

Министерство науки и высшего образования
Российской Федерации

Томский государственный университет
систем управления и радиоэлектроники

Р. С. Суровцев, А. В. Носов

Модальное разложение
в меандровых линиях
и устройствах на их основе

Томск
Издательство ТУСУРа
2022

УДК 621.391.24.018.756
ББК 32.841
С902

Рецензент
Дмитренко А. Г., д-р физ.-мат. наук

**Издание осуществлено при финансовой поддержке
национального проекта «Наука и университеты»
Министерства науки и высшего образования
Российской Федерации, проект FEWM-2022-0001,
соглашение 075-03-2022-174/1 от 31.01.2022**

Суровцев, Роман Сергеевич

С902 Модальное разложение в меандровых линиях и устройствах на их основе: моногр. / Р. С. Суровцев, А. В. Носов. – Томск: Изд-во Томск. гос. ун-та систем упр. и радиоэлектроники, 2022. – 184 с.
ISBN 978-5-86889-814-3

Систематизированы результаты исследований модального разложения импульсных сигналов в меандровых линиях, показаны возможности защиты радиоэлектронных средств от сверхкоротких импульсов за счёт свойств меандровых линий и построения устройств защиты на их основе. Приведены результаты комплекса теоретических и экспериментальных исследований структур витка меандровой линии с различными типами связи, диэлектрическим заполнением и количеством каскадов. Предложены новые полосковые устройства защиты на основе витка меандровой линии.

Для разработчиков радиоэлектронной аппаратуры, студентов и аспирантов радиотехнических специальностей.

УДК 621.391.24.018.756
ББК 32.841

ISBN 978-5-86889-814-3

© Суровцев Р.С., Носов А.В., 2022
© Томск. гос. ун-т систем упр.
и радиоэлектроники, 2022

Введение

С развитием и широким распространением радиоэлектронных средств (РЭС) различного назначения все острее становится задача обеспечения их электромагнитной совместимости (ЭМС). Одним из направлений в обеспечении ЭМС является повышение помехоустойчивости РЭС. Это связано с ростом производительности современных РЭС, достигаемым путём увеличения верхних граничных частот используемых сигналов, что в совокупности с уменьшением уровней сигналов и миниатюризацией устройств ведет к росту их чувствительности к электромагнитным воздействиям (ЭМВ). Причины возникновения ЭМВ могут быть как внутрисистемными (сбои в работе из-за перенапряжений), так и внешними (естественными, например электростатический разряд (ЭСР), или преднамеренными). Наибольшую опасность представляет возможность применения генераторов мощных сверхширокополосных воздействий злоумышленниками (случаи такого воздействия уже неоднократно регистрировались в разных странах). Таким образом, существует проблема преднамеренных электромагнитных воздействий (ПД ЭМВ), первое открытое обсуждение которой состоялось в 1996 г. после доклада В.М. Лоборева на пленарном заседании конференции AMEREM. Сегодня проблема ПД ЭМВ рассматривается как угроза объектам стратегической инфраструктуры общества.

Типовыми формами воздействий, которые используются для тестирования работы РЭС на помехоустойчивость, являются одиночный импульс, затухающая синусоида и пачки радиоимпульсов. Особое внимание следует уделить мощным импульсным воздействиям наносекундного и субнаносекундного диапазонов. Результатом развития технологий генерации сверхкоротких импульсов (СКИ) являются электромагнитные системы высокой мощности, которые способны создавать и посылать на объект направленные импульсы и практически мгновенно выводить из строя РЭС, контролируемые его работу. Широкий спектр СКИ способствует проникновению значительной части их частотных компонентов внутрь РЭС несмотря на наличие средств защиты. Специфика воздействия СКИ заключается в том, что наводки от него, распро-

странаясь по проводникам, могут восприниматься в качестве полезных сигналов, нарушая цифровой обмен, а при высокой амплитуде способствуют электрическому пробую, который ведет к выходу из строя компонентов и всего устройства. Значительный вклад в исследование вопросов ЭМС печатных узлов и стойкости полупроводниковых компонентов к ЭМВ, разработку подходов к защите от ЭМВ внесли В.Ю. Кириллов, Л.Н. Кечиев, С.Ф. Чермошенцев, Р.М. Гизатуллин, А.М. Бобрешов, Н.В. Балюк, Б.Б. Акбашев и многие другие.

Для защиты РЭС от ЭМВ применяют различные схемотехнические (фильтры, ограничители помех, газоразрядные устройства и т.д.) и конструктивные (экраны, схемы заземления и т.д.) решения. Однако они обладают недостатками, снижающими эффективность защиты. Конденсаторы в составе RLC -фильтров подвержены электрическому пробую, а напряжения срабатывания газоразрядных устройств часто выше заявленного уровня. Сравнительно новыми для защиты от СКИ являются модальные фильтры (МФ), основанные на модальном разложении сигнала на составляющие из-за различия скоростей их распространения. Вклад в их исследование внесли Т.Р. Газизов, А.М. Заболоцкий и другие.

В паре связанных линий, закороченных на конце (виток мейандровой линии (МЛ)), импульсное воздействие также подвергается модальному разложению. Эти структуры по сравнению с МФ обладают рядом преимуществ, среди которых большее число импульсов разложения, удвоенный путь распространения сигнала и отсутствие резисторов.

Основная цель данной монографии – познакомить читателя с результатами многолетней работы её авторов по исследованию модального разложения импульсных сигналов, возможности защиты РЭС от СКИ за счёт свойств МЛ и построения устройств защиты на их основе.

Авторы благодарны коллективу научно-исследовательской лаборатории «Фундаментальные исследования по электромагнитной совместимости», в составе которого были получены результаты представленных исследований, а также выражают признательность за мудрое руководство Т.Р. Газизову и за достойный пример А.М. Заболоцкому и С.П. Куксенко.

1 МОДАЛЬНОЕ РАЗЛОЖЕНИЕ В СВЯЗАННЫХ ЛИНИЯХ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ

1.1 Актуальность защиты от электромагнитных воздействий

В настоящее время радиоэлектронные средства проникли практически во все сферы деятельности общества. Поэтому от их бесперебойного и эффективного функционирования зависят процветание и безопасность человечества. Важным этапом при проектировании РЭС является обеспечение требований электромагнитной совместимости – способности технических средств удовлетворительно функционировать и не мешать работе других в заданной электромагнитной обстановке [1]. Стремление к увеличению быстродействия РЭС за счет повышения верхних граничных частот спектра используемых сигналов, а также снижение питающих напряжений и уменьшение габаритов устройств ведут к росту их чувствительности к электромагнитным воздействиям. Причинами возникновения ЭМВ могут быть естественные процессы (электростатический разряд, вторичные проявления разряда молнии) и преднамеренные действия человека (передвижные генераторы сверхширокополосных импульсов, средства радиоэлектронной борьбы, электромагнитное оружие и т.д.) [2]. Особую опасность представляет применение генераторов мощных сверхширокополосных импульсов в террористических целях (случаи такого воздействия уже неоднократно регистрировались в разных странах) [3]. Поэтому можно говорить об угрозе электромагнитного терроризма [4, 5]. Первое открытое обсуждение этой проблемы состоялось на пленарном заседании конференции AMEREM в 1996 г. [6]. Для контроля и предотвращения угроз электромагнитного терроризма на международном уровне в 1997 г. комиссией URSI (International Union of Radio Science) образован подкомитет по электромагнитному терроризму. Первый обзор проблемы преднамеренных ЭМВ представлен на симпозиуме по ЭМС во Вроцлаве в 1998 г. [7]. Сейчас проблема ПД ЭМВ рассматривается как очевидная угроза объектам топливно-энергетического

комплекса (ТЭК), защита которых требует новых технических и законодательных решений [3]. Примечательно, что в связи с этим разработана система целевых стандартов Российской Федерации (рисунок 1.1), регламентирующих мероприятия и содержание работ по защите от ПД ЭМВ автоматизированных систем в защищенном исполнении. Создаваемая нормативная база в первую очередь направлена на защиту средств информатизации потенциально опасных и стратегически важных объектов.

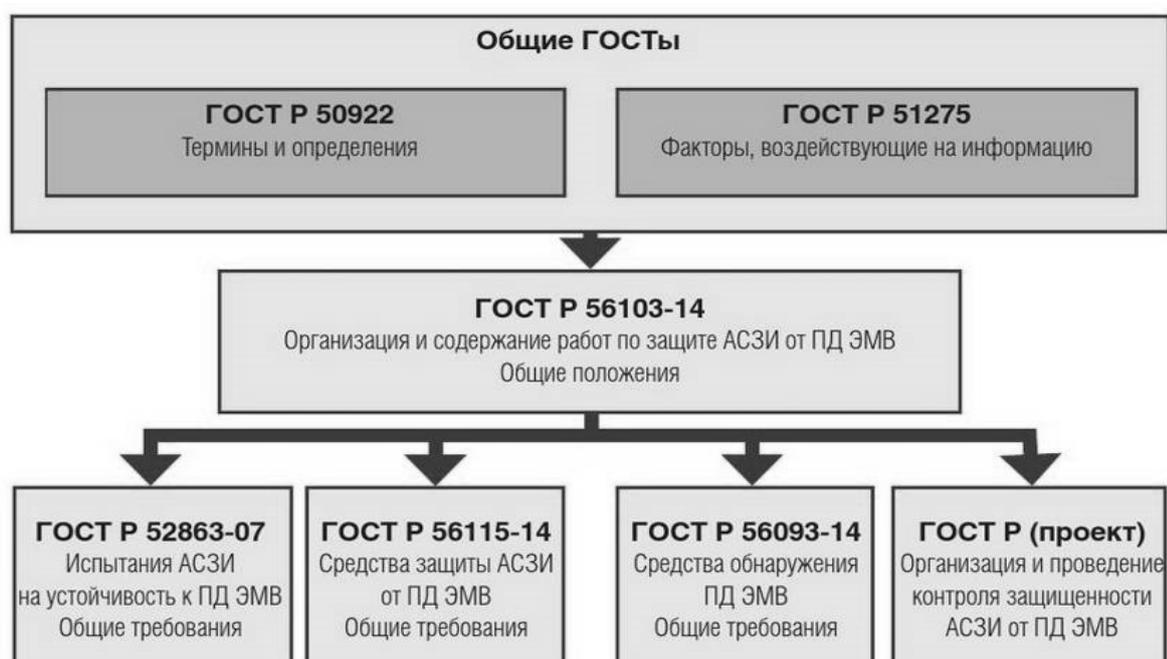


Рисунок 1.1 – Система целевых стандартов Российской Федерации по защите от преднамеренных электромагнитных воздействий

Типовыми формами воздействий, которые используются для тестирования работы РЭС на устойчивость к ЭМВ, являются одиночный импульс, затухающая синусоида и пачки радиоимпульсов [8]. Особое внимание следует уделить мощным импульсным воздействиям наносекундного и субнаносекундного диапазонов [9]. Широкий спектр сверхкоротких импульсов способствует беспрепятственному проникновению значительной части их частотных компонентов внутрь РЭС несмотря на наличие средств защиты [10]. Специфика воздействия СКИ состоит в том, что наводки от него могут восприниматься в качестве полезных сигналов и нарушать цифровой обмен, а при высокой амплитуде приводить к ча-

стичной дестабилизации РЭС и даже их отказу. Распространяясь по проводникам, СКИ способствуют электрическому пробоем полупроводников и диэлектриков, что приводит к преждевременному выходу из строя электронных компонентов и, как следствие, всего устройства [11]. Это связано с тем, что за время действия энергия СКИ не успевает передаться окружающим элементам, а её высокая плотность способствует дефектообразованию в чувствительных зонах выделения тепла [12]. Технологии генерации СКИ развиваются по трем направлениям: разработка мощных релятивистских электровакуумных приборов, создание твердотельных и газоразрядных сверхширокополосных сверхкороткоимпульсных генераторов, разработка новых и совершенствование существующих нерелятивистских электровакуумных приборов [13]. В результате появляются электромагнитные системы высокой мощности (high-power electromagnetic systems – HPEMS), способные посылать на объект направленные импульсы, что может практически мгновенно вывести из строя РЭС, контролирующие его работу. Такие системы могут быть установлены на наземную технику, морские суда или летательные аппараты, а мощность СКИ на расстоянии от источника до объекта зависит от технологии изготовления HPEMS и конструкции излучателя [14]. Поэтому актуальность защиты РЭС от ЭМВ (в первую очередь от СКИ) только возрастает.

1.2 Традиционные решения для защиты радиоэлектронных средств от электромагнитных воздействий

Для повышения помехоустойчивости РЭС применяют различные подходы [15]. К схемотехническим методам защиты относятся фильтры на основе компонентов с сосредоточенными и распределенными параметрами, ограничители помех, развязывающие и газоразрядные устройства. К конструктивным средствам относятся различные методы заземления, уменьшения импеданса цепей питания, а также защитные экраны и методы повышения их однородности. Из-за недостатков традиционных средств часто

невозможно обеспечить должную защиту РЭС от ЭМВ. Так, конденсаторы в составе RLC -фильтров подвержены электрическому пробоею [16], а реальные напряжения срабатывания газоразрядных и ограничительных устройств часто оказываются выше заявленного уровня и возрастают при уменьшении фронта воздействия [17]. Однако недостатки традиционных средств защиты можно устранить за счёт применения комплексных решений на основе гибридных фильтров [18].

Фильтры электромагнитных помех (ЕМИ-фильтры) широко используются в электронном оборудовании для подавления высокочастотных синфазных и дифференциальных помех. Примечательна предложенная конструкция фильтра, объединившего в себе фильтр синфазной моды и корректор дифференциальной моды [19]. Известны конструкции интегрированных планарных фильтров синфазной моды [20–23]. Изучена экстракция магнитных параметров элементов планарных фильтров [24]. Одно из направлений их проектирования – конденсаторные ЕМИ-фильтры, которые стали актуальны благодаря своим высокочастотным характеристикам, низкой стоимости и простоте [25, 26]. Однако высокочастотные характеристики ограничиваются влиянием паразитных эффектов, поэтому их исследованию посвящено множество работ [27–29]. Выпускаются ЕМИ-фильтры на основе сложенной конструкции проходного многослойного керамического конденсатора (МКК) [30]. Они имеют лучшую заграждающую характеристику по сравнению с широко распространенными двухвыводными МКК, потому что уменьшают эквивалентную последовательную индуктивность встроенного заземляющего электрода. Однако малое количество остаточной индуктивности, вызванной самоиндукцией внутренних электродов, не может быть полностью компенсировано, что ограничивает дальнейшее совершенствование заграждающей характеристики трехвыводного проходного МКК. Технология низкотемпературной совместно обжигаемой керамики (LTCC) позволила широко применять ЕМИ-фильтры в портативных устройствах за счёт их компактной реализации [31].

Для защиты от ЭМВ и фильтрации сигнала в полосе частот могут применяться полосковые устройства особой конфигурации

[32–34]. Для защиты от СКИ предложены линейные фильтры на основе встречно-гребенчатой микрополосковой структуры [32]. По сравнению с традиционными решениями в ряде применений они обладают более высокой эффективностью и низкой стоимостью. Говоря о полосковых устройствах, нельзя не отметить обширную монографию [35], где рассмотрены методы расчета первичных параметров полосковых связанных линий, представлено их применение для коррекции фазочастотных характеристик, а также изложены основы анализа и синтеза таких устройств. В основе монографии лежат классические работы, посвященные фазовой обработке сигналов с использованием цепей с распределенными параметрами [36, 37]. Близкие исследования отражены в работах других отечественных авторов [38–40]. Варианты фильтров поглощающего типа рассмотрены в [41–45]. Сравнительно новым решением для защиты от ЭМВ являются устройства, основанные на модальном разложении сигнала в связанных полосковых линиях [46, 47]. Несмотря на то что задача защиты от ЭМВ не нова и для ее решения созданы различные подходы и устройства, не теряет актуальность поиск других путей реализации защиты РЭС и проектирование соответствующих им устройств.

1.3 Теоретические основы модального разложения

Для защиты от СКИ применяются устройства, основанные на явлении модального разложения помехового импульса на импульсы меньшей амплитуды, – модальные фильтры. Основная идея модальной фильтрации заключается в использовании модальных искажений (изменений сигнала за счет разности задержек мод его поперечных волн в многопроводной линии передачи) для разложения воздействия на составляющие [46–49]. Так, при распространении импульса, возбуждаемого в активном проводнике отрезка линии передачи с неоднородным диэлектрическим заполнением из N проводников (не считая опорного), он подвергается модальным искажениям вплоть до полного разложения на N импульсов меньшей амплитуды из-за различия скоростей их распро-

странения в линии. Рассмотрим физический принцип разложения СКИ в полосковых структурах за счёт модальных искажений [46, 47]. Для полного разложения импульса необходимо, чтобы его общая длительность t_{Σ} была меньше минимального модуля разности задержек мод в отрезке связанной N -проводной линии, т.е. должно выполняться условие

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

где $\tau_{i(k)}$ – погонная задержка $i(k)$ -й моды отрезка. Для пары связанных линий ($N=2$) условие (1.1) сводится к виду

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

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

Таким образом, если в начало отрезка связанных линий между одним из проводников и общим проводником подается импульс длительностью меньшей, чем разность задержек мод этого отрезка, то к концу отрезка (между теми же проводниками) придут 2 импульса (импульс 1 и импульс 2) (рисунок 1.2).

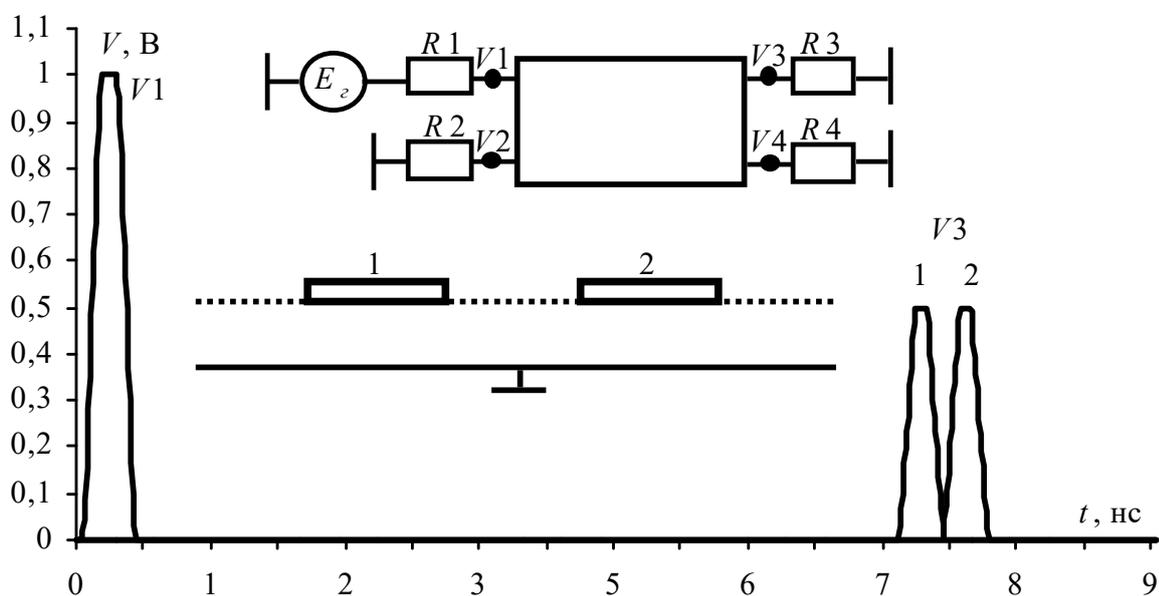


Рисунок 1.2 – Разложение импульса в одиночном отрезке связанной линии

При этом амплитуда импульсов 1 и 2 будет вдвое меньше, чем амплитуда импульса в начале отрезка (результаты вычислены при

значениях резисторов, выбранных из условия псевдосогласования).

Отметим, что амплитуда СКИ в зависимости от связи в линии может быть в 2 и более раза меньше исходной. В структуре с лицевой связью при неоднородном диэлектрическом заполнении возможно ослабление СКИ в 5 раз [50]. Для этого нужно, чтобы сопротивления R на всех концах отрезка были равны среднему геометрическому значению волновых сопротивлений чётной Z_e и нечётной Z_o мод, т.е.

$$R = \sqrt{Z_e Z_o}. \quad (1.3)$$

Модальная фильтрация СКИ, в отличие от традиционных средств защиты, тем эффективнее, чем короче СКИ. Однако она невозможна в однородном диэлектрическом заполнении и более эффективна при наличии диэлектриков с большой диэлектрической проницаемостью и длиной линии, что ограничивает ее использование. Принципы реализации такой защиты могут быть весьма разнообразными, в том числе даже не требующими устройства защиты как такового, а использующими внутренние свойства уже существующих электрических соединений, например межсоединений печатных плат. Практическая реализация модальной фильтрации возможна на разных структурных уровнях аппаратуры, например с помощью кабелей, в виде отдельных блоков, а также компонентов, в том числе печатных.

Теоретические и экспериментальные исследования, подтверждающие возможность модальной фильтрации в полосковых структурах и кабелях, обобщены в [47]. Использование модальной фильтрации в гибких печатных кабелях, применяемых в бортовой радиоэлектронной аппаратуре космических аппаратов для обеспечения связи между блоками, описано в [51, 52]. Результаты моделирования МФ на основе многопроводных микрополосковых линий (МПЛ), а также их сравнение с результатами измерений представлены в [53, 54]. Подход к проектированию печатных МФ с лицевой связью описан в [55, 56]. Совершенствование структур с модальной фильтрацией за счёт зеркальной симметрии рассматривается в [57].

В паре связанных линий, закороченных на дальнем конце (виток меандровой линии или С-секция), импульсное воздействие также подвергается разложению из-за модальных искажений. В такой структуре за счёт сильной связи между проводниками существует перекрестная наводка от фронта сигнала, которая передается на выход витка одновременно с началом распространения основного сигнала по витку. За счёт выбора оптимальной связи это можно использовать для дополнительного ослабления СКИ. Преимуществами таких структур по сравнению с МФ являются вдвое больший путь распространения сигнала и отсутствие резисторов, поскольку в витке нет пассивных проводников. Исследование указанных полосковых структур представляется перспективным с точки зрения разработки новых подходов к защите от СКИ.

1.4 Меандровые линии

Традиционное назначение меандровых линий – задержка сигнала на печатной плате для синхронизации тактируемых импульсов в точках приема, когда невозможно обеспечить равную длину линий передачи, подведенных к этим точкам, из-за сложности или плотности трассировки печатной платы [58]. Основными факторами, влияющими на задержку в МЛ, являются ее длина и конфигурация поперечного сечения, а также относительная диэлектрическая проницаемость материалов [59]. Например, трассы на внешних сторонах платы (микростриповые линии) по сравнению с трассами на внутренних слоях (полосковыми линиями) имеют более низкую задержку сигнала.

Исследованию МЛ посвящено много работ, где основное внимание уделено искажениям сигнала, в первую очередь вызванным перекрестными связями между проводниками МЛ, которые возрастают по мере сжатия витков и могут вызывать значительный уровень наводок, а следовательно, уменьшение задержки [60–66]. Это связано с тем, что наводки от фронта и спада импульсного сигнала вносят практически неконтролируемые искажения формы сигнала, изменяя его характеристики. Влияние наводок

нарушает целостность сигналов на печатной плате и особенно критично для цифровой электроники из-за роста тактовых частот используемых сигналов [67]. Проведено исследование, где в результате квазистатического моделирования распространения импульсного сигнала в одном и двух витках МЛ с одинаковым поперечным сечением показан рост влияния искажений сигнала (в том числе задержки) из-за наводок [68]. В другом исследовании выявлена линейная зависимость задержки в МЛ от количества витков и показано, что при проектировании многовитковых МЛ достаточно выполнить моделирование линии лишь из нескольких витков для определения значения задержки на один виток и использовать результат для расчёта задержки в МЛ из произвольного числа витков [69]. Опубликованы результаты электродинамического моделирования перекрестных наводок в витке МЛ на основе симметричной полосковой линии и предложены новые конструкции МЛ [70]. В [71] представлена сверхпроводящая линия задержки, которая получена из копланарной линии передачи и имеет меандровую структуру, свернутую в двойную спираль для минимизации занимаемой площади.

Устройства на основе МЛ могут применяться в РЭС для других целей. Например, отмечаются всепропускающие свойства витка МЛ [72]. Кроме того, известно использование свойств меандра для фильтрации сигнала в частотном диапазоне [73], применение С-секций (виток МЛ) для фазовой коррекции [35], а также для амплитудного выравнивания на основе всепропускающей DDS-структуры [74]. Нельзя не отметить и применение МЛ для коррекции сигнала [75, 76].

Из-за искажений, вносимых перекрестными связями, при проектировании даже таких простых структур, как МЛ необходимо предварительное моделирование и учёт влияния искажений на задержку. Однако часто для расчета погонных параметров применяют простые модели, полученные для МПЛ и полосковой линии [59]. Эти модели предназначены для определения довольно узкого диапазона параметров и не учитывают полный стек современных печатных плат. Например, в модели для МПЛ из [59] учитываются только параметры подложки и проводника, поэтому она

непригодна для учета задержки в более сложных структурах современных печатных плат. Расчет временного отклика МЛ на воздействие численными методами является ключевым подходом при их анализе, поскольку обеспечивает высокую точность, но вычислительные затраты на моделирование могут оказаться весьма высоки. Между тем виток МЛ можно представить парой связанных линий, закороченных на конце. Таким образом, для анализа временного отклика МЛ применимы модели, разработанные для пары связанных линий. Кроме того, на их основе можно получить простые соотношения, определяющие целевую функцию при оптимизации. Приведем наиболее значимые исследования в этой области.

Сначала отметим классические работы. В [77] впервые показано, как использовать матричную алгебру для решения задачи анализа многопроводных линий передачи (МПЛП). В [78] приведен вывод телеграфных уравнений для МПЛП, а в [79] представлен анализ временного отклика МПЛП с учетом слабой связи между проводниками и введено понятие эквивалентной схемы. В [80] с помощью матричного анализа расширена теория распространения волн в МПЛП без потерь в неоднородном диэлектрике. Этот подход является простым, а его основное преимущество заключается в возможности выполнять прямое описание физических процессов.

Автором [81] осуществлен вывод уравнений для однородной МПЛП и представление схемных параметров отрезка линии в матричном виде. Нельзя не отметить его исследования, посвященные разработке аналитических моделей [82, 83]. Особенно полезны результаты работы [83], где во временной области всесторонне исследованы уравнения для линии в неоднородном диэлектрике без потерь и со слабой связью. Интерес вызывают работы других авторов в этой области [84, 85]. В [84] описаны методы расчета отклика МПЛП, основанные на использовании принципов теории цепей, и приведены результаты их сравнения. В [85] на основе полноволнового анализа рассмотрен вопрос взаимовлияния между линиями быстродействующих межсоединений интегральных схем. В [86] предложен аналитический подход к расчету отклика двухпроводной линии передачи непосредственно во временной обла-

сти. Показано, что такое решение во временной области более удобно для расчета и анализа переходных процессов, чем решение в частотной области. В [87] исследован новый подход к анализу наводок в МПЛП на разных структурных уровнях РЭС. Примечательно, что он применим к общей задаче анализа N -проводных связанных межсоединений и межсоединений с учетом потерь и дисперсии с произвольными окончаниями МПЛП. Результатом работы является ряд аналитических выражений, описывающих форму сигнала во временной области [88].

Наконец, назовем исследования, посвященные оценке отклика в схемах МПЛП на основе многоотрезочных структур. Выделим исследование, где рассмотрены переходные процессы в структурах, состоящих из отрезков одиночных и связанных линий с разными характеристическими проводимостями и ёмкостей на стыках этих отрезков [89]. При редко размещенных ёмкостях их влияние на форму сигнала в конце структуры может быть учтено аналитически [90]. Но также есть альтернативное решение в частотной области, имеющее несколько совершенно новых особенностей [91]. Отметим, что к схемам, состоящим из двух отрезков пары связанных линий с ёмкостной нагрузкой на их стыке, нельзя применить аналитическую модель периодической структуры из [89]. Поэтому, применяя подход из [90] и выражения для определения коэффициентов передачи и отражения из [89], авторы получили модели для расчета отклика в структуре из двух отрезков [92]. При большой разности характеристических импедансов отрезков линии передачи необходим учёт дополнительных составляющих отклика. Однако указанная модель из [89] учитывает только проходящую волну и составляющие, испытавшие лишь два отражения. Поэтому получено выражение для составляющей отклика, компоненты которой испытывают четыре отражения [93]. Приведенные модели также применимы к структурам без ёмкостной нагрузки.

1.5 Постановка цели работы

Из обзора публикаций, представленного в подразделе 1.1, следует, что стремление к быстродействию и миниатюризации устройств привело к росту чувствительности современных РЭС к ЭМВ. В связи с развитием технологий генерации мощных СКИ возрастает опасность ПД ЭМВ на РЭС стратегически важных объектов инфраструктуры. Поэтому построение комплексной и эффективной защиты РЭС таких объектов от ЭМВ (в частности, от СКИ) становится все актуальней.

В подразделе 1.2 показано, что для защиты от ЭМВ применяются разнообразные схемотехнические и конструктивные решения. Однако они не лишены недостатков, снижающих эффективность защиты. Поэтому поиск новых путей её реализации является важной и актуальной задачей. Благодаря простоте и низкой стоимости среди многообразия устройств защиты выделяются полосковые устройства и фильтры ЭМВ на их основе. К преимуществам этих устройств относятся стойкость к радиации и практически бесконечный срок службы, что делает их перспективными для применения в самых разнообразных отраслях.

Перспективен подход к защите, основанный на разложении СКИ на последовательность импульсов меньшей амплитуды в связанных линиях (МФ) за счёт модальных искажений сигнала. Теоретические основы подхода представлены в подразделе 1.3. Виток МЛ является частным случаем пары связанных линий, замкнутых на дальнем конце, поэтому в нем также будут возникать такие искажения. Структуры на основе витка МЛ по сравнению с МФ обладают рядом таких преимуществ, как большее число импульсов разложения, удвоенный путь распространения сигнала и отсутствие резисторов. Их исследование перспективно для разработки новых подходов к защите.

Из обзора, представленного в подразделе 1.4, следует, что устройства на основе витка МЛ могут применяться не только для задержки сигнала на печатной плате, но и для его фильтрации в частотном диапазоне, фазовой коррекции, коррекции фронта сигнала во временной области. Однако их применение для защиты от

СКИ в открытых источниках не описывается. Между тем такие исследования на протяжении многих лет ведутся авторами данной работы, в которой систематизируются накопленные знания в этой области.

Целью публикации монографии является систематизация результатов многолетнего исследования модального разложения импульсных сигналов, возможности защиты РЭС от СКИ за счёт свойств МЛ и создания устройств защиты на их основе.