до его полного повреждения или разрушения в результате перегрева или полевого пробоя [30]. В таблице 2 приведены характеристики нескольких типов генераторов мощных ЭМИ-импульсов миллиметрового и сантиметрового диапазонов электромагнитных волн [31].

Таблица 2 – Характеристики некоторых мощных СВЧ-генераторов миллиметрового и сантиметрового диапазонов волн [31]

Тип генератора	Частота, ГГц	Длительность импульса	Выходная мощность	КПД, %	Примечание
Гиротрон с импульсным соленоидом, обладающий стабилизируемым носителем энергии	500	2 мкс	более 100 кВт		Эксперимент
Тиратрон с высокой эффективностью моды ТЕ031	140	2 мкс	100 кВт	30	Эксперимент
Тиратрон с резонаторами моды ТЕ031	100	–	1000 кВт	–	–
Виркатор	до 40	3–5 нс	До 1 ГВт	–	–
Релятивистский гиротрон	35	55 нс	0,2 ГВт	–	Разработан
Взрывомагнитный генератор	–	1 мкс	1010 кВт	–	Разработан в Лос-Аламосе

Как видно из таблицы 2, наиболее короткие импульсы достигаются в виркаторах, а наибольшая выходная мощность реализуется во взрывомагнитных генераторах (ВМГ). Между тем современный уровень развития СВЧ-генераторов обеспечивает выделение в нагрузке энергии 10⁷–10⁸ Дж, мощность которой эквивалентна мощности энергии, освобождающейся при взрыве заряда взрывчатого вещества массой 10 кг [31]. Далее представлено несколько примеров.

Рассмотрим отечественный образец военного комплекса ФП ЭМИ «Ранец-Э» разработки Московского радиотехнического института РАН. По заявлению Рособоронэкспорта этот комплекс предназначен для борьбы с малыми БПЛА, а также крылатыми ракетами высокоточного оружия. Комплекс «Ранец-

Э» состоит из антенны, высокоомощного генератора, подсистемы управления, измерительной установки и источника электропитания. «Ранец-Э» может быть изготовлен в стационарном и мобильном вариантах. Мощность излучения – 500 МВт в импульсе длительностью 10-20 нс в X-диапазоне. Комплектация изделия «Ранец-Э» предусматривает возможность использования двух антенн:

- 1) с усилением 50 дБи и с шириной главного лепестка ДНА 15-20° – дальность эффективного поражения РЭС 7-14 км, дальность частичного нарушения функционирования РЭС – 22-40 км;
- 2) с усилением 45 дБи и с шириной главного лепестка ДНА 60° – дальность эффективного поражения РЭС до 7 км, дальность частичного нарушения функционирования РЭС – до 23 км.

Эффект ФП достигается путем формирования на поверхности цели напряженности электрического поля, превышающего 1 кВ/м, что вызывает пробой, выводящие из строя РЭС аппарата. Комплекс «Ранец-Э» получает внешнее целеуказание от радиолокационной станции и пункта управления сопрягаемых систем противовоздушной обороны [3].

В работах [32] обсуждается перспективный вариант зенитной управляемой ракеты для зенитно-ракетного комплекса «Тор», оснащенной взрывомагнитным генератором, вместо классической боевой части. Взрывомагнитный генератор обеспечивает прямое преобразование энергии взрыва в энергию ЭМИ с помощью специального встроенного СВЧ-генератора. При этом, излучаемой энергии достаточно для ФП РЭС группы БПЛА в радиусе до 300–500 м от точки подрыва, что обеспечивает реализацию принципа «одна ракета – группа БПЛА».

Наконец, известны исследования [33], посвященные нелинейным линиям с насыщенным ферритом, обеспечивающим эффективное возбуждение высокочастотных колебаний. Рассмотрены генераторы высоковольтных импульсов, которые относятся к семейству СИНУС [34] (таблица 3). Они представляют собой формирующую линию, заполненную трансформаторным маслом, зарядка которой осуществляется через встроенный в нее трансформатор Тесла. Волновое сопротивление формирующей линии компактного сильноточного ускорителя электронов СИНУС-200 составляет 28 Ом. Коммутация формирующей линии на нагрузку происходит за счет самопробоя разрядника высокого давления, заполненного азотом. Регулирование давления в разряднике позволяет изменять напряжение самопробоя и получать импульсы напряжения с амплитудой в широком диапазоне от 80 кВ до 300 кВ. Генератор был нагружен на передающую линию с волновым сопротивлением 28 Ом и длиной ~1200 мм. Благодаря согласованному режиму, падающая от генератора мощность достигала ~3 ГВт. Длительность падающего импульса по полувысоте составляла 9 нс, что задается длиной формирующей линии.

Таблица 3 – Примеры генераторов высоковольтных импульсов СИНУС и их основные характеристики

Название	Энергия электронов (кэВ)	Ток пучка (кА)	Длительность импульса (нс)	Частота следования (Гц)	Время непрерывной работы
СИНУС-120	200	2	4	1000	20 мин.
СИНУС-200/30	250	2,5	30	200	30 мин.
СИНУС-200	200	5	10	50	более 1 часа
СИНУС-400	500	5	14	150	более 1 часа
СИНУС-5	600	6	22	150	более 1 часа
	550	5,5	22	400	30 мин.
СИНУС-6	600	6	12	1	непрерывно
СИНУС-К	500 (400)	5 (4)	25	500 (1000)	10 мин.
СИНУС-500	600	6	25	100	непрерывно
СИНУС-700	800	8	30	200	20 мин.
СИНУС-888	1000	9	20	100	1 с
СИНУС-700/130	650	4,8	130	100	1 с
СИНУС-700/90	450	7,5	90	200	2,5 с
СИНУС-7 (СИНУС-1200)	2000	20	50	0,1	более 1 часа
	1500	15	50	100	20 мин.

2. ТРИЗ в составе диверсионного подхода

Одним из ключевых подходов к обеспечению ЭМС является применение ТРИЗ [35] в составе диверсионного подхода [20]. ТРИЗ представляет собой систему принципов и методов, разработанную Г.С. Альтшуллером, для решения проблемных ситуаций и стимулирования креативного и творческого мышления [36]. Он проанализировал десятки тысяч патентов и сформулировал основные постулаты ТРИЗ:

1. Техника развивается закономерно. При решении задач и развитии систем необходимо использовать законы развития технических систем.
2. Любую изобретательскую задачу можно классифицировать и в соответствии с видом задачи выбрать вид решения.
3. Для решения сложных изобретательских задач необходимо выявить и разрешить противоречие, находящееся в глубине задачи.

Так, в изобретательском мышлении формулируют технические противоречия и выявляют физическое противоречие, лежащее в глубине задачи. Углубляя и обостряя его, определяют первопричины, породившие его. Разрешая противоречие, получают результат практически без недостатков.

Диверсионный подход, в свою очередь, направлен на создание таких событий, которые могут привести к наиболее значимому отклонению поведения системы от запланированного [20, 37]. Его суть заключается в том, чтобы заменить вопрос «Как найти причину возникновения неисправности в системе?» на обратный «Как создать неисправность в системе?». Иначе говоря, использование диверсионного подхода подразумевает руководствоваться мыслительным процессом «диверсанта» и, тем самым, спроектировать «системную диверсию»,

т.е. внедриться в систему и найти в ней уязвимые места. Основные принципы диверсионного подхода включают:

1. Инвертирование задачи: вместо того, чтобы искать причины неисправности в системе, ставится обратный (инвертированный) вопрос о том, как создать неисправность в системе. Это помогает изменить перспективу мышления и обнаружить уязвимые места в системе.
2. «Диверсантское мышление»: активное исследование системы, ее слабых мест и потенциальных источников вреда, а также разработка стратегии для создания «системной диверсии».
3. Поиск уязвимых мест: выявление уязвимых мест и «слабых точек» в системе, которые могут быть использованы для создания негативных эффектов. Подобный подход позволяет определить источники проблем и разработать эффективные меры по их устранению.
4. Анализ причинно-следственных связей: исследование воздействия на систему и его последствий позволяет определить взаимосвязь между элементами системы и выявить факторы, способствующие возникновению неисправности.

Применительно к предметной области данной работы, диверсионный подход может помочь в выявлении потенциальных источников электромагнитных помех, путей их распространения и наиболее уязвимых участков РЭС в составе БПЛА и, как следствие, в разработке эффективных мер по защите от подобных воздействий. Наконец, путем использования ТРИЗ в составе диверсионного подхода можно разработать эффективные меры для обеспечения ЭМС БПЛА в условиях деструктивных воздействий средствами ФП ЭМИ.

Рассмотрим приближенный алгоритм использования ТРИЗ в составе диверсионного подхода в задаче обеспечения ЭМС БПЛА при воздействии средствами ФП ЭМИ:

Шаг 1: Инвертирование задачи.

Вместо того, чтобы искать причины неисправности РЭС в составе БПЛА при воздействии средствами ФП ЭМИ, используем обратный вопрос: «Как создать неисправности РЭС в составе БПЛА при воздействии средствами ФП ЭМИ?»

Шаг 2: «Диверсантское мышление».

Анализ внутренних РЭС типовых БПЛА позволяет выявить уязвимые места, которые могут быть подвержены деструктивному воздействию средствами ФП ЭМИ. Среди них могут быть:

I. Электронные компоненты.

1. Микропроцессоры и микроконтроллеры. Высокая интенсивность СВЧ-излучения порождает электромагнитные помехи, которые могут влиять на работу микропроцессоров и микроконтроллеров. Уязвимыми местами в этом случае являются процессорные ядра, системные шины данных, адресов и управления.
2. Оперативная память (ОЗУ). СВЧ-излучение может вызывать ошибки чтения и записи данных в ОЗУ, что приведет к потере или искаже-

нию информации. Особое внимание следует уделить ячейкам памяти и интерфейсам обмена данными.

3. Беспроводные модули связи. Системы Wi-Fi, Bluetooth или радиопередатчики, могут быть подвержены воздействию СВЧ-излучения, что приведет к нарушению связи, деградации качества передачи данных или утрате связи.

II. Системы связи, навигации и управления.

1. Антенны. Антенные системы, используемые для передачи и приема сигналов, являются крайне чувствительными к воздействию СВЧ-излучения. Помимо деградации РЭС таких систем, они являются основным рецептором воздействующего СВЧ-излучения, что предполагает дальнейшее распространение наведенной сверхширокополосной (СШП) помехи по основным системам РЭС БПЛА в обход применяемым методам обеспечения ЭМС (например, экранирования). Уязвимые места включают антенные элементы (в т.ч. антенные усилители), коаксиальные кабели, соединители и иные компоненты антенн.
2. Радиопередатчики и радиоприемники. Компоненты, отвечающие за передачу и прием радиосигналов, могут быть чувствительными к электромагнитным помехам от СВЧ-излучения. Эта система отвечает за передачу и прием радиосигналов, обеспечивая беспроводную связь между БПЛА и его оператором или другими системами. В основном, работа данной системы распространяется на модуляцию и демодуляцию сигналов, автономную связь и управление, а также кодирование и декодирование сигналов. Уязвимыми местами являются усилители и смесители (транзисторы и диоды), осцилляторы (кварцевые резонаторы) и интерфейсные компоненты (соединители, разъединители, провода/кабели и платы).
3. Управляющие системы. Эти системы играют ключевую роль в функционировании БПЛА, обеспечивая контроль и управление его движением, полетными режимами, системами стабилизации, автопилотом и другими аспектами работы. Они включают в себя электронные компоненты и программное обеспечение, которые синхронизируют работу различных систем и обеспечивают выполнение задач БПЛА. Работа этих систем включает в себя автопилот, систему стабилизации, интерфейс с оператором, ПО. Уязвимыми местами этой системы являются полетный контроллер, автопилот, пульт управления (используемый оператором вне БПЛА), интерфейсы связи (системы радиосвязи, беспроводной связи, сетевых протоколов и др.).
4. Система навигации. Системы навигации отвечают за определение местоположения, ориентации и перемещения БПЛА в пространстве. Они обеспечивают точность и надежность навигационных данных, что необходимо для выполнения ряда задач в т.ч. наблюдения, контроля, поиска и др. Интенсивное СВЧ-излучение может вызвать де-

градацию и искажение GPS (Global Positioning System) сигналов, что приведет к ошибкам в определении местоположения и времени. Уязвимые места системы включают различные компоненты, в т.ч. плату GPS, инерциальные измерительные блоки, барометр, компас, датчики скорости и дистанции, а также центральную навигационную систему.

III. Электрическое соединение.

Проводники, особенно длинные и незащищенные от внешних электромагнитных полей, могут выступать в роли антенн, принимая деструктивное СВЧ-излучение и распространяя помехи по всем компонентам РЭС в системе БПЛА. Уязвимые места включают длинные линии связи, силовые провода/кабели и иные электрические каналы.

IV. Заземление.

Заземление является неотъемлемой частью систем электропитания, электрической сети и электронных устройств БПЛА. В БПЛА оно играет важную роль и служит для предотвращения накопления статического электричества и разряда электростатических зарядов, а также обеспечивает электрическую стабильность системы. Должная реализация системы заземления важна для обеспечения защиты от электрических перенапряжений и устранения помех в системе. Воздействие внешних электромагнитных полей может приводить к возникновению наводок, нежелательных токов и взаимных помех между заземлением и сигнальными системами. Это может привести к нарушению работы электронных компонентов, увеличению шумов и снижению качества ЭМС в системе. К заземленным системам БПЛА могут относиться провода и шины, контакты и соединители, пластины и поглощающие материалы.

Выявление уязвимых мест (при «диверсанта́тском мышлении») в системах БПЛА позволяет определить конкретные компоненты и подсистемы, которые требуют усиления защиты или разработки мер по снижению их чувствительности к воздействию СВЧ-излучения. Этот этап является основой для последующего применения принципов ТРИЗ и разработки эффективных решений для обеспечения ЭМС БПЛА при воздействии средствами ФП ЭМИ.

Шаг 3: Анализ причинно-следственных связей.

Детальное изучение принципов воздействия СВЧ-генераторов на уязвимые места БПЛА позволяет определить взаимосвязь между подобным воздействием и возникновением неисправностей РЭС в составе БПЛА. Рассмотрим два сценария воздействия СШП-помех: на внешнюю антенну и систему электрического соединения БПЛА (таблица 4).

Таблица 4 – Сценарии воздействия СШП-помех на антенну и электрическое соединение БПЛА

Сценарий	Этап	Причина	Следствие	Анализ
Воздействие на антенну	1	Воздействие СШП-помех на антенну	Изменение электромагнитных свойств антенны	Возможны деградация характеристик антенны и дальности ее связи
	2	Кратковременное электромагнитное возмущение в антенне	Возникновение наводок (помеховых сигналов)	Различные эффекты: от искажений и снижения чувствительности принимающей платы GPS до выхода из строя данной платы ввиду влияния СШП-помех высокой амплитуды
	3	Распространение СШП-помехи на внутренние компоненты РЭС БПЛА	Деградация внутренних компонентов РЭС	Возможны сбои или отказ в работе ряда РЭС и, как следствие, утрата БПЛА
Воздействие на электрическое соединение	1	Воздействие СШП-помех на электрическое соединение	Кратковременные перенапряжения в межсоединениях РЭС	Возможно распространение СШП-помех по электрическим цепям РЭС БПЛА
	2	Возникновение перекрестных наводок на неэкранированных элементах РЭС	Воздействие перекрестных наводок на внутренние компоненты РЭС	Возможны нарушения работы и деградация внутренних компонентов РЭС
	3	Локализация СШП-помехи на критичных узлах внутренних компонентов РЭС БПЛА	Кратковременный или постоянный выход из строя РЭС БПЛА	Возможен отказ ряда основных систем РЭС БПЛА и, как следствие, утрата БПЛА

Шаг 4: Разработка решений с использованием ТРИЗ.

Применение принципов ТРИЗ в составе диверсионного подхода поможет найти альтернативные решения для обеспечения электромагнитной совместимости БПЛА. Некоторые возможные подходы могут включать:

1. Использование экранирования и защиты электронных компонентов от СВЧ-излучения путем применения специальных материалов и конструкций.
2. Оптимизация систем связи и управления для минимизации влияния помех, например, путем применения антенн с высоким коэффициентом усиления или использования кодирования сигнала.
3. Совершенствование проводов и кабелей для снижения их чувствительности к СВЧ-излучению, например, через использование экранированных кабелей или должной трассировки для минимизации их взаимного влияния и уменьшения чувствительности к внешним помехам.

4. Использование фильтров и ферритовых компонентов в электронных схемах и электрическом соединении РЭС БПЛА для подавления нежелательных помех и улучшение соотношения сигнал-шум.
5. Разработка устойчивых алгоритмов обработки сигналов способных компенсировать возможные искажения, вызванные воздействием СВЧ-излучения, для повышения надежности и точности работы системы.
6. Применение адаптивных и интеллектуальных систем, способных реагировать на внешние факторы, автоматически адаптировать параметры работы системы в реальном времени и минимизировать влияние внешних помех.
7. Разработка системы мониторинга и диагностики для оперативного обнаружения и анализа возможных проблем, связанных с воздействием СВЧ-излучения для принятия соответствующих мер по их предотвращению или устранению и др.

Шаг 5: Внедрение и тестирование.

Реализация предложенных технических решений в конструкции БПЛА и проведение соответствующих испытаний позволят оценить их эффективность. Измерения и испытания должны быть направлены на проверку характеристик (уровней) воздействия СВЧ-генераторов на системы и компоненты БПЛА, а также на установление их должного функционирования и работоспособности в условиях воздействия средствами ФП ЭМИ.

Очевидно, что конкретные виды и параметры уязвимых РЭС в составе БПЛА возможно определить (с использованием алгоритма использования ТРИЗ в составе диверсионного подхода) на примере реального БПЛА. Между тем при разработке решений для обеспечения ЭМС БПЛА в условиях воздействия генераторами СВЧ-излучения следует учитывать, что наибольшая эффективность применения предлагаемых решений достижима лишь в пределах определенных уровней воздействия (формы, амплитуды), его длительности, а также определенного расстояния от источника СВЧ-излучений до БПЛА. Рекомендации и предложенные технические решения по результатам применения новых подходов к обеспечению ЭМС (и, в частности, ТРИЗ в составе диверсионного подхода) должны содержать уточнения об их наибольшей эффективности с учетом оговоренных условий. Это поможет учесть физические ограничения и предложить решения, которые будут наиболее актуальны, работоспособны и эффективны в пределах заданных параметров.

3. Модальная фильтрация

3.1. МФ на основе полосковых структур

Модальная фильтрация подразумевает использование модальных искажений (изменений сигнала за счет разности задержек мод многопроводной линии передачи) для разложения воздействующего СКИ на последовательность импульсов. Примечательно, что её реализация может не требовать отдельного устройства, а использовать лишь должную трассировку и компоновку существующих межсоединений для защиты от воздействующих СКИ.

Уровень результирующего выходного напряжения на выходе МФ определяется различными факторами: геометрической конфигурацией защитного устройства, числом проводников, используемым диэлектрическим материалом, длиной и др. Так, МФ на основе обычной микрополосковой связанной линии (МПЛ) передачи представлен на рис. 1 (проводники А – активный, П – пассивный и О – опорный в виде плоскости), где w – ширина проводников, s – расстояние между проводниками, t – толщина проводников, h – толщина диэлектрика, d – расстояние от края структуры до проводников, ϵ_r – относительная диэлектрическая проницаемость подложки (рис. 1а). Длина (l) МФ принята равной 1 м. В качестве воздействия использовался источник ЭДС с СКИ в форме трапеции с амплитудой 1 В и длительностями фронта, спада и плоской вершины (по уровням 0–1) по 100 пс, так что общая длительность составила 300 пс (рис. 1б). Значения сопротивлений (R) выбирались из условия согласования структуры с трактом (равенство амплитуды сигнала в начале линии (V_2) половине ЭДС источника сигнала (V_1) (рис. 1в) [38].

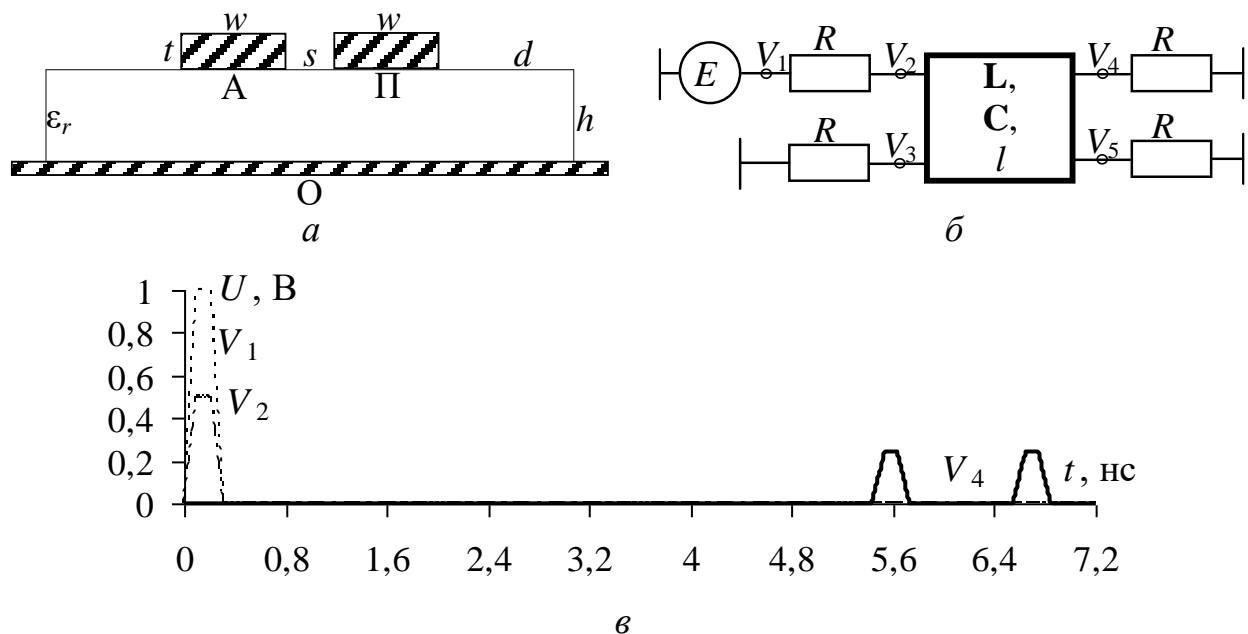


Рис. 1. Поперечное сечение (а), эквивалентная схема (б) и формы ЭДС (V_1), напряжения на входе (V_2) и выходе (V_4) (в) МФ на основе связанной МПЛ

Явление модальной фильтрации лежит в основе предлагаемых подходов, поскольку является одним из наиболее эффективных подходов к защите от кондуктивных воздействий СКИ. В зависимости от массогабаритных характеристик БПЛА и требуемого уровня ослабления воздействующего СКИ, могут быть использованы: многопроводные МФ на основе МПЛ [39]; 4-слойный зеркально-симметричный МФ [40]; МФ со структурой проводников в виде спирали и меандра [41]; МФ на керамической подложке [42]; МФ с пассивным проводником между вырезами в опорной плоскости [43]; МФ на основе кабельных структур [44] и др.

3.2. МФ на основе кабельных структур

Рассмотрим, в качестве примера, реализацию модальной фильтрации в кабельных структурах. Использование кабелей в РЭС для передачи сигналов и электропитания является стандартным почти для любой радиоэлектронной системы. Должный уровень функционирования подобных кабелей является крайне важной задачей для обеспечения надежной работы систем связи, управления и навигации. Существует ряд кабелей, применяемых во внутренних цепях БПЛА: коаксиальные кабели, многожильные кабели, плоские кабели, ГПК и др. Каждый из них имеет свои особенности, преимущества и ограничения, которые необходимо учитывать при разработке и эксплуатации БПЛА.

При воздействии СШП-помех на связующие кабели и далее на внутренние цепи БПЛА, возникает риск возникновения нежелательных эффектов: перекрестных наводок, электрических разрядов, искрения и повреждения электронных компонентов РЭС и др. Для предупреждения подобной угрозы возможно использование ресурса дополнительной защиты РЭС посредством замены используемых кабелей на МФ на основе кабельных структур. Такой подход способен значительно повысить защиту внутренних цепей БПЛА от СШП-помех.

Рассмотрим результативность применения МФ на основе кабельных структур на примере трех разработанных и созданных макетов МФ: 3-проводный кабель; плоский 3-проводный кабель; круглый 4-проводный кабель. Поперечные сечения и эквивалентные схемы макетов с длиной $l=2$ м представлены на рис. 2. Параметры МФ 1: $\epsilon_{r1}=1$, диэлектрическая проницаемость изоляции из ПВХ-пластиката $\epsilon_{r4}=3,4$ и тангенс угла диэлектрических потерь $\operatorname{tg}\delta=0,05$ на частоте $f=1$ МГц, радиус проводников $r_1=1,3$ мм, радиус изоляции $r_4=2,07$ мм, длина и толщина разделительного основания (изоляции) $k=0,9$ мм и $p=0,6$ мм, соответственно. Габариты МФ в поперечном сечении составляют $14 \times 4,2$ мм при общей длине $l=2$ м. Вычисленное среднее геометрическое сопротивление четной и нечетной мод – 116 Ом. Параметры МФ 2: $\epsilon_{r1}=1$, диэлектрическая проницаемость изоляции из ПВХ пониженной горючести $\epsilon_{r4}=3,0$ и $\operatorname{tg}\delta=0,02$ на частоте $f=1$ МГц, диэлектрическая проницаемость оболочки из ПВХ-пластиката $\epsilon_{r6}=3,5$ и $\operatorname{tg}\delta=0,05$ на частоте $f=1$ МГц, радиус проводников $r_1=1,4$ мм, радиус изоляции $r_4=2,4$ мм, толщина внешней изоляции $p=0,95$ мм, расстояние между оплеткой и изоляцией $b=0,15$ мм. Габариты структуры в поперечном сечении составляют $16,6 \times 6,9$ мм. Среднее геометрическое сопротивление – 87 Ом. Параметры МФ 3: $\epsilon_{r1}=1$, диэлектрическая проницаемость внутренней изоляции из невулканизированной резиновой смеси $\epsilon_{r3}=2,8$ и $\operatorname{tg}\delta=0,01$ на частоте $f=1$ МГц, диэлектрическая проницаемость изоляции вокруг проводников из ПВХ-пластиката $\epsilon_{r4}=3,4$ и $\operatorname{tg}\delta=0,02$ на частоте $f=1$ МГц, диэлектрическая проницаемость внешней изоляции из неподдерживающего горение ПВХ-пластиката $\epsilon_{r7}=4,6$ и $\operatorname{tg}\delta=0,05$ на частоте $f=1$ МГц, диэлектрическая проницаемость внутреннего диэлектрика в виде ПВХ-шнура $\epsilon_{r8}=4,6$ и $\operatorname{tg}\delta=0,06$ на частоте $f=1$ МГц, радиус проводников $r_1=1,88$ мм, радиус внутренней изоляции $r_3=7,75$ мм, радиус изоляции $r_4=2,82$ мм, радиус структуры $r_6=9,31$ мм, радиус диэлектрика в виде ПВХ-шнура $r_7=1,22$ мм, толщина внешней изоляции

$p=1,5$ мм. Поскольку МФ 3 представляет собой симметричную 4-проводную структуру, полное разложение воздействующего сигнала в ней невозможно ввиду симметрии. Поэтому, при измерении, два проводника из четырех полагаются опорными, однако моделировать данный случай можно двумя способами: заданием второго опорного проводника идеальной «землей» (рис. 2а) или заданием его сигнальным и закороченным на «землю» (рис. 2д). Среднее геометрическое сопротивление для первого случая составляет 43,33 Ом. Кроме этого, выполнено моделирование МФ 1 в системе электродинамического моделирования.

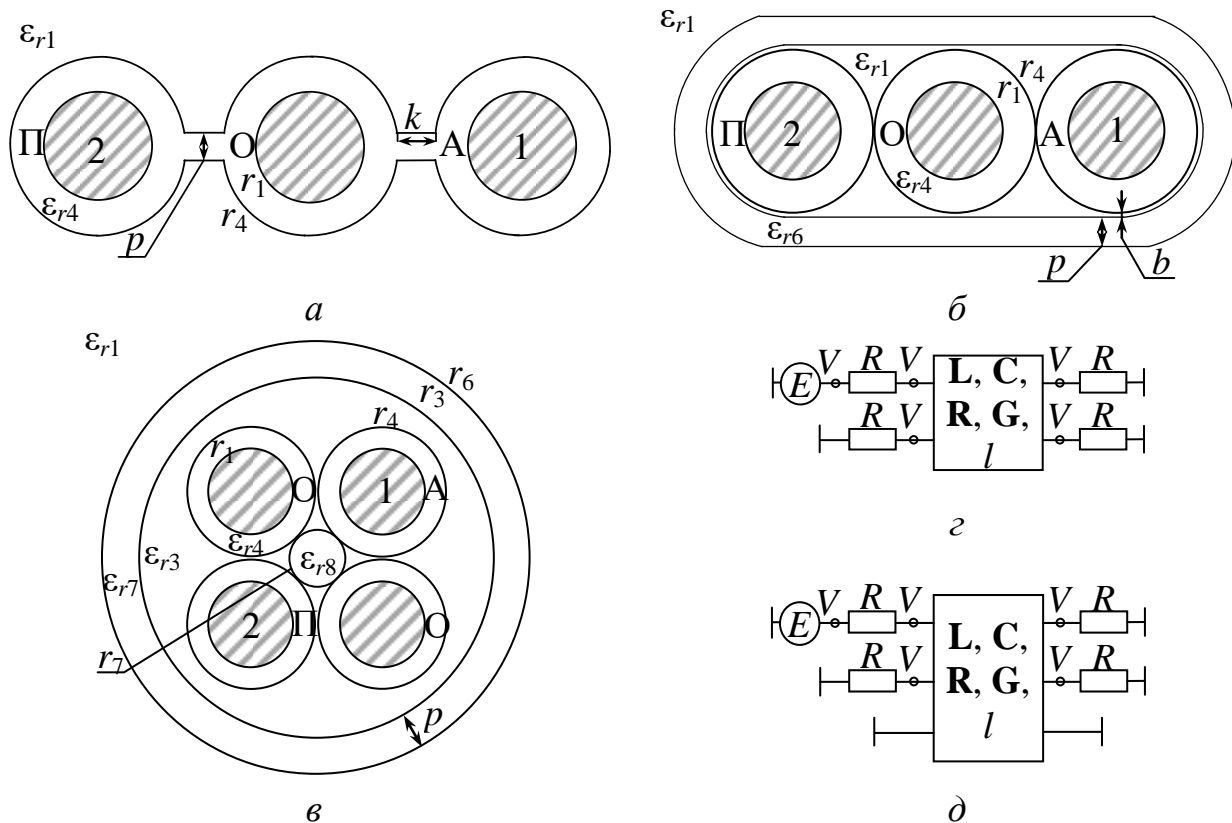


Рис. 2. Поперечные сечения МФ 1 (а), 2 (б), 3 (в) и эквивалентные схемы (в, г) МФ на основе кабельных структур

Внешний вид геометрической модели с печатной платой на одном из концов (при моделировании – на обоих концах), представлен на рис. 3.

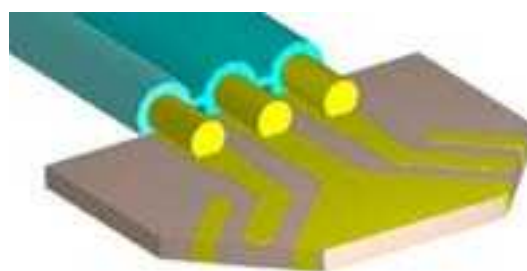


Рис. 3. Геометрическая модель МФ 1 с печатной платой

В качестве воздействия использовался импульсный сигнал, полученный в результате взятия производной от ступенчатого воздействия реального осциллографа Tektronix DSA 8300, с амплитудой ЭДС 0,634 В, длительностью фронта – 14,6 пс, спада – 12 пс и плоской вершины – 4,7 пс (по уровням 0,1–0,9), а общей длительностью (по уровню 0,5) – 22 пс. Формы ступенчатого воздействия и производного от него сигнала представлены на рис. 4.

Макеты МФ на основе кабельных структур представлены на рис. 5. Для монтажа SMA-соединителей изготовлены печатные платы, соединяемые с МФ на концах (рис. 6). В МФ 1 и 2 центральный проводник принят опорным. В МФ 3, при измерении, опорными приняты 2 диагональных (в поперечном сечении) проводника. На концах всех проводников установлены SMA-соединители для соединения МФ с измерительным трактом. При измерениях, на SMA-соединители пассивных проводников устанавливались нагрузки с сопротивлением 50 Ом.

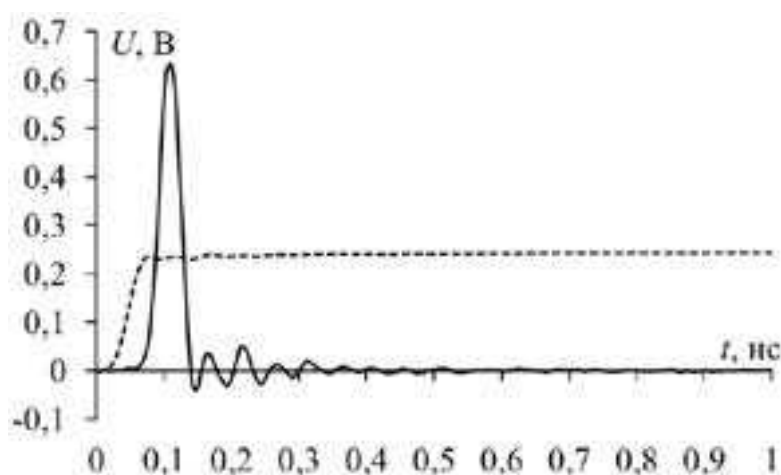


Рис. 4. Формы ступенчатого воздействия (- -) и воздействующего импульсного сигнала (—), со сдвигом по времени

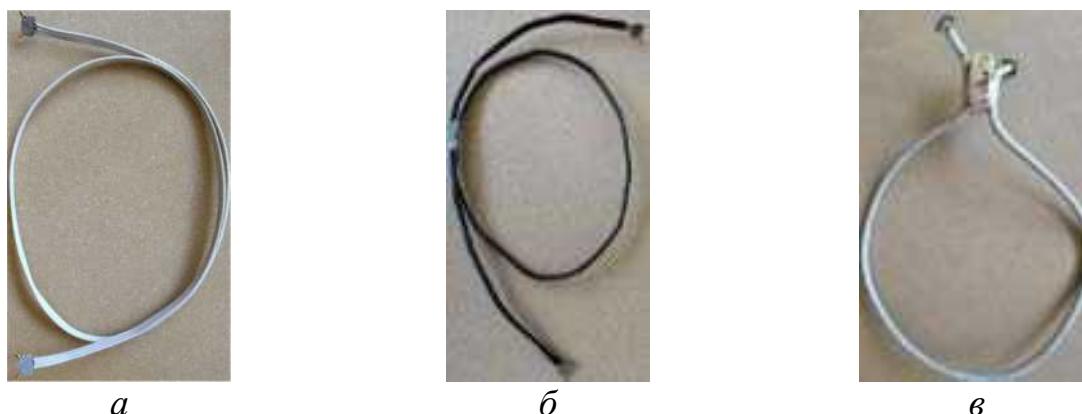


Рис. 5. Внешний вид: МФ 1 (а), 2 (б) и 3 (в) на основе кабельных структур

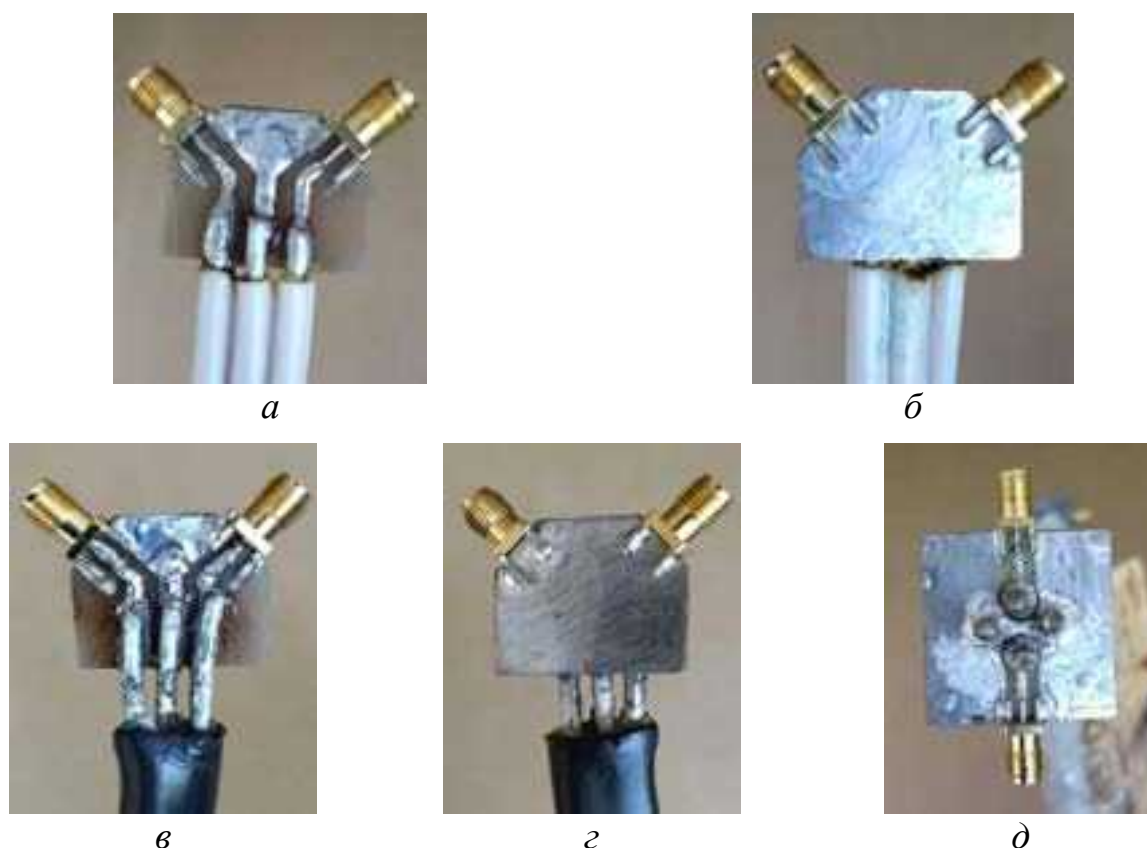


Рис. 6. Внешний вид переходных печатных плат
МФ 1 (а, б), 2 (в, г) и 3 (д)

На рис. 7 приведены измеренные с использованием векторного анализатора электрических цепей «Панорама» Р4226 частотные зависимости коэффициента передачи $|S_{21}|$ для каждого из макетов.

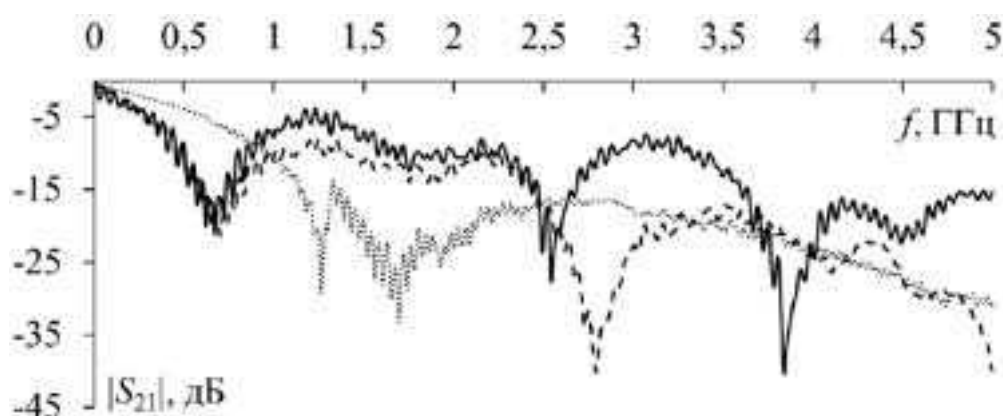


Рис. 7. Частотные зависимости $|S_{21}|$ для МФ 1 (—), 2 (- -) и 3 (· ·)

Из результатов измерений следует, что полоса пропускания МФ 1–3 составляет 0,19–0,41 ГГц. Для МФ 1 на частоте 3,8 ГГц и для МФ 2 на 2,8 ГГц наблюдаются минимумы до минус 40 дБ, а для МФ 3 – до минус 32 дБ на частоте 1,7 ГГц.

Формы напряжения на выходе МФ 1–3, полученные при моделировании с учетом потерь и экспериментально, представлены на рис. 8 (наблюдается

совпадение форм напряжения, полученных для различных заземлений опорных проводников из рис. 2г, д). Также выполнено моделирование МФ 3 с учетом потерь по эквивалентной схеме из рис. 2д для показательного сравнения двух вариантов моделирования 4-проводного МФ с двумя заземленными проводниками.

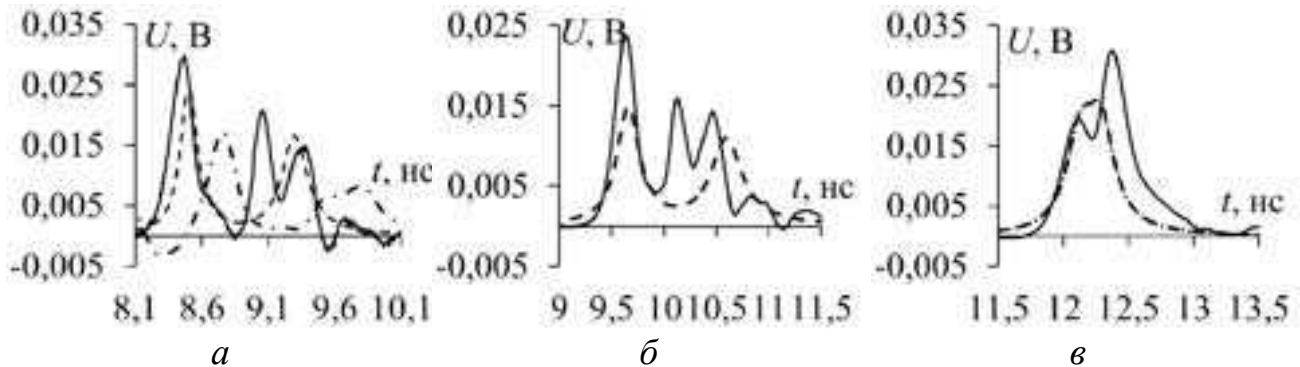


Рис. 8. Формы напряжения на выходе МФ 1 (а), 2 (б) и 3 (в), полученные при моделировании с учетом потерь (---) (в т.ч. МФ 1 в системе электродинамического моделирования (-·-·-), а также МФ 3 по эквивалентной схеме из рис. 2д (·····)) и экспериментально (—)

Значения максимального выходного напряжения составили 0,029, 0,023 и 0,03 В при измерениях и 0,024, 0,014 и 0,022 В при моделировании для МФ 1–3, соответственно. Максимальное отклонение полученных значений при измерениях и моделировании составляет 39% для МФ 2. Измерения показали, что значения максимального выходного напряжения в 15, 17,2 и 11,7 раз меньше половины амплитуды ЭДС для МФ 1–3. Максимальное выходное напряжение в МФ 1 при электродинамическом моделировании составило 0,017 В, что в 25,6 раз меньше половины амплитуды ЭДС.

Важным наблюдением является наличие импульса 3 при измерениях МФ 1, 2. С учетом того, что интервал между вершинами импульсов 2 и 3 при измерении составляет примерно 0,3 нс для обоих МФ, одна из причин появления импульса 3, возможно, кроется в граничных условиях МФ и печатных платах, подсоединяемых к ним для измерений (поскольку диэлектрическое заполнение в поперечном сечении МФ 2 отлично от МФ 1). Печатные платы разработаны для соединения с SMA-соединителями и измерений в тракте 50 Ом, тогда как средние геометрические сопротивления МФ 1 и 2 составляют 115 и 87 Ом. Таким образом, возбуждающиеся в МФ высокоомные моды распространяются в тракте с более низким импедансом, что увеличивает рассогласование и отражения в измерительном тракте. Кроме того, расхождение результатов эксперимента и моделирования с учетом потерь может быть связано с неточным вычислением матриц потерь, с неучетом влияния частотной зависимости ϵ_r материалов, неоднородностями при поверхностном монтаже SMA-соединителей и печатных плат, различием проводящих сред (медь на печатной плате и алюминий в МФ), неоднородностью поперечного сечения МФ по всей длине, а также возможными отклонениями ϵ_r и $\text{tg} \delta$, используемых при модели-

ровании, от реальных. В целом, результаты эксперимента сопоставимы с результатами моделирования с учетом потерь.

Важно отметить, что описанные результаты получены на основе разработанных экспериментальных макетов МФ, тогда как для применения в реальном БПЛА целесообразна разработка МФ с учетом требуемых массогабаритных характеристик. При этом важно сохранение и улучшение защитных характеристик, что возможно посредством использования изоляции с высоким значением ϵ_r , а также ферромагнетиков (например, магнитного порошка) в ее составе.

4. Применение полых, тонких и уголковых пассивных проводников в МФ

Обеспечение улучшенных характеристик функционирования БПЛА, за счет вводимых элементов РЭС или требуемых защитных устройств, при минимальном увеличении массы, весьма актуально при разработке новых концепций БПЛА или улучшении существующих. В этой связи эффективно применение защитных МФ с использованием полых и тонких пассивных проводников, уменьшающих массу итогового изделия. Для наглядности, это демонстрируется на макетах МФ с увеличенными геометрическими размерами (относительно конструкций, применяемых в реальных БПЛА). Далее приведены основные результаты по разработке и созданию макетов МФ. Показываются основные структуры со сплошным, полым, уголковым и тонким пассивными проводниками, их геометрические и схемные модели. Описывается натурный эксперимент по измерению характеристик МФ. Сравниваются вычисленные и измеренные характеристики МФ. Поперечные сечения (где $w=10$ мм, $s=0,5$ мм, $t=10$ мм (в случае МФ с тонким пассивным проводником $t=1$ мм), $h=1,5$ мм, толщина стенки проводников $g=1$ мм, $\epsilon_r=4,6$ и тангенс угла диэлектрических потерь $\text{tg}\delta=0,025$) представлены на рис. 9а–г и эквивалентная схема ($R=50$ Ом, а значения R на пассивных проводниках приняты 10 Ом для МФ со сплошным, полым и уголовым пассивными проводниками и 13 Ом для МФ с тонким пассивным проводником для приближения к значениям среднего геометрического сопротивлений четной и нечетной мод МФ) данных структур представлена на рис. 2г. Длины всех МФ равны 28 см.

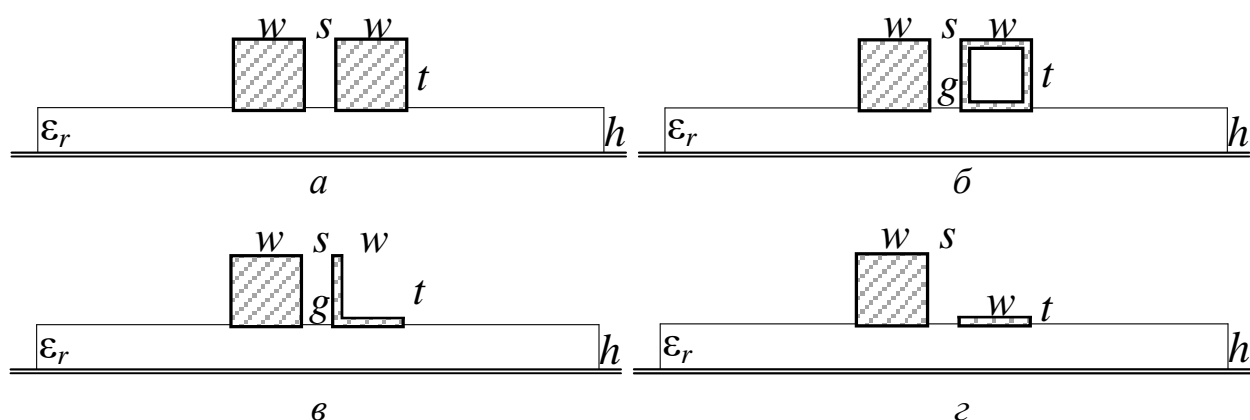


Рис. 9. Поперечные сечения МФ с пассивным проводником: сплошным (а), полым (б), уголковым (в), тонким (г)

При проведении натурального эксперимента использован подход [45], когда временные и частотные характеристики вычисляются в системе ADS на основе экспериментально полученных S -параметров. После того, как исследуемые МФ измерены в частотном диапазоне, выполнен их анализ во временной области в системе ADS 2020. Устройство, определенное в частотной области, представлялось как n -портовое устройство, описываемое уравнениями, демонстрирующими взаимосвязь между спектральными переменными каждого порта. Поскольку параметры матрицы рассеяния (выходной формат типа S2P) определялись для МФ, представляющих собой связанные МПЛ, их схема в ADS 2020 представлялась 2-портовым устройством. Поскольку для описания прохождения сигнала по МФ использовался метод определения временных и частотных характеристик на основе измеренных S -параметров, есть возможность использовать любую форму воздействия. Так, использован идеальный трапециевидный импульсный сигнал с амплитудой ЭДС 1 В, длительностью фронта, спада и плоской вершины по 100 пс (общая длительность 200 пс по уровню 0,5). Макеты исследуемых МФ представлены на рис. 10.

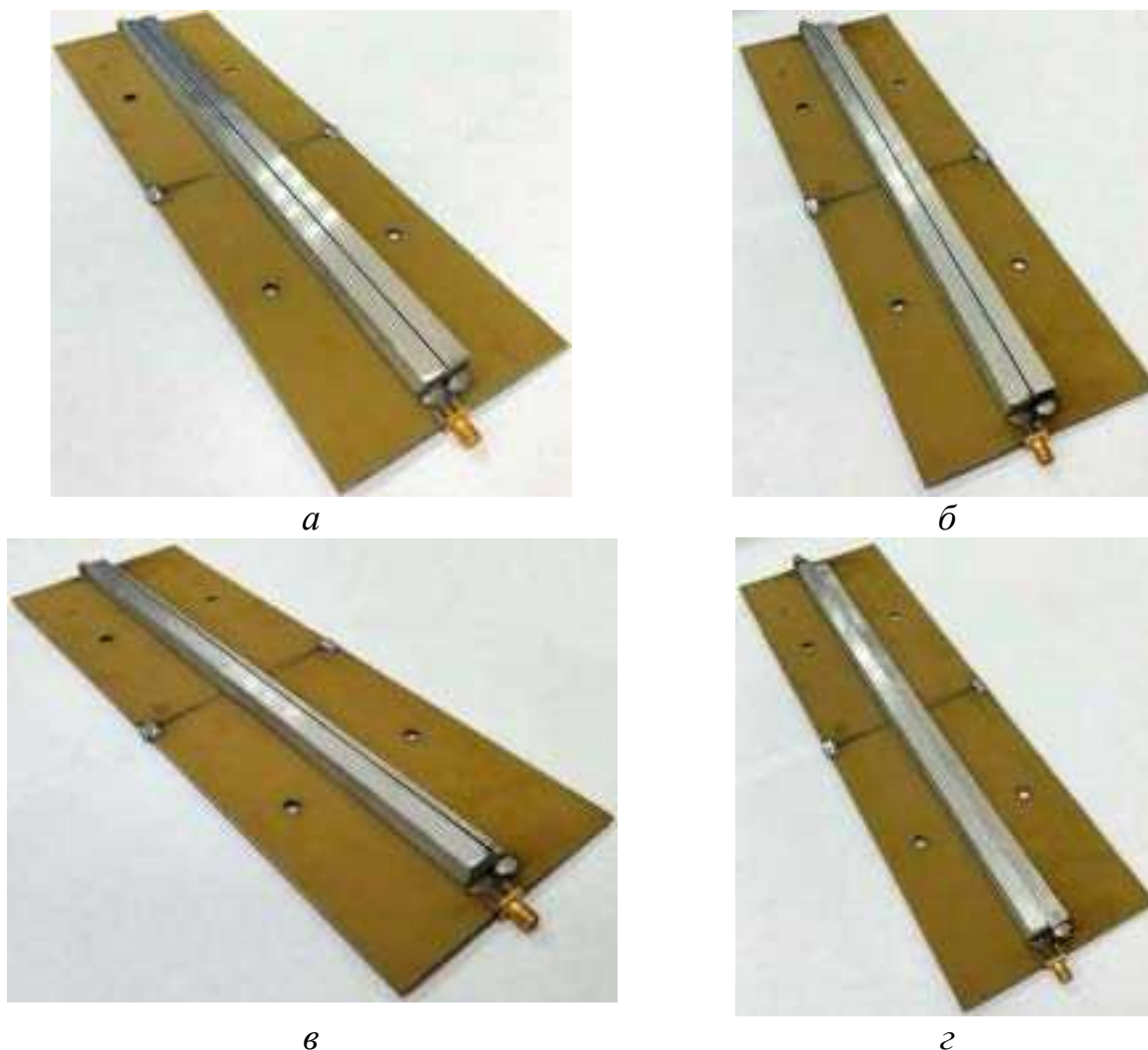


Рис. 10. Внешний вид МФ с пассивным проводником: сплошным (а), полым (б), уголковым (в), тонким (г)

Для удобства измерений использовалась единая диэлектрическая подложка FR-4 (полученная из соединения 2 заготовок FR-4), в которой один из проводников (активный) фиксирован, а второй является съемным. Так, обеспечивается возможность замены пассивного проводника в МФ для измерения характеристик в одинаковых условиях. Для обеспечения фиксации и целостности конструкции, а также заданного расстояния между проводниками, в подложке сделаны углубления шириной 10 мм и высотой 300 мкм, в которые помещались проводники. После фиксации проводников в углубления, они припаивались по краям для дополнительной фиксации и обеспечения электрического контакта (активный проводник дополнительно помещался на тонкий слой эпоксидного клея). На концах активного (сплошного) проводника устанавливались SMA-соединители.

Рассмотрим результаты натурального эксперимента по измерению характеристик МФ со сплошным, полым, уголковым и тонким пассивными проводниками, во временной и частотной областях. Измерительная установка с макетом МФ с уголковым пассивным проводником представлена на рис. 11 (остальные пассивные проводники лежат на столе). На рис. 12 приведены измеренные векторным анализатором электрических цепей «Панорама» P4226 частотные зависимости $|S_{21}|$ для каждого МФ.



Рис. 11. Векторный анализатор электрических цепей «Панорама» P4226 и макет МФ с уголковым пассивным проводником

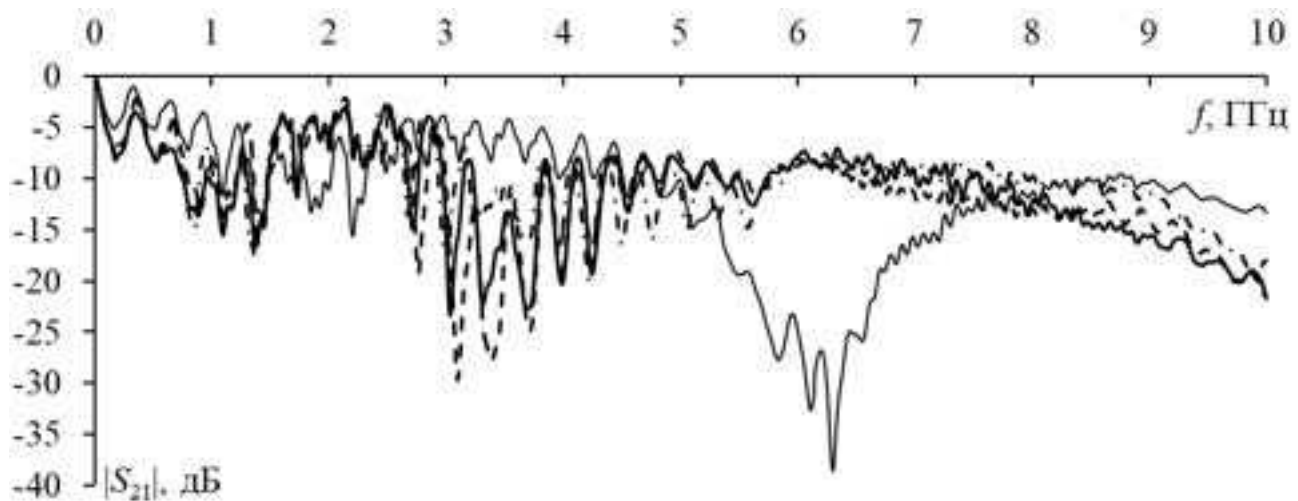


Рис. 12. Измеренные частотные зависимости $|S_{21}|$ МФ с пассивными проводниками: сплошным (—), полым (- -), уголковым (- · -), тонким (—)

Из результатов измерений следует, что полоса пропускания всех МФ составляет 77–82 МГц. Видна близость частотных зависимостей $|S_{21}|$ для МФ со сплошным, полым и уголковым пассивными проводниками, тогда как частотная зависимость МФ с тонким пассивным проводником имеет существенные отличия уже с 2,5 ГГц.

Зависимости $U(t)$ на выходе всех МФ, полученные при моделировании с учетом потерь и экспериментально, представлены на рис. 13. Значения максимального выходного напряжения составили 0,177, 0,178, 0,192 и 0,251 В при измерениях и 0,116, 0,117, 0,119 и 0,151 В при моделировании для сплошного, полого, уголкового и тонкого пассивных проводников, соответственно. Максимальное отклонение полученных значений при измерениях и моделировании составляет $\pm 25\%$ для МФ с тонким пассивным проводником. Измерения показали, что значения максимального выходного напряжения рассматриваемых МФ в 2,8, 2,81, 2,6 и 2 раза меньше половины амплитуды ЭДС.

Видно, что выходной сигнал приходит примерно в одно и то же время со средним отклонением $\pm 3\%$ для нечетной (ранней) моды. К сожалению, ввиду влияния дисперсии невозможно точно определить время прихода каждого импульса при измерениях. Также видно, что на формы напряжений, помимо дисперсии, оказывают влияние потери в проводниках и диэлектрике, что приводит к увеличению времени фронта и спада каждого выходного импульса и к их частичному наложению, что явно наблюдается для МФ с тонким пассивным проводником. Кроме этого, видно, что амплитуды импульсов мод, полученные с помощью моделирования и экспериментально, отличаются (несмотря на то, в обоих случаях активный проводник нагружался на 50 Ом, а пассивный — на 10 Ом для МФ со сплошным, полым и уголковым пассивными проводниками, и на 13 Ом для МФ с тонким пассивным проводником). Причина, вероятно, кроется в отражениях, вызванных рассогласованием мод, явно проявляющихся при измерении. Так, первая последовательность отражений наблюдается в диапазоне 3,4–7 нс (не приведено на рис. 13 из-за важности детализации основного выходного сигнала). Кроме этого, отражения из-за неоднородностей, пришед-

шие в конец МФ, накладываются на основные импульсы мод (преимущественно на импульс четной моды (импульс 2)), приводя к росту результирующей амплитуды. Этим также объясняется различие амплитуд импульсов мод при моделировании и измерении МФ с тонким пассивным проводником. Несмотря на это, видно сохранение эффекта модальной фильтрации при замене пассивного проводника МФ. Также, в целом, наблюдается согласованность форм выходного напряжения, полученных экспериментально и моделированием.

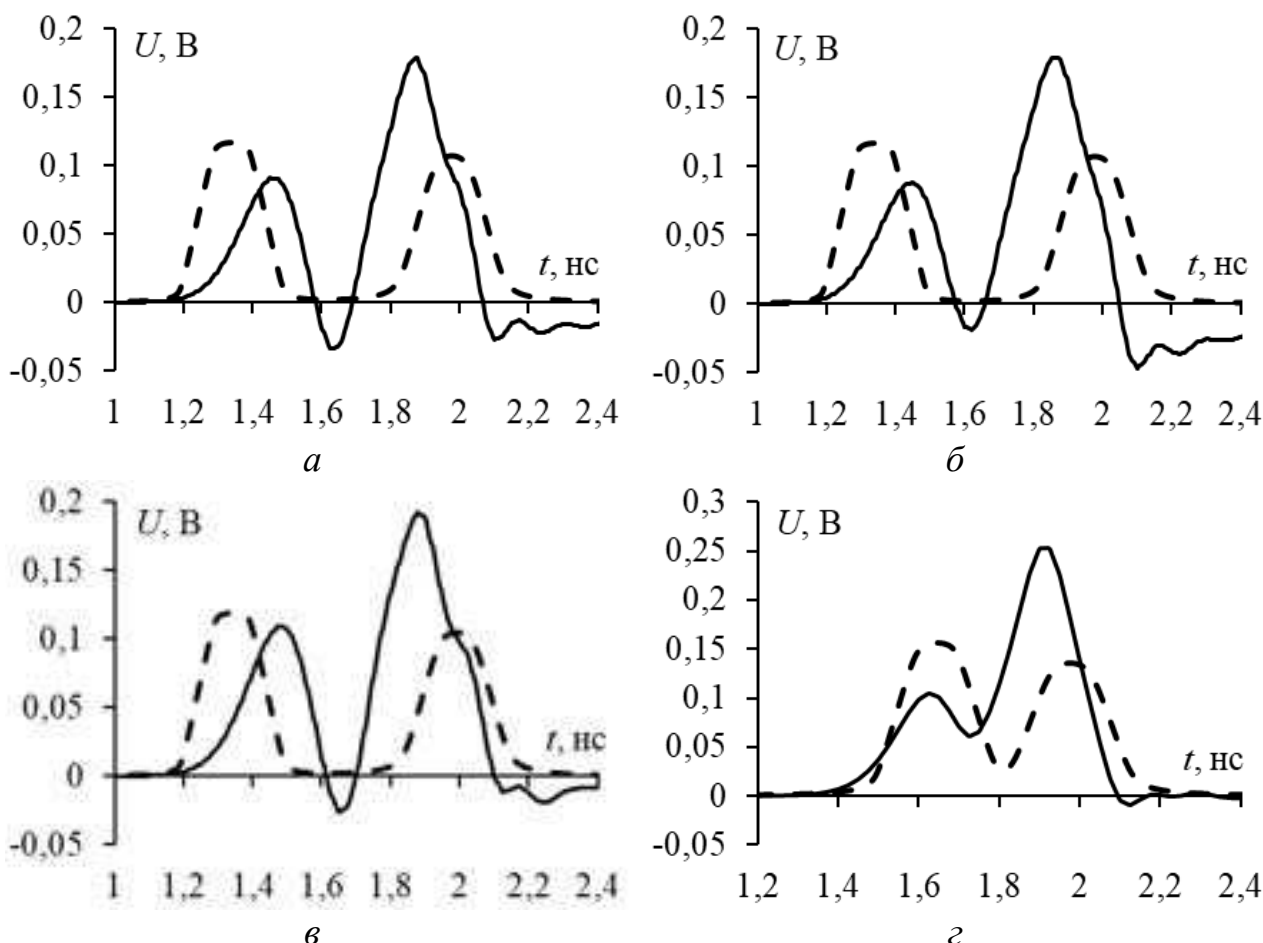


Рис. 13. Формы напряжения на выходе МФ с пассивными проводниками: сплошным (а), полым (б), уголковым (в), тонким (з), полученные при моделировании с учетом потерь (- -) и экспериментально (—)

Выполним оценку массы разработанных МФ. Поскольку они отличаются лишь пассивным проводником, оценим его массу при различных исполнениях.

При $w=10$ мм, $t=10$ мм, $g=1$ мм, $l=30$ см и плотности алюминия $\rho=2,71$ г/см³ объем сплошного проводника

$$V=lwt=30 \text{ см}^3, \quad (1)$$

а масса

$$m=V\rho=81,3 \text{ г.} \quad (2)$$

Объем полости проводника (V_{Π})

$$V_{\Pi}=(l-2g)(w-2g)(t-2g)=19,072 \text{ см}^3, \quad (3)$$

а масса полого проводника

$$m_{\Pi}=(V-V_{\Pi})\rho=29,615 \text{ г}, \quad (4)$$

что почти в 3 раза меньше массы сплошного проводника.

Масса проводника в форме угла

$$m_{\gamma}=m_{\Pi}/2=14,807 \text{ г}, \quad (5)$$

что в 5,5 раза меньше массы сплошного проводника.

Для тонкого проводника, по (1) и (2) при $t=1$ мм, объем составит 3 см^3 , а масса – $8,13$ г, что в 10 раз меньше массы сплошного проводника.

Наконец, известен ряд патентов, посвященных способам трассировки проводников МФ с полыми пассивными проводниками: «Способ трассировки проводников модального фильтра» [22]; «Способ трассировки проводников модального фильтра с круговым сечением» [46]; «Способ трассировки проводников модального фильтра на основе плоского кабеля» [47]; «Способ исполнения модального фильтра с уголковым пассивным проводником» [48].

5. МР цепей

5.1. Применение магнитодиэлектриков в структуре с МР

Для повышения надежности РЭС применяют резервирование. Из-за простоты реализации широкое распространение получило холодное резервирование. Такой подход обеспечивает бесперебойную работу резервируемых РЭС. В штатных ситуациях без отказов резервные части никак не задействуются. МР является разновидностью холодного резервирования, обеспечивающей помехоподавление СКИ за счет модальных искажений [49]. Применение МР для повышения надежности уязвимых или критичных элементов БПЛА позволяет также повысить их помехозащищенность. Известно множество различных структур с МР, отличающихся областью применения, эффективностью подавления СКИ, а также массогабаритными характеристиками [50, 51]. Примечательны зеркально-симметричные структуры, обеспечивающие одинаковую эффективность подавления СКИ для каждого из подключаемых узлов [40]. Они обладают хорошими массогабаритными характеристиками, позволяющими применять их в гражданских и военных БПЛА. Исходная конфигурация предлагаемой к использованию структуры с МР представляет собой экранированную четырехслойную печатную плату, поперечное сечение которой представлено на рис. 13а, а эквивалентная схема включения – на рис. 13б. В такой структуре внутренние проводники могут использоваться для подключения цепей питания и земли, а внешние – для резервирования особо критичных или уязвимых узлов БПЛА. В качестве экранирующей плоскости может использоваться собственный корпус БПЛА. Между тем в стенках корпуса могут присутствовать апертуры, уменьшающие эффективность экранирования (ЭЭ). Тщательное проектирование позволяет обеспечить целостность экранирования, но эта задача требует особенно выверенных решений.

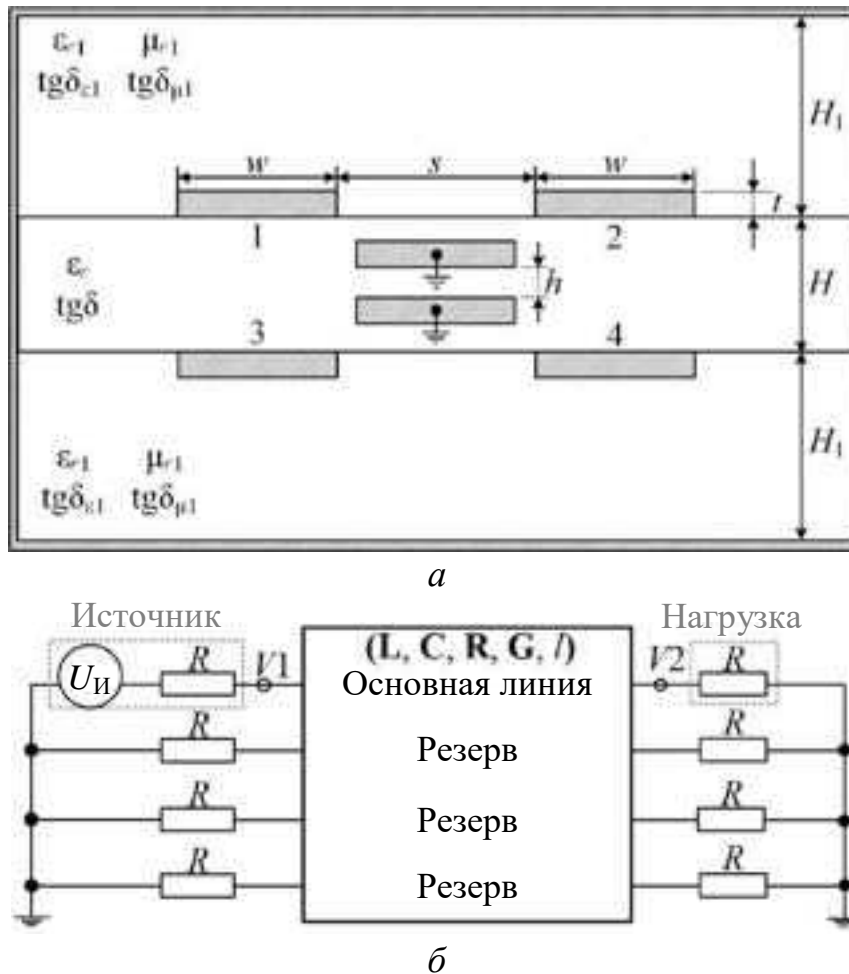


Рис. 14. Поперечное сечение (а) и эквивалентная схема (б) зеркально-симметричной структуры с 3-кратным МР

Для уменьшения резонансных эффектов щелей необходимо использовать ТРИЗ. Путем анализа существующих методов повышения ЭЭ найдено техническое решение. Так, пространство между внешними проводниками структуры с 3-кратным МР и корпусом БПЛА можно заполнить широкополосным РПМ, к примеру, магнитодиэлектриком ЗИПСИЛ РПМ-П1. Такой материал может эффективно использоваться в качестве резонансного поглотителя. В свою очередь, высокие значения ϵ_{r1} и μ_{r1} способны улучшить помехоподавление СКИ за счет увеличения разностей погонных задержек мод. Для оценки временных и частотных характеристик модифицированной конфигурации с РПМ с 3-кратным МР выполнено электродинамическое моделирование. Структура моделировалась при следующих геометрических параметрах из [52]: $s=700$ мкм, $w=1000$ мкм, $t=35$ мкм, $H=920$ мкм, $H_1=2000$ мкм, $h=510$ мкм. Электрические параметры диэлектриков и магнитодиэлектрика составили: $\epsilon_r=4,5$, $\text{tg}\delta=0,025$, $\epsilon_{r1}=20$, $\text{tg}\delta_{\epsilon1}=0,06$, $\mu_{r1}=3$ и $\text{tg}\delta_{\mu1}=0,5$. Для согласования линии передачи с источником помех $U_{и}$ и нагрузкой принято $R=50$ Ом. Анализ частотных характеристик проводился в диапазоне от 0 до 3 ГГц. Для анализа временных характеристик, на вход резервируемого проводника (узел V1) отдельно подавались два гауссовых импульса общей длительностью 0,8 и 2,4 нс (большая часть энергии

лежит в частотном диапазоне от 0 до 3 ГГц и от 0 до 1 ГГц, соответственно). Для комплексной оценки эффективности подавления таких СКИ могут быть использованы N -нормы [53]. В таблице 5 приведены анализируемые нормы и их характеристики из [54]. Так, к примеру, с их помощью оценивается возможность электрического пробоя диэлектрика, выгорания электронного компонента и т.д. В качестве аргумента в формулу передается форма напряжения разложенных импульсов $U(t)$.

Таблица 5 – Применение и описание N -норм

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

Частотные зависимости $|S_{21}|$ и формы напряжения на выходе резервируемого проводника (узел V2), полученные в ходе электродинамического моделирования, представлены на рис. 15. Из частотных характеристик видно, что обе конфигурации обладают характеристиками фильтра нижних частот. При этом применение РПМ уменьшило частоты среза и первого резонанса структуры с МР. Из-за наличия ярко выраженных потерь в магнитодиэлектрике характеристика конфигурации с РПМ монотонно убывает с ростом частоты. Из временных характеристик видно, что на форму СКИ сильное влияние оказывают модальные искажения и потери. Так, для обеих конфигураций видно, что входной импульс разделился на последовательность из 4 импульсов. При этом из-за сильной дисперсии полное модальное разложение не наблюдается. Тем не менее, обе конфигурации уменьшили оба СКИ в несколько раз.

Значения частот среза (f_c) и первого резонанса (f_r), а также максимального напряжения на выходе исследуемой структуры (U_{\max}), сведены в таблицу 6. Вычисленные N -нормы для двух длительностей СКИ приведены в таблице 7.

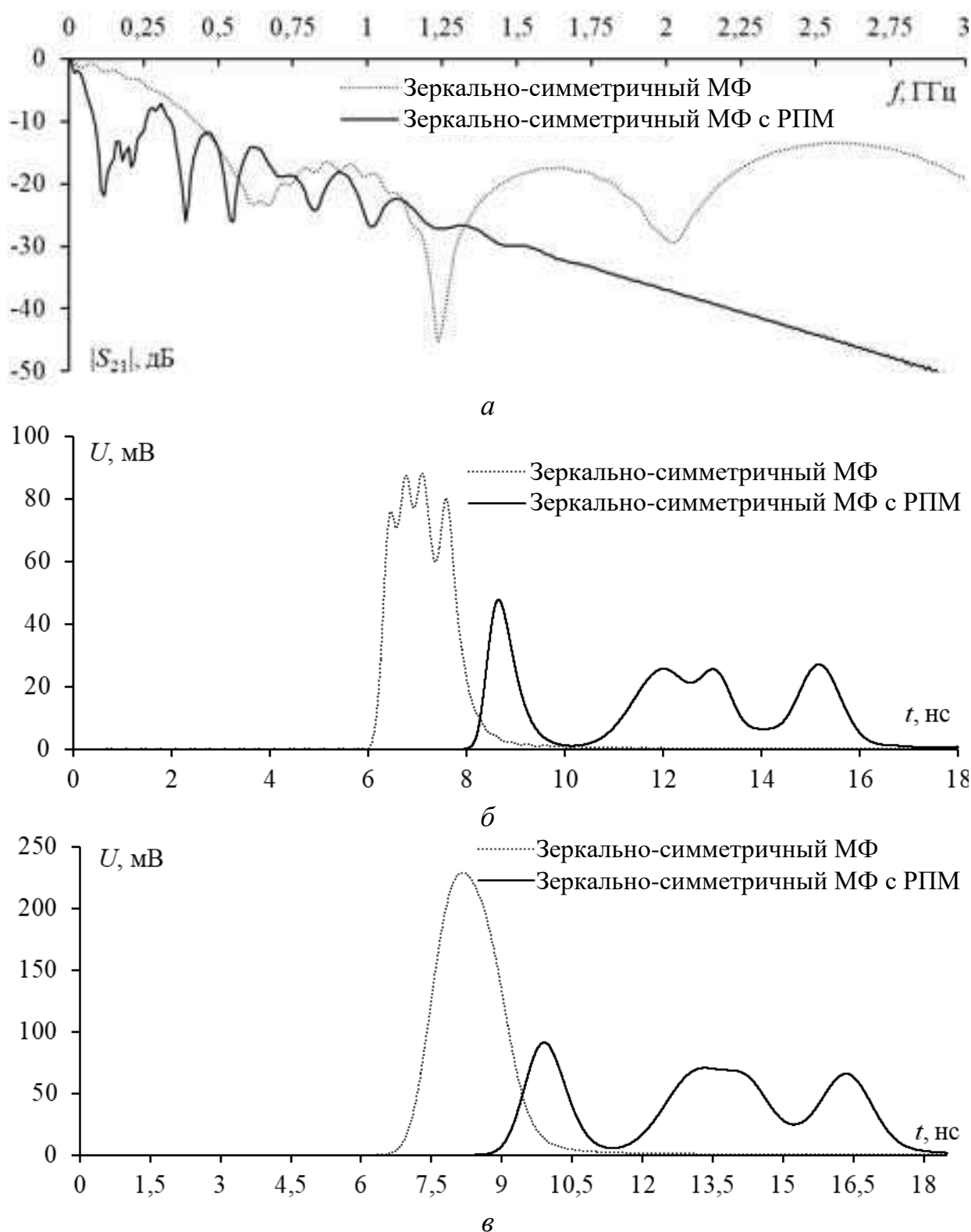


Рис. 15. Частотные зависимости $|S_{21}|$ (а) и формы напряжений при воздействии СКИ длительностью 0,8 (б) и 2,4 нс (в)

Таблица 6 – Сравнение частот среза и первого резонанса, а также максимального напряжения на выходе при воздействии СКИ разной длительности

Параметры	f_c , МГц	f_r , МГц	U_{max} , В (0,8 нс)	U_{max} , В (2,4 нс)
Зеркально-симметричный МФ	190	610	0,088	0,229
Зеркально-симметричный МФ с РПМ	40	120	0,048	0,091

Таблица 7 – Сравнение N -норм при воздействии СКИ разной длительности на зеркально-симметричный (З-С) МФ

Длительность СКИ	Конфигурация	N_1	N_2	N_3	N_4	N_5
0,8 нс	Без МФ	1	$5,32 \cdot 10^9$	$285 \cdot 10^{-12}$	$285 \cdot 10^{-12}$	$14,2 \cdot 10^{-6}$
	З-С МФ	0,088	$0,32 \cdot 10^9$	$136 \cdot 10^{-12}$	$136 \cdot 10^{-12}$	$2,95 \cdot 10^{-6}$
	З-С МФ с РПМ	0,047	$0,14 \cdot 10^9$	$126 \cdot 10^{-12}$	$126 \cdot 10^{-12}$	$1,69 \cdot 10^{-6}$
2,4 нс	Без МФ	1	$1,77 \cdot 10^9$	$856 \cdot 10^{-12}$	$856 \cdot 10^{-12}$	$24,6 \cdot 10^{-6}$
	З-С МФ	0,229	$0,28 \cdot 10^9$	$396 \cdot 10^{-12}$	$396 \cdot 10^{-12}$	$8,09 \cdot 10^{-6}$
	З-С МФ с РПМ	0,091	$1,37 \cdot 10^9$	$375 \cdot 10^{-12}$	$375 \cdot 10^{-12}$	$4,56 \cdot 10^{-6}$

Из таблицы 6 видно, что значение f_c зеркально-симметричного МФ с РПМ уменьшилось на 150 МГц, относительно МФ без РПМ, и составило 40 МГц. Также видно, что значение f_r уменьшилось на 490 МГц. Изменение этих двух параметров говорит об увеличении длительности максимально возможного помехового импульса, который разложится в структуре с МР. Из таблицы 7 видно, что обе структуры значительно ослабляют оба СКИ. При этом применение РПМ позволило уменьшить значения всех норм. Так, в случае N_1 получено дополнительное ослабление в 1,87 раза для СКИ длительностью 0,8 нс и 2,51 раза для 2,4 нс. Из-за сильной дисперсии значение N_2 в структуре с РПМ сильно меньше, чем в исходной. При этом максимальное ослабление входного воздействия составило 38 раз для СКИ длительностью 0,8 нс. В случае N_3 и N_4 также наблюдается ослабление входного воздействия. Так как в форме сигналов отсутствуют отрицательные составляющие, эти две нормы будут идентичны. Применение РПМ дает лишь небольшое преимущество по этим нормам. В случае N_5 наблюдаются большие различия. Так, применение РПМ позволило уменьшить значения последней нормы не менее чем в 1,74 раза для обоих СКИ.

5.2. Оценка возможности ослабления пачки СКИ

Развитие генераторов СКИ неуклонно продолжается. Их воздействия на бортовую аппаратуру БПЛА по сравнению с другими видами электромагнитных импульсов при одних и тех же значениях напряженностей электрического поля являются более эффективными. Это связано с соизмеримостью длительности помеховых и информационных сигналов, что приводит к повышению вероятности нарушения информации, обрабатываемой системой управления БПЛА [55]. Так, из-за высоких темпов развития цифровой вычислительной техники, увеличения объема и быстродействия передаваемой информации, возможности дистанционного управления БПЛА в режиме реального времени, возникает необходимость обеспечения устойчивой работы БПЛА в условиях возможного воздействия на них СКИ. Современные защитные устройства обладают рядом недостатков, которые не позволяют в полной мере обеспечить защиту от СКИ (недостаточное быстродействие, паразитные параметры, сложность и высокая стоимость), в связи с чем возникает необходимость в разработке новых устройств.

Как говорилось ранее, решением является использование устройств защиты, работающих по принципу модальной фильтрации. Примером является описанный ранее зеркально-симметричный МФ [56]. Между тем указанное устройство не лишено недостатков. Важным параметром МФ является разность задержек мод: чем она больше, тем больший по длительности СКИ можно разложить. Таким образом, возникает необходимость в улучшении существующей структуры. В этом случае эффективно использовать ТРИЗ. Путем анализа существующих методов совершенствования МФ найдено несколько решений. Увеличить значение разности задержек мод можно с помощью увеличения длины, однако вместе с тем увеличатся габариты и масса. Также можно увеличить значение ε_r , но тогда вырастет стоимость устройства. Так, использование ТРИЗ создало идею, что можно не изменять само поперечное сечение зеркально-симметричного МФ, а лишь его граничные условия. Предлагается из зеркально-симметричного МФ посредством электрического соединения проводников на концах линии с помощью перемычек, вместо резистивных окончаний на землю, получить зеркально-симметричную МЛ. В таком случае длина и габариты останутся без изменений, а разность задержек мод увеличится в 2 раза.

Основными параметрами СКИ являются амплитуда напряжения, длительность импульса, крутизна его фронта, вид и ширина спектра, а также количество следующих друг за другом импульсов и временные интервалы между ними. В реальной ситуации рассмотрена генерации пачки СКИ с определенной частотой следования или периодом повторения. При этом эффективность воздействия возрастает при увеличении частоты повторения помехи. В этой связи актуален анализ модального разложения пачки СКИ в зеркально-симметричных МФ и МЛ.

Моделирование выполнялось в ПО ADS 2020. Временные характеристики получены с помощью обратного преобразования Фурье, используя подход из [45]. Изначально измерены S -параметры исследуемых структур при помощи векторного анализатора цепей «Панорама» P4226 в частотном диапазоне от 10 МГц до 20 ГГц. Далее в ПО ADS задавалось 2-портовое устройство, определяемое частотными характеристиками, полученными при измерениях, после чего на его вход подавалось воздействие в виде пачки СКИ. Эквивалентные схемы зеркально-симметричных МФ и МЛ представлены на рис. 16а, б, соответственно. Поперечное сечение приведено на рис. 16в, где $w=1075$ мкм, $t=35$ мкм, $s=700$, $h=1000$ мкм, $\varepsilon_r=4,5$. В качестве воздействия выбран сигнал из 4 импульсов с периодами повторения (T) равными 0,5, 1 и 2 нс. Амплитуда каждого импульса равна 1 В, длительности фронта, спада и плоской вершины – по 50 пс, общая длительность – 150 пс. На рис. 17 представлены результаты моделирования зеркально-симметричных МФ и МЛ на воздействие пачки СКИ, а в таблице 8 – U_{\max} на выходе структур.

Таблица 8 – Амплитуды на выходе исследуемых структур

Период повторения импульсов в пачке СКИ (нс)	0,5	1	2
U_{\max} на выходе зеркально-симметричного МФ (мВ)	141,39	82,27	69,45
U_{\max} на выходе зеркально-симметричной МЛ (мВ)	100,97	69,71	41,71

Из рис. 17 следует, что при уменьшении значения T , наложение последовательностей импульсов разложения отдельных СКИ из пачки увеличивает амплитуду напряжения на выходе МФ и МЛ. При $T=2$ нс наблюдается деление каждого импульса из пачки СКИ на отдельную последовательность импульсов разложения. Поэтому, при фиксированных значениях T и длительности каждого импульса из пачки их полное разложение возможно, если значение T больше или равно общей длительности последовательности импульсов разложения одного СКИ.

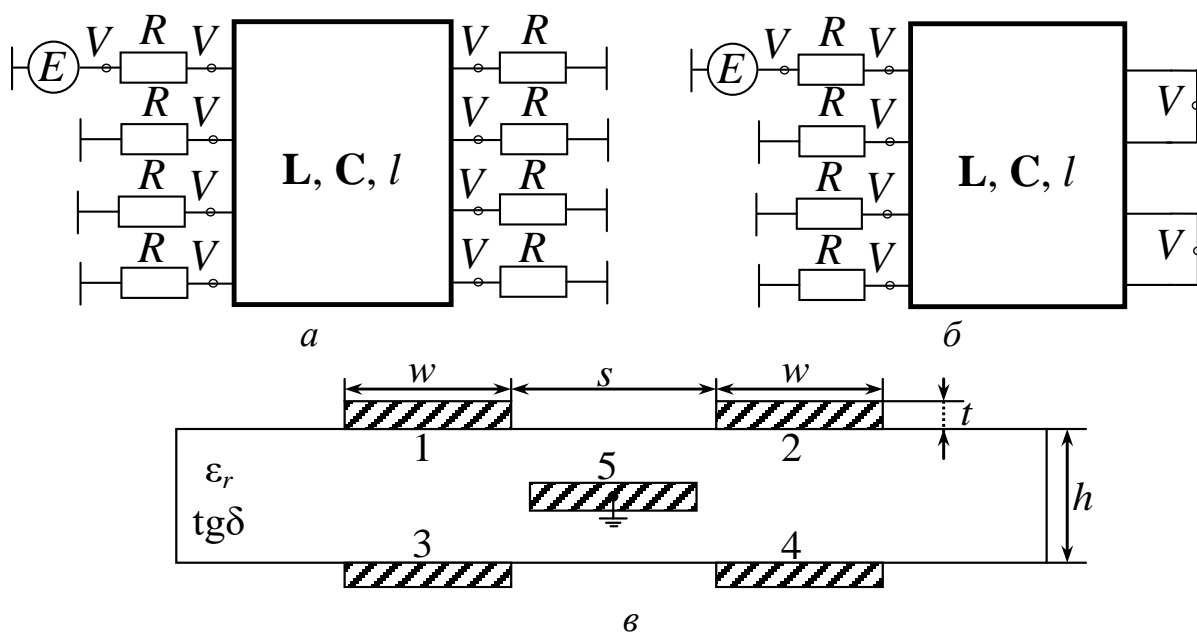
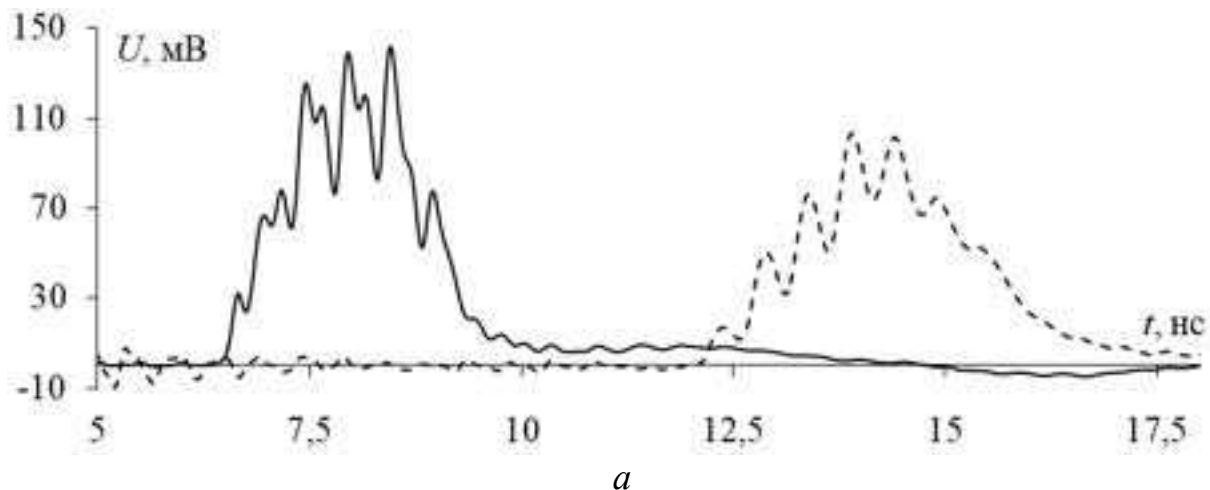
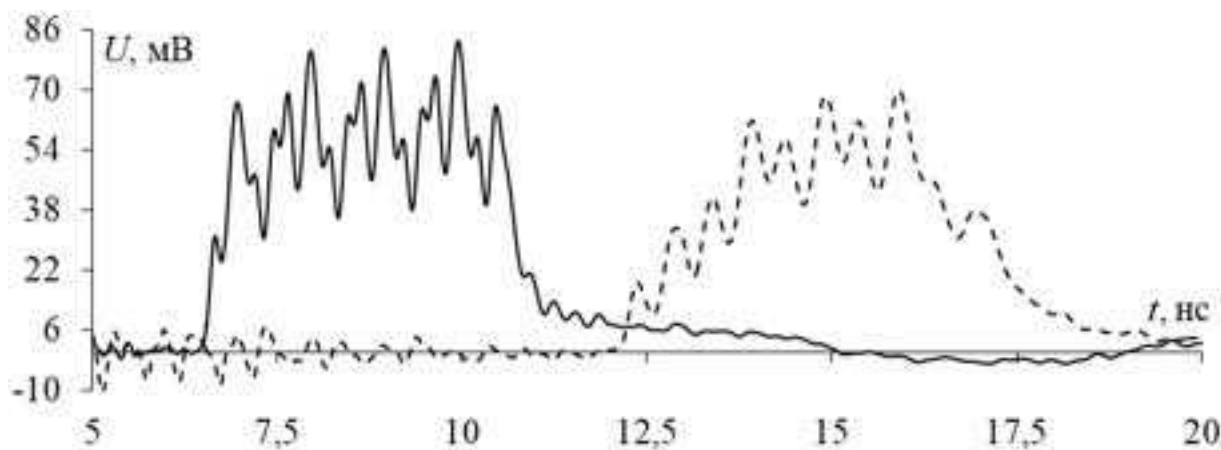


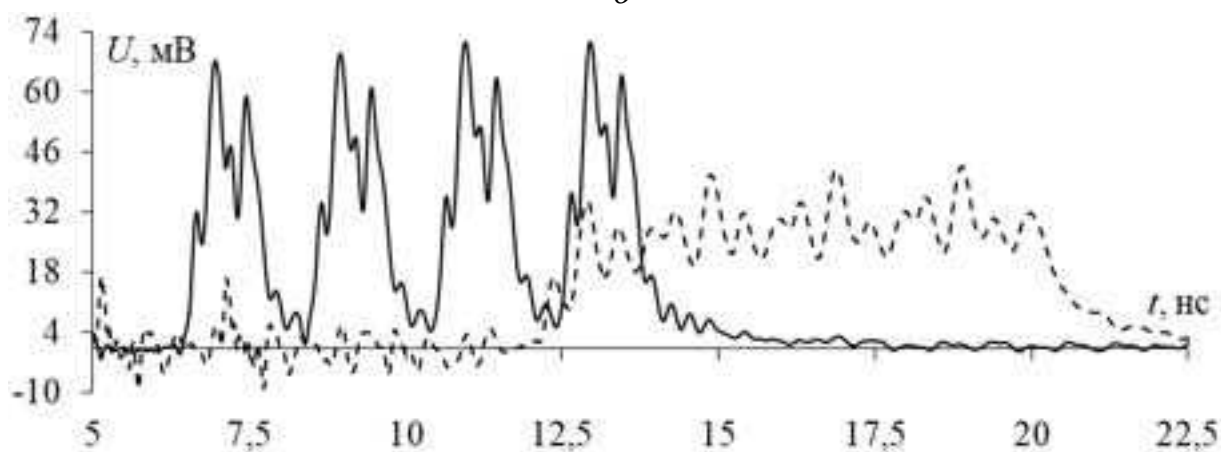
Рис. 16. Эквивалентные схемы зеркально-симметричных МФ (а) и МЛ (б) и их поперечное сечение (в)



а



б



в

Рис. 17. Формы напряжений на выходе зеркально-симметричных МФ (—) и МЛ (---) при воздействии пачки СКИ с периодами повторения 0,5 (а), 1 (б) и 2 нс (в)

6. Учет возможности опасного воздействия СКИ, минуя средства защиты

При трассировке электрических соединений РЭС могут быть структуры из n отрезков N -проводной линии. При этом защита на стыке отрезков связанных линий с противоположными знаками разностей погонных задержек четной и нечетной мод может оказаться бесполезной. Причиной этого может быть модального разложения и последующего восстановления импульса (РПВИ) в конце структуры. Рассмотрим возможность РПВИ на примере структуры из двух отрезков МПЛ из 2, 3, 4 проводников [57]. Поперечное сечение МПЛ при $N=2$ без покрывающего диэлектрического слоя показано на рис. 1а, а с покрывающим слоем – на рис. 18. Иные рассмотренные МПЛ отличаются лишь числом проводников.

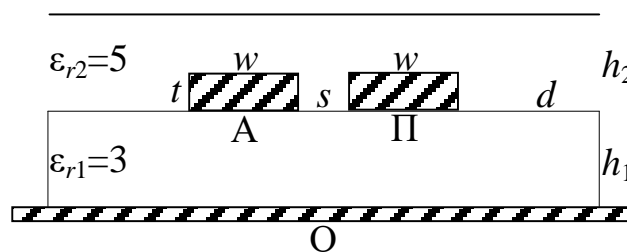
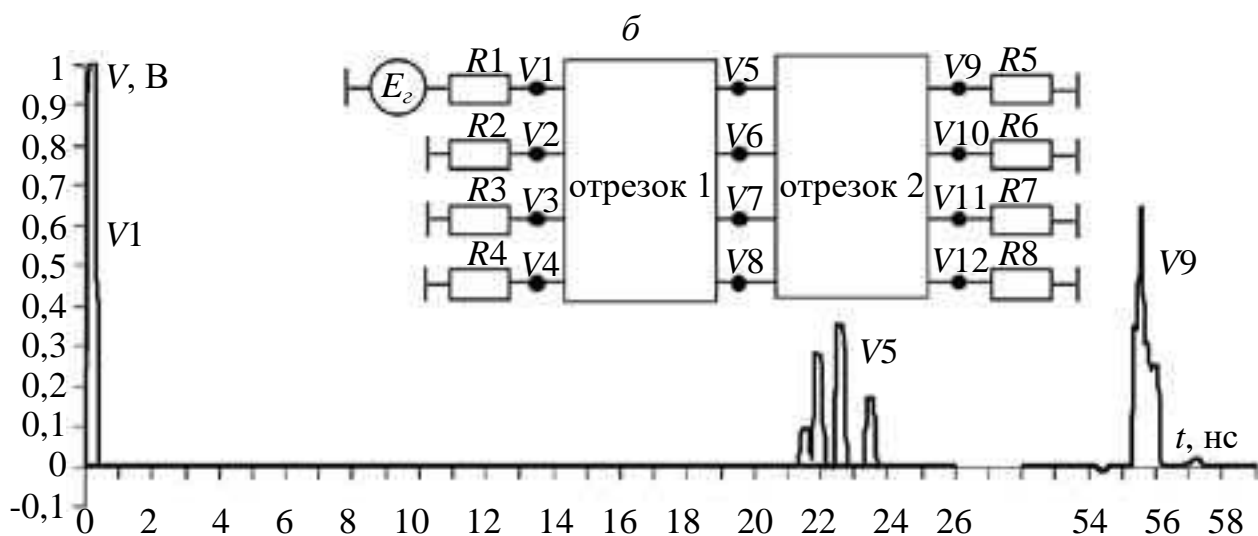
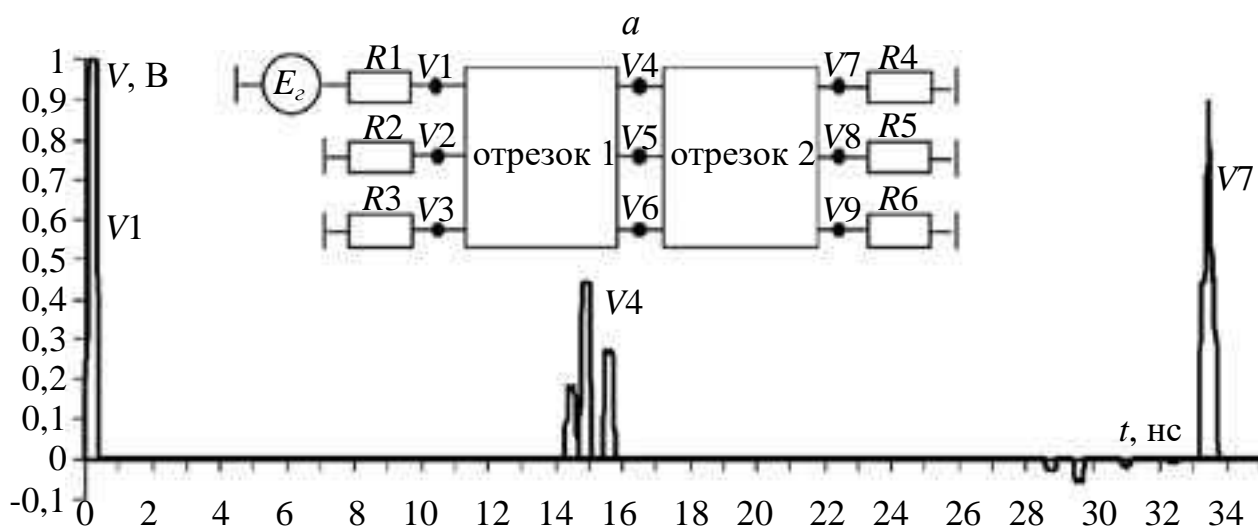
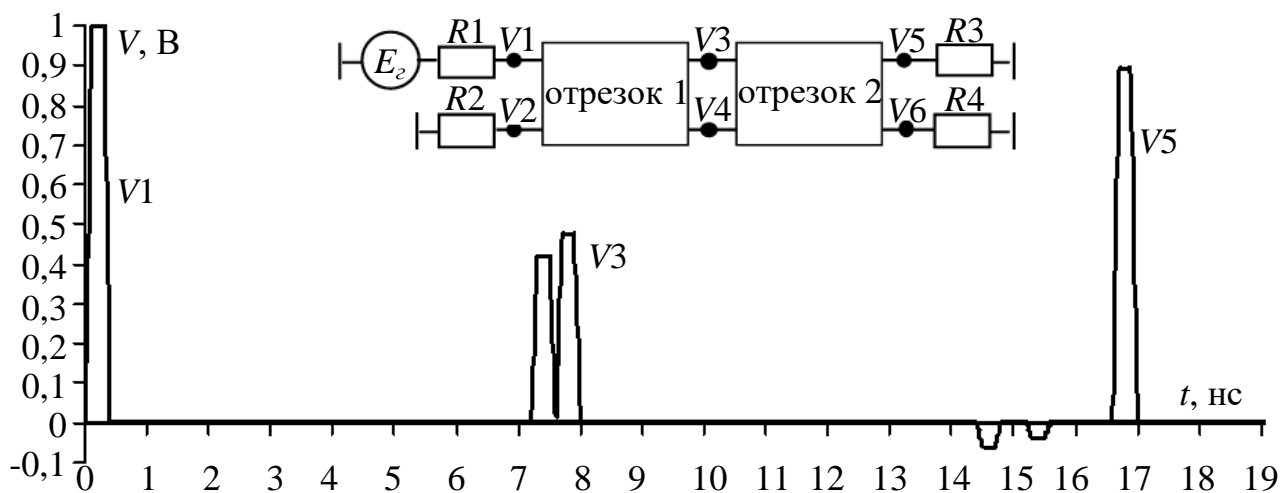


Рис. 18. Поперечное сечение МПЛ при $N=2$ с покрывающим диэлектрическим слоем

При моделировании отклика (рис. 19, 20) параметры двух отрезков выбирались разными, но при условии, что их максимальные разности погонных задержек приблизительно равны: отрезок 1 – без диэлектрического слоя ($h_2/w=0$), а отрезок 2 – с покрывающим диэлектрическим слоем (толщиной $h_2/w=0,65$ для $N=2, 3, 4$). Проводник 1 отрезка 1 возбуждается генератором импульса ЭДС в форме трапеции с длительностями фронта и спада по 100 пс и плоской вершины 200 пс. Видно, что исходный импульс может раскладываться на стыке двух отрезков на N импульсов меньшей амплитуды и восстанавливаться в конце отрезка 2. Кроме того, различие волновых сопротивлений каждой моды на стыке отрезков приводит к отражениям каждой моды от стыка, которые изменяют амплитуды импульсов на стыке и приходят к началу структуры. Поэтому после стыка импульсы каждой моды идут в линию с измененной амплитудой. Они, в свою очередь, испытывают отражения от нагрузки, что также влияет на амплитуду восстановленного сигнала. Отметим, что для полного разложения импульса необходимо, чтобы его длительность была меньше разности задержек мод первого отрезка, а для наиболее полного восстановления требуется одновременный приход мод к концу второго. Длины отрезков для результатов, представленных на рис. 19, выбирались именно из этих условий. Частотный отклик на гармоническое воздействие (см. рис. 20) показывает, что на частоте 1,21 ГГц амплитуда 0,45 В (V_1) в начале отрезка 1 снижается до 0,012 В (V_3) на стыке между отрезками 1 и 2 и восстанавливается в конце отрезка 2 опять до 0,45 В (V_5). Таким образом, при гармоническом воздействии можно достичь ослабления сигнала на стыке в 40 раз.

Если на стыке отрезков между сигнальным и общим проводниками включен защитный прибор, закорачивающий цепь при превышении определенного напряжения на нем, то напряжение в начале структуры (почти в 2 раза большее при импульсном воздействии и почти в 40 раз большее при гармоническом воздействии) может оказаться на нагрузке в конце структуры, а защитный прибор не сработает.



в

Рис. 19. Структура и формы напряжения для $N=2$ (а), 3 (б), 4 (в)

Таким образом, есть основание полагать, что указанное явление разложения и восстановления импульса может иметь место в реальных структурах и

быть одной из причин отсутствия срабатывания защитных приборов. Кроме того, если злоумышленнику известны параметры отрезка 2 и он контролирует параметры отрезка 1, то он может организовать кондуктивную преднамеренную электромагнитную помеху. С учетом этого, важно сформулировать условия восстановления импульса.

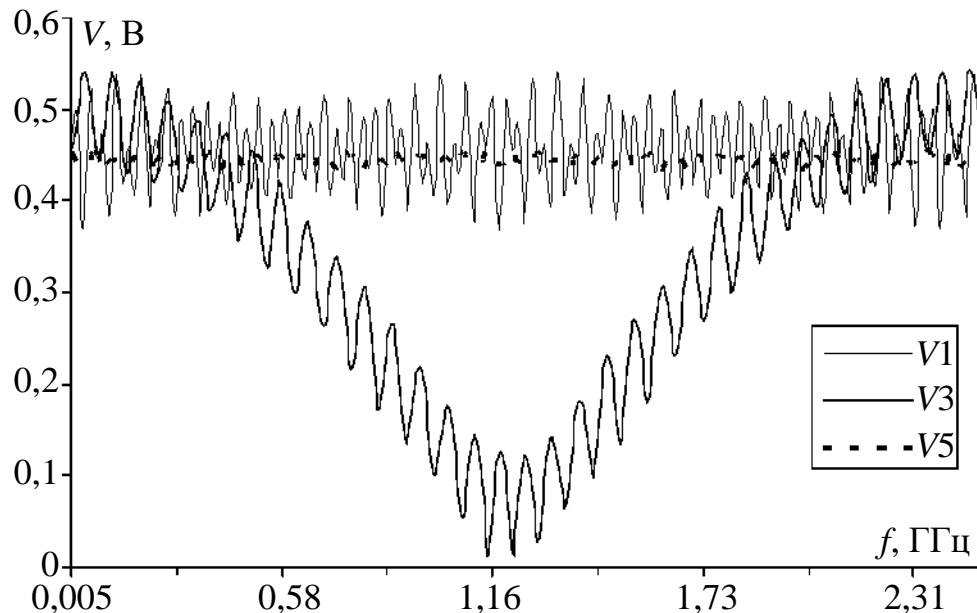


Рис. 20. Частотный отклик: разложение и восстановление импульса на примере МПЛ для $N=2$

В общем случае для n отрезков N -проводных межсоединений длиной l_j восстановление будет наиболее эффективным при одновременном приходе всех мод к концу структуры, т.е. при условии

$$\sum_{j=1}^n l_j \tau_{1j} = \sum_{j=1}^n l_j \tau_{2j} = \dots = \sum_{j=1}^n l_j \tau_{Nj}, \quad (6)$$

где τ_{ij} – погонная задержка i -й моды j -го отрезка.

7. Использование спиральной шины питания

Известен подход к сворачиванию электрических и диэлектрических пластин в спиральную в поперечном сечении линию передачи для эффективной передачи постоянных токов от источника к потребителю, за счёт снижения паразитных параметров линии передачи, снижения потерь на излучение, повышения помехоустойчивости к кондуктивным и излучаемым электромагнитным помехам. Научная значимость работы заключается в совершенствовании существующих линий передачи электроэнергии посредством уменьшения паразитных параметров за счёт взаимных электромагнитных связей, образованных при сворачивании двух и более электрических и диэлектрических плоскостей в спиральную, в поперечном сечении, линию передачи электроэнергии. С учетом требуемых доработок, этот подход может использоваться при передаче питания от источника к потребителю, с использованием системы электроснабжения ти-

повых БПЛА, с минимальным увеличением массы. Показано, что спиральная линия передачи имеет малую погонную индуктивность и может быть использована в т.ч. в качестве силовой шины электропитания, для передачи высоких значений постоянных токов от источника к потребителю [58].

Созданы квазистатические модели без сдвига (рис. 21а, б) и со сдвигом на 180° (рис. 21в, г) бесконечно тонких ($t \rightarrow 0$) (рис. 21а, в) и конечных ($t \rightarrow \text{const}$) (рис. 21б, г) толщин пластин, образующих в поперечном сечении спиральные шины питания с длинами спиралей l_1 и l_2 . Модели гибки для настройки их геометрических параметров и будут использованы для вычислений погонных параметров спиральных в поперечном сечении шин питания. В качестве геометрических параметров при настройке используются: начальный радиус r , количество витков N , толщины изоляторов (расстояние между пластинами) w с заданной относительной диэлектрической проницаемостью ϵ_r и металлических пластин t . На рис. 22 отображены значения относительных погрешностей при $r/w=0,01$ и 100 , для бесконечно тонких $t \rightarrow 0$ (рис. 22а, б) и конечной толщины ($t=0,1$ мм) (рис. 22в, г) пластин без их сдвига друг относительно друга (количество витков N изменялось от 1 до 20).

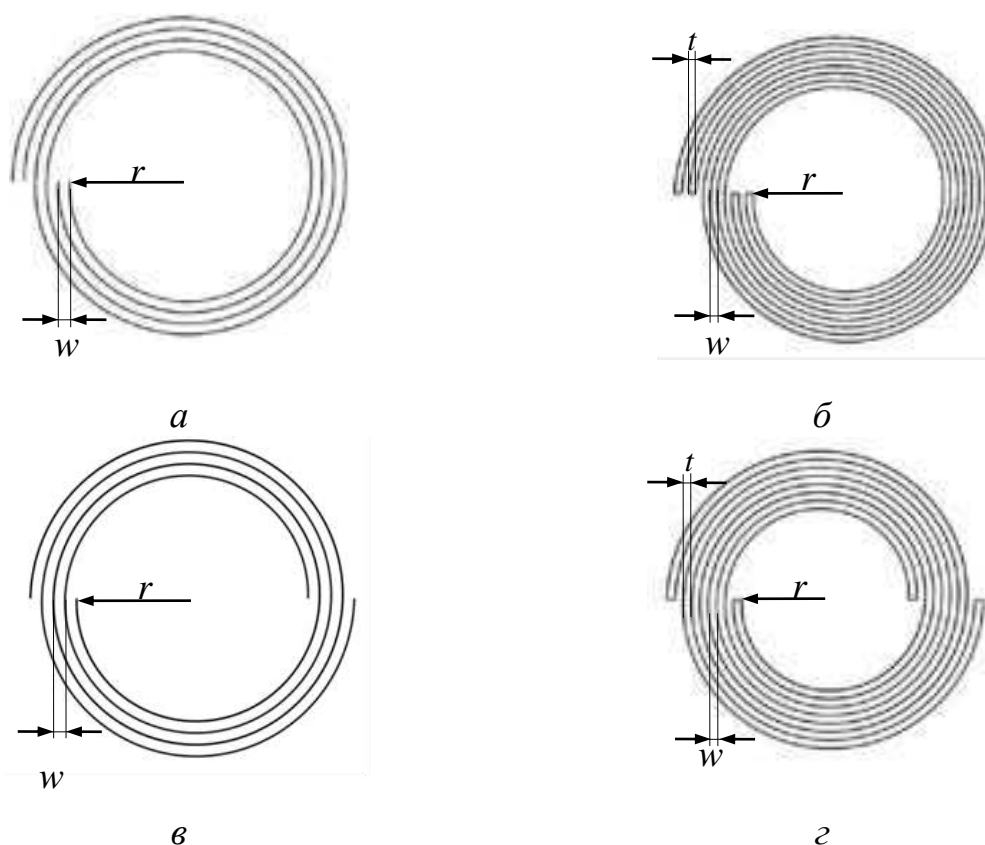


Рис. 21. Поперечные сечения без сдвига (а, б) и со сдвигом на 180° (в, г) бесконечно тонких $t \rightarrow 0$ (а, в) и конечной ($t \rightarrow \text{const}$) (б, г) толщин пластин спиральной шины питания

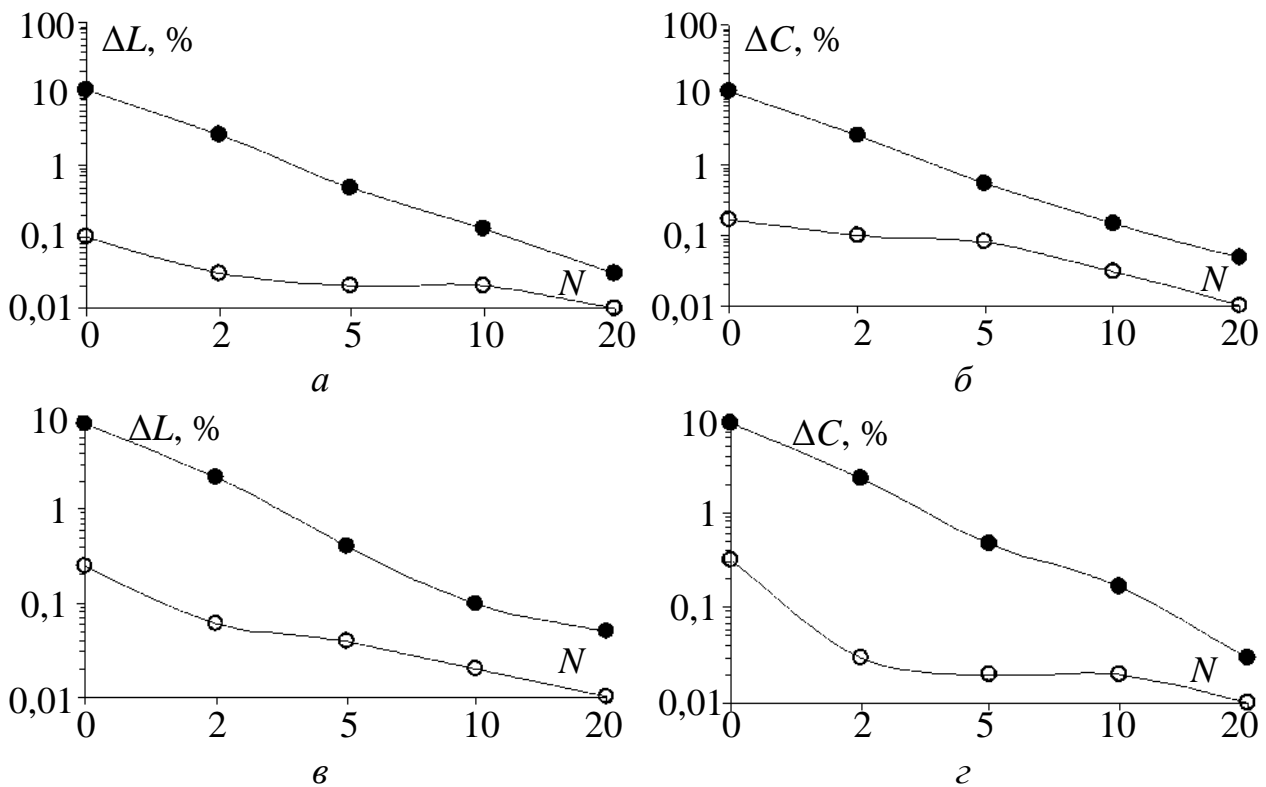


Рис. 22. Относительная погрешность вычисленных значений погонных L ($a, в$) и C ($б, г$) без сдвига пластин толщиной $t \rightarrow 0$ ($a, б$) и $t=0,1$ мм ($в, г$) при $r/w=0,01$ (●) и $r/w=100$ (○)

Из рис. 22 видно, что при постепенном увеличении количества витков N до 20 наблюдается сходимость результатов, полученных по аналитическим и квазистатическим моделям. Увеличение N и r/w с 0,01 до 100 (рис. 22) приводит к значительному уменьшению относительной погрешности. Следовательно, погонные L и C спиральной в поперечном сечении шины питания с большим количеством витков, могут быть вычислены с приемлемой точностью по разработанным аналитическим моделям.

Разработаны модели двух групп спиральных шин питания (с прямоугольным (рис. 23 a) и спиральным (рис. 23 $б$) поперечными сечениями), отличающиеся изолятором и геометрическими размерами проводящих пластин. Потери в проводниках не учитывались. Спиральная шина питания получена сворачиванием прямоугольных пластин шин питания вокруг продольной оси с начальным радиусом r , выбранным так, что длина спирали l_{cn} равна ширине l прямоугольной шины питания.

Из результатов моделирования шины питания с изолятором в виде лакоткани следует, что переход от прямоугольной шине питания к спиральной при $N=2$, позволил уменьшить L и увеличить C в 1,5 раза, а при $N=7$ – в 1,9 раза. Для полиимида, переход от прямоугольной шине питания к спиральной приводит к увеличению C в 1,41 и 1,68 раза и уменьшению L в 1,5 и 1,79 раза, при $N=2$ и $N=7$, соответственно. Для подтверждения корректности полученных результатов моделирования, разработаны и созданы 2 группы макетов линий передачи с прямоугольным и спиральным поперечными сечениями. Первая группа макетов изготовлена из пары медных пластин (шириной $l=0,25$ м, длиной

$Lg=0,25$ м, толщиной $t=100$ мкм) с расположенными между ними изоляторами из лакоткани ЛКМ-0,105 толщиной $t_d=105$ мкм с $\epsilon_r=1,7$ (рис. 24а). Спиральная шина питания была получена путём равномерного скручивания медных пластин прямоугольной формы с начальным радиусом $r=10$ мм (рис. 24б). Вторая группа макетов изготовлена из пары медных пластин ($l=0,25$ м, $Lg=0,04$ м, $t=100$ мкм) с расположенными между ними изоляторами из полиимида толщиной $t_d=60$ мкм с $\epsilon_r=3$ (рис. 25).

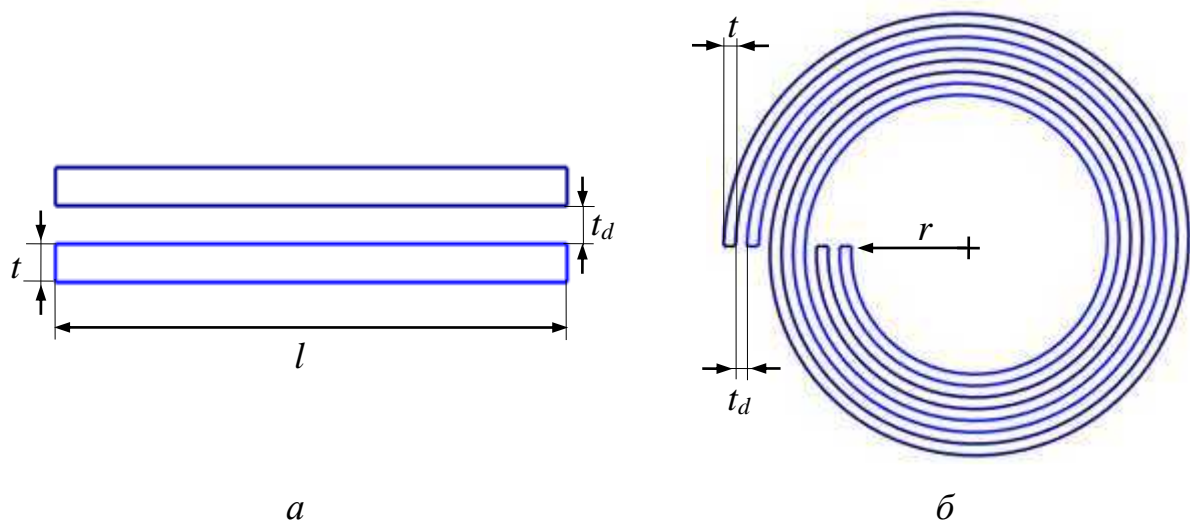


Рис. 23. Поперечные сечения прямоугольной (а) спиральной (б) шин питания

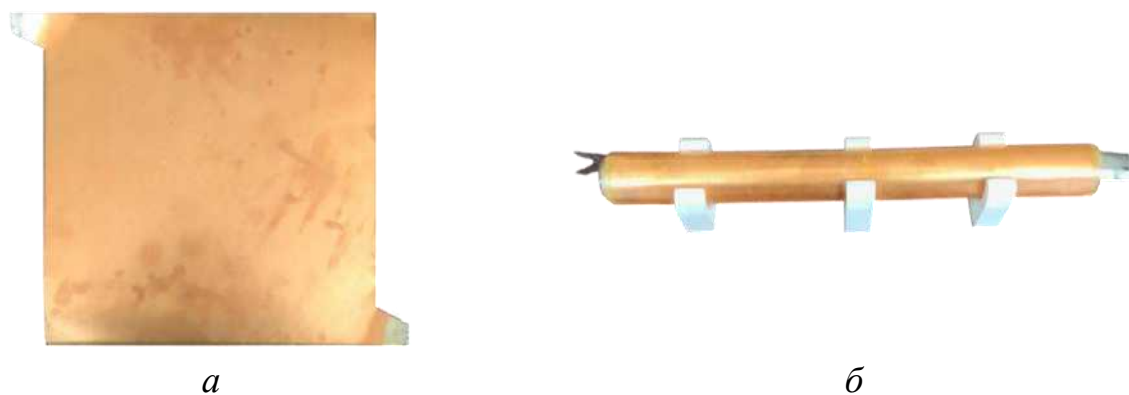


Рис. 24. Прототипы прямоугольной (а) и спиральной (б) шин питания с изолятором из лакоткани



Рис. 25. Прототипы прямоугольной (а) и спиральной (б) шин питания с изоляторами из полиимида

Результаты измерений показали, что макеты шин питания со спиральным поперечным сечением позволяют увеличить значение C в 1,29 и 1,75 раза для $r=10$ мм и $r=4$ мм, соответственно, по сравнению с конструкцией из прямоугольных проводников. Разница вычисленных и измеренных значений ёмкостей (ΔC) составляет не более 1,1 нФ для прямоугольной шины питания и не более 3,64 нФ – для спиральной, что соответствует $\pm 6\%$ и $\pm 13,6\%$. С ростом частоты значение проводимости $|G|$ увеличивается и на частоте $f = 200$ кГц для спирального сечения составляет 2 мСм, а для прямоугольного – 1,365 мСм сечений. С ростом частоты значения импеданса Z и активного сопротивления R – увеличиваются, а реактивного сопротивления X – уменьшается. При этом максимальная разница значений Z , R и X между спиральным и прямоугольным поперечными сечениями составляет не более 140 мОм, 80 мОм и 110 мОм соответственно. Кроме этого, с ростом частоты $|Z|$ и R увеличиваются, а X уменьшается. При этом наибольшие изменения происходят у шины питания с прямоугольным поперечным сечением, а наименьшее – со спиральным при $r=4$ мм.

Так, разработаны и запатентованы способ изготовления и на его основе устройство спиральной шины питания. На основе способа изготовлены макеты спиральной шины питания. Сравнены измеренные частотные зависимости реальной и мнимой частей импеданса, проводимостей и ёмкости, используя два разных измерительных прибора. Измерены S -параметры созданных макетов спиральной шины питания с двумя разными изоляторами, подтвердившие фильтрующие свойства спиральной шины питания. Проведены измерения параметров спиральной шины питания после воздействия реального электростатического разряда, показавшие высокую электрическую прочность изоляции и отсутствие изменения параметров.

8. Применение защитных МЛ

Рассмотрим МЛ для ослабления амплитуды СКИ. Так, известно, что в одном витке МЛ в воздухе СКИ может раскладываться на 2 импульса (перекрестную наводку и основной сигнал) меньшей амплитуды [26], а в витке микрополосковой МЛ уже на 3 импульса (перекрестную наводку, и импульсы нечетной и четной мод) еще меньшей амплитуды [59]. Так, ослабление СКИ в воздушной МЛ составило 1,6 раза, а микрополосковой – 2,4 раза. Более того, возможно разложение СКИ даже на 4 импульса меньшей амплитуды [60]. Исследования МЛ для защиты от СКИ позволили увеличить ослабление СКИ в МЛ. Так, за счет асимметрии поперечного сечения микрополосковой МЛ и дополнительного пассивного проводника [61], ослабление СКИ в ней составило уже 5,4 раза. Еще одним ресурсом является каскадирование МЛ [62], за счет которого ослабление СКИ в микрополосковой МЛ из 2 соединенных каскадно витков составило 5 раз, из 3 – 8 раз, из 4 – 20 раз, а из 5 – 33 раза. Наконец, примечательна гибридизация МЛ и МФ, за счет их каскадного соединения. Так, каскадное соединение 3-проводного МФ и витка микрополосковой МЛ позволило ослабление СКИ в 10 раз [63]. Также были исследованы структуры на основе каскадного соединения 3- и 4-проводного МФ и МЛ с лицевой связью, где максимальное ослабление СКИ составило 12 раз [64]. Отметим, что в указан-

ных публикациях сформулированы условия, позволяющие полное разложение СКИ для его максимального ослабления. Эти условия напрямую связаны с матрицами вторичных параметров структур, которые, в свою очередь, определяются их геометрическими параметрами. Это выявлено с помощью ТРИЗ и уже отработанных подходов и методов.

9. Применение магнитодиэлектриков в составе корпусов БПЛА

Одной из возможных причин ухудшения ЭМС БПЛА и повышения их радиолокационной заметности является возбуждение резонансов во внутреннем объеме или щелях электропроводящих оболочек (таких как корпуса), входящих в состав БПЛА. К примеру, известно, что корпуса, используемые в качестве электромагнитных экранов, на резонансной частоте могут обладать отрицательной ЭЭ, т.е. не ослаблять, а усиливать проникающую в них электромагнитную помеху [65]. Помимо этого, из-за возбуждения объемных резонансов эффективная поверхность рассеяния электропроводящей оболочки или корпуса может увеличиться более чем в 10 раз [66].

Традиционно для борьбы с негативным влиянием резонансов применяются два основных подхода, первый из которых заключается в подавлении (снижении) амплитуды резонанса, а второй – в смещении резонансных частот (т.е. их сдвиге в более низкочастотную или высокочастотную область). Для подавления амплитуды резонанса в электропроводящей оболочке обычно размещают радиопоглотители [67] или частотно-избирательные поверхности [68]. Смещение резонансных частот в основном достигается путем добавления в структуру дополнительных диэлектрических [69] или электропроводящих [70, 71] неоднородностей. Подходы, описанные в [67–71], довольно эффективны, однако плохо применимы к БПЛА, поскольку могут ощутимо увеличивать их массу.

Значительно меньше увеличивает массу БПЛА новый способ борьбы с резонансами, основанный на перекрытии щелей или отверстий в электропроводящих оболочках тонкими и легковесными магнитодиэлектрическими структурами. Способ может применяться как для подавления резонанса щели, так и для ослабления амплитуды объемного резонанса, возникающего внутри самой электропроводящей оболочки, что будет продемонстрировано далее. Магнитодиэлектрическая структура может не полностью перекрывать щель, а закрепляться только по её периметру и не препятствовать отводу воздуха из оболочки, что крайне необходимо, если щель используется для вентиляции и охлаждения РЭС БПЛА.

Рассмотрим работу способа на конкретном примере. Для этого, используя численный метод конечных разностей во временной области, в диапазоне частот от 1 до 3 ГГц вычислим модуль напряженности электрического поля $|E|$ в центре идеально-проводящей цилиндрической оболочки, на которую воздействует вертикально-поляризованная плоская электромагнитная волна (рис. 26). Оболочка имеет радиус $R = 50$ мм, длину $L = 100$ мм и толщину 0,5 мм, а в её лицевой (со стороны падения плоской волны) и задней стенках выполнены щели высотой 4 мм с ширинами 90 мм и 40 мм, соответственно.

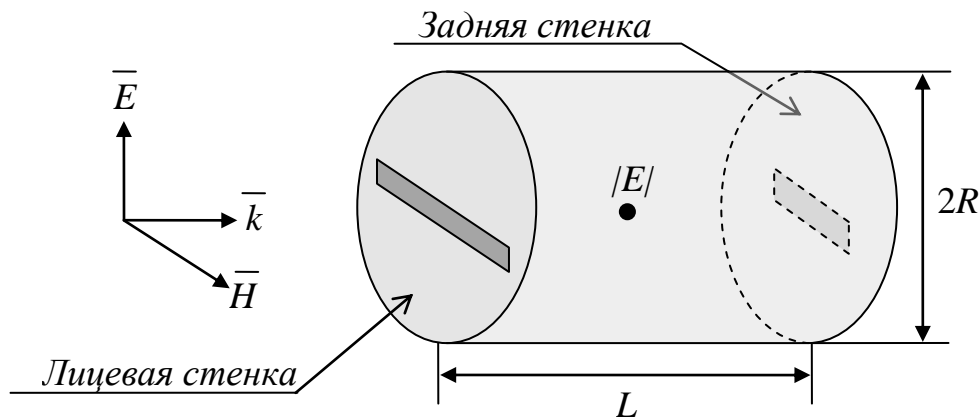


Рис. 26. Воздействие плоской электромагнитной волны на цилиндрическую оболочку со щелями

Частотная зависимость $|E|$ для оболочки из рис. 26 без магнитодиэлектрических структур в щелях представлена на рис. 27. Видно, что в рассматриваемом частотном диапазоне в центре оболочки наблюдаются два максимума $|E|$, которые вызваны резонансами. Первый максимум (1,75 В/м) на частоте 1,65 ГГц связан с резонансом щели, расположенной в лицевой стенке. Второй максимум (14,9 В/м) на частоте 2,33 ГГц вызван объемным резонансом внутри самой оболочки. Резонанс от щели, расположенной в задней стенке, в этом частотном диапазоне не проявляется, поскольку ширина щели невелика.

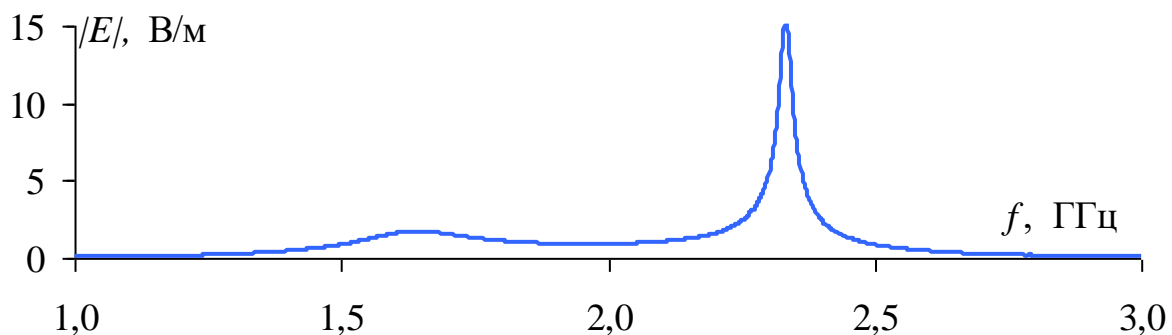


Рис. 27. Частотная зависимость $|E|$ в центре цилиндрической оболочки до размещения в её щелях магнитодиэлектрических структур

Для подавления двух выявленных резонансов разработаем магнитодиэлектрические структуры с толщиной, равной толщине оболочки (0,5 мм). Предположим, что часть щели в лицевой стенке должна остаться открытой, поэтому в этой щели магнитодиэлектрик будет размещаться только по периметру. Щель, имеющуюся в задней стенке, будем использовать в качестве частотно-избирательного звена, ослабляющего амплитуду резонанса оболочки (2,33 ГГц). Чтобы это стало возможным, частоты резонанса щели и самой оболочки должны совпадать, что можно обеспечить путем добавления магнитодиэлектрика в щель.

По результатам разработки получены две магнитодиэлектрические структуры с размерами, указанными на рис. 28. В качестве материала для структуры из рис. 28а, подавляющей резонанс на частоте 1,65 ГГц, выбран магнитодиэлектрик с высокими потерями ($\epsilon_r = 4 + 2,5j$ и $\mu_r = 4 + 2j$). Для структуры, подавляющей резонанс на частоте (2,33 ГГц), используя эвристический поиск, подобраны следующие электрофизические параметры: $\epsilon_r = 14 + 0,001j$ и $\mu_r = 6 + 0.001j$ (материал с низкими диэлектрическими и магнитными потерями).

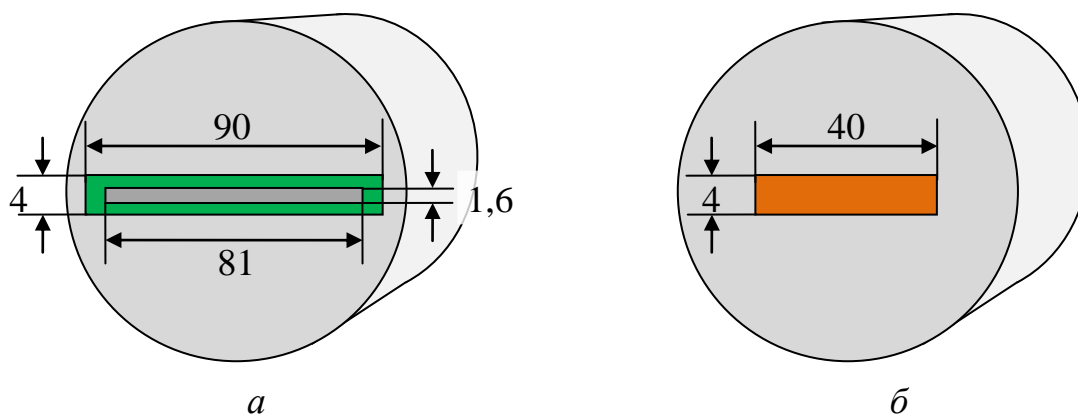


Рис. 28. Геометрические размеры магнитодиэлектрических структур, разработанных для щелей в лицевой (а) и задней (б) стенках оболочки

Выполнены повторные вычисления $|E|$ для цилиндрической оболочки из рис. 26, но при перекрытии её щелей разработанными магнитодиэлектрическими структурами. На рис. 29 приведено сопоставление частотных зависимостей $|E|$ в присутствии и отсутствии этих структур.

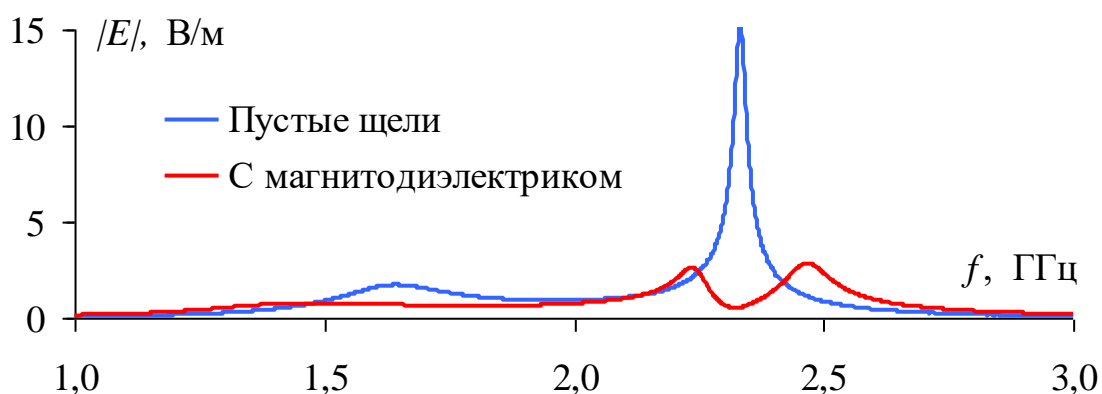


Рис. 29. Частотные зависимости $|E|$ в центре цилиндрической оболочки до и после размещения в её щелях магнитодиэлектрических структур

Видно, что при добавлении магнитодиэлектриков, амплитуды обоих резонансов существенно ослабляются. Так, на частоте 1,65 ГГц значение $|E|$ уменьшилось до 0,68 В/м (более чем в 2,5 раза), а на частоте 2,33 ГГц – до 0,54 В/м (в 27,6 раз). Максимальное значение $|E|$ после перекрытия щелей разработанными структурами составило 2,7 В/м.

Полученные результаты доказывают, что способ подавления резонансов в электропроводящих оболочках, основанный на перекрытии их щелей магнито-диэлектриками, является довольно эффективным. Для подавления резонанса не требуется много материала, поэтому масса оболочки увеличивается незначительно, что делает этот способ хорошо применимым к БПЛА.

10. Использование программных средств

На этапе проектирования МФ важную роль играет выбор оптимального набора геометрических и электрофизических параметров разрабатываемой структуры (в основном, из-за специфики требований, предъявляемых к МФ). Поскольку диапазон возможных значений для различных параметров МФ довольно широк, как и количество самих изменяемых параметров, перебрать все возможные комбинации (количество которых может достигать до тысяч) вручную физически невозможно. Поэтому для поиска такого набора параметров применяются различные методы оптимизации. Они подразделяются на локальные (определяют локальный экстремум) и глобальные (определяют глобальный экстремум) [72, 73]. В настоящее время реализована возможность оптимизации посредством ГА, ЭС, СП и их вариаций, по целевым функциям, включающим в себя один или несколько критериев оптимизации.

Как правило, полосковые МФ оптимизируются с помощью эволюционных алгоритмов, таких как ГА и ЭС [74]. Выбор эволюционных алгоритмов в данном случае обусловлен наличием большого числа локальных экстремумов, оптимизируемых параметров и ряда критериев оптимизации, применяемых к МФ одновременно. Оптимизация МФ с круговым сечением посредством эволюционных алгоритмов была впервые реализована в [44] с использованием модифицированного алгоритма ЭС. Многокритериальная оптимизация позволяет учитывать более одного интересующего критерия (например, амплитудный и временные критерии, а также критерий согласования).

Рассмотрим в качестве примера оптимизацию двух МФ (с разной геометрией поперечного сечения) на основе: 3-проводной МПЛ (рис. 30а) и 2-проводного плоского кабеля (рис. 30б). Обозначения поперечного сечения МФ на основе 3-проводной МПЛ соответствуют представленным на рис. 1а. На рис. 30б (где ε_{ri} – относительная диэлектрическая проницаемость среды, r_{1i} – радиус проводников, r_{4i} – радиус изоляции вокруг проводников, s_i – расстояние между изоляцией соседних проводников, а h_1 – толщина внешней изоляции) центральный проводник принят опорным, а по краям от него расположены сигнальные проводники. В качестве воздействия использован трапецевидный СКИ с ЭДС 1 В, длительностью плоской вершины и временем фронта и спада $t_d=t_r=t_f=50$ пс (общая длительность СКИ $t_\Sigma=150$ пс). Длина МФ принята равной 1 м, а окончания всех проводников (R) взяты по 50 Ом.

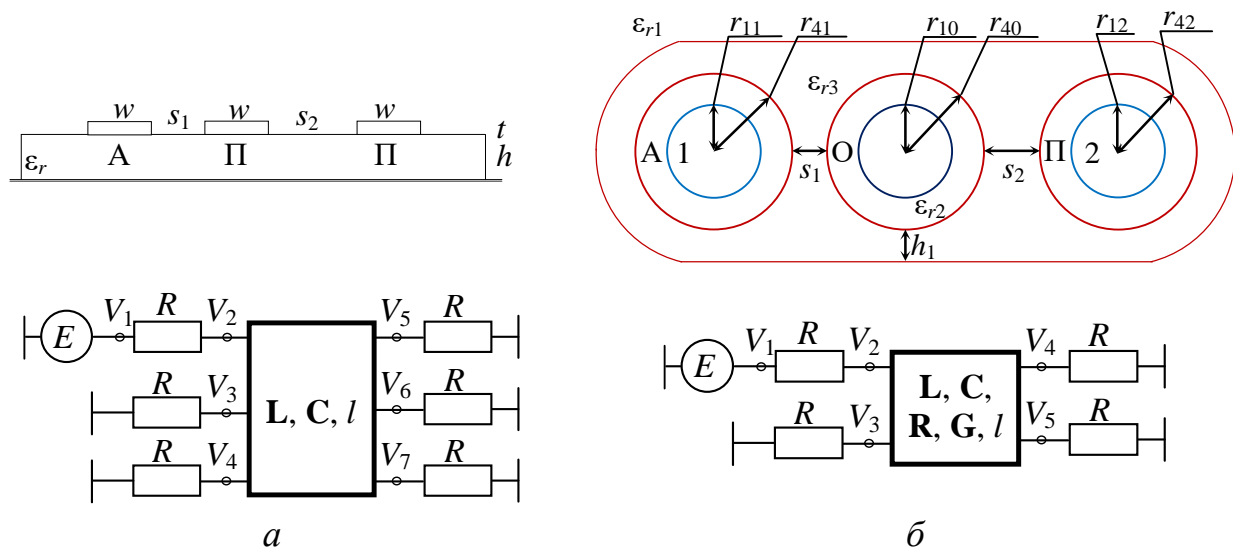


Рис. 30. Поперечные сечения и эквивалентные схемы МФ на основе 3-проводной МПЛ (а) и 2-проводного плоского кабеля (б)

Оптимизация выполнялась по амплитудному критерию и критерию согласования линии с трактом по целевой функции (7). Первый критерий важен для минимизации максимального уровня выходного напряжения на выходе МФ, а второй – отражений полезных высокочастотных сигналов от входа МФ:

$$F = M_1 \frac{\max(U_{\text{вых}}(t))}{\max(E(t))} + M_2 \frac{|\max(E(t)) - 2 \max(U_{\text{вх}}(t))|}{\max|E(t)|} \quad (7)$$

где M_i – весовой коэффициент i -го критерия, $i=1, 2, \dots, N_c$ (где N_c – число критериев оптимизации), $U_{\text{вых}}(t)$ – напряжение на выходе МФ, $E(t)$ – ЭДС источника, $U_{\text{вх}}(t)$ – напряжение на входе МФ, $M_1=M_2=0,5$ для МПЛ и $M_1=0,4, M_2=0,6$ для кабеля.

Оптимизация МФ на МПЛ выполнялась с помощью модифицированного алгоритма ЭС (далее ЭС) [75], ГА и СП, без учета потерь. В качестве оптимизируемых параметров взяты h, t, s_1 и s_2 . Диапазоны оптимизируемых параметров, при ГА и СП: 200–1000 мкм для h ; 18–200 мкм для t ; 10–300 мкм для s_1 и s_2 . Начальные решения при ЭС: 500 мкм для h ; 100 мкм для t ; 200 мкм для s_1 и s_2 , а шаг – $\sigma=0,1$ мм.

Оптимизация МФ на кабеле выполнялась с помощью аналогичных алгоритмов, с учетом потерь. Оптимизируемые параметры: r_{11}, r_{12}, s_1 и s_2 (в данном случае – расстояния между изоляцией соседних проводников), h_1 . Оптимизация МФ выполнялась в диапазонах реальных параметров одножильных проводов Н07V-U [76]. Диапазоны оптимизируемых параметров при ГА и СП: 0,5–1,8 мм для r_{11}, r_{12}, s_1 и s_2 ; 0,1–1 мм для h_1 . Начальные решения при ЭС: 1,1 мм для r_{11}, r_{12}, s_1, s_2 ; 0,5 мм для h_1 , а шаг – $\sigma=0,1$ мм. Значение r_{4i} при оптимизации фиксировано (ввиду использования реальных параметров) и составляет 0,8 мм.

При оптимизации посредством ЭС все запуски останавливались по причине достижения максимального количества вычислений (тогда как в качестве критерия останова могут выступать сходимость параметров или ЦФ, а также отсутствие сходимости). При оптимизации посредством ГА, для всех МФ ко-

эффиценты мутации и кроссовера взяты по 0,1 и 0,5, соответственно. На рис. 31, 32 представлены графики сходимости значений оптимизируемых (h , t , s_1 и s_2) и выходных ($U_{\text{вх}}$ и $U_{\text{вых}}$) параметров при последовательных запусках (N) оптимизации по трем алгоритмам при разном числе вычислений (N_{it}). При оптимизации, значение N_{it} увеличивалось от 500 до 5000 для ЭС и СП, а для ГА – изменялось число особей/поколений от 5/10 до 50/100. На рис. 33 показаны формы ЭДС и наилучшие варианты напряжений на входе и выходе двух МФ после оптимизации посредством трех алгоритмов.

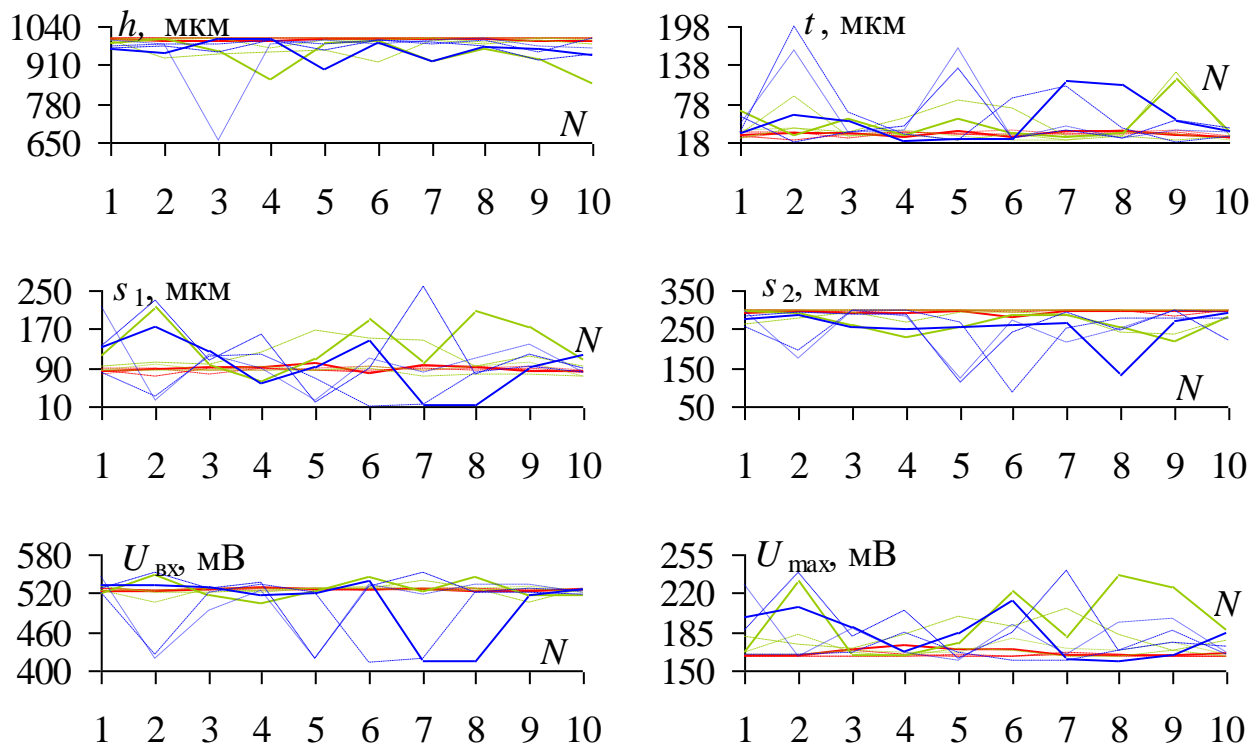


Рис. 31. Результаты оптимизации МФ на основе 3-проводной МПЛ с использованием ЭС при $N_{it}=500$ (—), 1000 (- -), 2500 (···), 5000 (-·-), ГА при числе особей/поколений 5/10 (—), 10/10 (- -), 10/100 (···), 50/100 (-·-), СП при $N_{it}=500$ (—), 1000 (- -), 2500 (···), 5000 (-·-)

Из рис. 31 следует, что для МФ на МПЛ наилучшие результаты получены при $N_{it}=1000$ при оптимизации с помощью ЭС ($U_{\text{вх}}=525,1$ мВ, $U_{\text{max}}=162,8$ мВ), при числе особей/поколений 50/100 для ГА ($U_{\text{вх}}=521,8$ мВ, $U_{\text{max}}=162,4$ мВ) и при $N_{it}=5000$ для СП ($U_{\text{вх}}=520,2$ мВ, $U_{\text{max}}=164,3$ мВ). Это подтверждается данными из рис. 33а, из которого видно, что для всех алгоритмов, минимизация U_{max} достигнута за счет выравнивания амплитуд мод 1 и 2, тогда как мода 3 незначительно меньше них. При ЭС первые две моды частично накладываются из-за небольшого значения Δt_1 (143,4 пс при $t_2=150$ пс). Также наблюдается обеспечение критерия согласования в данном МФ (равенство $U_{\text{вх}}$ половине амплитуды ЭДС источника).

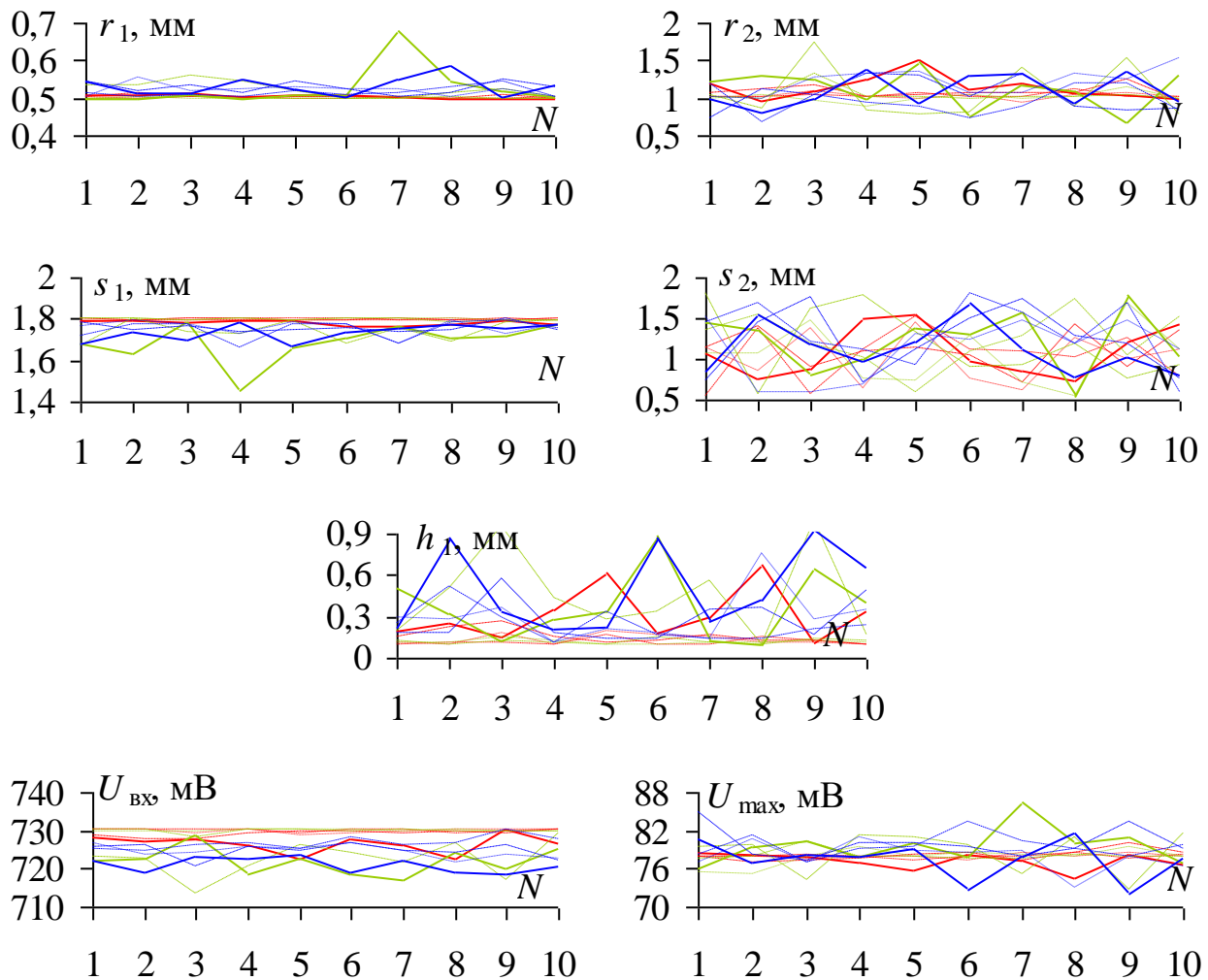


Рис. 32. Результаты оптимизации МФ на основе 2-проводного плоского кабеля с использованием ЭС при $N=500$ (—), 1000 (- -), 2500 (···), 5000 (-·-), ГА при числе особей/поколений $5/10$ (—), $10/10$ (- -), $10/100$ (···), $50/100$ (-·-), СП при $N=500$ (—), 1000 (- -), 2500 (···), 5000 (-·-)

Из рис. 32 следует, что для МФ на кабеле наилучшие результаты получены при $N_{it}=5000$ при оптимизации с помощью ЭС ($U_{вх}=729,3$ мВ, $U_{max}=77,4$ мВ), при числе особей/поколений $10/100$ для ГА ($U_{вх}=717,2$ мВ, $U_{max}=72,7$ мВ), при $N_{it}=500$ для СП ($U_{вх}=718,7$ мВ, $U_{max}=72,1$ мВ). Это также подтверждается данными из рис. 33б, из которого видно, что при оптимизации с помощью трех алгоритмов, минимизация U_{max} достигнута за счет выравнивания амплитуд мод 1 и 2. Значения Δt при оптимизации посредством ЭС составили $0,593$ нс, $0,58$ нс для ГА и $0,56$ для СП. Между тем видно, что согласование МФ с трактом 50 Ом обеспечивается слабо в данном МФ. Это связано со спецификой задания весовых коэффициентов при оптимизации данного МФ ($0,6$ на амплитудный критерий и $0,4$ на критерий согласования). Наконец, из рис. 32 видно, что не достигается сходимость параметра s_2 в процессе оптимизации. Это объясняется малым влиянием s_2 (в заданном диапазоне его оптимизации) на поведение целевой функции.

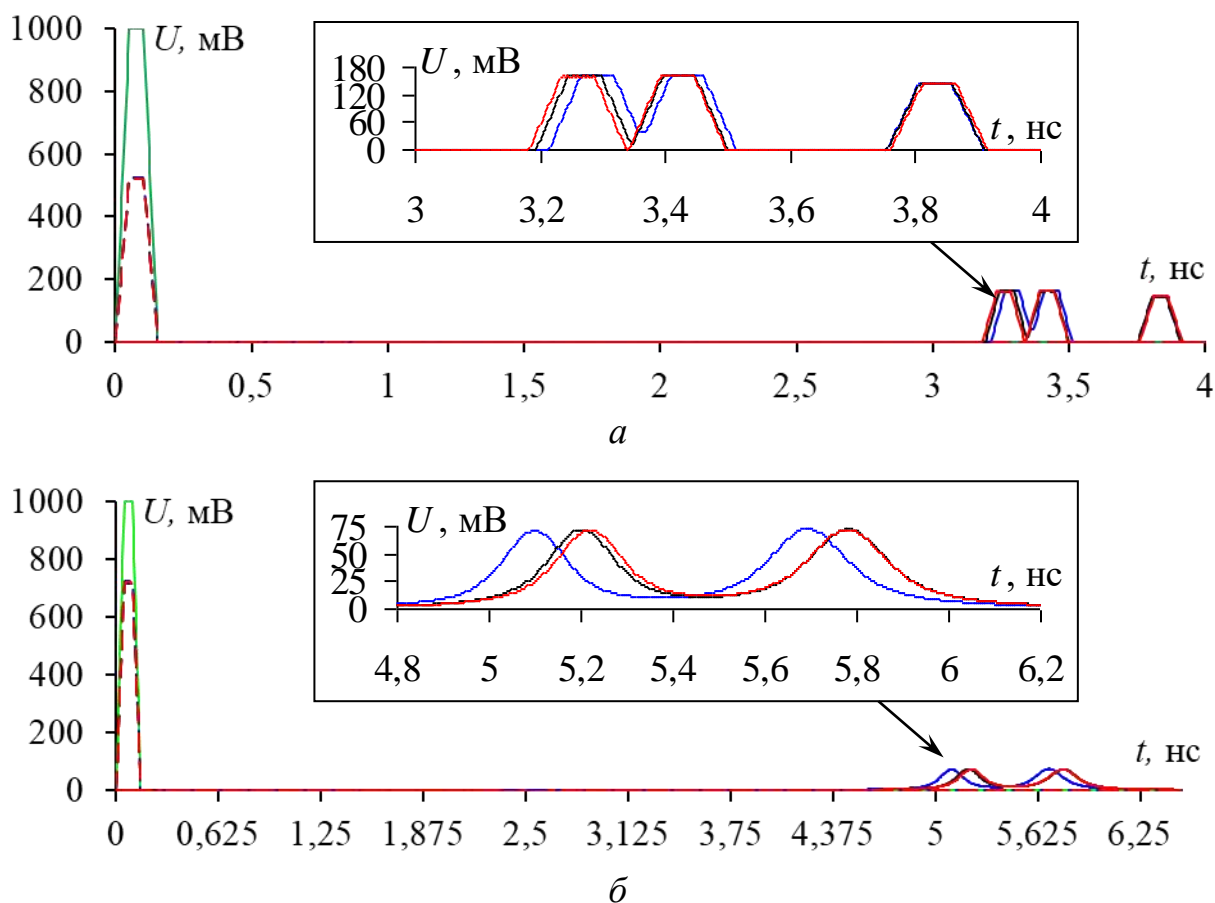


Рис. 33. Формы ЭДС (–), напряжения на входе (пунктир) и выходе (сплошная) МФ на основе 3-проводной МПЛ (а) и 2-проводного плоского кабеля (б) при оптимизации посредством ЭС (–), ГА (–), СП (–)

Выводы

Впервые предложена совокупность разноплановых подходов для решения проблемы обеспечения ЭМС средств ФП ЭМИ с другими РЭС в составе комплекса противодействия БПЛА. Продемонстрирована их приемлемость на примерах использования некоторых из них:

1. ТРИЗ в составе диверсионного подхода предоставляет собой ценный инструмент для анализа и решения исследовательских задач в сложных технических системах, в частности, обеспечения ЭМС БПЛА при воздействии средствами ФП ЭМИ. Этот подход позволяет изменить мышление, найти уязвимые места и разработать эффективные решения. Его применение способствует инновационному мышлению и улучшению качества технических решений. В то же время, с его помощью возможен поиск компромиссных решений и использование имеющихся ресурсов наилучшим образом и, тем самым, повышение защищенности всех элементов в совокупности рассматриваемой системы.

2. Модальная фильтрация лежит в основе ряда подходов, нацеленных на решение задачи обеспечения ЭМС средств ФП ЭМИ с другими РЭС в составе комплекса противодействия БПЛА, в частном случае, «своими» БПЛА. При этом, сама суть разложения кондуктивных импульсных воздействий малой длительности на импульсную последовательность меньшей амплитуды справедли-

ва для широкого ряда МФ. Однако немаловажным фактором является возможность использования своих межсоединений конкретного РЭС вместо дополнительного МФ. Так, возможно использование: защитных корпусов в качестве опорной плоскости; свободного пространства на используемой печатной плате; имеющихся кабелей и кабельных сборок (замена либо модернизация) в составе РЭС; обычных печатных проводников (при должной трассировке) и др.

3. Результаты моделирования и измерения разработанных и созданных макетов трех МФ на основе кабельных структур подтвердили возможность разложения исходного импульса в конце активного проводника МФ. Также представлены результаты исследования МФ в частотной области. Сравнены результаты вычислительного и натурального экспериментов во временной области. Получена согласованность форм выходного напряжения, полученных экспериментально и посредством моделирования. По измерениям выявлено, что МФ имеют полосу пропускания 0,19–0,41 ГГц, а значения максимального выходного напряжения 15, 17,2 и 11,7 раз меньше половины амплитуды ЭДС для МФ 1–3, соответственно.

4. Представлены результаты многокритериальной оптимизации двух МФ (с разной геометрией поперечного сечения) по трем алгоритмам: ГА, ЭС, СП. Помимо представленных результатов, имеющийся инструментарий позволяет оптимизацию полосковых и кабельных структур любой геометрической конфигурации (и с любыми электрофизическими и геометрическими параметрами) с использованием указанных алгоритмов по широкому ряду критериев: амплитудным, интервально- и диапазонно-временным, согласования, массогабаритному, стоимостному. Наконец, в качестве объекта оптимизации может выступать не только структура с модальными явлениями, но используемый участок ПП для совершенствования защиты от преднамеренных СШП-воздействий.

Таким образом, в работе показана целесообразность использования ряда предлагаемых подходов на примере конкретных структур, при конкретных помеховых воздействиях. Показаны новые подходы к обеспечению ЭМС средств ФП ЭМИ с другими РЭС в составе комплекса противодействия БПЛА, в частном случае, «своими» БПЛА, во время возможных боевых действий. Актуальность и широта использования полученных результатов определяются добавлением дополнительной защиты (с учетом применения предлагаемых подходов к обеспечению ЭМС) в РЭС, функционирующие в составе комплекса противодействия БПЛА, в частном случае, в «свои» БПЛА.

Дальнейшим шагом видится создание отдельных методик и технических решений на их основе для защиты уязвимых областей РЭС в составе комплекса противодействия БПЛА, в частном случае, «своих» БПЛА (например, цепей питания, управления, связи), а также предварительное моделирование критичных узлов РЭС при воздействии средствами ФП ЭМИ.

Автор выражает благодарность Е.С. Жечеву, Е.Б. Черниковой, А.В. Носову, А.А. Иванову и Т.Р. Газизову за оказанную помощь при получении результатов работы.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-29-01331, <https://rscf.ru/project/22-29-01331/>.

Литература

1. Журавлев В. Н., Журавлев П. В. Применение беспилотных летательных аппаратов в отраслях экономики: состояние и перспективы // Научный вестник МГТУ ГА. 2016. № 226. С. 156–164.
2. Ляшева С. А., Медведев М. В., Шлеймович М. П. Распознавание объектов на местности в системах управления беспилотных летательных аппаратов // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. 2014. № 3. С. 64–66.
3. Макаренко С. И. Противодействие беспилотным летательным аппаратам: Монография. СПб.: Научно-технические технологии, 2020. 204 с.
4. Егурнов В. О., Ильин В. В., Некрасов М. И., Сосунов В. Г. Анализ способов противодействия беспилотным летательным аппаратам для обеспечения безопасности защищаемых объектов // Вопросы оборонной техники. Серия 16: Технические средства противодействия терроризму. 2018. № 1–2 (115–116). С. 51–58.
5. Жаринов Д. А. О возможности применения беспилотных летательных аппаратов для охраны военных аэродромов // Воздушно-космические силы. Теория и практика. 2018. №5 (5). С. 54–59.
6. Швецова С. В., Швецов А. В. Обеспечение безопасности при эксплуатации беспилотных летательных аппаратов на объектах транспортной инфраструктуры // Мир транспорта. 2020. № 18(3). С. 174–188.
7. Котарев С. Н., Котарева О. В., Александров А. Н. Использование беспилотных летательных аппаратов для обеспечения безопасности на объектах транспорта // Вестник Восточно-Сибирского института МВД России. 2017. № 4 (83). С. 199–204.
8. Митрофанов М., Васюков Д., Анисимов В. Практические рекомендации. Защита элементов системы связи от беспилотных летательных аппаратов // Армейский сборник. 2021. – URL: <https://army.ric.mil.ru/Stati/item/343042/> (дата обращения: 25.04.2023).
9. Michel A. H. Counter-drone systems. 2nd Edition, December 2019, 45 p. URL: <https://dronecenter.bard.edu/files/2019/12/CSD-CUAS-2nd-Edition-Web.pdf> (дата обращения: 25.04.2023).
10. Макаренко С. И. Анализ средств и способов противодействия беспилотным летательным аппаратам. Часть 4. Функциональное поражение сверхвысокочастотным и лазерным излучениями // Системы управления, связи и безопасности. 2020. № 3. С. 122–157. doi: 10.24411/2410-9916-2020-10304.
11. Ананьев А. В., Рыбалко А. Г., Петренко С. П., Ильинов Е. В. Способ совместного применения беспилотных летательных аппаратов малого класса и многофункциональных бомбардировщиков при поражении средств противовоздушной обороны на маршруте полета // Воздушно-космические силы. Теория и практика. 2021. № 19. С. 10–28.

12. Нуриев М. Г. Физическое моделирование помехоустойчивости электронных средств беспилотного летательного аппарата // Труды МАИ. 2018. № 102. С. 1–15.

13. Гизатуллин Р. М., Дроздилов В. А., Константинов Э. С. Моделирование функционирования элементов электронных систем БПЛА при воздействии излучаемых электромагнитных помех высоковольтной линии электропередачи // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2019. Т. 11, № 4(44). С. 13–21.

14. Гизатуллин З. М., Гизатуллин Р. М., Нуриев М. Г. Математические модели для физического моделирования задач электромагнитной совместимости // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2015. № (1–2). С. 115–122.

15. Holland M. A. Counter-Drone Systems // Center for the Study of the Drone at Bard College. February 2018, 23 P.

16. Countering rogue drones // FICCI Committee on Drones, EY, 2018, 31 p. URL: <https://www.varindia.com/pdf/Countering-rouge-drones.pdf> (дата обращения: 25.04.2023)

17. Sheu B. H., Chiu C. C., Lu W. T., Huang C.-I., Chen W.-P. Development of UAV Tracing and Coordinate Detection Method Using a Dual-Axis Rotary Platform for an Anti-UAV System // Applied Sciences. 2019. Vol. 9. № 13. P. 1–17.

18. Belousov A. O., Zhechev E. S., Chernikova E. B., Nosov A. V., Gazizov T. R. UAVs protection and countermeasures in a complex electromagnetic environment // Complexity. 2022. Vol. 2022. P. 1–16.

19. Mora N., Vega F., Lugin G., Rachidi F. Study and classification of potential IEMI sources. – System and assessment notes, note 41, July 2014. – 92 p.

20. Gazizov T. R. Design of electronic systems protected from electromagnetic terrorism // Proc. of the 15-th Int. Wroclaw Symp. on EMC. Wroclaw, Poland. 27–30 June 2000. P. 469–472.

21. Gazizov A. T., Zabolotsky A. M., Gazizov T. R. UWB Pulse Decomposition in Simple Printed Structures // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. Aug. 2016. Vol. 58. № 4. P. 1136–1142.

22. Белоусов А.О., Газизов Т.Р. Способ трассировки проводников модального фильтра // Патент на изобретение RU 2750393. опублик. 28.06.2021. бюл. № 19.

23. Belousov A. O., Medvedev A. V., Chernikova E. B., Gazizov T. R., Zabolotsky A. M. Switching order after failures in symmetric protective electrical circuits with triple modal reservation // Symmetry. 2021. Vol. 13(6). № 1074. P. 1–22.

24. Zabolotsky A. M., Gazizov T. R., Bova A. G., Radasky W. A. Dangerous pulse excitation of coupled lines // 17th International Zurich Symposium on Electromagnetic Compatibility. 2006. P. 164–167.

25. Комнатнов М. Е., Газизов Т. Р., Николаев И. И., Демаков А. В., Дроздова А. А. Способ изготовления линии электропередачи со спиральным поперечным сечением и устройство на его основе // Патент на изобретение RU 2749558. опублик. 15.06.2021. бюл. № 17.

26. Surovtsev R., Gazizov T., Zabolotsky A. Pulse decomposition in the turn of meander line as a new concept of protection against UWB pulses // 2015 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). 2015. P. 1–5.

27. Иванов А. А., Комнатнов М. Е. Полуаналитический метод для оценки эффективности экранирования корпуса с апертурой // Доклады ТУСУР. 2021. Т. 24. № 1. С. 16–23. doi: 10.21293/1818-0442-2021-24-1-16-23.

28. Ivanov A. A., Demakov A. V., Komnatnov M. E., Gazizov T. R. Semi-analytical approach for calculating shielding effectiveness of an enclosure with a filled aperture // ELECTRICA. 2022. № 22. P. 220–225.

29. Kuksenko S. P. Preliminary results of TUSUR University project for design of spacecraft power distribution network: EMC simulation // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 560. № 012110. P. 1–7.

30. Макаренко С. И. Информационное противоборство и радиоэлектронная борьба в сетевых войнах начала XXI века: Монография. СПб.: Научное издательство «Лань», 2017. 546 с.

31. Перунов Ю. М., Мацукевич В. В., Васильев А. А. Зарубежные радиоэлектронные средства. В 4-х книгах. Кн. 2: Системы радиоэлектронной борьбы. М.: Радиотехника, 2010. 352 с.

32. Лузан А. Г. Исчезающие перспективы. Настоящее и беспокойное будущее ЗРК семейства «Тор» // Воздушно-космическая сфера. 2018. № 3. С. 52–63.

33. Романченко И. В. Генерирование мощных наносекундных импульсов электромагнитного излучения на основе линий с ферритом. Дисс. ... докт. ф.-м. наук. Томск: ИСЭ СО РАН, 2019. 220 с.

34. Mesyats G. A., Korovin S. D., Gunin A. V., Gubanov V. P., Stepchenko A. S., Grishin D. M., Landl V. F., Alekseenko P. I. Repetitively pulsed high-current accelerators with transformer charging of forming lines // Laser and Particle Beams. 2003. Vol. 21. № 2. P. 197–209.

35. Газизов Т. Р. Основы теории решения изобретательских задач. – Томск: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2018. – 108 с.

36. Альтшуллер Г. С. Найти идею. Введение в теорию решения изобретательских задач. 2-е изд., доп. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1991. 225 с.

37. Газизов Т. Р. Электромагнитная совместимость и безопасность радиоэлектронной аппаратуры: Учебное пособие. Томск: «ТМЛ-Пресс», 2007. 256 с.

38. Belousov A. O., Chernikova E. B., Samoylichenko M. A., Medvedev A. V., Nosov A. V., Gazizov T. R., Zabolotsky A. M. From Symmetry to Asymmetry: The Use of Additional Pulses to Improve Protection against Ultrashort Pulses Based on Modal Filtration // Symmetry. 2020. Vol. 12. № 7. P. 1–38. doi: 10.3390/sym12071117.

39. Белоусов А. О. Анализ и оптимизация многопроводных структур с модальным разложением для обработки импульсных сигналов. Дисс. ... канд. техн. наук. Томск: ТУСУР, 2020. 247 с.

40. Zhechev Y. S., Chernikova E. B., Belousov A. O. Research of the new structure of reflection symmetric modal filter // 20th International conference of young specialists on micro/nanotechnologies and electron devices EDM, Erlagol, Altai. 29 June–3 July 2019. P. 108–112.

41. Zhechev Y. S., Belousov A. O., Zabolotsky A. M., Vlasov S. V., Murmansky M. S., Pavlov N. S., Gazizov T. R. Serpentine and Spiral Routing Schemes for Microwave Transmission Lines to Ensure UWB Interference Immunity // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2023. P. 1–13. doi: 10.1109/TMTT.2023.3276029.

42. Костелецкий В. П. Устройства защиты радиоэлектронной аппаратуры от сверхкоротких импульсов в синфазном и дифференциальном режимах. Дисс. ... канд. техн. наук. Томск: ТУСУР, 2022. 210 с.

43. Самойличенко М. А. Повышение качества защиты от нежелательных импульсных воздействий в конфигурациях полосковых линий передачи с дополнительными проводниками в заземленном основании. Дисс. ... канд. техн. наук. Томск: ТУСУР, 2022. 218 с.

44. Belousov A. O., Vlasova N. O., Gordeyeva V. O., Gazizov T. R. Breaking the Symmetry of Cable Structures as an Instrument for Improving Modal Decomposition to Protect Critical Equipment Against UWB Pulses // Symmetry. 2022. Vol. 14(6), № 1228. P. 1–34, doi: 10.3390/sym14061228.

45. Vauché R., Mefteh R. A. B., Haddad F., Nebhen J., Rahajandraibe W., Wan F., LALLéchére S., Ravelo B. Experimental Time–Domain Study for Bandpass Negative Group Delay Analysis With Lill–Shape Microstrip Circuit // IEEE Access. 2021. Vol. 9. P. 24155–24167.

46. Белоусов А. О., Газизов Т. Р. Способ трассировки проводников модального фильтра с круговым сечением // Патент на изобретение RU 2747104, опубл. 27.04.2021, бюл. №12.

47. Белоусов А. О., Газизов Т. Р. Способ трассировки проводников модального фильтра на основе плоского кабеля // Патент на изобретение RU 2749994, опубл. 21.06.2021, бюл. №18.

48. Белоусов А. О., Газизов Т. Р., Власова Н. О., Гордеева В. О. Способ исполнения модального фильтра с уголковым пассивным проводником // Патент на изобретение RU 2781266, опубл. 11.10.2022. бюл. №29.

49. Gazizov T. R., Orlov P. E., Zabolotsky A. M., Kuksenko S. P. New Concept of Critical Infrastructure Strengthening // Proceedings of the 13th International Conference of Numerical Analysis and Applied Mathematics, Rhodes, Greece. 23–29 Sept 2015. P. 1–3.

50. Zhechev Y. S., Zhecheva A. V., Kvasnikov A. A., Zabolotsky A. M. Using N–Norms for Analyzing Symmetric Protective Electrical Circuits with Triple Modal Reservation // Symmetry. 2021. Vol. 13. No. 12. P. 1–17, doi: 10.3390/sym13122390.

51. Orlov P. E., Medvedev A. V., Sharafutdinov V. R. Quasistatic Simulation of Ultrashort Pulse Propagation in the Spacecraft Autonomous Navigation System Power Circuit with Modal Reservation // 19th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM), Erlagol, Russia. 29 June–03 July 2018. P. 1–6.

52. Zhechev Y. S. Experimental Study of the Buried Vias Effect on Reflection Symmetric Modal Filter Performance // 21st International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM), Chemal, Russia. 29 June–03 July 2020. P. 200–204.

53. Baum C. E. Mathematics Notes. 1979. 63 p.

54. Giri D. V. High-Powered Electromagnetic Radiators: Nonlethal Weapons and Other Applications. 2004. 198 p.

55. Yukhanov Y. V., Privalova T. Y., Yukhanov A. Y., Andrianov V. I., Ostrovsky A. G., Los V. F. Peculiarities of Videopulse Scanning Antenna Array Design // 3rd International Conference on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals, Sevastopol, Ukraine. 18–22 Sept. 2006. P. 85–89.

56. Chernikova E. B., Ivanov A. A. Using Composite Insulating Materials to Improve Modal Filter Performance // 21st International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM), Chemal, Russia. 29 June–03 July 2020. P. 187–190. doi: 10.1109/EDM49804.2020.9153480.

57. Заболоцкий А. М. Электромагнитная совместимость: модальные технологии: Учебное пособие. Томск: ТУСУР, 2018. 132 с.

58. Комнатнов М. Е., Газизов Т. Р., Николаев И. И., Демаков А. В., Дроздова А. А. Способ изготовления линии электропередачи со спиральным поперечным сечением и устройство на его основе // Патент на изобретение RU 2749558, опубл. 15.06.2021, бюл. №17.

59. Surovtsev R. S., Nosov A. V., Zabolotsky A. M. Simple method of protection against UWB pulses based on a turn of meander microstrip line // 16th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM), Erlagol, Russia. 29 June–03 July 2015. P. 175–177. doi: 10.1109/EDM.2015.7184519.

60. Nosov A. V., Surovtsev R. S. Revealing New Possibilities of Ultrashort Pulse Decomposition in a Turn of Asymmetrical Meander Delay Line // 21st International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM), Chemal, Russia. 29 June–03 July 2020. P. 149–153. doi: 10.1109/EDM49804.2020.9153541.

61. Nosov A. V., Surovtsev R. S. Ultrashort pulse decomposition in the turn of a meander microstrip line with a passive conductor // Journal of Physics: Conference Series. 2021. Vol. 1862. P. 1–6. doi: 10.1088/1742-6596/1862/1/012029.

62. Kim G. Y., Nosov A. V., Surovtsev R. S., Gazizov T. T., Maximov A. E. Conditions for ultrashort pulse decomposition in multi-cascade protection devices based on meander microstrip lines // Journal of Physics: Conference Series. 2020. Vol. 1679. P. 1–6. doi: 10.1088/1742-6596/1679/2/022059.

63. Nosov A. V., Belousov A. O., Surovtsev R. S., Gazizov T. R. Simulating hybrid protection against ultrashort pulse based on its modal decomposition // Journal

of Physics: Conference Series. 2019. Vol. 1353. P. 1–6. doi: 10.1088/1742-6596/1353/1/012022.

64. Kim G., Nosov A., Surovtsev R. Ultrashort Pulse Decomposition in Hybrid Protection Devices Based on the Cascade–Connected Modal Filter and Meander Line With Broad–Side Coupling // 22nd International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM), Souzga, the Altai Republic, Russia. 30 June–04 July 2021. P. 163–166. doi: 10.1109/EDM52169.2021.9507720.

65. Ivanov A. A., Demakov A. V., Komnatnov M. E., Gazizov T. R. On Symmetry and Asymmetry in Nested Electromagnetic Shields // Symmetry. 2023. Vol. 15. № 2. P. 1–18.

66. Hussein K. F. A. Effect of internal resonance on the radar cross section and shield effectiveness of open spherical enclosures // Progress in electromagnetics research. 2007. Vol. 70. P. 225–246.

67. Kwon J. H., Hwang J. H., Park H. H. Improving shielding effectiveness of enclosure with apertures using absorbers // Proceedings of 2019 IEEE International symposium on electromagnetic compatibility, signal & power integrity, New Orleans, USA. 22–26 July 2019. P. 356–359.

68. Chan H. W., Wu R. B. A novel desensitization using resonance suppressors in metallic shielding // IEEE Transactions on components, packaging and manufacturing technology. 2019. Vol. 9, № 9. P. 1680–1689.

69. Ivanov A. A., Komnatnov M. E. Analytical model of a shielding enclosure populated with arbitrary shaped dielectric obstacles // Journal of physics: Conference series. 2021. Vol. 1889. P. 1–5.

70. Hussain T., Majid I., Cao Q. Improved shielding effectiveness of enclosures using symmetrically placed metallic posts // Proceedings of 7th International Bhurban Conference on Applied Sciences and Technology, Islamabad, Pakistan. 14–18 January 2020. P. 679–685.

71. Ivanov A. A., Komnatnov M. E., Gazizov T. R. Analytical model for evaluating shielding effectiveness of an enclosure populated with conducting plates // IEEE Transactions on electromagnetic compatibility. 2020. Vol. 62. № 5. P. 2307–2310.

72. Норенков И. П. Автоматическое проектирование. М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2000. 188 с.

73. Shiryaev V., Tsybulevsky A. Homogeneous algorithm for global optimization with adaptive model of objective function // 2016 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), Chelyabinsk, Russia. 2016. P. 1–4, doi: 10.1109/ICIEAM.2016.7911617.

74. Long Q., Wu C., Huang T., Wang X. A genetic algorithm for unconstrained multi-objective optimization // Swarm and Evolutionary Computation. 2015. No. 22. P. 1–14. doi: 10.1016/j.swevo.2015.01.002.

75. Gordeyeva V. O., Belousov A. O. Optimization of a broad-side coupling modal filter by evolutionary strategy algorithm with setting the ranges of the optimization parameters // Journal of Physics: conference Series. 2022. Vol. 2291. № 1. P. 1–8, doi: 10.1088/1742-6596/2291/1/012014.

76. H07V-U PVC single core // HELUKABEL Shop [Электронный ресурс]. 2023. – URL: <https://shop.helukabel.com/en/search/product-concrete?q=H07V-U> (дата обращения: 09.06.2023).

References

1. Zhuravlev V. N., Zhuravlev P. V. Application of unmanned aerial vehicles in the sectors of the economy: current state and prospects. *Civil aviation high technologies*, 2016, no. 226, pp. 156–164. (in Russian).
2. Lyasheva S. A., Medvedev M. V., Shleymovich M. P. Object recognition on the ground in unmanned aerial vehicle control systems. *Russian Aeronautics (Iz. VUZ)*, 2016, no. 226, pp. 156–164. (in Russian).
3. Makarenko S. I. *Protivodejstvie bespilotnym letatel'nyh apparatam* [Counteraction to unmanned aerial vehicles]. Saint-Petersburg, Naukoemkie tekhnologii, 2020, 204 p. (in Russian).
4. Egunov V. O., Ilyin V. V., Nekrasov M. I., Sosunov V. G. Analysis of methods to counter unmanned aerial vehicles for ensuring the security of protected objects. *Enginery Problems. Series 16. Anti-Terrorist Engineering Means*, 2018, vol. 115–116, no. 1–2, pp. 51–58. (in Russian).
5. Zharinov D. A. Possibility of using unmanned aerial vehicles for military airfield protection. *Aerospace forces. Theory and practice*, 2018, vol. 5, no. 5, pp. 54–59. (in Russian).
6. Shvetsova S. V., Shvetsov A. V. Ensuring security in the operation of unmanned aerial vehicles in transport infrastructure facilities. *World of Transport and Transportation Journal*, 2020, vol. 3, no. 18, pp. 174–188, (in Russian).
7. Kotarev S. N., Kotareva O. V., Aleksandrov A. N. Use of unmanned aerial vehicles for security purposes in transport facilities. *Vestnik of the East Siberian institute of the Ministry of Internal Affairs of the Russian Federation*, 2017, vol. 83, no. 4, pp. 199–204. (in Russian).
8. Mitrofanov M., Vasyukov D., Anisimov V. Prakticheskie rekomendacii. Zashchita elementov sistemy svyazi ot bespilotnyh letatel'nyh apparatov [Practical recommendations. Protection of communication system elements from unmanned aerial vehicles]. *Armejskij sbornik*, 2021. Available at: <https://army.ric.mil.ru/Stati/item/343042/> (accessed 03 May 2023) (in Russian).
9. Michel A. H. *Counter-drone systems. 2nd Edition*. December 2019, 45 p. Available at: <https://dronecenter.bard.edu/files/2019/12/CSD-CUAS-2nd-Edition-Web.pdf> (accessed 25 April 2023).
10. Makarenko S. I. Analysis of means and methods of countering unmanned aerial vehicles. Part 4. Functional impact with ultra-high frequency and laser radiation. *Systems of Control, Communication and Security*, 2020, no. 3, pp. 122–157. doi: 10.24411/2410-9916-2020-10304. (in Russian).
11. Ananyev A. V., Rybalko A. G., Petrenko S. P., Ilyinov E. V. Joint use of small-class unmanned aerial vehicles and multifunctional bombers in countering air defense facilities along the flight route. *Aerospace forces. Theory and practice*, 2021, no. 19, pp. 10–28. (in Russian).

12. Nuriyev M. G. Physical modeling of interference immunity of electronic equipment of an unmanned aerial vehicle. *Trudy MAI*, 2018, no. 102, pp. 1–15. (in Russian).

13. Gizatullin R. M., Drozdikov V. A., Konstantinov E. S. Modeling the functioning of electronic systems of unmanned aerial vehicles under the influence of electromagnetic interference from high-voltage power transmission lines. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta*, 2019, vol. 11, no. 4 (44), pp. 13–21. (in Russian).

14. Gizatullin Z. M., Gizatullin R. M., Nuriyev M. G. Mathematical models for physical modeling of electromagnetic compatibility tasks. *Power engineering: research, equipment, technology*, 2015, no. (1–2), pp. 115–122. (in Russian).

15. Holland M. A. Counter-Drone Systems. *Center for the Study of the Drone at Bard College*, February 2018, 23 p.

16. Countering rogue drones. *FICCI Committee on Drones*, EY, 2018, 31 p. Available at: <https://www.varindia.com/pdf/Countering-rouge-drones.pdf> (accessed 25 April 2023)

17. Sheu B. H., Chiu C. C., Lu W. T., Huang C.-I., Chen W.-P. Development of UAV Tracing and Coordinate Detection Method Using a Dual-Axis Rotary Platform for an Anti-UAV System. *Applied Sciences*, 2019, vol. 9, no. 13, pp. 1–17.

18. Belousov A. O., Zhechev E. S., Chernikova E. B., Nosov A. V., Gazizov T. R. UAVs protection and countermeasures in a complex electromagnetic environment. *Complexity*, 2022, vol. 2022, pp. 1–16.

19. Mora N., Vega F., Lugin G., Rachidi F. Study and classification of potential IEMI sources. *System and assessment notes, note 41*, July 2014, 92 p.

20. Gazizov T. R. Design of electronic systems protected from electromagnetic terrorism. *Proceedings of the 15th Int. Wroclaw Symp. on EMC*, Wroclaw, Poland, 27–30 June 2000, pp. 469–472.

21. Gazizov A. T., Zabolotsky A. M., Gazizov T. R. UWB Pulse Decomposition in Simple Printed Structures. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, Aug. 2016, vol. 58, no. 4, pp. 1136–1142.

22. Belousov A. O., Gazizov T. R. Method for routing conductors of a modal filter. Patent Russia, no. RU 2750393. Publish. 28.06.2021, bul. no. 19 (in Russian).

23. Belousov A. O., Medvedev A. V., Chernikova E. B., Gazizov T. R., Zabolotsky A. M. Switching order after failures in symmetric protective electrical circuits with triple modal reservation. *Symmetry*, 2021, vol. 13(6), no. 1074, pp. 1–22.

24. Zabolotsky A. M., Gazizov T. R., Bova A. G., Radasky W. A. Dangerous pulse excitation of coupled lines. *17th International Zurich Symposium on Electromagnetic Compatibility*, 2006, pp. 164–167.

25. Komnatnov M. E., Gazizov T. R., Nikolaev I. I., Demakov A. V., Drozdova A. A. Method for manufacturing a power line with a spiral cross-section and a device based on it. Patent Russia, no. RU 2749558. Publish. 15.06.2021, bul. no. 17 (in Russian).

26. Surovtsev R., Gazizov T., Zabolotsky A. Pulse decomposition in the turn of meander line as a new concept of protection against UWB pulses. *2015 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON)*, 2015, pp. 1–5.

27. Ivanov A. A., Komnatnov M. E. Semi-analytical method for evaluating shielding effectiveness of an enclosure with an aperture. *Proceedings of Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics*, 2021, vol. 24, no. 1, pp. 16–23. doi: 10.21293/1818-0442-2021-24-1-16-23 (in Russian).

28. Ivanov A. A., Demakov A. V., Komnatnov M. E., Gazizov T. R. Semi-analytical approach for calculating shielding effectiveness of an enclosure with a filled aperture. *Electrica*, 2022, no. 22, pp. 220–225.

29. Kuksenko S. P. Preliminary results of TUSUR University project for design of spacecraft power distribution network: EMC simulation. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 2019, vol. 560, no. 012110, pp. 1–7.

30. Makarenko S. I. *Informacionnoe protivoborstvo i radioelektronnaya bor'ba v setecentricheskih vojnah nachala XXI veka* [Information Confrontation and Electronic Warfare in Network-Centric Warfare at the Beginning of the 21st Century]. Saint-Petersburg, Naukoemkie tekhnologii. 2017, 546 p. (in Russian).

31. Perunov Y. M., Matsukevich V. V., Vasiliev A. A. *Zarubezhnye radioelektronnye sredstva. V 4-h knigah. Kn. 2: Sistemy radioelektronnoj bor'by* [Foreign radio-electronic means. In 4 books. Book 2: Electronic warfare systems]. Moscow, Radiotekhnika. 2010, 352 p. (in Russian).

32. Luzan A. G. Disappearing prospects. The present and troubled future of the air defense systems of the «Tor» family. *Aerospace Sphere Journal*, 2018, no. 3. pp. 52–63. (in Russian).

33. Romanchenko I. V. *Generirovanie moshchnykh nanosekundnykh impul'sov elektromagnitnogo izlucheniya na osnove linij s ferritom*. Diss. dokt. fiz.-mat. nauk [Generation of powerful nanosecond pulses of electromagnetic radiation based on lines with ferrite]. Tomsk, Institute of High Current Electronics Siberian Branch Russian Academy of Sciences, 2019, 220 p. (in Russian).

34. Mesyats G. A., Korovin S. D., Gunin A. V., Gubanov V. P., Stepchenko A. S., Grishin D. M., Landl V. F., Alekseenko P. I. Repetitively pulsed high-current accelerators with transformer charging of forming lines. *Laser and Particle Beams*, 2003, Vol. 21, No. 2, pp. 197–209.

35. Gazizov T. R. *Osnovy teorii resheniya izobretatel'skikh zadach* [Fundamentals of theory of inventive problem solving]. Tomsk, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, 2018, 108 p. (in Russian).

36. Altshuller G. S. *Najti ideyu. Vvedenie v teoriyu resheniya izobretatel'skikh zadach. 2-e izd., dop.* [Find an idea. Introduction to the theory of inventive problem solving. 2nd ed., add.]. Novosibirsk, Nauka. Sib. otd-nie, 1991, 225 p. (in Russian).

37. Gazizov T. R. *Elektromagnitnaya sovместimost' i bezopasnost' radioelektronnoj apparatury: Uchebnoe posobie* [Electromagnetic compatibility and safety of radio electronic equipment: Tutorial]. Tomsk, «TML-Press», 2007, 256 p. (in Russian).

38. Belousov A. O., Chernikova E. B., Samoylichenko M. A., Medvedev A. V., Nosov A. V., Gazizov T. R., Zabolotsky A. M. From Symmetry to Asymmetry: The Use of Additional Pulses to Improve Protection against Ultrashort Pulses Based on Modal Filtration. *Symmetry*, 2020, vol. 12, no. 7, pp. 1–38. doi: 10.3390/sym12071117.

39. Belousov A. O. *Analiz i optimizaciya mnogoprovodnyh struktur s modal'nym razlozheniem dlya obrabotki impul'snyh signalov*. Diss. kand. tehn. nauk [Analysis and optimization of multiconductor structures with modal decomposition for pulse signals processing]. Tomsk, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, 2020, 247 p. (in Russian).

40. Zhechev Y. S., Chernikova E. B., Belousov A. O. Research of the new structure of reflection symmetric modal filter. *20th International conference of young specialists on micro/nanotechnologies and electron devices EDM*, Erlagol, Altai, 29 June–3 July 2019, pp. 108–112.

41. Zhechev Y. S., Belousov A. O., Zabolotsky A. M., Vlasov S. V., Murmansky M. S., Pavlov N. S., Gazizov T. R. Serpentine and Spiral Routing Schemes for Microwave Transmission Lines to Ensure UWB Interference Immunity. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2023, pp. 1–13. doi: 10.1109/TMTT.2023.3276029.

42. Kosteleckiy V. P. *Ustrojstva zashchity radioelektronnoj apparatury ot sverhkorotkih impul'sov v sinfaznom i differencial'nom rezhimah*. Diss. kand. tehn. nauk [Devices for protection of electronic equipment from ultra-short pulses in in-phase and differential modes]. Tomsk, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, 2022, 210 p. (in Russian).

43. Samoylichenko M. A. *Povyshenie kachestva zashchity ot nezhelatel'nyh impul'snyh vozdeystviy v konfiguratsiyah poloskovykh linij peredachi s dopolnitel'nymi provodnikami v zazemlennom osnovanii*. Diss. kand. tehn. nauk [Improving the quality of protection against unwanted pulse effects in strip line configurations with additional conductors in a grounded base]. Tomsk, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, 2022, 218 p. (in Russian).

44. Belousov A. O., Vlasova N. O., Gordeyeva V. O., Gazizov T. R. Breaking the Symmetry of Cable Structures as an Instrument for Improving Modal Decomposition to Protect Critical Equipment Against UWB Pulses. *Symmetry*, 2022, vol. 14(6), no. 1228, pp. 1–34. doi: 10.3390/sym14061228.

45. Vauché R., Mefteh R. A. B., Haddad F., Nebhen J., Rahajandraibe W., Wan F., LALLéchére S., Ravelo B. Experimental Time–Domain Study for Bandpass Negative Group Delay Analysis With Lill–Shape Microstrip Circuit. *IEEE Access*, 2021, Vol. 9, pp. 24155–24167.

46. Belousov A. O., Gazizov T. R. Method for tracing conductors of a modal filter with a circular cross section. Patent Russia, no. RU 2747104. Publish. 27.04.2021, bul. no. 12 (in Russian).

47. Belousov A. O., Gazizov T. R. Method for tracing the conductors of a modal filter based on a flat cable. Patent Russia, no. RU 2749994. Publish. 21.06.2021, bul. no. 18 (in Russian).

48. Belousov A. O., Gazizov T. R., Vlasova N. O., Gordeeva V. O. Method of making a modal filter with a corner passive conductor. Patent Russia, no. RU 2781266. Publish. 11.10.2022, bul. no. 29 (in Russian).

49. Gazizov T. R., Orlov P. E., Zabolotsky A. M., Kuksenko S. P. New Concept of Critical Infrastructure Strengthening. *Proceedings of the 13th*

International Conference of Numerical Analysis and Applied Mathematics, Rhodes, Greece, 23–29 Sept 2015, pp. 1–3.

50. Zhechev Y. S., Zhecheva A. V., Kvasnikov A. A., Zabolotsky A. M. Using N–Norms for Analyzing Symmetric Protective Electrical Circuits with Triple Modal Reservation. *Symmetry*, 2021, Vol. 13, No. 12, pp. 1–17, doi: 10.3390/sym13122390.

51. Orlov P. E., Medvedev A. V., Sharafutdinov V. R. Quasistatic Simulation of Ultrashort Pulse Propagation in the Spacecraft Autonomous Navigation System Power Circuit with Modal Reservation. *19th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM)*, Erlagol, Russia, 29 June–03 July 2018, pp. 1–6.

52. Zhechev Y. S. Experimental Study of the Buried Vias Effect on Reflection Symmetric Modal Filter Performance. *21st International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM)*, Chemal, Russia, 29 June–03 July 2020, pp. 200–204.

53. Baum C. E. *Mathematics Notes*. 1979, 63 p.

54. Giri D. V. *High–Powered Electromagnetic Radiators: Nonlethal Weapons and Other Applications*. Harvard University Press, 2004, 198 p.

55. Yukhanov Y. V., Privalova T. Y., Yukhanov A. Y., Andrianov V. I., Ostrovsky A. G., Los V. F. Peculiarities of Videopulse Scanning Antenna Array Design. *3rd International Conference on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals*, Sevastopol, Ukraine, 18–22 Sept, 2006, pp. 85–89.

56. Chernikova E. B., Ivanov A. A. Using Composite Insulating Materials to Improve Modal Filter Performance. *21st International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM)*, Chemal, Russia, 29 June–03 July 2020, pp. 187–190. doi: 10.1109/EDM49804.2020.9153480.

57. Zabolotsky A. M. *Elektromagnitnaya sovmestimost': modal'nye tekhnologii: Uchebnoe posobie* [Electromagnetic compatibility: modal technologies: Tutorial]. Tomsk, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, 2018, 132 p. (in Russian).

58. Komnatnov M. E., Gazizov T. R., Nikolaev I. I., Demakov A. V., Drozdova A. A. A method of manufacturing a power line with a spiral cross section and a device based on it. Patent Russia, no. 2749558. Publish. 15.06.2021, bul. no. 17 (in Russian).

59. Surovtsev R. S., Nosov A. V., Zabolotsky A. M. Simple method of protection against UWB pulses based on a turn of meander microstrip line. *16th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM)*, Erlagol, Russia, 29 June–03 July 2015, pp. 175–177. doi: 10.1109/EDM.2015.7184519.

60. Nosov A. V., Surovtsev R. S. Revealing New Possibilities of Ultrashort Pulse Decomposition in a Turn of Asymmetrical Meander Delay Line. *21st International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM)*, Chemal, Russia, 29 June–03 July 2020, pp. 149–153. doi: 10.1109/EDM49804.2020.9153541.

61. Nosov A. V., Surovtsev R. S. Ultrashort pulse decomposition in the turn of a meander microstrip line with a passive conductor. *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, Vol. 1862, pp. 1–6. doi: 10.1088/1742-6596/1862/1/012029.

62. Kim G. Y., Nosov A. V., Surovtsev R. S., Gazizov T. T., Maximov A. E. Conditions for ultrashort pulse decomposition in multi-cascade protection devices based on meander microstrip lines. *Journal of Physics: Conference Series*, 2020, Vol. 1679, pp. 1–6. doi: 10.1088/1742-6596/1679/2/022059.

63. Nosov A.V., Belousov A. O., Surovtsev R. S., Gazizov T. R. Simulating hybrid protection against ultrashort pulse based on its modal decomposition. *Journal of Physics: Conference Series*, 2019, Vol. 1353, pp. 1–6. doi: 10.1088/1742-6596/1353/1/012022.

64. Kim G., Nosov A., Surovtsev R. Ultrashort Pulse Decomposition in Hybrid Protection Devices Based on the Cascade-Connected Modal Filter and Meander Line With Broad-Side Coupling. *22nd International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM)*, Souzga, the Altai Republic, Russia, 30 June–04 July 2021, pp. 163–166. doi: 10.1109/EDM52169.2021.9507720.

65. Ivanov A. A., Demakov A. V., Komnatnov M. E., Gazizov T. R. On Symmetry and Asymmetry in Nested Electromagnetic Shields. *Symmetry*, 2023, vol. 15, no. 2, pp. 1–18.

66. Hussein K. F. A. Effect of internal resonance on the radar cross section and shield effectiveness of open spherical enclosures. *Progress in electromagnetics research*, 2007, Vol. 70, pp. 225–246.

67. Kwon J. H., Hwang J. H., Park H. H. Improving shielding effectiveness of enclosure with apertures using absorbers. *Proceedings of 2019 IEEE International symposium on electromagnetic compatibility, signal & power integrity*, New Orleans, USA, 22–26 July 2019, pp. 356–359.

68. Chan H. W., Wu R. B. A novel desensitization using resonance suppressors in metallic shielding. *IEEE Transactions on components, packaging and manufacturing technology*, 2019, vol. 9, no. 9, pp. 1680–1689.

69. Ivanov A. A., Komnatnov M. E. Analytical model of a shielding enclosure populated with arbitrary shaped dielectric obstacles. *Journal of physics: Conference series*, 2021, vol. 1889, pp. 1–5.

70. Hussain T., Majid I., Cao Q. Improved shielding effectiveness of enclosures using symmetrically placed metallic posts. *Proceedings of 7th International Bhurban Conference on Applied Sciences and Technology*, Islamabad, Pakistan, 14–18 January 2020, pp. 679–685.

71. Ivanov A. A., Komnatnov M. E., Gazizov T. R. Analytical model for evaluating shielding effectiveness of an enclosure populated with conducting plates. *IEEE Transactions on electromagnetic compatibility*, 2020, vol. 62, no. 5, pp. 2307–2310.

72. Norenkov I. P. *Avtomaticheskoe proektirovanie* [Automatic design]. Moscow, Science and Education of the Bauman MSTU, 2000, 188 p. (in Russian).

73. Shiryaev V., Tsybulevsky A. Homogeneous algorithm for global optimization with adaptive model of objective function. 2016 2nd International

Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), Chelyabinsk, Russia, 2016, pp. 1–4. doi: 10.1109/ICIEAM.2016.7911617.

74. Long Q., Wu C., Huang T., Wang X. A genetic algorithm for unconstrained multi-objective optimization. *Swarm and Evolutionary Computation*, 2015, no. 22, pp. 1–14. doi: 10.1016/j.swevo.2015.01.002.

75. Gordeyeva V. O., Belousov A. O. Optimization of a broad-side coupling modal filter by evolutionary strategy algorithm with setting the ranges of the optimization parameters. *Journal of Physics: Conference Series*, 2022, vol. 2291, no. 1, pp. 1–8. doi: 10.1088/1742-6596/2291/1/012014.

76. H07V-U PVC single core. *HELUKABEL Shop*, 2023. Available at: <https://shop.helukabel.com/en/search/product-concrete?q=H07V-U> (accessed 09 June 2023).

Статья поступила 27 июня 2023 г.

Информация об авторе

Белусов Антон Олегович – кандидат технических наук, доцент и докторант кафедры телевидения и управления, старший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории «Безопасность и электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств». Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники. Область научных интересов: электромагнитная совместимость, проектирование защитных устройств на основе модальной фильтрации, оптимизация защитных устройств. E-mail: ant1lafleur@gmail.com

Адрес: 634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 40.

Electromagnetic Compatibility of Unmanned Aerial Vehicles and Countermeasure Systems

A. O. Belousov

Problem statement. Due to the constant progress in the development of modern radio-electronic equipment (REE), there is growing attention from the scientific community towards ensuring the proper level of electromagnetic environment for their correct operation. It is known that various types of electromagnetic interference (EMI) can have a detrimental impact on the performance of critical components of REE. Therefore, there is a need to develop effective methods and technologies to protect REE from the destructive effects of EMI. In this study, EMI-based functional destruction means, which utilize powerful microwave radiation generators, are considered as sources of EMI for countering unmanned aerial vehicles (UAVs). The complexity of achieving selectivity in the microwave radiation generators concerning the targeted REE can lead to malfunctions in the internal components of radio-electronic systems such as receivers, transmitters, signal generators, control devices, stabilization and command formation systems, and electronic computing devices. This fact emphasizes the importance of ensuring electromagnetic compatibility (EMC) between EMI-based functional destruction means and other REE within the UAV counteraction complex. Additionally, it is crucial to ensure EMC for «friendly» UAVs that may be within the range of the EMI-based functional destruction means. **The purpose** of this work is to present preliminary results on the creation, structuring and detailing of new approaches to ensuring the EMC of REE as part of a complex for countering UAVs using EMI-based functional destruction means. **The methods used** in this study include a quasi-static simula-

tion system based on the method of moments and optimization using a simple genetic algorithm, modified evolutionary strategies algorithm, and random search method. The optimization is performed based on an objective function that includes two criteria: amplitude and matching one. The measurements were conducted using a Tektronix DSA 8300 oscilloscope and «Panorama» R4226 vector network analyzer. **Novelty.** For the first time, a combination of various approaches and methods within a unified methodology for EMC ensuring for UAVs and their counteraction complexes using EMI-based functional destruction means is proposed. This is supported by the application of the Theory of Inventive Problem Solving (TRIZ) as part of a diversionary approach, modal filtration, modal filters (MF) based on cable structures, and software tools, including optimization capabilities of MF using evolutionary algorithms and the random search method. **Results.** The feasibility of the proposed methods and approaches has been demonstrated through several examples. In terms of using TRIZ as part of the diversionary approach, the main principles of TRIZ and the diversionary approach applicable to the task of EMC ensuring for UAVs under the influence of EMI-based functional destruction means have been formulated. An approximate algorithm for using TRIZ as part of the diversionary approach in the task of EMC ensuring for UAVs, specifically when exposed to EMI-based functional destruction means, has been outlined, and two scenarios of the excitation of high-power microwave interference on the external antenna and connection system of UAVs have been detailed. Regarding modal filtration, the main MF applicable to the task has been identified. In terms of MF based on cable structures, simulation and measurement of characteristics of experimental models of such MF under the excitation of high-power microwave interference have been performed. Pathways for the modernization of such MF for use in real UAV configurations have been specified. In terms of optimization, the optimization of two MF (with different cross-sectional geometries) based on two criteria using three algorithms has been considered. **Practical relevance.** The structured methods and approaches within the unified methodology for EMC ensuring for UAVs and their counteraction complexes using EMI-based functional destruction means, as well as the technical solutions derived from it, can be valuable tools for developers and engineers of EMI-based functional destruction means and UAV complexes to ensure the protection of REE from the destructive EMI effects. These tools can be applied during the production stage or for the modernization of existing systems.

Keywords: High-power microwave interference, electromagnetic compatibility, unmanned aerial vehicles, TRIZ, modal filtration, optimization, functional destruction, electromagnetic interference.

Information about Author

Anton Olegovich Belousov – Ph.D. of Engineering Sciences, Associate Professor and Doctoral Student at the Department of Television and Control, Senior Research Fellow of the research laboratory «Safety and electromagnetic compatibility of radio-electronic means». Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics. Field of research: electromagnetic compatibility, design of protective devices based on modal filtration, optimization of protective devices. E-mail: ant1lafleur@gmail.com

Address: Russia, 634050, Tomsk, Lenina prospekt, 40.