

На правах рукописи

Туркин Владимир Анатольевич

**Разработка излучателей сверхкоротких электромагнитных импульсов для испытаний радиотехнической аппаратуры**

Специальность 05.12.04 - Радиотехника, в том числе системы и устройства теле-  
видения

Автореферат

диссертация на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва 2006

Работа выполнена на кафедре "Радиоэлектронные и телекоммуникационные устройства и системы" Московского государственного института электроники и математики.

Научный руководитель - к. т. н. Сахаров Константин Юрьевич.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор Петров Александр Сергеевич,  
кандидат физико-математических наук Ногаев Александр Иванович.

Ведущая организация: ФГУП Московский научно-исследовательский радиотехнический институт.

Защита состоится "20" июня 2006 г. в 16.00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.133.06 Московского государственного института электроники и математики по адресу:

109028, Москва, Б. Трехсвятительский пер., 3/12, зал Ученого Совета.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Автореферат разослан 11 мая 2006 г.

Ученый секретарь диссертационного совета  
к. т. н., профессор



Н. Н. Грачев

## I. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **АКТУАЛЬНОСТЬ ТЕМЫ ДИССЕРТАЦИИ**

В последние десятилетия наблюдается постоянно возрастающий интерес к исследованию и использованию в задачах радиотехники нового типа электромагнитных волн – электромагнитных импульсов (ЭМИ). В природе источником ЭМИ являются импульсные токи, сопровождающие нестационарные природные явления – геомагнитные бури, удары молнии, электростатические разряды. В технике источниками ЭМИ являются электромагнитные поля радиопередающих и радиолокационных станций, высоковольтные линии электропередачи, импульсные электротехнические устройства. Источником наиболее мощного ЭМИ является ядерный взрыв (ЯВ). С началом решения проблемы защиты от воздействия ЭМИ ЯВ начинались активные исследования механизмов взаимодействия ЭМИ с РЭА. Исследования стимулировались также широким распространением микроэлектроники в современных информационных системах учета, планирования и регулирования. Воздействие ЭМИ приводит к возрастанию вероятности отказов ответственных систем управления и связи.

Поэтому актуальными в этих условиях становятся проблемы защиты информационных ресурсов, оценка устойчивости гражданских объектов, обеспечение функциональной безопасности информационных, телекоммуникационных и радиотехнических систем. Решение этих проблем проводится по следующим основным направлениям:

1. Задание в качестве требований в нормативно-технических документах обоснованных, типизированных параметров электромагнитных факторов природного и техногенного происхождения.
2. Создание и модернизация имитаторов для воспроизведения заданных в стандартах параметров электромагнитных полей ЭМИ ЯВ и сверхкоротких (СК) ЭМИ.
3. Разработка средств измерений и метрологического обеспечения испытаний .
3. Испытание объектов к действию электромагнитных факторов с использованием имитаторов ЭМИ.
4. Разработка методов и средств защиты.
5. Обеспечение электромагнитной совместимости (ЭМС) технических систем.

Импульсной электродинамике широкополосных радиосистем и полям связанных структур, методам измерений параметров и генерации сверхкоротких полей, а также разработке мероприятий по защите РЭА от СК ЭМИ посвящены работы целого ряда известных отечественных и зарубежных ученых: Фортов В.Е., Синий Л.Л., Соколов А.А., Потапов А.А., Подосенов С.А., Сахаров К.Ю., Мырова Л.О., Кечиев Л.Н., Крохалев Д.И., Балюк Н.В., Баум К.И., Парфенов Ю.В., Радаски У. Ф. и других.

В нашей стране и за рубежом ведется целенаправленная работа по разработке стандартов. Завершается работа над комплексом российских стандартов и техническим регламентом по ЭМС.

По оценке специалистов проблема ЭМС и устойчивость технических средств (ТС) к ЭМИ выходит на ведущую позицию при разработке электронной аппаратуры и телекоммуникационных систем (ТКС) на их основе.

Для испытаний радиотехнических средств на стойкость к воздействию ЭМИ ЯВ в экономически развитых странах было сооружено несколько десятков имитаторов ЭМИ ЯВ.

Дальнейшие исследования в области генерирования и измерения параметров ЭМИ проводились в направлении разработки излучающих имитаторов ЭМИ ЯВ и средств измерений параметров в наносекундной области.

В настоящее время в развитии телекоммуникационных технологий наблюдается интенсивное освоение нового типа радиоволн – коротких сверхширокополосных (сверхкоротких) электромагнитных импульсов.

Они имеют длительность порядка 0,1 нс. Было установлено, что подобный тип электромагнитных волн чрезвычайно эффективен для передачи цифровой информации, а также для сверхширокополосной (в первую очередь для подповерхностной) радиолокации с разрешением образа объекта.

На основе этой технологии за рубежом разработаны и проходят испытания устройства скрытой телефонной радиосвязи, приемо-передающие устройства для бескабельных локальных компьютерных сетей, высокоточные системы местоопределения. Испытываются локаторы для обнаружения в грунте пластиковых мин, для дальнометрии и систем охранной сигнализации, для контроля расстояний на транспорте и для дистанционного контроля пульса и дыхания человека.

Для метрологического обеспечения телекоммуникационных технологий, использующих сверхкороткие электромагнитные импульсы (СК ЭМИ) необходимы средства измерений параметров этих импульсов, быстроедействие которых должно быть менее 100 пс. Практика показала, что единственным типом средств измерений, обеспечивающим требуемую широкополосность являются полосковые измерительные преобразователи. Развитие полосковых измерительных преобразователей проходило в направлении сокращения времени нарастания их переходной характеристики.

По мере развития теории и технических средств генерирования, излучения и измерения коротких ЭМИ, имеющих субнаносекундную длительность, стала развиваться концепция об исключительном значении коротких сверхширокополосных электромагнитных импульсов (СШП ЭМИ, английская аббревиатура UWB EMP) в прикладной электродинамике. Отечественными и зарубежными специалистами были показаны возможности остронаправленного из-

лучения повторяющихся СК ЭМИ субнаносекундной длительности и эффективной регистрации с помощью устройств, аналогичных стробоскопическому осциллографу. При воздействии СК ЭМИ на компьютеры и цифровые устройства в их цепях наводятся сигналы, аналогичные рабочим, что приводит к нарушению работы цифровых систем. По единодушному мнению отечественных и зарубежных специалистов, относительная простота изготовления мощных передвижных излучателей СК ЭМИ позволяет прогнозировать их использование в террористических целях для нарушения работы компьютеризованных государственных инфраструктур. Необходимым условием развертывания работ в трех перечисленных направлениях (связь, локация, борьба с электромагнитным терроризмом) является решение проблем метрологического обеспечения исследований и создания излучателей СК ЭМИ, разработка методов расчета АФС и разработка генераторов.

Одной из наиболее актуальных задач при оценке стойкости технических средств (ТС) в условиях воздействия сверхкоротких электромагнитных излучений в соответствии с требованиями стандартов ГОСТ и МЭК является проблема воспроизведения необходимых параметров нагружения в сантиметровом и миллиметровом диапазонах длин волн. Для проведения таких исследований требуется разработка новых методов и соответствующий комплекс установок - имитаторов электромагнитных излучений для испытаний аппаратуры и стационарных объектов. Это позволит повысить достоверность исследований устойчивости ТС, обеспечит их стойкость и взрывобезопасность на всех этапах жизненного цикла (хранение, транспортировка, эксплуатация).

Следовательно, задача разработки методов расчета узконаправленных антенных систем и совершенствования методов и средств генерации СК ЭМИ является в настоящее время актуальной.

Настоящая работа посвящена теоретическому обобщению и решению важной научной задачи по разработке научно-методических основ создания мощных излучателей СК ЭМИ для оценки устойчивости технических систем к воздействию электромагнитного импульса.

#### **АКТУАЛЬНОСТЬ ПОСТАВЛЕННОЙ ЗАДАЧИ ОПРЕДЕЛЯЕТСЯ:**

- необходимостью создания и совершенствования радиотехнических систем (РТС) и телекоммуникаций, соответствующих современным требованиям, предъявляемым к их надежности и устойчивости в условиях воздействия СК ЭМИ;
- слабой теоретической и экспериментальной изученностью воздействия наносекундных электромагнитных полей на РТС и ТКС;

▪ отсутствием в полном объеме технических средств защиты оборудования, сетей ТКС от СК ЭМИ и требований к средствам воспроизведения параметров сверхкоротких электромагнитных полей.

### **ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ**

Основной целью диссертационной работы является разработка научно-методического аппарата, средств воспроизведения излучения и методов испытаний РТС в условиях воздействия сверхкоротких электромагнитных импульсов.

Для достижения поставленной цели в работе решаются следующие задачи:

1. Анализ современного состояния разработки излучателей сверхкоротких электромагнитных импульсов.
2. Обоснование требований к мощным излучателям для обеспечения испытаний технических средств на стойкость к воздействию сверхкоротких ЭМИ.
3. Разработка методов расчета антенно-фидерных систем (АФС) излучателей.
4. Создание излучателей большой мощности и исследование их характеристик.
5. Проведение экспериментальных исследований с целью подтверждения основных положений математических моделей, положенных в основу методов расчета АФС, и оценки воздействия сверхкоротких ЭМИ на радиотехнические системы.
6. Разработка рекомендаций по защите РТС.

### **НА ЗАЩИТУ ВЫНОСЯТСЯ:**

- требования к мощным излучателям для обеспечения испытаний технических средств на стойкость к воздействию сверхкоротких ЭМИ;
- математические модели расчета АФС, описывающие распределение полей излучения;
- результаты теоретических и экспериментальных исследований по созданию мощных излучателей СК ЭМИ;
- экспериментальные исследования воздействия СК ЭМИ на элементы ТКС и радиотехнических систем.

### **НАУЧНАЯ НОВИЗНА РАБОТЫ ЗАКЛЮЧАЕТСЯ:**

- в обосновании требований к излучателям СК ЭМИ и рекомендаций по определению их метрологических характеристик;
- в разработке методов расчета АФС для оценки электромагнитной обстановки вокруг АФС и прогнозирования характеристик полей излучения в районе расположения технических систем различного назначения;

- в создании излучателей СК ЭМИ, доведенных до конкретных комплексных установок;
- в получении новых данных по стойкости элементов ТКС и РТС к воздействию СК ЭМИ и разработке научно-обоснованных мероприятий по повышению их устойчивости.

#### **ПРАКТИЧЕСКАЯ ЗНАЧИМОСТЬ РАБОТЫ СОСТОИТ В РАЗРАБОТКЕ:**

- расчетных методик и прикладных программ по оценке электромагнитных полей излучателей;
- рекомендаций по оценке стойкости и защите элементов РТС и ТКС от токов и напряжений, наводимых СК ЭМИ;
- комплекса излучателей СК ЭМИ, позволяющих проводить исследования стойкости РТС в соответствии с требованиями стандартов.

#### **ДОСТОВЕРНОСТЬ НАУЧНЫХ ПОЛОЖЕНИЙ ОБЕСПЕЧИВАЕТСЯ:**

- корректностью использования математического аппарата и математической статистики, теории испытаний и измерений;
- апробацией и публикациями основных результатов исследований;
- проверкой соответствия теоретических результатов по исследуемой проблеме экспериментальным данным;
- сравнением полученных данных с результатами других исследований.

#### **РЕАЛИЗАЦИЯ И ВНЕДРЕНИЕ НАУЧНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИИ**

Основные результаты работы внедрены и нашли практическое применение на ряде предприятий: ФГУП РФЯЦ-ВНИИЭФ, ФГУП МИТ, ФГУП МНИРТИ, ИТЭС ОИВТ РАН, ФСТЭК России, 32 ГНИИИ МО РФ и др. при создании излучателей СК ЭМИ и экспериментальных исследованиях воздействия СК ЭМИ на насыщенные цифровыми устройствами системы. Результаты внедрены также в учебный процесс МИЭМ на кафедре «Радиоэлектронные и телекоммуникационные устройства и системы» по дисциплине «Основы проектирования РЭС».

Результаты внедрения обеспечили оснащение ведущих испытательных центров России излучателями мощных СК ЭМИ, которые используются для отработки эффективных средств защиты радиотехнических и цифровых систем военного, специального и гражданского назначения.

Теоретические и практические результаты работы реализованы в НИР, выполненных ФГУП «ВНИИОФИ», при непосредственном участии автора: «Актив-3» (1994г.); «Зенит» (1994г.); «Заря-ОФИ» (1999г.); «Сходня» (2000г.); «Персей-СИ» (2000г.); «Защита» (2000г.); «МАКОНТ» (2001г.); «Сигнал» (2004г.); «Комплект» (2004г.); «Щит» (2004г.); «Залив-02» (2005г.) и ОКР «Листва-ОФИ» (2005г.).

Решенная в диссертации научная задача легла в основу комплекса средств измерений и излучателей сверхкоротких электромагнитных импульсов, созданных и внедренных на ряде предприятий и научно – испытательных центров страны. Авторы указанных систем, включая автора данной диссертации, были удостоены премии Правительства Российской Федерации 2002 г в области науки и техники.

### **АПРОБАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ**

Работа в целом и отдельные ее результаты докладывались и обсуждались на Всесоюзной научно-технической конференции «Вопросы обеспечения стойкости РЭС к воздействию ЭМИ естественного и искусственного происхождения» в Харькове в 1991 г., на Российской научно-технической конференции по электромагнитной совместимости в Санкт-Петербурге в 1996 г. и 1998 г., на первой научно-технической конференции «Метрологическое обеспечение испытаний вооружения и военной техники» в Московской области, на Всероссийской научно-технической конференции «Методы и средства измерений в области электромагнитной совместимости технических средств» в Нижнем Новгороде в 2004 г., а также на международных конференциях: 13<sup>th</sup> International Wroclaw Symposium EMC 96; 10<sup>th</sup> International Crimean Conf. “Microwave and Telecommunication Technology” Crimico’2000, Sevastopol, Ukraine; International Conf. in Blanes, Barcelona, Spain, 2004.

### **ПУБЛИКАЦИИ**

По теме диссертации опубликовано 27 печатных работ, в том числе: 10 статей, 14 тезисов доклада и 3 патента на изобретение.

### **СТРУКТУРА ДИССЕРТАЦИИ**

Диссертация состоит из введения, пяти глав с выводами, заключения и списка литературы, содержащего 125 наименований. Общий объем диссертационной работы составляет 163 страницы.

## **II. СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность исследований по созданию излучателей сверхкоротких электромагнитных импульсов, определены цель работы, задачи исследований и приведены основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** проведен анализ структуры излучателей СК ЭМИ и генераторов сверхкоротких импульсов напряжения. На основе анализа показано, что наиболее перспективными генераторами СК импульсов являются:

- искровые генераторы с маслонаполненными разрядниками для создания мощных однократных (или с частотой повторения 10 Гц-100 Гц) излучателей импульсной мощностью порядка 1 ГВт и более;
- полупроводниковые генераторы для создания портативных излучателей с частотой повторения до 1000 Гц и более.

Анализ антенно-фидерных систем и методов их расчета для излучения СК ЭМИ показал, что основными типами АФС для направленного излучения СК ЭМИ являются антенная решетка из ТЕМ-рупоров и излучающая антенна с параболическим рефлектором.

Проведен анализ методов оценки стойкости радиотехнических систем и современного состояния разработки излучателей сверхкоротких электромагнитных импульсов в России и за рубежом. Из анализа следует, что в настоящее время преднамеренные сверхкороткие электромагнитные помехи (электромагнитный терроризм) являются новой серьезной угрозой для радиотехнических и компьютерных систем, тем более, что восприимчивость этих электронных систем к СК помехам стремительно растет.

Рассмотрены основные методы оценки стойкости аппаратуры.

В экспериментальных исследованиях испытания аппаратуры на стойкость к электромагнитным факторам различного происхождения проводят прямыми, косвенными или комбинированными методами.

При прямых методах с помощью импульсных источников энергии в локальных объемах пространства, либо путем излучения в окружающее пространство воспроизводят натурные или близкие к ним электромагнитные поля.

При косвенных методах воспроизводят результат действия ЭМИ на аппаратуру в виде наведенных токов (напряжений) с определенными (расчетными или экспериментальными) амплитудно-временными характеристиками, которые создают с помощью импульсных источников энергии. При необходимости используют комбинированный метод воспроизведения воздействия ЭМИ, представляющий собой разнообразные сочетания прямых и косвенных методов.

Прямые методы испытаний на стойкость к воздействию ЭМИ различного происхождения реализуются с помощью имитаторов двух видов - связанных волн и излучающего типа с горизонтальной или вертикальной поляризацией поля. При косвенных методах используются генераторы импульсных напряжений и токов с соответствующими формирующими устройствами.

Расчетно-экспериментальные методы используются при испытаниях с целью оценки стойкости ТС, степени их защищенности и для определения критериев, параметров СК ЭМИ, при которых наступает гарантированное поражение ТС. Общеизвестен механизм воздействия СК ЭМИ, при котором падающее на объект поле трансформируется в импульсный сигнал наводки, которая и вызывает поражение наиболее слабого элемента в цепи. Возможны следующие

пути попадания энергии СК ЭМИ: через антенный тракт, по цепям питания, через экранирующие корпуса и покрытия, кабели и т.д. При одинаковых амплитудах падающего поля вблизи объекта опасность поражения радиотехнической системы через приёмную антенну выше, чем через экранирующий корпус или кабельную линию.

На основании изложенного в главе материала обоснована актуальность диссертационной работы, поставлены цель и задачи исследований.

**Во второй главе** проведено обоснование требований к характеристикам мощных излучателей сверхкоротких электромагнитных импульсов.

Определены основные требования к метрологическим характеристикам разрабатываемых излучателей для обеспечения испытаний радиотехнических систем на стойкость к ЭМИ большой мощности:

#### 1. Мощные излучатели ЭМИ:

- напряженность электрического поля в рабочей зоне – 50 - 100 кВ/м;
- длительность фронта импульса по уровням 0,1-0,9 от амплитуды - 0,3 – 2,5 нс;
- длительность импульса по уровню 0,5 от амплитуды – 2- 25 нс;
- частота повторения – однократные импульсы.

#### 2. Излучатели сверхкоротких ЭМИ:

- напряженность электрического поля в рабочей зоне – 1-10,0 кВ/м;
- длительность фронта импульса по уровням 0,1-0,9 от амплитуды - 100-250 пс;
- длительность импульса по уровню 0,5 от амплитуды – 150 - 350 пс;
- частота повторения импульсов до 1 кГц.

Исходя из метрологических характеристик, а также из конструктивных и эксплуатационных особенностей определены три основные группы разрабатываемых излучателей:

1. Мощные стационарные излучатели ЭМИ большой энергии. Такие излучатели требуют строительства специальных сооружений, так как высоковольтная генераторная часть излучателя и экранированная кабина с пультом управления и регистраторами должны находиться в отапливаемом помещении.

2. Мощные передвижные излучатели сверхкоротких ЭМИ с максимальной частотой повторения до 1 кГц. Их можно размещать в автофургонах или автоприцепах и применять на значительном расстоянии для исследования воздействия сверхкоротких ЭМИ на объекты РТС, системы телекоммуникаций, охранные системы, системы управления и командные пункты. Одним из основных эксплуатационных требований к таким излучателям является мобильность, что предполагает в свою очередь специфические требования к конструкции: монтаж всех узлов в передвижном транспортном средстве, наличие там же экранированной кабины с пультом управления, средств регистрации и системы автономного электропитания.

3. Лабораторные переносные излучатели сверхкоротких ЭМИ, на основе полупроводниковых генераторов, производства ЗАО «НПАО «ФИД-Технология». Применяются для исследования воздействия сверхкоротких ЭМИ на небольшие объекты внутри зданий, насыщенные цифровыми устройствами, например, персональные компьютеры, системы контроля доступа в охраняемые помещения и сети Интернета. Основным эксплуатационным требованием к лабораторным излучателям является его компактность, возможность размещения на любом требуемом объекте как внутри помещения, так и вне его и достаточно высокая напряженность поля излученных импульсов, которая позволяет воспроизводить ситуацию воздействия мощных передвижных излучателей сверхкоротких ЭМИ. Применяя модульный принцип, можно создавать мощные излучатели сверхкоротких ЭМИ. Такой способ генерации ЭМИ представляется наиболее перспективным.

**Третья глава** диссертации посвящена разработке методов расчета АФС излучателей. Во ВНИИОФИ были разработаны модели для расчета параметров сверхкоротких ЭМИ, создаваемых полеобразующими системами. Получены аналитические выражения для расчета излучения от бегущих волн тока, распространяющегося по тонким криволинейным проводам полеобразующих систем. Полученные решения справедливы как в ближней, так и в дальней зоне и позволяют находить поля излучения как от сложных проволочных структур, так и от сплошных структур при известных плотностях тока. АФС излучателей рассчитывались по заданной геометрии и токам в проводах, что позволило сконструировать различные типы антенн бегущих волн тока.

Метод применим в том случае, когда начальные токи в каждом из проводов структуры известны. На основе метода заданных токов был произведен расчет поля антенны с рефлектором. Для этого был использован метод зеркальных изображений, используемый для расчета полей излучения вибраторов, расположенных над идеальной проводящей плоскостью. Суть этого метода состоит в том, что суммарное поле от вибратора над проводящей плоскостью складывается из поля излучения вибратора в свободном пространстве и поля излучения от его зеркального изображения.

Метод зеркальных изображений применялся не к плоской поверхности, а к параболическому зеркалу, отобразив в нем возбуждающую  $V$  – образную антенну. Так как точка возбуждения  $V$  - образной антенны находится в фокусе параболического рефлектора, то изображение точки возбуждения в зеркале будет мнимым и лежать в бесконечно удаленной точке за зеркалом. Концы возбуждающей антенны и ее зеркального изображения будут совпадать друг с другом и лежать на образующей зеркала. Расстояние между концами равно диаметру зеркала (см. рисунок 1).

Таким образом, вместо системы V - образная антенна - рефлектор, мы получили две V - образных антенны с разными углами раскрытия. При этом, угол раскрытия антенны, заменяющей рефлектор, будет стремиться к нулю. Суперпозиция полей от этих антенн дает искомое поле.

Далее для расчета поля от V - образных антенн применялся метод заданных токов. Применяемый метод позволяет вычислить поле внутри центрального пятна для произвольной точки с учетом прихода сигнала от концов возбуждающей и "отраженной" антенн. Опуская довольно громоздкие преобразования, приведем выражение общего вида для нахождения z - компоненты полного электрического поля для точек, имеющих произвольные координаты x, y, z :

$$\begin{aligned}
 E_{tz} = \frac{1}{2f_g \pi} & \left\{ \frac{V(t-R/c)}{2R} \cdot \left( \frac{\sin \beta + z/R}{1 + \frac{(y - \cos \beta D/2) \cos \beta + z \sin \beta}{R}} + \right. \right. \\
 & \left. \left. + \frac{\sin \beta - z/R}{1 + \frac{(y - \cos \beta D/2) \cos \beta - z \sin \beta}{R}} \right) - \frac{V(t-l/c-R_2/c)}{2R_2} \times \right. \\
 & \times \frac{\sin \beta - \frac{z-D/2}{R_2}}{1 + \frac{y \cos \beta + (D/2-z) \sin \beta}{R_2}} - \frac{V(t-l/c-R'_2/c)}{2R'_2} \cdot \frac{\sin \beta + \frac{z+D/2}{R'_2}}{1 + \frac{y \cos \beta + (D/2+z) \sin \beta}{R'_2}} - \\
 & - \frac{4V(t-2F/c-y/c+(D/2c) \cot \beta)}{D} \cdot \frac{1+k^2-p^2}{1+2k^2-2p^2+2k^2p^2+k^4+p^4} + \\
 & \left. + \frac{V(t-l/c-R_2/c)}{2R_2} \cdot \frac{D/2-z}{R_2-y} + \frac{V(t-l/c-R'_2/c)}{2R'_2} \cdot \frac{D/2+z}{R'_2-y} \right\}. \quad (1)
 \end{aligned}$$

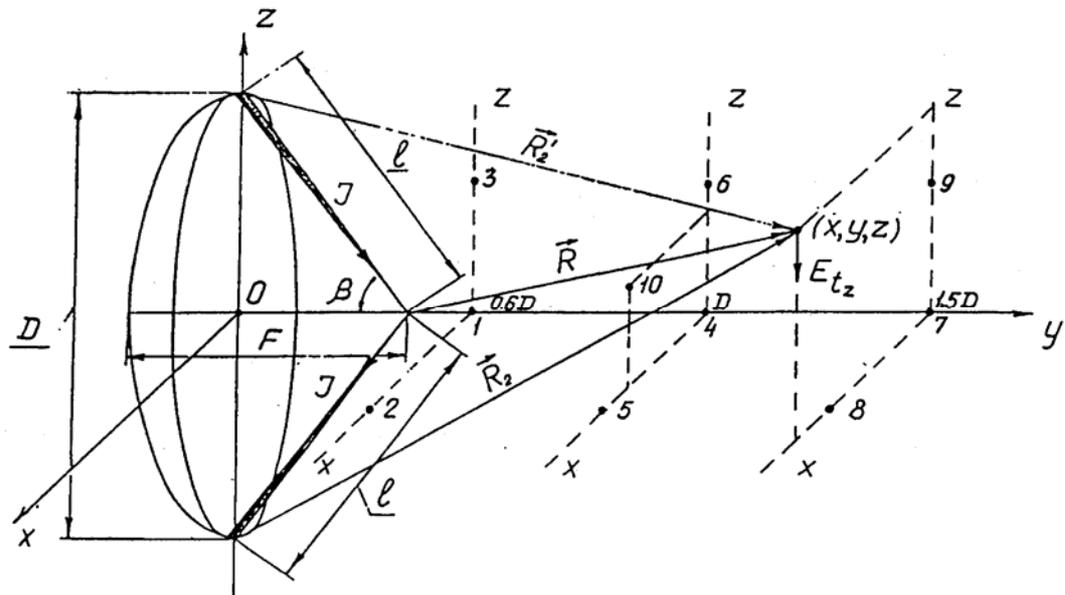


Рисунок 1 – Геометрия расчета V- антенны с рефлектором

Используя полученные формулы, было проведено сравнение результатов, получаемых по формуле (1) и по формуле (2) Фарра-Баума для вычисления напряженности электрического поля  $E(R,t)$  на оси рефлектора на расстоянии  $R$  от него в момент времени  $t$ :

$$E(R,t) = \frac{D}{4\pi R c f_g} \left( \frac{\partial V(t - 2F/c)}{\partial t} - \frac{c}{2F} \left[ V(t) - V\left(t - \frac{2F}{c}\right) \right] \right), \quad (2)$$

здесь  $f_g = Z_f/\eta_0$ , где  $Z_f$  - входной импеданс  $V$  - образной антенны, облучающей параболический рефлектор,  $c$  - скорость света,  $\eta_0 = (\mu_0/\epsilon_0)^{1/2}$  - волновой импеданс вакуума, импульс напряжения  $V(t)$  произвольной зависимости от времени  $t$ . Точка возбуждения  $V$  - образной антенны расположена в фокусе рефлектора с фокусным расстоянием  $F$ . Расстояние между концами антенны равняется диаметру зеркала  $D$ . Формула (2) содержит член с производной по времени  $t$  от напряжения возбуждения в момент прихода сигнала в точку наблюдения, связанный с излучением от рефлектора, и член с разностью двух напряжений, соответствующий излучению от возбуждающей антенны. Напряженность поля убывает обратно пропорционально расстоянию от излучателя.

Было доказано, что член с производной (по крайней мере, в ближней зоне) на расстояниях равных трем - пяти диаметрам зеркала не отражает существа задачи, так как при подаче на вход ступенчатого сигнала, амплитуда излучаемого зеркалом импульса поля на оси рефлектора не зависит от расстояния и является постоянной по величине на любом конечном расстоянии от зеркала. Меняется с расстоянием лишь длительность импульса, которая убывает обратно пропорционально расстоянию до зеркала.

При квазиступенчатом импульсе возбуждения с длительностью фронта  $\tau$  ситуация существенно изменяется.

Таким образом, в работе теоретически и экспериментально показано, что формула Фарра-Баума (2) неприменима для расчета поля при небольших расстояниях.

Был произведен расчет излучателей на основе монорупорной антенны и решетки из ТЕМ-рупоров. Нахождение поля излучения решетки из ТЕМ-рупоров сводится к суммированию во временной области излучения от каждого рупора. Рупор может быть представлен суммой  $V$  - образных антенн, излучение от каждой из которых рассчитывается методом заданных токов.

Для проверки основных положений теоретических положений сравнивались данные, полученные при расчете с помощью программы Mathad-2001 и экспериментально полученные. Результаты расчета и эксперимента совпадают с погрешностью не более 8 %. Полученные экспериментальные данные полностью подтверждают правомерность теоретических выводов.

**Четвертая глава** посвящена разработке излучателей большой мощности и исследованию их характеристик.

На основании требований, обоснованных во второй главе, используя предварительные теоретические расчеты, были разработаны излучатели СК ЭМИ, имеющие следующие характеристики:

1. Мощные стационарные излучатели ЭМИ большой энергии на основе искровых генераторов с маслonaполненными разрядниками и моно ТЕМ-рупорной полеобразующей системой. Характеристики излучателей ЭМИ большой энергии представлены в таблице 1.

Таблица 1 - Характеристики излучателей ЭМИ большой энергии

Излучатели ЭМИ большой энергии	Высота подвеса потенциалн. электрода, м	Напряженность, кВ/м	Длительность фронта импульса, нс	Длительность импульса, нс
«Актив»	0,75	500	0,3	3,0
	3,0	105	0,5	
«Персей-Супер»	5,0	60	0,5	3,0
Режим работы – однократные импульсы				

Излучатель ЭМИ большой энергии «Актив» изображен на рисунках 2 и 3.



Рисунок 2 - Формирователь импульсов поля с начальным участком полеобразующей системы излучателя «Актив»



Рисунок 3 - Полеобразующая система излучателя «Актив»

2. Мощные передвижные частотные излучатели СК ЭМИ на основе искровых генераторов с маслonaполненными разрядниками и системой прокачки масла в обостряющих промежутках. Характеристики передвижных излучателей СК ЭМИ представлены в таблице 2.

Таблица 2 - Характеристики передвижных излучателей СК ЭМИ

Характеристики	«Снайпер»	«Снайпер-М»	«И-140/64»	«Гигаватт»
Напряжение генератора, кВ	150	170	137	500
Мощность, подводимая к антенне, МВт	450	578	370	5000
Тип антенны	антенна с рефлектором Ø 2,6 м	решетка из 144-х ТЕМ рупоров, 2x2м <sup>2</sup>	решетка из 64-х ТЕМ рупоров, 1,2x1,2м <sup>2</sup>	монорупор, 0,66x0,4м <sup>2</sup>
Расстояние до точки измерения, м	27,5	100	50	45
Напряженность, кВ/м	10	10	10	10
Длительность фронта импульса, пс	--	250	200	98
Длительность импульса, пс	200	350	315	220
Максимальная частота следования импульсов, Гц	500	1000	50	10
Диаграмма направленности: в вертик. пл. в горизонт. пл.	±5,3°	±7,5° ±8,5°	±7,5° ±9,7°	± 10,5° ± 12°

Внешний вид мощных передвижных частотных излучателей СК ЭМИ «Снайпер», «Снайпер-М» и «Гигаватт» представлен на рисунках 4, 5, 6 соответственно.



Рисунок 4 - Излучатель СК ЭМИ «Снайпер», на автомобильном прицепе ПАУ-1



Формирователь короткоимпульсных сигналов при работе на эквивалент нагрузки



Антенная решетка 2м·2м из 144 ТЕМ рупоров  
Рисунок 5 - Излучатель СК ЭМИ «Снайпер-М»

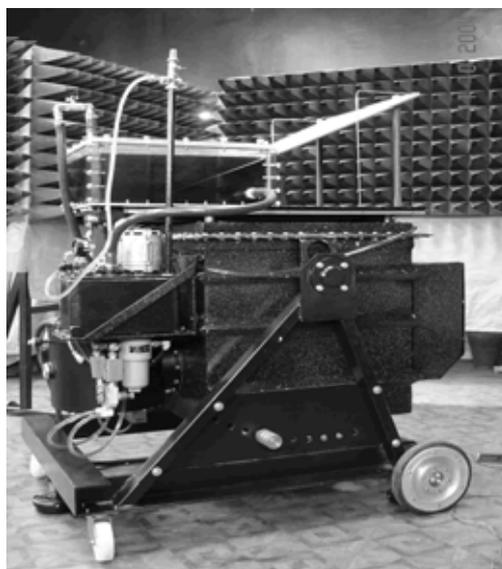


Рисунок 6 - Излучатель СК ЭМИ «Гигаватт»

3. Лабораторные переносные излучатели СК ЭМИ, на основе полупроводниковых генераторов, производства ЗАО «НПАО «ФИД-Технология». Характеристики лабораторных переносных излучателей СК ЭМИ представлены в таблице 3.

Таблица 3 - Характеристики лабораторных переносных излучателей СК ЭМИ

Характеристики	«И-30/4»	«И – 40/6»	«И – 40/64»	«И – 10/0,9Р»
Генератор	ГИН-30	ГИН-40	ГИН-40	ГИН-10
Тип антенны	решетка из 4-х ТЕМ рупоров, площадь раскрыва – 0,13 м <sup>2</sup>	решетка из 6-ти ТЕМ рупоров, площадь раскрыва – 0,08 м <sup>2</sup>	решетка из 64-х ТЕМ рупоров, площадь раскрыва – 1,44 м <sup>2</sup>	антенна с рефлектором Ø 0,9 м
Начало волновой зоны, м	2	2	6	4
Параметр качества E (кВ/м)* Y (м)	45	57	165	40
Длительность фронта импульса, пс	190	100	150	70
Длительность импульса, пс	200	160	150	100
Максимальная частота следования импульсов, Гц	100	1000	1000	70
Ширина диаграммы направленности на уровне 0,7 от максимума: в плоскости H; в плоскости E	±18 <sup>0</sup> ±18 <sup>0</sup>	±18 <sup>0</sup> ±11 <sup>0</sup>	±8 <sup>0</sup> ±7 <sup>0</sup>	±3,3 <sup>0</sup> ±3,5 <sup>0</sup>

Характерный внешний вид лабораторных переносных излучателей СК ЭМИ представлен на рисунках 7 и 8.



Рисунок 7 – Переносной излучатель СК ЭМИ «И – 40/6» с излучающей антенной на основе решетки из 6-ти ТЕМ рупоров



Рисунок 8 - Переносной излучатель СК ЭМИ «И – 10/0,9Р» в радиопоглощающей камере

При исследованиях характеристик излучателей использовались следующие средства измерений:

- регистратор аналого-цифровой СРГ7, полоса пропускания сигнального тракта 5 ГГц;
- осциллограф вычислительный стробоскопический Tektronix CSA8000, полоса пропускания - 50 ГГц;
- осциллограф цифровой запоминающий Tektronix TDS784D, полоса пропускания 1 ГГц;
- радиочастотная безэховая камера из состава государственного специального эталона ГЭТ 148-93 единиц максимальных значений напряженностей импульсных электрического и магнитного полей (ГСЭ), рабочий объем камеры составляет  $6 \times 3 \times 2$  м<sup>3</sup>, уровень подавления отраженных от поверхностей камеры СК ЭМИ составляет не менее 40 дБ;
- измерительный преобразователь ИППЛ-Л, время нарастания переходной характеристики 45 пс, длительность переходной характеристики 4,4 нс, погрешность коэффициента преобразования 3,4 %;
- измерительный преобразователь ИППЛ-М, время нарастания переходной характеристики 120 пс, длительность переходной характеристики 144 нс., погрешность коэффициента преобразования 7,3 %.

Таким образом, во ВНИИОФИ создан целый ряд излучателей, позволяющих в широком диапазоне проводить эксперименты по воздействию СК ЭМИ на РТС, ТКС и другие системы, насыщенные цифровыми устройствами.

**Пятая глава** посвящена экспериментальным исследованиям воздействия СК ЭМИ на типовые объекты различных технических систем, такие как персональный компьютер и система контроля доступа в охраняемые помещения.

В результате исследований устойчивости компьютеров к воздействию СК ЭМИ было установлено следующее:

1. Амплитуды напряженности электрического поля, создаваемого излучателями СК ЭМИ, находились в пределах 2-10 кВ/м. Установлено, что при напряженности поля менее 2 кВ/м большинство из исследованных типов компьютеров не имеют эффектов, связанных с зависанием. При амплитуде прямого излученного сигнала более 10 кВ/м происходит сбой практически всех устройств, чувствительных к воздействию электромагнитных импульсов.

2. Диапазон частот повторения импульсов, рекомендованный для оценки поражающего действия СК ЭМИ на радиотехнические, информационные системы, составляет 10 Гц-100 Гц – в случае применения излучателей на основе искровых разрядников и 100-1000 Гц - в случае применения излучателей на основе полупроводниковых ключей.

Ограничение по верхней частоте определяется следующим. Большие частоты повторения ЭМИ требуют большого энергопотребления излучателей. Для полупроводниковых генераторов частота 1 кГц является вполне достижимой, при этом разница по стоимости, массогабаритам и энергопотреблению для генераторов, работающих с частотами 1 кГц и несколько Гц незначительна.

В случае искровых разрядников повышение частоты следования чрезвычайно усложняет конструкцию, так как требует большой скорости прокачки масла в зазорах разрядников.

3. Однократные ЭМИ имеют эффективность воздействия в 1,5-2 раза ниже, чем пачка импульсов с частотой 10 Гц и длительностью в доли секунды.

Было замечено, что практически все компьютеры, находящиеся под воздействием СК ЭМИ с уровнями меньшими, чем это требуется для сбоя, замедляли свою работу. Время запаздывания составляло, как правило, от долей секунды до нескольких секунд. Некоторые компьютеры после воздействия временно зависали до минуты и выше, после чего их режим работы восстанавливался.

4. Наибольшее влияние на компьютер оказывают импульсы поля длительностью  $T_{и} \sim 400$  пс. Импульсы более длинные ( $\sim 600$  пс), как и более короткие ( $\sim 190$  пс и короче) требуют большей напряженности поля для возникновения сбоя в аппаратуре.

Анализ спектров СК ЭМИ, полученных в критических точках сбоя позволил сделать вывод о том, что существуют резонансные частоты в диапазоне 0,7-0,9 ГГц, на которых эффективность воздействия СК ЭМИ на компьютеры максимальна. Это соответствует длительности излучаемых импульсов (или длительности фронта генераторов, возбуждающих антенну) 0,3-0,5 нс. Установлено, что наибольшую эффективность по расстоянию имеет излучатель, создающий ЭМИ длительностью  $\sim 250$  пс.

5. Исследования распространения сверхкоротких сигналов показали, что поражающее действие СК ЭМИ на объекты при использовании излучателя СК ЭМИ в помещении существенно возрастает. Это вызвано отражениями сигналов от стен и переизлучениями от металличе-

ских конструкций, накладывающимися на спаде воздействующего импульса, что создает дополнительный вклад в суммарную энергию воздействия.

Получены экспериментальные результаты по воздействию СК ЭМИ на элементы СКД.

Облучению СК ЭМИ был подвержен действующий макет системы контроля доступа в помещения, состоящий из контроллера управления доступом NC-5000, охранного контроллера AC-08, клавиатуры управления функциями охраны АКD-01, внутреннего считывателя бесконтактных карт NR-A16 и внешнего считывателя NR-A05, выпускаемых торговой маркой Parsec.

В результате исследований получены отказы и нарушения в работе системы контроля доступа при уровнях поля 5-10 кВ/м.

На основе экспериментальных данных определены режимы работы излучателя СК ЭМИ при которых наступают сбои компьютеров и элементов СКД:

- Амплитуда воздействующих импульсов поля  $\sim 10$  кВ/м.
- Диапазон частот воздействующих импульсов находился в интервале 10 Гц-100 Гц – в случае применения излучателей на основе искровых разрядников и 100-1000 Гц - в случае применения излучателей на основе полупроводниковых ключей.
- Длительность излучаемых импульсов (или длительность фронта импульсов генераторов, возбуждающих СК антенну) должна находиться в пределах 0,25-0,5 нс.
- Наиболее эффективным вариантом применения излучателей СК ЭМИ является их использование в здании и помещениях, имеющих металлические элементы в конструкции стен, полов и потолков.

Наиболее простым и эффективным способом защиты РЭА остаются различные типы экранов. В качестве экранов для защиты аппаратуры от СК ЭМИ могут быть использованы металлические сетки (размер ячейки сетки не должен превышать 0,1...0,2 минимальной длины волны в спектре сигнала), фольга, напыляемые пленки, металлизированные краски и т.д. В данной работе установлено, что защитная краска уменьшает амплитуду электромагнитного поля внутри диэлектрического объема в  $\sim 3$  раза.

Применение к РЭА, размещаемой в пластиковых корпусах, мер защиты, основанных на использовании относительно тонкостенных экранов, даже с учетом существующих в них неоднородностей, позволяет повысить эффективность экранирования аппаратуры на 10...20 дБ.

**В заключении** сформулированы основные выводы по диссертационной работе в целом.

### **ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ**

Основным результатом, определяющим научную и практическую значимость, выполненных в работе исследований, является создание научно-методических основ расчета АФС и разработка сверхмощных искровых излучателей на основе антенны с параболическим рефлектором и решеток из ТЕМ-рупоров, включающие в себя:

- разработку математических моделей расчета АФС;

- обоснование параметров генераторов и исследование метрологических характеристик излучателей;
- проведение комплекса экспериментальных исследований воздействия полей разработанных излучателей на радиотехническую и телекоммуникационную аппаратуру.

Наиболее важные конкретные научные результаты, полученные в ходе исследований, состоят в следующем:

1. На основе анализа состояния проблемы ЭМИ установлено, что в настоящее время в развитии телекоммуникационных технологий наблюдается интенсивное освоение нового типа радиоволн – сверхширокополосных (сверхкоротких) электромагнитных импульсов.

Они имеют длительность порядка 0,1 нс. Было установлено, что подобный тип электромагнитных волн чрезвычайно эффективен для передачи цифровой информации, а также для сверхширокополосной (в первую очередь для подповерхностной) радиолокации с разрешением образа объекта.

Одной из наиболее актуальных проблем при оценке стойкости технических систем (ТС) в условиях воздействия сверхкоротких электромагнитных излучений в соответствии с требованиями стандартов ГОСТ и МЭК является проблема воспроизведения необходимых параметров нагружения в сантиметровом и миллиметровом диапазонах длин волн. Для проведения таких исследований требуется разработка новых методов и соответствующий комплекс установок-имитаторов электромагнитных излучений для испытаний аппаратуры и стационарных объектов. Это позволяет повысить достоверность исследований устойчивости ТС, обеспечит их стойкость и взрывобезопасность на всех этапах жизненного цикла (хранение, транспортировка, эксплуатация). В России имеется существенный задел по разработке мощных излучателей с узконаправленными антенными системами. Результаты этих исследований служат основой для создания мощных импульсных излучателей СК ЭМИ.

2. Разработаны требования к метрологическим и конструктивным характеристикам излучателей. На основе обоснованных требований определены три вида, разрабатываемых излучателей:

- Мощные искровые однократные излучатели ЭМИ большой энергии. В качестве источника высокого напряжения – многоступенчатый ГИН, работающий на обостряющую емкость. В качестве полеобразующей системы – моно ТЕМ-рупор, нагруженный на сопротивление, равное волновому сопротивлению рупора. Объект испытаний помещается внутри полеобразующей системы, при этом достигаются максимальные напряженность поля, длительность импульса и однородность поля в испытательном объеме.

- Мощные искровые передвижные излучатели сверхкоротких ЭМИ с максимальной частотой повторения до 1 кГц. В качестве источника высокого напряжения – импульсный трансформатор Тесла, заряжающий формирующую емкость. Для получения длительности фронта ге-

нератора, порядка 100 – 250 пс необходимо установить несколько ступеней обостряющих разрядников. Для создания требуемой частоты повторения – прокачка масла в обостряющих разрядниках. В качестве АФС использованы: моно ТЕМ-рупор, антенна с рефлектором и решетка из ТЕМ-рупоров.

- Лабораторные переносные излучатели сверхкоротких ЭМИ, на основе полупроводниковых генераторов, производства ЗАО «НПАО «ФИД-Технология». Максимальная частота повторения до 1 кГц, возможность внешнего запуска, максимальное выходное напряжение генератора до 40 кВ. В качестве АФС используются следующие типы: антенна с рефлектором и решетка из ТЕМ-рупоров.

3. Разработаны физико-математические модели расчета АФС, на основе которых получены аналитические выражения для полей излучения от бегущих волн тока, распространяющегося по тонким криволинейным проводам. Полученные решения справедливы как в ближней, так и в дальней зоне.

На основе полученных соотношений разработана программа для расчета ТЕМ - рупоров и рупорных решеток с заменой сплошного рупора проводами. Таким образом, создан математический аппарат, позволяющий находить поля излучения от сложных проволочных структур, а также и от сплошных структур при известных плотностях тока.

Время расчета по такой программе на обычных персональных компьютерах составляет несколько минут. Все другие известные методы расчетов полей требуют значительно больших затрат машинного времени.

4. На основе расчетов ТЕМ-рупорных антенных систем, а также результатов их экспериментального исследования получена упрощенная формула для определения в дальней зоне амплитуды электрического поля излучателей СК ЭМИ.

Для синхронного возбуждения решеток из ТЕМ-рупоров был предложен так называемый «волновой трансформатор», позволяющий согласовать один мощный генератор с 50-омным выходом со многими ТЕМ-рупорами антенной решетки.

Трансформатор представляет собой коаксиал с нарастающим по ходу волны диаметром внутреннего электрода, что соответствует уменьшению волнового сопротивления. К выходу трансформатора подключается N/4 коаксиальных 50-омных кабелей, каждый из которых разветвляется на 4 двухсотомные линии, подключенные к рупорам. Синхронность возбуждения рупоров обеспечивается одинаковой длиной всех кабелей. Собственное время нарастания переходной характеристики системы волновой трансформатор – кабели – рупора составляет согласно измерениям не более 100 пс.

Решетка из ТЕМ-рупоров в сочетании с волновым трансформатором позволяет передать энергию генератора практически полностью к раскрытию антенны. Рабочее напряжение на каждом рупоре снижается в несколько раз, поле практически равномерное в раскрытии, решетка

вписывается в любой прямоугольный габарит, имеет малую толщину, а наличие гибких кабелей позволяет осуществлять ее поворот.

5. Показано преимущество антенны с рефлектором, по сравнению с решеткой из ТЕМ-рупоров для получения более узконаправленного сигнала СК ЭМИ за счет более плоского фронта импульса поля в раскрытии антенны, а также более крутого фронта возбуждающего генератора, вследствие отсутствия разветвленных фидерных линий и потерь в фидере.

Реально достигнутые значения ширины диаграмм направленности параболических антенн по уровню 0,7 от амплитуды составили для излучателя «Снайпер» при диаметре зеркала 2,6 м и длительности импульса 200 пс -  $5,3^0$ , для излучателя «И-10/0,9Р» при диаметре зеркала 0,9 м и длительности импульса 100 пс -  $3,4^0$ .

6. Во ВНИИОФИ разработаны искровые и полупроводниковые испытательные излучатели СК ЭМИ.

Искровые излучатели обладают импульсной мощностью порядка 1 ГВт и более, но имеют ограниченный ресурс из-за эрозии электродов в разрядниках.

Полупроводниковые генераторы в настоящее время уступают по импульсной мощности искровым, однако имеют огромный ресурс и допускают (при уменьшении импульсной мощности) высокую частоту следования – до сотен килогерц. Если в искровых генераторах частота следования импульсов ограничивается временем восстановления электрической прочности искрового зазора (порядка 1 мс), то в полупроводниковых генераторах главную роль играют трудности отвода тепла от ключевых элементов, имеющих характерный размер около 1 см. Еще одно преимущество полупроводниковых генераторов – принципиальная возможность их синхронизации с погрешностью порядка 0,01 нс, что позволяет наращивать импульсную и среднюю мощности излучателей.

Основная задача при разработке искровых излучателей – распределить достаточно равномерно мощность возбуждающего генератора по площади антенны. Были использованы два типа антенн: с параболическим рефлектором диаметром 2,6 м; с плоской решеткой, размерами  $1,2 \times 1,2 \text{ м}^2$  из 64 ТЕМ-рупоров и  $2 \times 2 \text{ м}^2$  из 144 ТЕМ-рупоров; монорупорная антенна, апертурой  $0,66 \times 0,4 \text{ м}^2$ .

В первом случае облучение рефлектора осуществлялось двумя скрещенными биконическими диполями, подключенными к выходному коаксиалу возбуждающего генератора.

Во втором случае энергия генератора с помощью понижающего коаксиального трансформатора распределяется между соответственно 16 и 36 кабелями, каждый из которых через согласующее устройство подключался к четырем ТЕМ-рупорам.

В третьем случае энергия генератора непосредственно подавалась на антенну, что позволило получить рекордную длительность фронта излученного импульса для искровых излучателей – 100 пс.

В полупроводниковых излучателях, используются в основном антенные решетки из ТЕМ-рупоров. Следует подчеркнуть, что ввиду высокого КПД полупроводниковых генераторов их вес при равной мощности примерно на порядок меньше массы искровых, что чрезвычайно важно в прикладных задачах. Разработана серия полупроводниковых излучателей для различных задач с числом рупоров в антенных решетках 4÷64 и на основе антенны с рефлектором, диаметром 0,9 м. Технология полупроводниковых генераторов быстро развивается и в настоящее время создание искровых излучателей становится нецелесообразным.

7. Проведены экспериментальные исследования характеристик излучателей. Исследования излучателей осуществлялись с помощью измерительных преобразователей напряженности импульсного электрического поля полоскового типа ИППЛ-Л и ИППЛ-М, разработанных и запатентованных ВНИИОФИ. Проведенные измерения показали, что максимальное отличие расчетных данных от экспериментальных составляет 10%. Это свидетельствует об удовлетворительной точности предлагаемых методов расчета АФС.

8. Проведены исследования воздействия СК ЭМИ на ПЭВМ и систему контроля доступа (СКД).

Обоснованы режимы воздействия СК ЭМИ, при которых наступают сбои в элементах РТС и информационных инфраструктурах.

По результатам проведенных исследований разработаны рекомендации по совершенствованию методов и средств защиты РТС от воздействия СК ЭМИ.

Характеризуя работу и полученные результаты в целом, следует заключить, что в диссертации решена крупная научная задача, разработаны излучатели сверхкоротких импульсов, имеющие важное народнохозяйственное значение. Создан комплекс излучателей СК ЭМИ, использование которых дает возможность определить реальную стойкость существующих и разрабатываемых различных радиотехнических систем к воздействию СК ЭМИ, создать базу данных по механизмам и пороговым уровням поражения аппаратуры, разработать эффективные методы и средства защиты.

### **ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

1. Туркин В.А. , Саночкин В.В., Соколов А.А. Распространение электромагнитного импульса в ТЕМ-рупоре и полосковой линии // Материалы Всесоюзн.научн.-техн.конф. «Вопросы обеспечения стойкости РЭС к воздействию ЭМИ естественного и искусственного происхождения», Харьков, НИПКИ «Молния», 1991г.,ч.2, с.76-78.

2. Туркин В.А., Саночкин В.В., Соколов А.А. Исследование трансформирующей полосковой линии // Материалы Всесоюзн.научн.-техн.конф. «Вопросы обеспечения стойкости РЭС к воздействию ЭМИ естественного и искусственного происхождения», Харьков, НИПКИ «Молния», 1991г., ч.2, с.86-87.

3. Туркин В.А., Альбетков С.В., Сахаров К.Ю., Соколов А.А. Генератор мощных электромагнитных импульсов с субнаносекундным фронтом // Приборы и техника эксперимента, №6, 1993г., с.125-128.
4. Туркин В.А., Михеев О.В., Подосенов С.А., Сахаров К.Ю., Свекис Я.Г., Соколов А.А. Pulse radiation of an antenna with a reflector // 13th Internat. Wroclaw Symposium EMC 96, pp. 102-105.
5. Туркин В.А., Гулидов Ю.А., Пашков И.А., Сегень А.В. Аппаратурно-методическое обеспечение испытаний крупногабаритных объектов с использованием передвижного комплекса имитаторов импульсных ЭМП и токов // Материалы IV Российской научно-техн. конференции «Электромагнитная совместимость технических средств и биологических объектов», ЭМС-96, г. Санкт-Петербург, 1996 г.
6. Туркин В.А., Михеев О.В., Подосенов С.А., Сахаров К.Ю., Свекис Я.Г., Соколов А.А., «New Method for Calculating Pulse Radiation from an Antenna with a Reflector», IEEE Trans. on EMC, vol.39, no.1, February 1997, pp. 48-54.
7. Туркин В.А., Михеев О.В., Подосенов С.А., Сахаров К.Ю., Свекис Я.Г., Соколов А.А. Скрещенные двухпроводные линии передачи // Материалы научно-техн. конференции «Электромагнитная совместимость технических средств и биологических объектов ЭМС-98», г. Санкт-Петербург, 23-25 сентября 1998г., с. 284-291.
8. Туркин В.А., Михеев О.В., Подосенов С.А., Сахаров К.Ю., Свекис Я.Г., Соколов А.А. Двухпроводная линия передачи в поле V-образной биконической антенны // Труды научно-техн. конференции «Электромагнитная совместимость технических средств и биологических объектов ЭМС-98», г. Санкт-Петербург, 23-25 сентября 1998г., с. 291-297.
9. Туркин В.А., Михеев О.В., Подосенов С.А., Сахаров К.Ю., Соколов А.А., Кокин Е.Н., Радченко В.М. Излучатели коротких сверхширокополосных электромагнитных импульсов // 10th Internat. Crimean Conf. “Microwave and Telecommunication Technology” Crimico’2000, 11-15 Sept., Sevastopol, Ukraine, pp. 469-470.
10. Туркин В.А., Михеев О.В., Подосенов С.А., Сахаров К.Ю., Соколов А.А. Approximate calculation methods for pulse radiation of a TEM-horn array // IEEE Trans. on EMC, vol.43, no.1, February 2001, pp. 67-74.
11. Туркин В.А., Михеев О.В., Сахаров К.Ю., Соколов А.А. Генераторы сверхкоротких импульсов электромагнитного излучения и средства измерений их параметров // Материалы первой научно-техн. Конф. “Метрологическое обеспечение испытаний вооружения и военной техники”, Моск. обл., 16-17 января 2002г., с. 38-41.
12. Туркин В.А., Сахаров К.Ю., Соколов А.А. Коаксиальная линия для передачи высоковольтных импульсов напряжения // Патент РФ RU2136089, 6Н01Р3/06, 27.04.98 г.

13. Туркин В.А., Михеев О.В., Сахаров К.Ю., Соколов А.А. Импульсный коаксиальный трансформатор на неоднородной линии // Патент РФ RU2149485, 7H01P5/12, 20.05.00 г.
14. Туркин В.А., Михеев О.В., Сахаров К.Ю., Соколов А.А. Устройство для ввода высоковольтных импульсов напряжения в ТЕМ-рупорную антенну // Патент РФ RU2185012, 7H01Q13/04, H01P5/12, 26.04.01 г.
15. Туркин В.А., Михеев О.В., Сахаров К.Ю., Соколов А.А. Antennas for beaming and receiving short ultra wideband electromagnetic impulses // Information and Telecommunication Technologies in Intelligent Systems. Proc. of Internat. Conf. in Blanes / Barcelona, Spain, May 22-29, 2004, pp. 37-39.
16. Туркин В.А., Алешко А.И., Михеев О.В., Сахаров К.Ю., Соколов А.А. Полупроводниковые излучатели сверхкоротких электромагнитных импульсов // Материалы Всероссийской научно-техн. конф. «Методы и средства измерений в области электромагнитной совместимости технических средств» (Измерение ЭМС – 2004), 15-16 декабря 2004г., г.Н.Новгород, с. 53-54
17. Туркин В.А., Алешко А.И., Михеев О.В., Сахаров К.Ю., Соколов А.А. Полосковые датчики ВНИИОФИ // Материалы Всероссийской научно-техн. конф. «Методы и средства измерений в области электромагнитной совместимости технических средств» (Измерение ЭМС – 2004), 15-16 декабря 2004г., г.Н.Новгород, с. 51-52.
18. Туркин В.А., Алешко А.И., Михеев О.В., Сахаров К.Ю., Соколов А.А. Коаксиальный делитель высоковольтных импульсов напряжения со сверхкоротким фронтом // Материалы Всероссийской научно-техн. конф. «Методы и средства измерений в области электромагнитной совместимости технических средств» (Измерение ЭМС – 2004), 15-16 декабря 2004г., г.Н.Новгород, с. 55-56.
19. Туркин В.А., Алешко А.И., Михеев О.В., Сахаров К.Ю., Соколов А.А. Развитие эталонного комплекса для средств измерений напряженности импульсных электрического и магнитного полей // Материалы Всероссийской научно-техн. конф. «Методы и средства измерений в области электромагнитной совместимости технических средств» (Измерение ЭМС – 2004), 15-16 декабря 2004г., г.Н.Новгород, с. 14-15.
20. Туркин В.А., Михеев О.В., Сахаров К.Ю., Соколов А.А. Перспективы новой области радиотехники, использующей сверхширокополосные электромагнитные импульсы // Оптико-электронные измерения. Сборник статей. М., Университетская книга. 2005 г., с.643-670.
21. Туркин В.А. Искровые и полупроводниковые излучатели сверхкоротких электромагнитных импульсов // Оптико-электронные измерения. Сборник статей. М., Университетская книга. 2005 г., с.633-642.
22. Туркин В.А., Михеев О.В., Сахаров К.Ю., Соколов А.А. Эталонные и испытательные источники электромагнитных импульсов // Измерительная техника №11, 2005 г., с.55-57.

23. Туркин В.А., Алешко А.И., Добротворский М.И., Михеев О.В., Сахаров К.Ю. Малогабаритный автономный измеритель максимальных значений напряженности электрического поля сверхкоротких электромагнитных импульсов // Материалы докладов Всероссийской научно-техн. конф. «Методы и средства измерений в области электромагнитной совместимости технических средств» (Измерение ЭМС – 2004), 15-16 декабря 2004г., г.Н.Новгород, с. 49-50.

24. Туркин В.А., Алешко А.И., Михеев О.В., Сахаров К.Ю., Семин В.В., Соколов А.А. Экспериментальные исследования воздействия сверхкоротких электромагнитных импульсов на систему контроля доступа в помещения // Технологии электромагнитной совместимости №1(16). М., Издательский Дом «Технологии», 2006г., с. 3-6.

25. Туркин В.А., Алешко А.И., Михеев О.В., Сахаров К.Ю., Соколов А.А. Экспериментальные результаты по генерированию эталонных импульсов электромагнитного поля с длительностью фронта в десятки пикосекунд // Технологии электромагнитной совместимости №1(16). М., Издательский Дом «Технологии», 2006г., с. 7-8.

26. Туркин В.А., Акбашев Б.Б., Ольшевский А.Н., Семин В.В. Экспериментальные исследования воздействия СШП ЭМИ на технические средства. Сборник научных трудов «Проектирование телекоммуникационных и информационных средств и систем» / Под ред. Л. Н. Кечиева. – М.: МИЭМ, 2006. – с. 21–22.

27. Туркин В.А. Излучатели сверхширокополосных электромагнитных импульсов для испытаний телекоммуникационной и радиотехнической аппаратуры. Сборник научных трудов «Проектирование телекоммуникационных и информационных средств и систем» / Под ред. Л. Н. Кечиева. – М.: МИЭМ, 2006. – с. 51– 60.