





проводников и диэлектриков и предложен комплекс аналитических моделей временного отклика полосковых устройств с модальным разложением. На основе моделей получены условия равенства амплитуд составляющих сигнала на выходе устройств, которые вошли в состав методики параметрической оптимизации полосковых устройств с модальным разложением в качестве критериев, что позволяет существенно сократить время на оптимизацию. На основе методики параметрической оптимизации, аналитических моделей и известных численных методов предложена методика проектирования таких устройств, которая затем апробирована на 10 прототипах. Поэтому считаем, что тема, содержание и полученные в диссертации результаты соответствуют п. 7 паспорта научной специальности 2.2.13 – Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения в части разработки и исследования методов обеспечения электромагнитной совместимости радиотехнических систем и устройств, методов обеспечения их стойкости к электромагнитному излучению и методов защиты информации в этих системах.

### **Общая характеристика работы**

Диссертационная работа состоит из введения, 6 разделов, заключения списка сокращений и условных обозначений, списка источников и двух приложений. Работа изложена на 366 страницах, содержит 205 рисунков и 78 таблиц, а также список источников из 619 наименований. Оформление и основное содержание работы соответствует рекомендациям ВАК и ГОСТ.

**Во введении** дана общая характеристика работы, сформулированы цель и задачи исследования для решения, обозначенной в работе, проблемы.

**В первом разделе** обоснована актуальность, представлены источники и классификация ЭМВ, а также методы защиты от них. Представлены подходы к моделированию и анализу структур проводников и диэлектриков, а также методы их оптимизации РЭС. На их основе сформулированы задачи работы.

**Во втором разделе** сведены результаты предварительного анализа межсоединений печатных плат (ПП) РЭС. Выполнен анализ характеристик одиночных и связанных линий при изменении параметров диэлектрических покрытий ПП и температуры среды. Также выполнен анализ многопроводных межсоединений реальных ПП бортовой аппаратуры космического аппарата по предложенной автором методике квазистатического моделирования, которая затем апробирована на примере ряда межсоединений. Кроме того показана возможность выбора оптимальных параметров покрытий ПП для компенсации перекрестных помех в многопроводных линиях. Также предложена методика распределения контактов соединителей РЭС, обеспечивающего минимальный импеданс цепи питания.

**В третьем разделе** предложен метод защиты РЭС от СКИ за счёт его разложения в витке МЛ на составляющие. Представленные теоретические основы метода позволили автору предложить широкий ряд устройств на его основе (запатентовано 21 устройство).

**В четвертом разделе** разработаны модели и алгоритмы для анализа устройств на основе связанных линий. Предложено ускорение многократного вычисления ряда ёмкостных матриц системы проводников и диэлектриков за



счёт использования блочного LU-разложения на этапе решения системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ). Также показана возможность ускорения вычисления временного отклика в диапазоне изменения частоты. Также предложены аналитические модели временного отклика полосковых устройств с модальным разложением и универсальные условия разложения импульсного воздействия в многокаскадных устройствах на основе витка МЛ. На их основе разработаны программные модули для анализа полосковых устройств с модальным разложением.

**В пятом разделе** предложены методики оптимизации и проектирования полосковых устройств с модальным разложением. На основе аналитических моделей из раздела 4 получены условия равенства составляющих временного отклика на выходе устройств, которые вошли в методику в виде критериев целевой функции. Показано ускорение оптимизации за счёт применения этой методики. В основу второй методики (проектирования устройств) вошли: предложенная методика оптимизации, аналитический модели временного отклика на выходе устройства, комплекс численных методов и вычисление  $N$ -норм для оценки эффективности ослабления ЭМВ.

**В шестом разделе** сведены результаты экспериментальной апробации методики проектирования устройств за счёт полномасштабного моделирования и измерения характеристик прототипов устройств во временной и частотной областях (всего рассмотрены 10 прототипов устройств). Также выполнены оценки излучаемых помехоэмиссий прототипов и целостности цифрового сигнала в них. Также оценена адекватность разработанных аналитических моделей временного отклика путём сравнения результатов измерений во временной области и аналитического расчёта отклика методом валидации с выделением особенностей (FSV).

**В заключении** подведены итоги работы, сформулированы её основные научные и практические результаты, а также рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы.

### **Научная новизна и ценность полученных соискателем результатов, выводов и рекомендаций**

Научная новизна диссертации определяется следующими результатами.

1. Предложен ряд полосковых устройств, отличающихся модальным разложением импульсного воздействия на составляющие в витке меандровой линии и выравниванием их амплитуд, что позволяет ослабить сверхкороткий импульс в 1,6 – 6,3 раза.

2. Разработаны алгоритмы вычисления ёмкостной матрицы в диапазоне параметров, отличающиеся применением метода блочного LU-разложения для уменьшения затрат на решения систем линейных алгебраических уравнений, что позволяет ускорить расчёт временного отклика в диапазоне параметров с учётом частотной зависимости комплексной относительной диэлектрической проницаемости структуры проводников и диэлектриков в 2,15 раза.

3. Разработаны аналитические модели временного отклика полосковых устройств на основе модального разложения, позволившие в аналитическом виде доказать инвариантность равенства амплитуд основных составляющих



временного отклика асимметричного двухпроводного модального фильтра, без учёта потерь и дисперсии, к выбору сопротивлений на концах активного проводника и достижимость равенства подбором сопротивлений на концах пассивного проводника. Разработанные модели для ряда меандровых линий и модальных фильтров также позволили доказать возможность выравнивания амплитуд основных составляющих разложения импульсного воздействия.

4. Предложена методика оптимизации полосковых устройств на основе связанных линий с модальным разложением, отличающаяся использованием в качестве критериев условий равенства амплитуд составляющих временного отклика на их выходе, позволила существенно (до 300 раз на исследованных устройствах) уменьшить время оптимизации эволюционными алгоритмами.

5. Предложена методика синтеза защитных полосковых устройств с модальным разложением, которая отличается использованием предложенной методики параметрической оптимизации, аналитического вычисления формы выходного напряжения по моделям в замкнутом виде и применением  $N$ -норм для оценки эффективности ослабления воздействия.

Научная ценность диссертации также подтверждается весьма широкой опубликованностью её результатов, как в отечественной, так и зарубежной печати (опубликовано 160 работ, в том числе статьи в журналах, входящих в перечни ВАК и Scopus/WoS, а также 21 патент на изобретение).

#### **Значимость результатов работы для теории и практики**

**Теоретическую ценность**, прежде всего, определяют представленные теоретические основы предложенного метода защиты РЭС от СКИ за счёт модального разложения импульсных воздействий в полосковых меандровых линиях. Разработанные алгоритмы расширяют теоретический инструментарий подходов к многократному вычислению ёмкостной матрицы в диапазоне параметров. Полученные модели временного отклика полосковых устройств с модальным разложением и условиями равенства амплитуд доминирующих составляющих на выходе устройств расширяют возможности их оптимизации без вычисления временного отклика, как такового. Выявленные особенности влияния асимметрии поперечного сечения полосковых устройств с модальным разложением (в том числе многокаскадных) на появление и распространение дополнительных импульсов позволит более эффективный анализ устройств и исследование возможностей построения более эффективной защиты от СКИ на практике.

**Практическая значимость** заключается в том, что основные результаты работы (предложенные методики оптимизации и проектирования) применимы для построения защиты РЭС от СКИ за счёт их модального разложения в полосковых меандровых линиях. Предложенная методика квазистатического анализа многопроводных линий передачи ПП применима на ранних этапах проектирования РЭС для оценки целостности сигналов и обеспечения ЭМС. Выявленная возможность оптимизации толщины диэлектрического покрытия для минимизации перекрестных помех в многопроводных межсоединениях реальных ПП применима на заключительном этапе проектирования РЭС и не требует внесения схемных изменений или существенной доработки устройств.



Использование усовершенствованных с помощью блочного LU-разложения алгоритмов для вычисления ёмкостной матрицы и аналитических моделей временного отклика полосковых устройств позволит ускорить их синтез.

Кроме того, практическую ценность работы подтверждают 15 актов о внедрении результатов диссертации. Особенно ценно внедрение результатов работы в деятельность предприятия АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М.Ф. Решетнёва» (АО «Решетнев») и АО «НПЦ «Полус», которые являются ведущих в России производителей космических аппаратов. Не менее важно внедрение результатов в деятельность предприятия ООО «Эремекс», занимающееся разработкой САПР. Необходимо отметить, что результаты работы использованы в учебном процессе двух университетов, что говорит о высокой значимости для учебного процесса. Наконец, на ценность указывает перечень из 20 НИР (по грантам Президента РФ, РФФИ, госзадания), где использованы результаты диссертации.

### **Обоснованность и достоверность результатов**

Обоснованность и достоверность результатов, изложенных в работе, основывается на совпадении результатов аналитического и квазистатического моделирования и их согласованности с результатами электродинамического моделирования и измерений с помощью сертифицированных аппаратно-программных комплексов, валидации результатов стандартизированным методом.

### **Рекомендации по использованию результатов и выводов, приведенных в диссертационной работе**

В работе получен комплекс теоретических и практических результатов, применение которых может быть довольно широким. Результаты направлены на обеспечение эффективной защиты РЭС от СКИ с помощью полосковых меандровых линий. Поэтому результаты диссертации могут быть применены на предприятиях: АО «НПО им Лавочкина», г. Химки (Московская область), ПАО «Туполев», г. Москва, АО «НИИП им. В.В. Тихомирова», г. Жуковский, АО «ОНИИП», г. Омск, АО «Решетнев», г. Железногорск (Красноярский край), АО «НПЦ «Полус», г. Томск.

### **Замечания по работе**

1. При разработке алгоритмов для ускорения процесса моделирования связанных линий соискателем рассмотрены только 2 изменяемых параметра поперечного сечения структуры проводников и диэлектриков. Целесообразно рассмотреть возможность ускорения моделирования при изменении и других параметров структуры.

2. Второе положение, выносимое на защиту, требует подтверждения с помощью измерений. Выбор параметров нагрузок при измерениях, хотя и видится затруднительным на практике, но представляется вполне возможным.

3. В диссертации в явном виде не дано обоснование выбора материалов подложки при прототипировании полосковых устройств.



4. Соискатель исследует процессы преобразования формы импульсных сигналов в разных конструкциях на основе связанных линий. Связанные линии характеризуются системой параметров, что позволяет объективно сравнивать устройства между собой. Поскольку соискателем разработано 10 прототипов полосковых устройств, то такое сравнение видится необходимым.

Указанные замечания в большинстве легко устранимы и не умаляют ценности диссертационной работы и значимости её результатов.

### Выводы

1. Диссертационная работа выполнена на актуальную тему, имеет научную новизну и значимость для науки и практики, является законченной научно-квалификационной работой, раскрывающей сформулированную соискателем цель и задачи, направленные на решение актуальной проблемы.

2. Основные результаты, полученные в работе, в достаточной степени опубликованы и известны специалистам в области радиотехники.

3. Автореферат диссертации достаточно полно отражает её основное содержание и оформлен в соответствии с требованиями ВАК РФ.

### Заключение

Считаем, что представленная работа удовлетворяет п.9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней ...», утвержденного постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 г. №842 (ред. от 25.01.2017), а её автор, Суровцев Роман Сергеевич, заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 2.2.13—«Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения».

Отзыв на диссертационную работу обсужден и одобрен на заседании кафедры электроники, протокол № 5 от 24 мая 2024 года.

Доктор физико-математических наук, профессор-консультант кафедры электроники Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Воронежский государственный университет»

Бобрешов Анатолий Михайлович

E-mail: bobreshov@phys.vsu.ru

394006, Россия, г. Воронеж, Университетская пл., 1, к. 234.

Телефоны: +7 (473) 220-82-84 (раб.); 8-910-749-79-45 (сот.)

