

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«БРЯНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи

ДВИЛЯНСКИЙ Алексей Аркадьевич

**МЕТОДОЛОГИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ  
ОБЕСПЕЧЕНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ОБЪЕКТОВ  
КРИТИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ  
ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ИМПУЛЬСОВ**

05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и  
комплексы программ

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук

Научный консультант:  
доктор военных наук, профессор  
Иванов Владимир Алексеевич

Брянск 2021

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>ВВЕДЕНИЕ</b> .....	8
<b>ГЛАВА 1. АНАЛИЗ ПРОБЛЕМЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ОБЪЕКТОВ КРИТИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ИМПУЛЬСОВ</b> .....	18
1.1. Анализ информационно-телекоммуникационных систем и сетей как составной части критической информационной инфраструктуры Российской Федерации .....	18
1.2. Тенденции, учитываемые при формировании методов и способов обеспечения функциональной устойчивости объектов инфокоммуникационных систем при воздействии электромагнитных импульсов .....	24
1.2.1. Перспективы применения и совершенствования средств генерации электромагнитных импульсов.....	25
1.2.2. Оценка поражающих факторов воздействия электромагнитного импульса.....	39
1.3. Анализ основных задач, принципов и методов обеспечения функциональной устойчивости объектов критической информационной инфраструктуры при воздействии электромагнитных импульсов.....	67
1.3.1. Задачи и принципы обеспечения функциональной устойчивости объектов критической информационной инфраструктуры.....	67
1.3.2. Анализ существующих методов обеспечения функциональной устойчивости объектов инфокоммуникационных систем при воздействии электромагнитных импульсов.....	69

<b>ГЛАВА 2. ТЕОРЕТИКО-МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПОСТРОЕНИЯ СИСТЕМЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ОБЪЕКТОВ КРИТИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ИМПУЛЬСОВ.....</b>	<b>75</b>
2.1. Научные предпосылки разработки методологии обеспечения функциональной устойчивости объектов критической информационной инфраструктуры при воздействии электромагнитных импульсов .....	75
2.2. Разработка методологической схемы решения научной проблемы обеспечения функциональной устойчивости объектов критической информационной инфраструктуры при воздействии электромагнитных импульсов и постановка задачи исследования.....	83
2.3. Постановка задачи на разработку математических методов моделирования, составляющих и обосновывающих методологию математического моделирования обеспечения функциональной устойчивости объектов критической информационной инфраструктуры при воздействии электромагнитных импульсов.....	87
<b>ГЛАВА 3. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ, СОСТАВЛЯЮЩИЕ И ОБОСНОВЫВАЮЩИЕ МЕТОДОЛОГИЮ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ОБЪЕКТОВ КРИТИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ИМПУЛЬСОВ.....</b>	<b>107</b>
3.1. Анализ математических методов решения электродинамических задач в целях разработки математического метода моделирования экранирующей конструкции.....	107
3.2. Математический метод моделирования экранирующей конструкции, базирующийся на функционале энергии (потенциала) электромагнитного поля, отличающийся от существующих эффектом обратимости,	

электрофизических свойств радиопоглощающих полимерных композиционных материалов, формирующих слои в многослойной конструкции, а также формы, количества и расположения в ней технологических неоднородностей обеспечивающей ослабление воздействующих электромагнитных полей СВЧ-диапазона на компоненты объектов критической информационной инфраструктуры.....	127
3.2.1. Элементы теории электромагнитного экранирования для формирования математического метода моделирования экранирующей конструкции .....	127
3.2.2. Определение функционала энергии (потенциала) электромагнитного поля на основе метода конечных элементов и тензорного представления электромагнитного поля .....	144
3.2.3. Определение коэффициентов экранирования многослойных экранирующих конструкций с различными типами технологических неоднородностей .....	171
3.3. Математический метод моделирования ущерба, наносимого объектам критической информационной инфраструктуры, позволяющий на основе иерархически рангового подхода определять перечень возможных сценариев и степень опасности возникновения неблагоприятных ситуаций для анализируемого объекта, связанных с его функциональной устойчивостью в условиях воздействия электромагнитных импульсов.....	185
3.3.1. Теоретические предпосылки оценки ущерба, наносимого объектам критической информационной инфраструктуры при воздействии электромагнитных импульсов .....	185
3.3.2. Математический метод моделирования ущерба, наносимого объектам критической информационной инфраструктуры при воздействии электромагнитных излучений, базирующийся на иерархически ранговом подходе.....	192

3.4. Математический метод моделирования системы обеспечения функциональной устойчивости объектов критической информационной инфраструктуры при воздействии электромагнитных импульсов, базирующийся на способах и приемах расчета условной вероятности их «попадания» (преодоления им различного рода препятствий) и математического вероятностного аппарата классического обнаружения наведенного сигнала.....	199
3.4.1. Математический метод моделирования живучести объектов критической информационной инфраструктуры при воздействии электромагнитных импульсов, базирующийся на способах и приемах расчета условной вероятности «попадания» электромагнитных импульсов.....	202
3.4.2. Математический метод моделирования помехозащищённости объектов критической информационной инфраструктуры при воздействии электромагнитных импульсов, базирующийся на математическом вероятностном аппарате классического обнаружения наведенного сигнала.....	211
<b>ГЛАВА 4. КОМПЛЕКС ПРОБЛЕМНО-ОРИЕНТИРОВАННЫХ ПРОГРАММ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И АЛГОРИТМЫ, РЕАЛИЗУЮЩИЕ МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПО ОБЕСПЕЧЕНИЮ ЖИВУЧЕСТИ И ПОМЕХОЗАЩИЩЁННОСТИ ОБЪЕКТОВ КРИТИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ИМПУЛЬСОВ.....</b>	<b>221</b>
4.1. Обоснование структуры, электрофизических свойств материалов, формы и расположения технологических неоднородностей экранирующих конструкций средств вычислительной техники объектов критической информационной инфраструктуры при воздействии электромагнитных импульсов .....	221

4.2. Описание эксперимента и результаты оценки живучести (стойкости) средств вычислительной техники объектов критической информационной инфраструктуры при воздействии мощными электромагнитными импульсами СВЧ-диапазона .....	230
4.3. Описание эксперимента по оценке уровня внутренних электромагнитных излучений и наводок средств вычислительной техники объектов критической информационной инфраструктуры при воздействии электромагнитных импульсов .....	246
<b>ГЛАВА 5. ЧИСЛЕННЫЙ МЕТОД ОПТИМИЗАЦИИ ЭКОНОМИЧЕСКИХ ЗАТРАТ, ПОЗВОЛЯЮЩИЙ ПОЛУЧАТЬ ЗНАЧИТЕЛЬНЫЙ ЭКОНОМИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ В РАМКАХ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ОБЪЕКТОВ КРИТИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ В УСЛОВИЯХ ВОЗДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ИМПУЛЬСОВ.....</b>	<b>255</b>
5.1. Теоретическое обоснование выбора технологии разработки системы обеспечения функциональной устойчивости объектов критической информационной инфраструктуры при воздействии электромагнитных импульсов .....	255
5.2. Обоснование выбора оптимального варианта создания системы обеспечения функциональной устойчивости объектов критической информационной инфраструктуры систем с целью максимального предотвращения ущерба при воздействии электромагнитных импульсов...	261
5.3. Алгоритм расчета экономического эффекта от внедрения конструкторско-технологического решения по обеспечению функциональной устойчивости объектов критической информационной инфраструктуры при воздействии электромагнитных импульсов.....	270
5.4. Обоснование социально-экономического и хозяйственного значения выполненных исследований в рамках диссертационной работы .....	287

<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ</b> .....	291
<b>СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ</b> .....	298
<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ</b> .....	301
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ А.</b> Зависимость теплопроводности электронных элементов средств вычислительной техники от энергии поражения электромагнитного импульса.....	325
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ Б.</b> Аттестат и свидетельство аккредитации.....	329
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ В.</b> Акты внедрения.....	331
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ Г.</b> Листинг (исходный код) программы для проверки на устойчивость и сходимость алгоритма численного метода оптимизации экономических затрат.....	339

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы диссертации.** Объекты национальной инфраструктуры, обеспечивающие жизненно важные общественные функции, всегда рассматривались потенциальными злоумышленниками в качестве возможных «мишеней» для воздействия. Среди них особо выделяются объекты, частичная деградация или полная потеря функциональности которых способна влиять на жизнедеятельность общества и государства, а также приводить к чрезвычайным ситуациям определенного уровня и масштаба. К таким объектам относятся **объекты критической информационной инфраструктуры Российской Федерации (КИИ РФ, далее – КИИ).**

С появлением у групп экстремистского толка возможности создавать малое по размерам оборудование, которое генерирует электромагнитные импульсы (ЭМИ) микро- и наносекундной длительности, на первый план выходит проблема оценки и предотвращения целенаправленного воздействия ЭМИ, приводящее к функциональному и катастрофическому поражению микропроцессорной и конструктивной элементной базы средств вычислительной техники (СВТ), которое проявляется в разрушении, плавлении и выгорании металлизации контактных дорожек, и, как следствие, деградации параметров компонентов объектов КИИ – компьютерного оборудования), искажения обрабатываемой информации, за счет возникающих в информационных сетях внутренних электромагнитных излучений и наводок (ВЭМИН), что в итоге приводит к невозможности обеспечения достоверности и непрерывности предоставляемых информационных услуг потребителям.

Одной из основных задач для объектов КИИ, обеспечивающих жизненно важные общественные функции, является анализ и оценка последствий от воздействия ЭМИ искусственного происхождения, результатом которого является дез-



организация систем управления, подавление технических средств охраны (ТСО) особо охраняемых объектов, а также причинение значительного экономического ущерба.

В настоящее время, по мнению российских и зарубежных специалистов, наблюдается примитивность и несовершенство действующих математических моделей, учитывающих взаимное влияние как секторов, так и объектов критической инфраструктуры, математических методов моделирования ущерба, живучести и помехозащищённости объектов, а также отсутствие комплексных компьютерных (имитационных) моделей, позволяющих учитывать не только ЭМИ, но и расположение источников электромагнитного поля (ЭМП) внутри объектов КИИ.

Все это требует пересмотра традиционных подходов к обеспечению функциональной устойчивости КИИ с учетом нового вида опасности в их отношении – внешних электромагнитных импульсов (ЭМИ).

Таким образом, в области обеспечения функциональной устойчивости (ОФУ) объектов КИИ имеет место *противоречие* между традиционными принципами и методами ОФУ объектов и изменившимся содержанием современных способов и процессов воздействия в условиях интенсивного развития средств генерации ЭМИ. В свою очередь, *актуальной* представляется *научная проблема*, которая заключается в наличии системных противоречий и отсутствием математических моделей адекватного отображения процессов ОФУ объектов КИИ при воздействии ЭМИ в условиях динамики электромагнитной обстановки.

**Целью исследования является** разработка методологии, позволяющей с помощью математического моделирования, численных методов и комплекса программ обосновать мероприятия по обеспечению живучести и помехозащищённости объектов критической информационной инфраструктуры при воздействии ЭМИ.

В этой связи **объектом исследования** выступают математические модели процессов функционирования компонентов объектов критической информационной инфраструктуры, подверженные воздействию электромагнитных импульсов.

Таким образом, **предметом исследования** являются математические и вычислительные методы моделирования состояния объектов КИИ в условиях воздействия ЭМИ.

Исходя из цели исследования, в диссертации решаются следующие **научные задачи**:

1. Анализ проблемы ОФУ объектов КИИ в условиях воздействия ЭМИ.

2. Разработка элементов теории электромагнитного экранирования, на основании которых формируется математический метод моделирования экранирующей конструкции, обеспечивающей устойчивое функционирование компонентов объектов КИИ при воздействии ЭМИ, **базирующийся** на учете функционала энергии (потенциала) электромагнитного поля, **отличающийся** от существующих эффектом обратимости, электрофизических свойств радиопоглощающих полимерных композиционных материалов (РППКМ), формирующих слои в многослойной конструкции, а также формы, количества и расположения в ней технологических неоднородностей на основе известных математических моделей, применяемых для решения электродинамических задач с выявлением общих признаков и подходов к их решению (п. 1 паспорта научной специальности).

3. Разработка математического метода моделирования ущерба, наносимого объектам КИИ при воздействии ЭМИ, **базирующегося** на иерархическом ранговом подходе, **отличающегося** учетом атрибутов функциональности объекта, подвергающегося воздействию и предусматривающего систематизацию их критичности с использованием экспертной системы для нахождения функции максимального предотвращенного ущерба при минимизации финансовых затрат (п. 1 паспорта научной специальности).

4. Разработка математического метода моделирования системы ОФУ объектов КИИ при воздействии ЭМИ, учитывающие условия их функционирования (п. 1 паспорта научной специальности), включающий:

– математический метод моделирования живучести объектов КИИ при воздействии ЭМИ, **базирующийся** на способах и приемах расчета условной вероятности «попадания» ЭМИ (преодоления им различного рода «препятствий»), **отличающийся** учетом надежности генератора ЭМИ и времени теплового рассеивания (переходных процессов) при тепловом вторичном пробое диэлектрика конструктивных элементов компонентов КИИ, обеспечивающий снижение уровней электромагнитных полей до безопасных величин;

– математический метод моделирования помехозащищённости объектов КИИ при проявлении внутренних электромагнитных излучений и наводок, **базирующийся** на аппарате теории обнаружения наведенного сигнала, **отличающийся** учётом аддитивности наводок электромагнитных излучений и собственных наводок конструктивного элемента КИИ.

5. Разработка комплекса проблемно-ориентированных программ, позволяющего проводить вычислительные эксперименты на основе разработанных алгоритмов, реализующих сформированные математические методы моделирования, а также технологического испытательного стенда для проверки адекватности математической модели экранирующей конструкции на основании результатов натуральных экспериментов с обоснованием и тестированием эффективных вычислительных методов с применением современных компьютерных технологий (п. 3, 5, 6 паспорта научной специальности).

6. Разработка численного метода оптимизации экономических затрат в рамках обеспечения функциональной устойчивости объектов КИИ в условиях воздействия ЭМИ с целью максимального предотвращения ущерба, **базирующегося** на интеллектуальной технологии оптимизации и стабилизации систем, основанный на применении теории игр (симплекс-метод) **и отличающегося** возможностью выбора вариантов обеспечения их функциональной устойчивости (п. 4 паспорта научной специальности).

**С учётом представленных научных задач исследования сформулированы положения, выносимые на защиту:**

1. Математический метод моделирования экранирующей конструкции, обеспечивающей устойчивое функционирование компонентов объектов критической информационной инфраструктуры при воздействии электромагнитных импульсов.

2. Математический метод моделирования ущерба, наносимого объектам критической информационной инфраструктуры при воздействии электромагнитных импульсов.

3. Математический метод моделирования системы обеспечения функциональной устойчивости объектов критической информационной инфраструктуры при воздействии электромагнитных импульсов, учитывающий условия их функционирования.

4. Комплекс проблемно-ориентированных программ и технологический испытательный стенд, позволяющие проводить вычислительные эксперименты на основе разработанных алгоритмов, реализующих сформированные математические методы моделирования и проверку адекватности математической модели экранирующей конструкции.

5. Численный метод оптимизации экономических затрат в рамках обеспечения функциональной устойчивости объектов критической информационной инфраструктуры в условиях воздействия электромагнитных импульсов с целью максимального предотвращения ущерба.

**Научная новизна** базируется на совокупности разработанных в настоящем исследовании элементов **теории** математического моделирования в электродинамике, **позволяющих сформировать** математические методы моделирования экранирующей конструкции, ущерба, живучести и помехозащищённости, а также численный метод оптимизации экономических затрат и алгоритмов, **входящих в комплекс программ, и реализовать** с единых методологических позиций **концепцию ОФУ объектов КИИ в условиях воздействия ЭМИ**, направленную на разрешение выявленных системных противоречий в целях реализации принципов функциональной устойчивости данных объектов с учётом динамики электромагнитной обстановки, **базирующуюся** на комплексном исследовании проблемы, включающую анализ и синтез структур многофункциональных средств обеспечения живучести и помехозащищённости, **отличающуюся** интегральной оценкой показателей качества их функционирования на основе критериальных требований, предъявляемым к объектам КИИ в условиях воздействия ЭМИ (п. 1, 3, 4, 5 паспорта научной специальности).

**Практическая значимость исследования** определяется возможностями разработанных теоретических основ для обеспечения функциональной устойчивости объектов КИИ и заключается в том, что внедрение полученных моделей, методов, алгоритмов и комплекса программ на их основе позволяет (п. 6 паспорта научной специальности):

1. Проводить комплексную оценку функциональной устойчивости объектов КИИ с учетом применения по ним различных средств генерации ЭМИ с использованием проблемно-ориентированных программ.

2. Обеспечить комплексность использования современных инструментально-моделирующих средств, позволяющих анализировать информацию об электромагнитном влиянии, а также представить практические рекомендации по использованию многослойных экранирующих конструкций, математических методов моделирования ущерба, оценки живучести и помехозащищённости объектов КИИ, численного метода оптимизации экономических затрат в рамках обеспечения функциональной устойчивости объектов КИИ при воздействии ЭМИ.

3. Определить перспективы практического использования результатов исследований – разработанной математической модели экранирующей конструкции с использованием РППКМ и технологических процессов их производства на основании результатов натурных экспериментов с обоснованием и тестированием эффективных вычислительных методов на основе современных компьютерных технологий.

**Связь с государственными и научно-исследовательскими программами:**

1. Математические методы моделирования, алгоритмы расчета, а также результаты моделирования применялись при расчетно-аналитическом обосновании проектных решений по реконструкции специального объекта («3165-А»), а также при разработке конструкторско-технологических решений по обеспечению живучести и помехозащищённости специальных объектов при настройке телекоммуникационного оборудования в технологическом зале специального объекта («720/7», Протокол № 11/15-2017), выполненных «Отделом конструкционной защиты от электромагнитных воздействий» 23 ГМПИ – филиалом АО «31 Государственный проектный институт специального строительства» (г. Санкт-Петербург).

2. Научно-технологические решения внедрены в практическую деятельность Управления вооружения Федерального органа исполнительной власти Российской Федерации при формировании предложений в проект государственной программы вооружения на период 2018-2025 годов.

3. Научно-технологические решения использованы при проведении ОКР «Утилита» в АО «НИИ «РУБИН».

4. В учебном процессе кафедры «Системы информационной безопасности» ФГБОУ «Брянский государственный технический университет» в рамках учебной дисциплины «Системы и сети связи».

5. В практической деятельности АО «Славсервис-связь», г. Орёл.

6. Научные положения использованы в НИР «Цемент» в ФГУП «НТЦ» ОРИОН» (г. Москва).

В качестве **методологической основы** работы выступают прикладные аспекты математического моделирования, анализа, статистики и логики, теорий обнаружения и оценок, управления, численные методы прогнозирования и принятия решений, синергетики, игр и множеств, электродинамики, электромагнитного экранирования электромагнитных полей, дифракции, метода конечных элементов, тензорного анализа, современные положения теории моделирования сложных систем. Архитектура построения математических моделей опирается на методы аналитического и численного моделирования.

**Обоснованность и достоверность** полученных в работе результатов достигнута за счет системного подхода при рассмотрении всех вопросов исследования, полноценного учета проверенных на практике исходных данных, верификации дифференцированных результатов в рамках известных теоретических положений электродинамики, экранирования и функциональной устойчивости объектов и систем.

По теме диссертационного исследования **опубликованы монография и 72** научные работы, **23** из которых в периодических научно-технических изданиях из Перечня рецензируемых научных изданий ВАК при Министерстве науки и высшего образования Российской Федерации (5 статей входят в ядро РИНЦ) и **3** статьи в международной реферативной базе данных SCOPUS. Выполнено **6** научно-исследовательских работ. Получено **3** Патента на изобретения, **1** Патент на полезную модель и **6** Свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ.

**Реализации.** Положения, выносимые на защиту, реализованы в Управлении вооружения Федерального органа исполнительной власти Российской Федерации (г. Москва), АО «31 Государственный проектный институт специального строительства» (г. Санкт-Петербург), АО «НИИ «РУБИН» (г. Санкт-Петербург), ФГБОУ «Брянский государственный технический университет» (г. Брянск),

АО «Славсервис-связь» (г. Орёл), ФГУП «НТЦ «ОРИОН» (г. Москва), что подтверждается актами внедрения.

**Вклад автора в разработку проблемы.** Во всех работах по теме диссертационного исследования, в том числе совместных, автору лично принадлежит обоснование актуальности, формулировка и решение научных задач, обоснование полученной научной новизны, разработка предложенной модели, математических методов моделирования ущерба, живучести и помехозащищённости, а также численного метода оптимизации экономических затрат, конструкторско-технологического решения и комплекса программ. Автор выражает благодарность профессору Ерёмченко В.Т. за консультирование в рамках второй и пятой главы диссертации.

**Структура, объем и содержание диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений и списка литературы.

**Апробации.** Результаты исследований апробированы на 20-ти научно-технических конференциях международного, всероссийского и межведомственного уровней:

1. 5-ой межведомственной научной конференции «Научно - техническое и информационное обеспечение деятельности спецслужб» (Москва, ИКСИ Академии ФСБ России, 2004 г.);

2. 4-й Всероссийской научной конференции «Проблемы совершенствования и развития специальной связи и информации, предоставляемых государственным органам» (Орёл, Академия ФСО России, 2005 г.);

3. 1-й Межвузовской научно-практической конференции «Проблемы обеспечения безопасности в системах связи и информационно-вычислительных сетях» (Голицыно, Голицынский пограничный институт ФСБ России, 2005 г.);

4. 1-й Межведомственной конференции МВД России «Актуальные проблемы информационного обеспечения деятельности отделов внутренних дел. Технические средства и системы выявления каналов утечки информации. Наука и практика» (Орёл, Орловский юридический институт МВД России, 2005 г.);

5. 2-й Межведомственной конференции МВД России «Актуальные проблемы информационного обеспечения деятельности отделов внутренних дел. Технические средства и системы выявления каналов утечки информации. Наука и практика» (Орёл, Орловский юридический институт МВД России, 2006 г.);

6. 2-й Международной конференции по проблемам безопасности и противодействия терроризму (Москва, МГУ, 2006 г.);

7. 2-й Международной научно-практической конференции «Исследование, разработка и применение высоких технологий в промышленности. Высокие технологии, фундаментальные и прикладные исследования, образование» (Санкт-Петербург, СПбГТУ, 2006 г.);

8. 5-й Международной электронной научно-технической конференции «Технологическая системотехника – 2006» (Тула, Тульский Государственный университет, 2006 г.);

9. 5-й Всероссийской научной конференции «Проблемы развития системы специальной связи и специального информационного обеспечения государственного управления России» (Орёл, Академия ФСО России, 2007 г.);

10. Научно-практической конференции «Перспективы развития федеральных органов государственной охраны на 2011–2025 гг.» (Орёл, Академия ФСО России, 2007 г.);

11. III Всероссийской научной интернет-конференции «Методы прикладной математики и компьютерной обработки данных в технике, экономике и экологии» (Орел, ОГТУ, 2007 г.);

12. Ведомственной (межвузовской) научно-практической конференции «Основные направления развития пограничных органов ФСБ России» (Голицыно, Голицынский пограничный институт ФСБ России 2008 г.);

13. 6-й Всероссийской научной конференции «Проблемы развития технологических систем государственной охраны, специальной связи и информации» (Орел, Академия ФСО России, 2009 г.);

14. Седьмой научно-практической конференции «Проблемы развития технологических систем государственной охраны, специальной связи и специального информационного обеспечения» (Орёл, Академия ФСО России, 2011 г.);

15. VIII Всероссийской межведомственной научной конференции «Актуальные проблемы развития технологических систем государственной охраны, специальной связи и специального информационного обеспечения» (Орёл, Академия ФСО России, 2013 г.);



16. IX, X, XI Всероссийских межведомственных научных конференциях «Актуальные направления развития систем охраны, специальной связи и информации для нужд государственного управления» (Орёл, Академия ФСО России, 2015, 2017, 2019 гг.);

17. The International Workshop «Advanced Technologies in Material Science, Mechanical and Automation Engineering» (MIP: Engineering-2019). April 4-6, 2019 in Krasnoyarsk, Russia;

18. Blue Eyes Intelligence Engineering & Sciences. Volume-8 Issue-6S3, April 2019, ISSN: 2278-3075 (Online);

19. II Межведомственная научно-практическая конференция «Телекоммуникации и кибербезопасность: специальные системы и технологии». (Серпухов, МОУ «Институт инженерной физики»).

## ГЛАВА 1. АНАЛИЗ ПРОБЛЕМЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ОБЪЕКТОВ КРИТИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ИМПУЛЬСОВ

1.1. Анализ информационно-телекоммуникационных систем и сетей как составной части критической информационной инфраструктуры Российской Федерации

В данном разделе раскрываются фрагменты предметной области, которые в последующем определили направление исследований и использованы в процессе решения частных задач теоретического и практического аспектов исследуемой проблемы.

Анализ развития предметной области исследования в России и за рубежом показывает, что её исследованию посвящено значительное количество работ. При этом сам предмет исследования находится на пересечении нескольких областей: *методология научных исследований* – Новиков А.М., Новиков Д.А., Пономарев А.Б., Пикулева Э.А., Андреев Г.И., Иванов В.А.; *математическое моделирование* – Крон Г., Митра Р., Потапов А.А., Сегерлинд Л., Митчелл Э., Норри Д.; *численные методы*, связанные с прогнозированием состояния объектов КИИ в нерасчётных условиях – Бусленко Н.П., Кечиев Л.Н., Мырова Л.О., Хафнер Ч., Так Ч., Ерёменко В.Т.; *электродинамика и распространение электромагнитных волн* – Боголюбов А.Н., Веников В.А., Аранео Р., Гелоци С., Радаски У.Ф., Ловат Г., Сильвестер П., Балюк Н. В., Геков В.В., Иванов С.А., Куприенко В.М., Парфенов Ю.В., Соколов А.А., Степанов П.В., Хорев А.А. и др.

Ряд отечественных и зарубежных специалистов определили следующую приоритетность возникновения коллапса основных секторов критической инфра-

структуры страны (*SCADA*-систем – *Supervisory Control And Data Acquisition* – диспетчерское управление и сбор данных, предназначенных для осуществления мониторинга и диспетчерского контроля большого числа удаленных объектов) в результате данного воздействия: электроэнергетический (системы электроснабжения); систем связи и телекоммуникаций; банковско-финансовый; топливный (системы нефте- и газоснабжения и переработки); транспортная инфраструктура; продовольственный; водоснабжения; аварийно-спасательные службы (экстренного реагирования); коммерческие космические системы.

В ФЗ № 187 от 26.05.2017 г. «О безопасности критической информационной инфраструктуры Российской Федерации» объекты КИИ РФ представлены как информационные системы (ИС), информационно-телекоммуникационные системы и сети (ИТКСС), автоматизированные системы управления (АСУ) субъектов КИИ, а также сети электросвязи, используемые для организации взаимодействия таких объектов и гарантированного предоставления качественных и защищенных цифровых каналов и трактов передачи первичной сети, защищенных услуг вторичной сети, построенной с использованием цифровых пакетных технологий на базе современного отечественного оборудования для обслуживания органов государственной власти (ОГВ), обороны, безопасности и охраны правопорядка в РФ [1, 2].

В соответствии с [1, 2] к субъектам КИИ относятся государственные органы, государственные учреждения, которым на праве собственности, аренды или на ином законном основании принадлежат ИС, ИТКСС, АСУ, функционирующие в сфере здравоохранения, науки, транспорта, связи, энергетики, банковской сфере и иных сферах финансового рынка, топливно-энергетического комплекса, в области атомной энергии, оборонной, ракетно-космической, горнодобывающей, металлургической и химической промышленности; российские юридические лица и (или) индивидуальные предприниматели, которые обеспечивают взаимодействие указанных систем или сетей.



Рисунок 1.1 – Критически важные для национальной безопасности объекты информационной инфраструктуры

Президиум Государственного Совета РФ (протокол № 14 от 14.11.2006 г.), выделил класс критически важных сегментов информационной инфраструктуры (КВСИИ) Российской Федерации (рис. 1.1) [1, 2]:

1. Информационные и телекоммуникационные системы и сети (ИТКСС) органов государственной власти (ОГВ) федерального, регионального и местных уровней.

2. ИТКСС силовых министерств и ведомств, Министерства по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, банковской и финансовой сфер, а также систем скорой помощи и других служб экстренного реагирования.

3. АСУ, ИТКСС предприятий и организаций электроснабжения, нефтегазовой отрасли, транспорта (прежде всего, воздушного и железнодорожного), водоснабжения, критически опасных производств и сетей связи общего пользования.

Таким образом, к объектам КИИ относятся:

- правительственные и военные объекты;
- объекты нефтегазовой промышленности с системами переработки;
- объекты электроэнергетики (в том числе атомной);
- системы управления аэро-железнодорожным, автомобильным и водным транспортом, службами жизнеобеспечения (спасения), банками и финансами;
- объекты транспортной сети, коммуникационное и коммутационное оборудование;
- структурированные кабельные системы (линии и каналы связи);
- информационные автоматизированные системы (ИАС);
- программно-технические средства (ПТС);
- системы управления (в том числе и СУБД);
- информационные и сетевые сервисные службы (узлы) информационно-вычислительных сетей (ИВС);
- автоматизированные рабочие места (АРМ) пользователей КИИ, серверы локальных вычислительных сетей (ЛВС), серверы баз данных ЛВС, специализированные серверы ЛВС, коммуникационное оборудование КИИ (маршрутизаторы, серверы удаленного доступа);

- базовое и прикладное программное обеспечение (БППО) КИИ;
- информационное взаимодействие пользователей КИИ с информационно-коммуникационным узлом (сервером);
- информационное взаимодействие пользователей различных локальных вычислительных сетей, входящих в состав КИИ, между собой;
- информационное взаимодействие комплексов КИИ с мобильными информационными комплексами и удаленными автоматизированными рабочими местами.

Это свидетельствует о том, что объекты КИИ оснащены оборудованием различной сложности и объединены сетевыми структурами с использованием программных средств, реализующих алгоритмы управления, в том числе баз данных, которые обеспечивают информационную поддержку программных средств прикладного уровня.

Следует отметить, что реальную опасность объектам КИИ представляет совокупность *опасностей* – специальных технологий, позволяющих целенаправленно изменять, уничтожать, искажать, копировать, блокировать, ограничивать доступ, нарушать процессы функционирования и дезорганизовывать работу КИИ. Формализованное представление процесса воздействия генераторами ЭМИ по объекту КИИ изображено на рисунке 1.2[1–8].

Перечень стандартизированных опасностей для той или иной информационной инфраструктуры в настоящее время отсутствует. В то же время общепринятый путь анализа ущерба от каждого из множества возможных воздействий на объекты КИИ приводит к выявлению множества возможных последствий или уязвимостей (слабостей системы по отношению к возможным целям нарушителя по отношению к объектам) как недостатков процесса функционирования КИИ. Подобный подход справедлив, поскольку последствие воздействий всегда является функцией, интегрирующей их множество, а общее множество всегда меньше множества возможных воздействий.

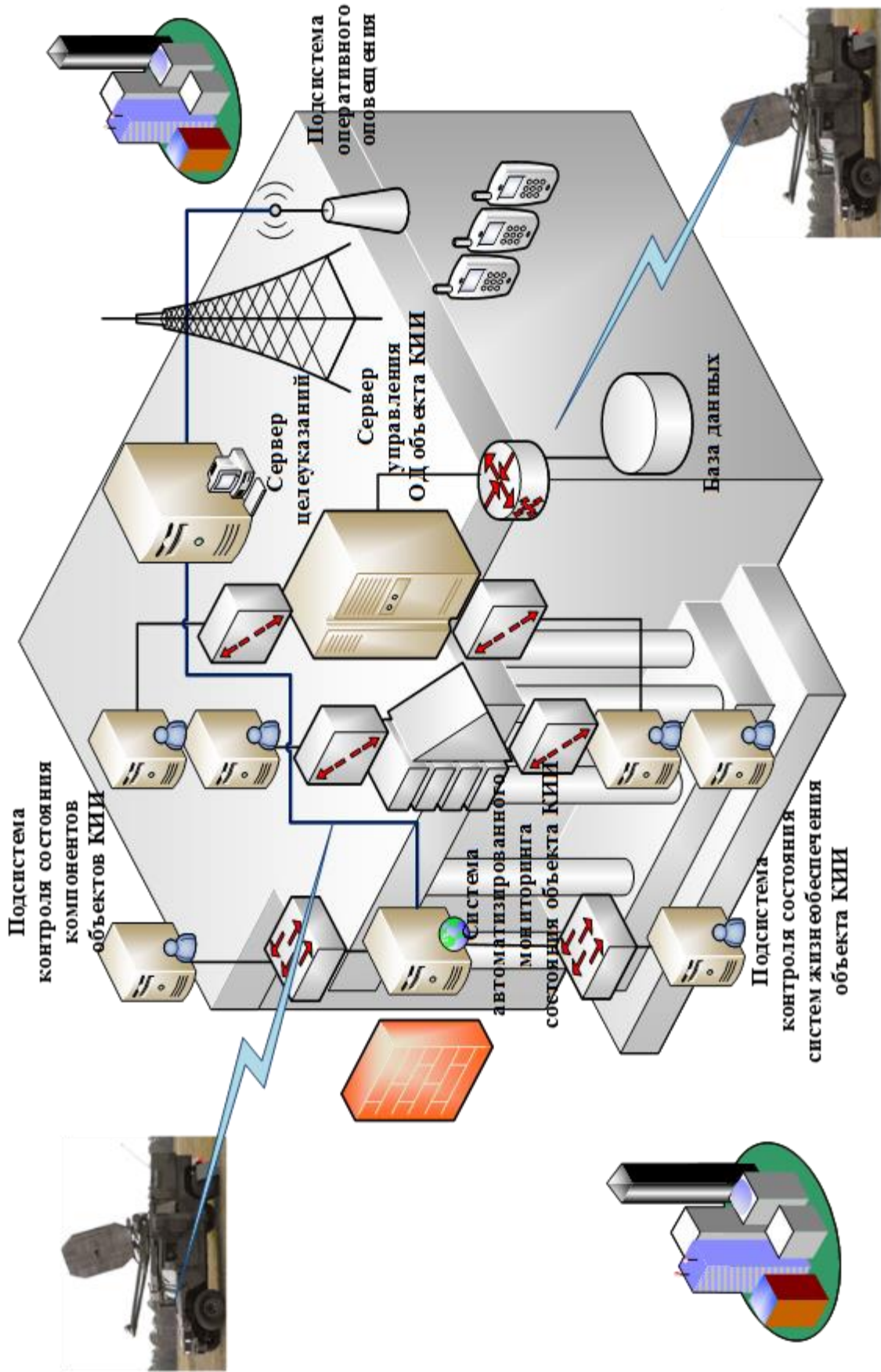


Рисунок 1.2 – Формализованное представление процесса воздействия генераторами ЭМИ по объекту КИИ

1.2. Тенденции, учитываемые при формировании методов и способов обеспечения функциональной устойчивости объектов инфокоммуникационных систем при воздействии электромагнитных импульсов

Необходимо отметить, что данному вопросу в зарубежных странах уделяется особое внимание в рамках устойчивости SCADA-систем (*Supervisory Control And Data Acquisition* – диспетчерское управление и сбор данных, предназначенных для осуществления мониторинга и диспетчерского контроля большого числа удаленных объектов), чему посвящено большое количество научных работ, публикаций, а также отчетов, образующих внешнюю систему факторов, определяющих научные предпосылки и условия разработки методологии [9–28].

Выявим общие функциональные требования, проявляющие возможные последствия воздействий, и совокупность опасностей, которые при ликвидации указанной неопределенности могут быть трансформированы в реальные требования по обеспечению функциональной устойчивости объектов КИИ.

В общем случае под **опасностью объектам КИИ** будем понимать действие или событие, которое может привести к разрушению, искажению или неправомерному использованию активов информационных технологий (ИТ), включая хранимую, обрабатываемую и передаваемую информацию, а также аппаратные и программные средства (АПС), приводящие к уничтожению, сбою функционирования или утрате носителя информации, средства взаимодействия с носителем, средства его управления или системы в целом [1, 6, 7].

В данной работе основным видом опасности будем рассматривать воздействие мощными (ЭМИ) СВЧ-диапазона, которые влияют на устойчивость (живучесть и помехозащищенность) ИТКС, что подразумевает проведение организационных, технических и иных мероприятий, определяющих устойчивый режим деятельности источников информации, охватывающих совокупность программно-аппаратных, технических и организационно-правовых методов, а также средств обеспечения функциональной устойчивости объектов КИИ в данных условиях.



Все ИТКСС и АСУ, включая объекты электроэнергетики, средства связи, системы управления транспортных средств и средств жизнеобеспечения содержат радиоэлектронные компоненты (РЭК) и отказ одного отдельного сегмента не остается изолированным, а вызовет отказы в других сегментах друг за другом. Следовательно, прекращение или нарушение функционирования объектов КИИ приводит к чрезвычайным ситуациям или к значительным негативным последствиям для обороны, безопасности, международных отношений, экономики, другой сферы хозяйства или инфраструктуры страны, либо для жизнедеятельности населения, проживающего на соответствующей территории, на длительный период времени. В связи с этим актуальным является решение задачи обеспечения функциональной устойчивости объектов КИИ к внешним воздействующим факторам, таким, как ЭМИ.

#### 1.2.1. Перспективы применения и совершенствования средств генерации электромагнитных импульсов

О важности, актуальности и своевременности исследования в рамках обеспечения функциональной устойчивости объектов КИИ свидетельствуют факты воздействия ЭМИ преднамеренного характера на различные стратегические и гражданские объекты. Лидером в производстве и испытании генераторов ЭМИ (ГЭМИ) с последующим воздействием мощным потоком радиочастотного электромагнитного излучения (РЧЭМИ) являются США, которые в настоящее время наиболее активно ведут исследования в сфере создания и совершенствования средств генерации ЭМИ в военных (исследовательская лаборатория армии и ВМС США (шт. Мериленд)) и университетских лабораториях, такими, как Лос-Аламосская национальная лаборатория и Техасский технологический университет (г. Лаббок) [26 – 30].

Обретение РЧЭМИ свойств электромагнитного оружия (ЭМО) произошло в результате создания его мощных источников и того, что в радиоэлектронном оборудовании вместо электронных ламп, обладающим устойчивостью к воздействию ЭМИ, пришла полупроводниковая элементная база (ППЭБ) в виде микросхем с высокой степенью интеграции элементов, что способствовало повышению уязви-

мости оборудования к токовым перегрузкам при данном виде облучения [25, 30-34].

Основными технологиями разработки ЭМО являются генераторы со сжатием потока при помощи взрывчатки (*Explosively Pumped Flux Compression Generators, FCG*), работающие на взрывчатке или пороховом заряде, магнито-гидродинамические генераторы (*Explosive or Propellant Driven Magneto-Hydrodynamic generators, MHD*) и микроволновые устройства высокой мощности (*HPM devices*) типа осциллятора с виртуальным катодом (*Virtual Cathode Oscillator, Vircator*). На настоящий момент имеются образцы ГЭМИ, создающие ЭМИ мощностью до 1 ГВт в импульсах около 10 мкс, при этом предельный радиус зоны поражения радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) составляет 200-400 м. В перспективе планируется доработать их конструкцию для достижения предельных дальностей поражения в единицы-десятки километров [25, 26, 27, 30-34].

Научно-исследовательские и опытно конструкторские работы (НИОКР) по созданию мобильных ГЭМИ ведутся с 1986 г. Было произведено более 20 имитаторов ЭМИ с целью получения достоверной информации по воздействию ЭМИ на различные электронные средства вооружения и военной техники (ВВТ) (ракет, самолетов, кораблей), а также пункты управления. Например, имитатор ЭМИ «Джипси» в диапазоне частот от 0,8 до 40 ГГц показал пиковую мощность в импульсе равной 1 ГВт. В последующем, разработка ГЭМИ, работающих в диапазоне 1-40 ГГц с направляющими системами, имеющими узкую диаграмму направленности (ДН) и основанных на синхронизации излучения большого числа источников излучения, выделилась в самостоятельное научно-техническое направление и была включена в перечень перспективных технологий воздействия на военные и гражданские системы [6, 26].

Ввиду того, что механизм поражения электронных систем управления ударом молнии аналогичен воздействию ЭМИ ЭМО в качестве подтверждения актуальности рассматриваемой проблемы можно привести остановку 7 июля 2005 г. пяти реакторов ядерного центра Токаймура и прекращение работы 27 декабря 2006 г. ядерного реактора Научно-исследовательского центра по переработке отработанного ядерного топлива (Япония) после попадания молнии в силовую кабель с поражением электронных компонентов системы контроля безопасности ре-

акторов, приведшее к ущербу в несколько миллионов долларов США [15]. Также был отложен запуск шаттла «*Atlantis*» в связи с прямым ударом молнии в стартовую площадку на мысе Канаверал 25 августа 2006 года (ущерб 1,2 млн. долларов США). [27–29].

В последнее время возможно применение направленных источников РЧЭМИ на дистанциях в десятки-сотни метров без опасения за собственную систему наведения излучения (антенную систему). Относительно низкая стоимость (10 тыс. долларов США) с сравнительно дешевыми компонентами для производства *HEMP-Simulator* (*High-Altitude Electromagnetic Pulse-Simulator*, ГЭМИ) и возможности многократного повторения цикла передачи энергии при неизменяемых основных средствах генерации и наведения мощного луча открывают широкие перспективы его высокоэффективного воздействия на любые электронные средства и объекты с гарантированным разрушением (уничтожением) электронных компонентов компьютерных систем и последующим выводом из строя различного электронного оборудования за несколько секунд [5–8, 26]. Опытные образцы ЭМИ СВЧ-комплексов уже прошли полевые испытания, а одним из примеров служит так называемая «система активного отбрасывания» *ADS* (*Active Denial System*), разработанная в интересах МО США (рис. 1.3).



а)



б)

Рисунок 1.3 – ЭМИ СВЧ-комплексы: а) переносной; б) мобильный

Современные технологии позволяют выполнить генераторы ЭМИ в виде стационарных, мобильных или портативных электронных комплексов направленного излучения с различными принципами генерирования ЭМИ, разными мощно-

стями и радиусом воздействия. Наибольший интерес представляет мобильный ГЭМИ «Дипломат», с дальностью действия 500 м: в течение 10 нс происходит излучение заряда электроэнергии мощностью в миллионы ватт, создавая при этом огромную перегрузку во всех электронных системах, которые находятся в границах действия данного генератора. Последствия его целенаправленного применения по жизненно важным объектам инфраструктуры катастрофические.

Ключевыми технологиями при разработке ЭМО являются:

- *ELFCG (Explosive Lypumped Flux Compression Generators)* – генераторы со сжатием потока при помощи взрывчатки;
- *EPDMHD (Explosive or propellant driven Magneto-Hydrodynamic generators)* – магнито-гидродинамические генераторы;
- *Viricator (Virtual Cathode Oscillator)* – осциллятор с виртуальным катодом (виркатор):
  - аксиальный виркатор (*Axial Viricator, AV*);
  - поперечный виркатор (*Transverse Viricator, TV*);
  - спиральные взрывомагнитные генераторы (*ВМГ*);
  - взрывные магнитодинамические генераторы (*ВМДГ*).

Классификация генераторов ЭМИ представлена на рисунке 1.4 [25, 30–32].



Рисунок 1.4 – Классификация генераторов ЭМИ

В таблице 1.1 представлены характеристики генераторов мощных ЭМИ (*HEMP-Simulator*), произведенных в передовых научно-технологичных государствах в период с середины 1960-х по настоящее время [25].

Таблица 1.1 – Характеристики генераторов мощных ЭМИ (*HEMP-Simulator*)

Генераторы ЭМИ ( <i>HEMP-Simulator</i> )	Страна	Год разработки	Амплитуда, кВ	Длительность импульса	$\sim(dV/dt)$ max (V/s)
<i>ALECS</i>	США	Сер. 1960-х	1000	10 нс	1,00 /1015
<i>APEC</i>	США	1970	4000	6 нс	0,67 /1015
<i>IEMP-10</i>	СССР	1970	2 500	20-40 нс	0,13 /1015
<i>TEMPS</i>	США	В нач. 1970-х	7 000	4-12 нс	1,75 /1015
<i>VPD-I</i>	США	В нач. 1970-х	1 600	5 нс	0,32 /1015
<i>EMPRESS-I</i>	США	В нач. 1970-х	1 500	8-15 нс	0,19 /1015
<i>ATHAMAS II-HPD</i>	США	Сер. 1970-х	4 000	8-12 нс	0,50 /1015
<i>US Navy - HPD</i>	США	Сер. 1970-х	5 000	2 нс	2,50 /1015
<i>ATHAMAS-I VPD2</i>	США	В кон. 970-х	4 000	10 нс	0,40 /1015
<i>GIN 1,6-5</i>	СССР	1976	1 600	5-10 нс	0,32 /1015
<i>SIEM-2</i>	Франция	1979	2 800	10 нс	0,28 /1015
<i>DPH</i>	Франция	1980	4 000	1-5 нс	4,00 /1015
<i>ATLAS-I TRESTLE</i>	США	В нач. 1980-х	6 000-8 000	20 нс	0,30/1015
<i>EMIS III HPD</i>	Нидерланды	В нач. 1980-х	500	5 нс	1,00 /1014
<i>DIESES</i>	Германия	1981	1 000	1-7 нс	1,00 /1015
<i>ERU-2M</i>	СССР	1982	1 000	2,5 - 25 нс	0,40 / 1015
<i>SEMP 6M-2M</i>	СССР	1982	6 000	9 нс	0,67 /1015
<i>SPERANS</i>	Швеция	1984	200	2,5 нс	0,80 /1014
<i>MEMPS</i>	Швейцария	1985	4 000	10 нс	0,40 / 1015
<i>DM-1200</i>	Китай	1985	1 200	10 нс	0,12 / 1015
<i>VEPES</i>	Швейцария	1989	800	8 нс	1,00 / 1014
<i>EMPRESS -II</i>	США	В кон.1980-х	7 000	10 нс	0,70 / 1015
<i>SAPIENS 2</i>	Швеция	1990	1 000	5 нс	0,20 / 1015
<i>INSIEME</i>	Швейцария	В нач. 1900-х	1 000	4 нс	0,25 / 1015
<i>PULS M</i>	Россия	В нач. 1990-х	600	5 нс	1,20 / 1014
<i>RAFAEL- HPD</i>	Израиль	1991	600	5 нс	1,20 / 1014
<i>SEMIRAMIS</i>	Швейцария	1991	100	10 нс	0,10 / 1014
<i>GINT 12-30</i>	Украина	1992	4 500	5-11 нс	0,90 / 1015
<i>EMIS III</i>	Нидерланды	1992	500	10 нс	0,50 / 1014
<i>SEMP 12-3</i>	Россия	1992	2 400	15 нс	0,16 / 1015
<i>DREMPS</i>	Канада	Сер. 1990-х	600	5 нс	1,20 / 1014
<i>France Telecom</i>	Франция	1996	800	2,5 нс	3,20 / 1014
<i>VERIFY</i>	Швейцария	1999	600	1 нс	6,00 / 1014

<i>SEMP 1.5</i>	Россия	1998	1 500	5-12 нс	0,30 / 1015
<i>VPD</i>	Германия	2001	400	1,2 нс	3,33 / 1014
<i>MDES-60</i>	Китай	2005	60	3 нс	2,00 / 1013
<i>NOTES</i>	США	2005	0,1 - 1 000	3-5 нс	0,33 / 1015

Как видно из таблицы 1.1, наиболее передовыми странами в области производства мощных *HEMP-Simulator* являются Россия, США, Китай Франция, Германия, Нидерланды, Швейцария, Израиль.

Результаты экспериментов, полученных в различных лабораториях при тестировании генераторов ЭМИ на виркаторах, представлены в Таблице 1.2 [26–51].

Характеристики наиболее мощных генераторов ЭМИ, разработанных в США, приведены в Таблице 1.3

Таблица 1.2 – Параметры генераторов ЭМИ на виркаторах

Лаборатория пучка	Ток в диоде, кА	Напряжённость электрического поля, МВ/м	Мощность генерации, МВт	Частота импульса, ГГц	Длительность импульса, нс
Commissariat al'EnergieAtomique (France)	200	0,35	>1000	14	50
HarryDiamond Lab.(USA)	300	6,5	22000	0,8	20
Air Force 80 Weapons Lab. (USA)	80	4	7500	1,17	50
Los Alamos National Lab. (USA)	90	1,8	500	17	40
Nat.Instit. Fusion Sc. (Japan)	22	0,36	360	20...22	50
Instit.Nucl. Energy Res. (Chine)	38	0,66...1,2	120	8,63	150

Таблица 1.3 – Характеристики наиболее мощных генераторов ЭМИ, разработанных в США

Излучатель	Длительность импульса, нс	Длительность фронта импульса, нс	Электрическая напряжённость импульсного ЭМП, кВ/м	Частота повторения импульсов, Гц	Тип антенны	Габаритные размеры, см	Масса, кг	Мощность излучения, МВт	Диапазон частот, ГГц	Зона поражения, м
<i>H-2</i>	1,5	0,25	50	1200	<i>ТЕМ</i> -рупор	225×80×45	200	120	До 10	До 3000
<i>Phoenix</i>	3,0	0,14	100	1000	<i>ТЕМ</i> -рупор	230×70×40	210	120	До 15	До 3000
<i>BASS 103</i>	1,0	0,175	100	3000	Конец волновода	245×118×56	200	120	До 20	До 3000
<i>GEM1</i>	1,0	0,175	100	3000	Решетка концов волновода	240×85×56	200	1000	До 10	До 3000
<i>GEM 2</i>	1,0	0,175	100	3000	<i>ТЕМ</i> -рупор	230×70×40	200	1000	До 10	До 3000
<i>SNIPER</i>	2,0	0,24	50	1500	<i>ТЕМ</i> -рупор	183×136×37	100	1200	До 10	До 3000
<i>EMBL</i>	2,4	0,25	50	800	<i>ТЕМ</i> -рупор	235×100×50	195	1200	До 10	До 3000
<i>IRA</i>	0,15	0,035	100	200	Параболоид	240×85×56	180	1100	До 10	До 3000
<i>MPS-II</i>	1,0	0,175	100	100	Зерк., диам. 3 м	230×320×128	370	1000	До 10	800

В настоящее время в России есть достаточно развитое технологическое производство мощных передвижных и лабораторных генераторов ЭМИ, базирующихся, как правило, в автофургонах или автоприцепах (рис. 1.5 и 1.6). Применяют их для воздействия на объекты внутри зданий, насыщенные цифровыми устройствами, например СВТ, системы телекоммуникаций, охранные системы, системы управления [30, 31, 33, 34–51].



Рисунок 1.5 – ГЭМИ «Снайпер»



Рисунок 1.6 – ГЭМИ «Снайпер–М»

Лабораторные ГЭМИ представлено на рисунках 1.7 и 1.8.



Рисунок 1.7 – Имитатор У 0.8/15-3000

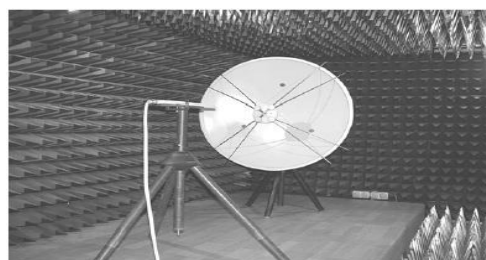


Рисунок 1.8 – ГЭМИ «И–10/0,9Р»

На рисунке 1.9 представлены генераторы СВЧ ЭМИ, разработанных Институтом сильноточной электроники Сибирского отделения РАН, характеристики которых приведены в Таблице 1.4.



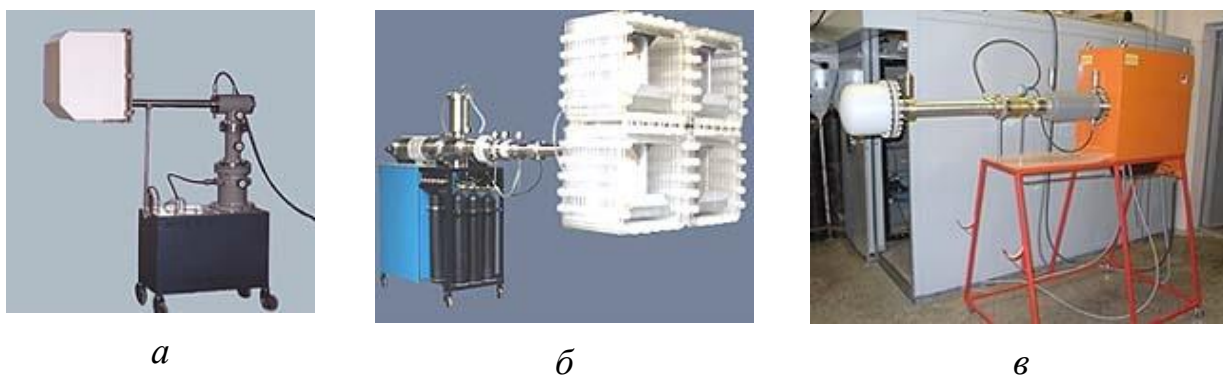


Рисунок 1.9 – Генераторы СШ ЭМИ, разработанные институтом  
сильноточной электроники Сибирского отделения РАН

Таблица 1.4 – Характеристики генераторов СШ ЭМИ, разработанных  
институтом сильноточной электроники сибирского отделения РАН

Характеристики	Генератор СШП ЭМИ, разработанные ИСЭ сибирского отделения РАН		
	100	200	120
Амплитуда напряженности, кВ/м	100	200	120
Длительность импульса напряжения, нс	3	3	1
Мощность излучения, МВт	120	1300	170
Ширина диаграммы, град	120×120	60×60	100×100
Габариты, см	183×136×37	230×320×128	230×70×40 (без подставки)
Вес, кг	200	700	200
Потребляемая мощность, кВт	0,5	3,5	1

С целью обоснования разработки математических методов моделирования функциональной устойчивости объектов КИИ необходимо провести анализ параметров ЭМИ.

Таблица 1.5 – Основные параметры, характеризующие ЭМИ

Характеристика ЭМИ	Значение
Пиковая мощность в антенне, ГВт	0,1–20
Время нарастания импульса по уровню 0,1–0,9 (скорость нарастания фронта импульса $\Delta\tau$ ), нс	от 1–20
Длительность переднего фронта импульса $\tau_{\text{ф}}$ , нс	0,4
Длительность импульса $\tau_{\text{и}}$ , нс	1–20;
Форма импульса	гауссова
Рабочий диапазон (ширина полосы частот ЭМО, в которой сосредоточена основная часть энергии ЭМИ) $\Delta f$ , ГГц	0,1–10
Амплитуда электрического поля $E_{\text{max}}$ в области источника излучения, кВ/м	1–300

Окончание табл. 1.5

Амплитуда электрического поля в дальней зоне $E_1$ на расстояниях, кВ/м	100 м	20–100
	1 км	2–30
	10 км	0,2–3
Мощность в импульсе в течение выстрела длительностью от 0,1–10 нс, на 1 м <sup>2</sup> на дальности	100 м	1 Вт–200 МВт
	1 км	10 мВт–2 МВт
	10 км	0,1 мВт–200 кВт
Энергия импульса на 1 м <sup>2</sup> на дальности, Дж	100 м	1–20
	1 км	0,01–2
	10 км	0,1–0,2
Облучаемая поверхность, км <sup>2</sup>	0,1–10	
Дальность, км	0,1–10	
Метод излучения	Антенна или управляемый взрыв	

На основании данных, представленных в таблицах 1.1–1.4 [30, 31, 33, 34–51], можно утверждать, что амплитудно-временные характеристики ЭМИ изменяются в широких пределах и зависят от ряда параметров, представленных в Таблице 1.5 [34].

Напряженность электромагнитного импульса, воздействующего на средства ЭВТ, зависит от мощности источника ЭМИ, расстояния от источника, времени воздействия, параметров окружающей среды и представляется следующими выражениями [32, 34, 35]:

$$E_1(P_{\text{и}}, r, t) = E_{\text{макс}}(P_{\text{и}}, r) \cdot Y_E(t); \quad (1.1)$$

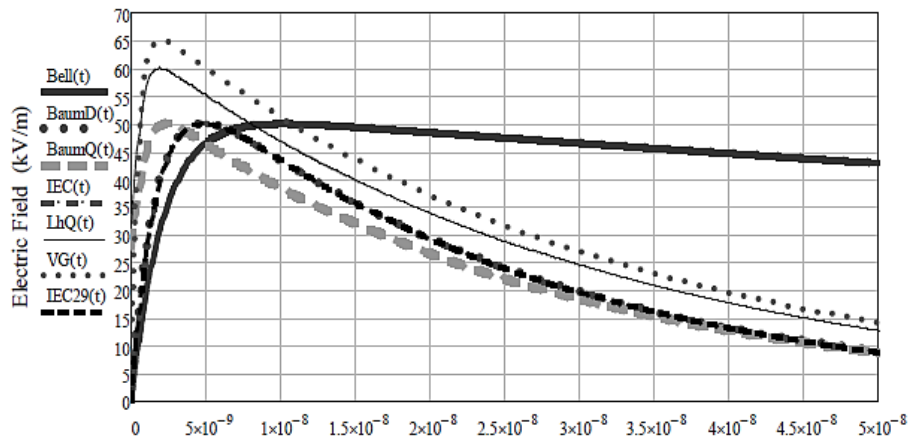
$$H_1(P_{\text{и}}, r, t) = H_{\text{макс}}(P_{\text{и}}, r) \cdot Y_H(t), \quad (1.2)$$

где  $E_{\text{макс}}$  и  $H_{\text{макс}}$  – максимальные значения напряженностей электрического и магнитного полей в импульсе;  $Y_E(t)$  и  $Y_H(t)$  – формы (временные зависимости) напряженностей электрического и магнитного полей;  $P_{\text{и}}$  – мощность источника ЭМИ;  $r$  – расстояние от источника воздействия.

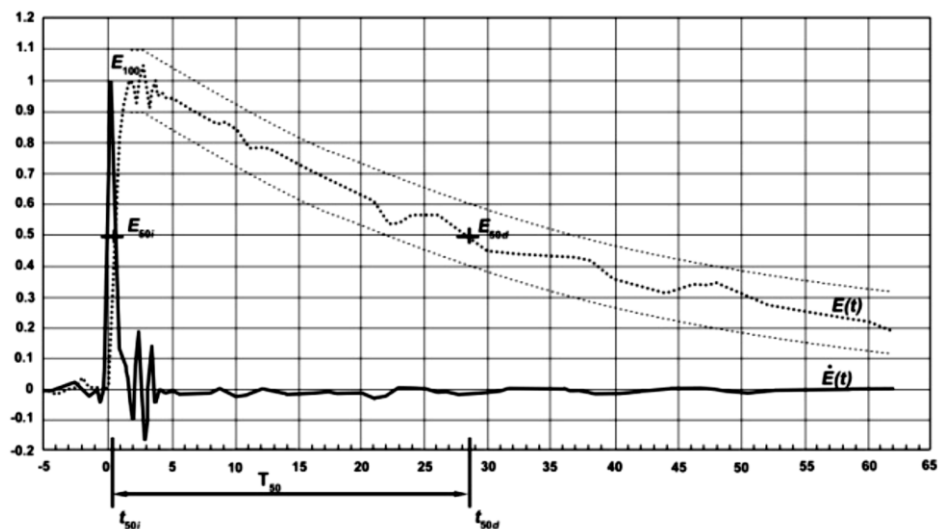
В соответствии с действующими на настоящее время *HEMP-Simulator-Standards* (табл. 1.6) с на рисунке 1.10 представлены графики изменения формы импульсов двухэкспоненциальной формы (*DEXP – double exponential*) [25].

Таблица 1.6 – Действующие стандарты *HEMP-Simulator*

Параметры	Bell Labs	Baum	IEC-77C	Leuthäuser	VG95371-10	IEC 61000-2-9
Длительность DEXP, нс	184	~23	23	23,8	24,1	23
$t_{10\%-90\%}$ , нс	4,6	2,5	2,5	1,9	0,9	2,5
$E_0$ (пиковое значение), кВ/м	50	50	50	60	65	50
$\alpha$ (1/сек)	$4 \times 10^6$	$4 \times 10^7$	$4 \times 10^7$	$2,20 \times 10^9$	$3,22 \times 10^7$	$4 \times 10^7$
$\beta$ (1/сек)	$4,76 \times 10^8$	$6 \times 10^8$	$6 \times 10^8$	$3,24 \times 10^7$	$2,07 \times 10^9$	$6 \times 10^8$
Энергетическая плотность (Дж/м <sup>2</sup> )	0,114	0,114	0,167		0,196	0,114

Рисунок 1.10 – Графики изменения формы *DEXP* - импульса

Сравнение форм идеализированного и реального *DEXP*-импульса представлена на рисунке 1.11.

Рисунок – 1.11 – Сравнение форм идеализированного и реального *DEXP*-импульса

Одним из основных методов оценки воздействия ЭМИ на конструктивные элементы СВТ является спектральный метод, при котором наряду с формой ЭМИ необходимо знать его спектральные характеристики: спектральную плотность мощности и фазовый спектр.

Согласно [32, 34, 35], воздействующие импульсные электромагнитные поля представляются в виде гармонических составляющих следующими выражениями:

$$E(e^{j\omega t}) = \int_{t_1}^{t_2} E(t) \cdot \exp(-j\omega t) dt; \quad (1.3)$$

$$H(e^{j\omega t}) = \int_{t_1}^{t_2} H(t) \cdot \exp(-j\omega t) dt, \quad (1.4)$$

где  $\omega$  – круговая частота, характеризующая изменение поля ЭМИ во времени;  $j = \sqrt{-1}$  – мнимая единица временного вектора;  $(t_2, t_1)$  – интервал нарастания амплитуды импульса по уровню 0,1–0,9 от максимального значения (рисунок 1.12).

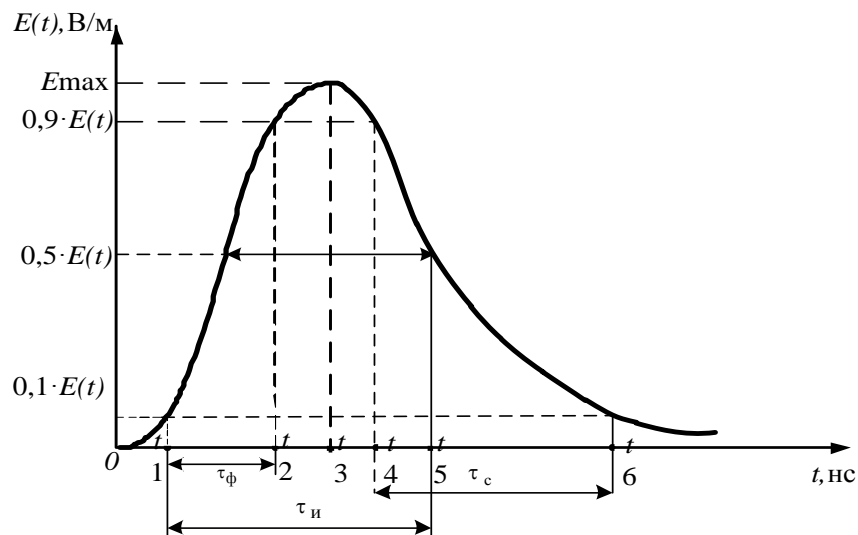


Рисунок 1.12 – Изменение во времени импульса двухэкспоненциальной формы

Представленный в виде гармонических составляющих ЭМИ и его временная форма связаны прямым и обратным преобразованиями Фурье:

$$E(e^{j\omega t}) = \int_{t_1}^{t_2} E(t) \cdot \exp(-j\omega t) dt; \quad (1.5)$$

$$E(t) = \frac{1}{2 \cdot \pi} \int_{\omega_1}^{\omega_2} E(e^{j\omega t}) \cdot \exp(j\omega t) d\omega;$$

$$H(e^{j\omega t}) = \int_{t_1}^{t_2} H(t) \cdot \exp(-j\omega t) dt; \quad (1.6)$$

$$H(t) = \frac{1}{2 \cdot \pi} \int_{\omega_1}^{\omega_2} H(e^{j\omega t}) \cdot \exp(j\omega t) d\omega.$$

Спектральная плотность мощности двухэкспоненциального импульса описывается следующим выражением:

$$G(e^{j\omega t}) = \left[ \frac{1}{j\omega + \alpha} - \frac{1}{j\omega + \beta} \right] = \frac{(\beta - \alpha)}{(j\omega + \alpha) \cdot (j\omega + \beta)}, \quad (1.7)$$

где  $\alpha$ ,  $\beta$  – коэффициенты, определяющие спад и фронт ЭМИ, вычисляются по формулам:

$$\alpha = 0,7/\tau_{И}; \quad \beta = 3,25/\tau_{\Phi}. \quad (1.8)$$

Гармонические составляющие импульса двухэкспоненциальной формы представляются разложениями в виде следующих выражений:

$$E(e^{j\omega t}) = E_{\max} \cdot \left[ \frac{1}{j\omega + \alpha} - \frac{1}{j\omega + \beta} \right] = E_{\max} \cdot \left[ \frac{(\beta - \alpha)}{(j\omega + \alpha) \cdot (j\omega + \beta)} \right]; \quad (1.9)$$

$$H(e^{j\omega t}) = H_{\max} \cdot \left[ \frac{1}{j\omega + \alpha} - \frac{1}{j\omega + \beta} \right] = H_{\max} \cdot \left[ \frac{(\beta - \alpha)}{(j\omega + \alpha) \cdot (j\omega + \beta)} \right]. \quad (1.10)$$

Согласно [87–92], при оценке воздействия ЭМИ на сложные технические системы, к которым относятся средства ЭВТ, из-за практических ограничений времени счета на ЭВМ ЭМИ Гауссовой формы строго не рассматривается в связи с тем, что его частотный спектр очень широк и простирается от нуля до бесконечности с постоянной амплитудой. Поэтому при гауссовой форме импульса для проведения исследования и выполнения расчетов вместо сложной аппрок-

симации форм ЭМИ для практических расчетов используются аппроксимации вида:

$$E(t) = E_{\max}(t) \cdot (\exp(-\alpha t) - \exp(-\beta t)); \quad (1.11)$$

$$H(t) = H_{\max}(t) \cdot (\exp(-\alpha t) - \exp(-\beta t)), \quad (1.12)$$

где  $E(t), E_{\max}(t)$  – соответственно, текущее и максимальное значения напряженностей электрической составляющей ЭМИ;  $H(t), H_{\max}(t)$  – соответственно, текущее и максимальное значения напряженностей магнитной составляющей ЭМИ.

Поле ЭМИ в дальней зоне ( $DZ$ ) излучения меняется в зависимости от расстояния от источника излучения до объекта воздействия, что приводит в конечном итоге к ослаблению и трансформации составляющих напряженности электрических и магнитных полей. Вне области источника напряженность электромагнитного импульса на расстоянии  $r$  от источника электромагнитного воздействия определяется известным из теории распространения радиоволн соотношением Шулейкина-Ван-дер-Поля [36, 37]:

$$E_1(t) = 490 \cdot \frac{r_0}{r} \cdot \sqrt{\frac{E^2(t)}{240}} \cdot G \cdot e^{(-jkr)} \cdot F(\xi) \cdot \sin\theta; \quad (1.13)$$

где  $r_0$  – радиус области источника ЭМИ;  $k$  – фазовый коэффициент распространения радиоволн,  $m^{-1}$ ;  $G$  – коэффициент усиления антенны;  $\theta$  – угол между вертикалью и направлением на наблюдателя;  $F(\xi)$  – коэффициент ослабления электромагнитной энергии радиопередачи, определяющий потери энергии в земле при проникновении в ее толщу электромагнитных волн. Она является функцией параметра  $\xi$ , называемого «численным расстоянием», которое зависит от комплексной диэлектрической проницаемости земли по трассе распространения радиоволн и расстояния от источника поля ЭМИ до рассматриваемой точки и определяется с помощью следующего выражения [36, 37]:

$$\zeta = \pi \cdot r / 60 \cdot \lambda^2 \cdot \sigma_3 \quad (1.14)$$

где  $\sigma_3$  – удельная электрическая проводимость земли.

Коэффициент ослабления электромагнитной энергии приближенно определяется так:

$$\xi = (2 + 0,3 \cdot \zeta) / (2 + \xi + 0,6 \cdot \zeta^2). \quad (1.15)$$

Таким образом, на основании проведенного анализа параметров ЭМИ можно сделать вывод, что воздействие ими является серьезной потенциальной угрозой для объектов КИИ различного назначения вследствие амплитудно-временных, частотных и энергетических характеристик, а также массогабаритных показателей. Очевидно, что воздействующие РЧЭМИ приведут к деградации электронных компонентов исследуемых объектов, в связи с чем необходим анализ факторов, обуславливающих поражение данных компонентов, а также методов, механизмов и средств обеспечения функциональной устойчивости объектов при воздействии ЭМИ.

### 1.2.2. Оценка поражающих факторов воздействия электромагнитного импульса

Цель применения ЭМИ заключается в нанесении энергетического поражения электронным средствам, поэтому эффективность его применения зависит от конкретных ситуаций, зависящих от роли электроники: системы управления, принятия решения и жизнеобеспечения.

Эффекты воздействия РЧЭМИ на радиоэлектронную аппаратуру (РЭА) могут быть разделены на 3 класса [31–35, 38–45]:

- *короткое последствие (КП)* – перегрузка электронных цепей в течение времени, равного длительности одного или немногих циклов обработки информации;
- *временное ослепление (ВО)* – перегрузка в течение времени, значительно превышающем длительность цикла обработки информации;
- *функциональное поражение (ФП)*.

Каждая цель имеет направления «преимущественного» воздействия – «лепестки приема»: если рабочая частота цели и частота воздействующего РЧЭМИ совпадают, то воздействие ЭМИ максимально эффективно и реализуется в пределах главного лепестка диаграммы приема цели. При наличии различий в данных частотах в диаграмме направленности заметно растет число максимумов и уменьшаются их отличия от минимумов (рис. 1.13).

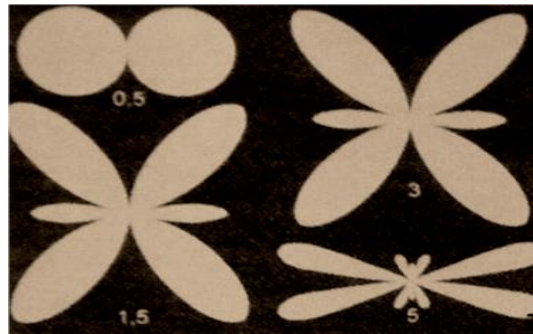


Рисунок 1.13 – Зависимость пространственного распределения энергии от длины волны РЧЭМИ на примере простейшего излучателя – диполя

Ордината, проведенная из центра любой из диаграмм, пропорциональна плотности потока энергии РЧЭМИ в направлении ее проведения. Цифры под диаграммами соответствуют отношению размера излучателя к длине волны РЧЭМИ. Для СШП РЧЭМИ, генерация которого типична для источников прямого преобразования, диаграмма «лепестков приема» близка к изотропной форме. В соответствии с теоремой взаимности – если какое-либо устройство излучает электромагнитную энергию, то направления наиболее интенсивного излучения совпадают с направлениями наиболее эффективного приема РЧЭМИ данной частоты [31–35, 44,45].

Диаграмма приема любого электронного устройства не ограничивается лепестками на рабочей частоте, а представляет сложную суперпозицию таких лепестков для разных частот. Небольшие изменения во взаимном расположении источника и цели могут приводить к проявлению эффектов воздействия в различных электронных цепях цели вследствие реализации приема широкополосного РЧЭМИ по различным лепесткам. Наблюдается также аккумулянт эффектов



и/или самопроизвольное восстановление некоторых схем спустя время («временное ослепление»), длительность которого может варьироваться от нескольких миллисекунд до часов [38–44, 45].

Современные компоненты объектов КИИ (телекоммуникационное оборудование (ТКО) и СВТ) построены, в основном, на КМОП-приборах высокой плотности и сверхбольших интегральных схемах (СБИС), выполненных по нано- или микронной технологии. Любое электронное устройство на полупроводниковых конструктивных элементах (ППКЭ) может быть выведено из строя, если только плотность потока мощности воздействующего РЧЭМИ достаточно высока.

Эффекты воздействия РЧЭМИ многообразны. Практически установлено, что подтвержденная стойкость того или иного изделия не является гарантией его стойкости по отношению к РЧЭМИ иного частотного диапазона и определяется его физическими свойствами – глубина проникновения РЧЭМИ в вещество зависит от его проводимости и частоты излучения. Чем больше эти величины, тем меньше глубина проникновения.

Поражающее воздействие ЭМИ на ППКЭ и интегральные схемы ИМС СВТ основано на генерации короткого (в сотни наносекунд) электромагнитного излучения, формирующего мощное ЭМП. Проникая в проводящее вещество, РЧЭМИ индуцирует в нем токи, которые могут явиться причиной мощных наводок за счет емкостных связей элементов с корпусом. Это вызывает кратковременные перенапряжения в тысячи вольт в электрических проводниках и элементах. Эффективность преобразования энергии РЧЭМИ в токовые импульсы зависит от частоты воздействующего излучения, собственной рабочей частоты цели; пространственного взаиморасположения цели и источника РЧЭМИ; схемных решений и элементной базы цели.

Диаграмма последовательности воздействия полей источника ЭМИ на полупроводниковые конструктивные элементы (ППКЭ) представлена на рисунке 1.14.

Проникновение полей ЭМИ внутрь экранирующих конструкций СВТ обусловлено [44, 46–50]:

- проникновением ЭМИ через технологические неоднородности (вентиляционные отверстия, щели между панелями, плохо экранированные интерфейсы), что может привести к труднопредсказуемым результатам вследствие дифракционных и интерференционных явлений при воздействии;
- проводящими элементами конструкции СВТ вблизи отверстий и щелей корпуса;
- диффузией полей из-за малой толщины стенок и малой проводимости последних;
- проводными коммуникациями, выходящими за пределы корпусов;
- цепями питания от промышленной сети.

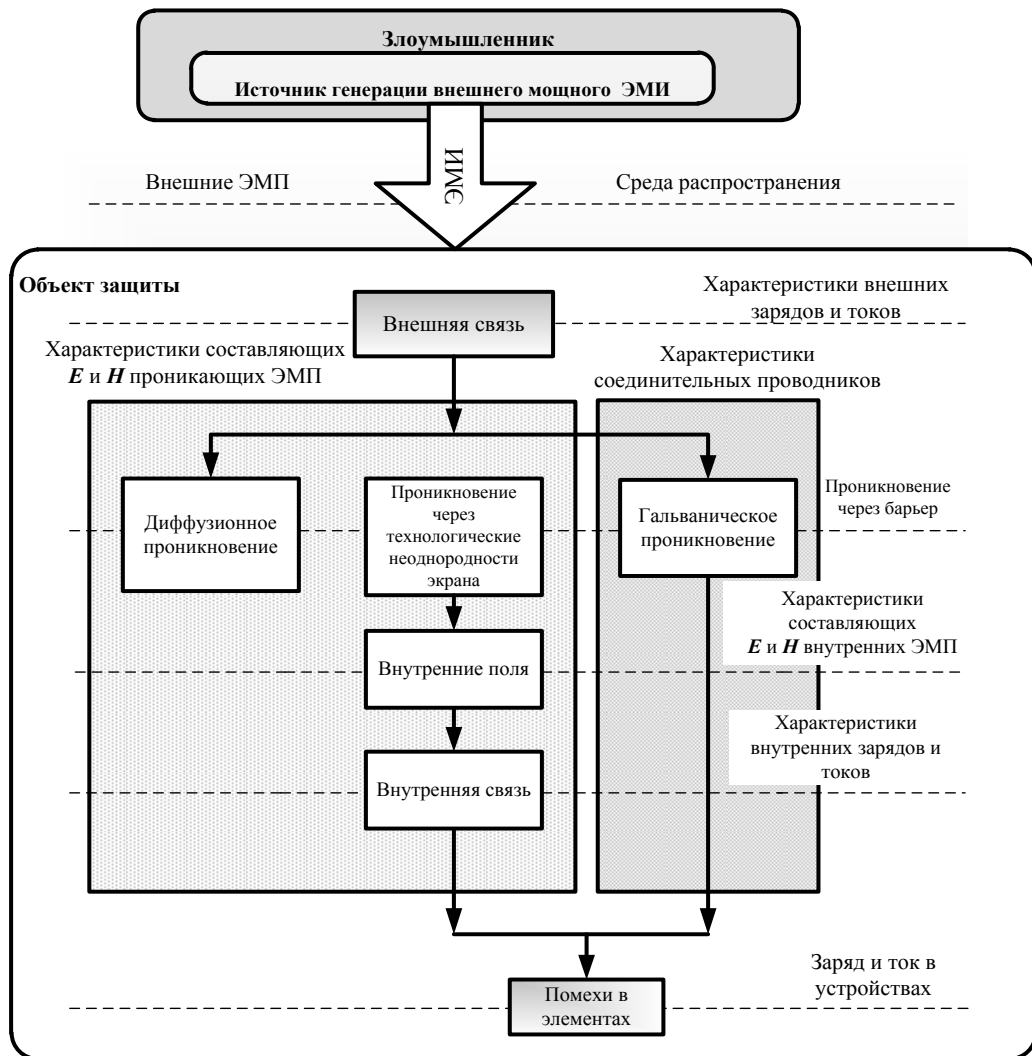


Рисунок 1.14 – Диаграмма последовательности воздействия полей источника ЭМИ на полупроводниковые конструктивные элементы

При диффузионном проникновении полей ЭМИ из экранов СВТ выбиваются комптоновские электроны, приводящие к появлению «внутреннего» электромагнитного излучения и наводок, которое при определенных условиях может усиливать действие проникающего внешнего поля ЭМИ. При проникновении полей ЭМИ наносекундной длительности в СВТ через технологические неоднородности любое отверстие, ведущее внутрь оборудования, ведет себя как щель в микроволновой полости [38,41].

Внешнее импульсное ЭМП, ослабленное и измененное по форме, проникает внутрь аппаратуры, влияя непосредственно на комплектующие изделия и вызывая в них опасные напряжения и токи с генерацией сильного электромагнитного поля, приводящего к искажению внутренних ЭМП изделий, возникновению ЭДС и токов на корпусах, выводах и других проводящих элементах, воздействию на изделия электрических импульсов, приходящих с других КЭ СВТ [38, 40–50].

Изменения параметров изделий при воздействии полей ЭМИ определяются:

- взаимодействием ЭМП с собственными электрическими и магнитными полями изделий;
- поглощением энергии внешнего ЭМП конструкционными материалами изделий;
- образованием наведенных на корпусах, выводах и других элементах конструкций изделий опасных импульсных токов и напряжений.

Значения и форма наводимых напряжений определяются следующими факторами [38, 40–50]:

- амплитудно-временными и спектральными характеристиками ЭМИ (напряженностью  $E$  и  $H$  ЭМП, длительностью фронта и спада  $DEXP$ -импульсов);
- геометрическими размерами схем и номиналами комплектующих изделий;
- взаимной ориентацией схем и векторов полей ЭМИ;
- электрическим режимом (напряжением питания, чувствительностью к изменению полярности входных сигналов);
- конструктивным расположением монтажа схем относительно корпуса аппаратуры.

Уровни заносимых в СВТ полей зависят от расположения полупроводниковых приборов внутри экранирующего объема, электрофизических свойств (ЭФС) материалов и структуры экрана, а эффекты, возникающие в полупроводниковых материалах и элементах в вычислительных и управляющих устройствах, проявляются по-разному: магнитные составляющие ЭМП ЭМИ сказывается на перемагничивании ферритовых сердечников, что способствует потере информации. При воздействии импульсных напряжений от влияния ЭМИ на ППКЭ и ИМС наиболее чувствительными к нарушению работоспособности являются ППКЭ и ИМС материнских и других плат (процессор, карты оперативной памяти, звуковая и видеокарта).

Характерные повреждения при влиянии сильных электрических полей на ППКЭ и ИМС приведены в Таблице 1.7 [30, 31, 34, 38, 40–50], а классификация эффектов, возникающих в ППКЭ при воздействии ЭМИ СВЧ, представлена на рисунке 1.15 [30,31, 33, 34, 38, 40-50].

Таблица 1.7 – Повреждения полупроводниковых конструктивных элементов СВТ при воздействии ЭМИ

Класс изделий	Характер повреждений	Величина электрической напряжённости $E_{кр}$ , кВ/м
ИМС, ППЭ, маломощные транзисторы и переключательные диоды	Деградация параметров диодов и транзисторов в составе ИМС; плавление и выгорание металлизации; разрушение контактных дорожек; структурные повреждения и пробой $p-n$ -переходов; перераспределение потенциалов в $p-n$ -переходах; образование каналов проводимости в поверхностных слоях полупроводников; расплавление и обрывы токоведущих дорожек, мест пайки (сварки) проводов из-за термо- и электродинамических напряжений.	0,086–8,6
Конденсаторы	Пробой диэлектриков, воздушных и вакуумных промежутков	0,27–270
Композиционные и проволочные резисторы	внутренний и тепловой пробой выводов высокоомных резисторов, разрушение резисторов	0,25–270

*Первичные эффекты* – функциональные отказы (восстанавливаемые: при восстановлении работоспособности ППКЭ СВТ их параметры либо восстанавливаются, либо ухудшаются, причем интервал временного выхода из строя КЭ изменяется в пределах от единиц миллисекунд до десятков минут) [60-62,72,78].



Рисунок 1.15 – Классификация эффектов, возникающих в полупроводниковых элементах СВТ при воздействии ЭМИ

*Вторичные эффекты* связаны с неустойчивым распределением тока в областях полупроводникового элемента, они определяются механизмами лавинного и туннельного пробоев, а также пробоем подзатворного диэлектрика, приводят либо к *тепловому пробую* (ТВП), либо к эффекту «*электрического блокирования*» полупроводникового элемента. Это способствует резкому увеличению

тока как в цепи питания, так и во входных и выходных цепях, и, как следствие, катастрофическому отказу или функциональному поражению [44, 46, 56, 60-62,72,78].

В таблице 1.8 представлены характеристики эффектов, возникающих в СВТ при воздействии ЭМИ [40–52, 56, 60-62,72,78].

Таблица 1.8 – Характеристика эффектов, возникающих в СВТ при воздействии ЭМИ

Тип устройства	Характер нарушений работоспособности
Вычислительные управляющие и синхронизирующие устройства	Сбои в работе делителей частоты и усилителей считывания оперативных запоминающих устройств (ОЗУ) и устройствах видеосистемы; сбои сигналов, контролирующих структуру кода и телеметрии, пропуски импульсов в кодовых группах в режиме памяти, выдача ложных команд по разрядам кодовых групп; помехи в цепях статистических преобразователей для выработки специальных сигналов; потеря информации в регистрах оперативной памяти; ложные срабатывания в импульсных узлах; нарушение нормального хода программы; искажение информации; существенные дрожания изображения на мониторе; в ЛВС происходит разрыв соединения, нарушение маршрутизации, искажение передаваемых данных, снижение скорости передаваемой информации
Устройства формирования разовых команд	Ложные срабатывания в схемах обработки сигналов и в цепях исполнительных схем
Источники питания (выпрямители, стабилизаторы)	Кратковременное изменение выходного напряжения

*Лавинный и туннельный пробои* (ЛП и ТП) вызываются неограниченным возрастанием тока между электродами полупроводникового элемента при ударной ионизации и лавинном умножении носителей заряда в результате действия электрического поля большой напряженности. При этом рост концентрации носителей заряда становится лавинным, что резко повышает обратный ток *p-n*-перехода, который может превысить допустимое значение. После воздействия импульса перенапряжения, если электрический пробой не перешел в тепловой, значение обратного тока возвращается к первоначальному состоянию.

Основной причиной отказа ППКЭ и ИМС является *вторичный тепловой пробой (ВТП)*, который наблюдается во всех их типах, наиболее критичных к воздействию импульсных токов и напряжений. В наибольшей степени этот эффект проявляется в быстродействующих интегральных микросхемах [53–58].

Первый вид функциональных отказов, при которых возможны ложные срабатывания исполнительных устройств и схем, называют функциональным подавлением, а второй – функциональным поражением. В работе будем употреблять общий термин – «*функциональное поражение*».

Диапазон напряжений пробоя для различных типов полупроводниковых приборов представлен в Таблице 1.10.

Таблица 1.10 – Напряжения пробоя для различных типов полупроводниковых приборов

Тип ППЭ	Напряжения пробоя, В
Кремниевые высокочастотные приборы	15–65
Арсенид-галлиевые полевые транзисторы	10
Микросхемы динамической памяти с произвольным доступом, DRAM	до 7
КМОП логика	от 7 до 18
Микропроцессоры	3,3–6

При исследовании воздействия ЭМИ на электронные устройства учитывают фазовые состояния (ФС), характеризующие электромагнитные свойства диэлектриков, ферро-, пара- и диамагнетиков, полупроводников. Для характеристики изменения свойств радиоматериалов вводится понятие фазовых превращений, показывающих переходы вещества из одной фазы в другую, например, полупроводника в проводник или проводника в сверхпроводник.

При действии сильного кратковременного ЭМИ первоначальное равновесное физическое состояние полупроводника нарушается и с ростом плотности потока энергии  $\mathcal{E}$ , Дж/м<sup>2</sup> в некоторой критической точке  $\mathcal{E} = \mathcal{E}_{кр}$  происходит лавинообразное формирование новой устойчивой фазы (например, проводника).

На рисунке 1.16 представлен фазовый переход диэлектрика в проводник при воздействии на вещество сильного импульсного ЭМП. Степень фазового превращения характеризуется значением удельной проводимости  $\sigma$ ,  $\text{Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$ . Лавинообразное необратимое фазовое превращение диэлектрика в проводник наблюдается в критической точке  $E = E_{\text{кр}} \approx 10^7 \dots 10^8$  В/см, когда происходит электрический или тепловой пробой диэлектрика [39–42, 46–49].

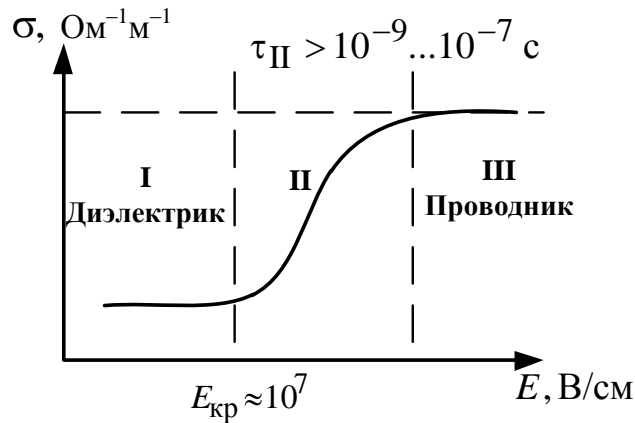


Рисунок 1.16 – Фазовое превращение диэлектрика (I) в проводник (III);  
(II) – переходная фаза

Механизмы пробоя в твердых телах, жидких и газообразных диэлектриках связаны с образованием проводящих каналов. Вследствие фазового перехода (пробоя) изменяется на много порядков проводимость вещества от  $\sigma_I \approx 10^{-11}$  до  $\sigma_{III} \approx 10^5 \dots 10^6 \text{ Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$ . Условием фазового перехода является не только критическая напряженность электрического поля  $E_{\text{кр}}$ , но и время воздействия ЭМП  $\tau$ , которое должно быть  $\tau > 10^{-7}$  с [46–49]. Время фазового перехода из состояния I (диэлектрик) в состояние III (проводник) составляет  $\tau_{II} > 10^{-9} \dots 10^{-7}$  с и определяет минимальную длительность ЭМИ  $\tau_{\text{ЭМИ}}$  при функциональном поражении электронных средств кратковременным излучением.

Поражение наступает при выполнении условия:  $\tau_{\text{ЭМИ}} > \tau_{II}$  и  $E_{\text{кр}} > E$ . В слабых полях с ростом напряженности электрического поля  $E$  ток  $I$  вначале



растет, а затем в сильных ЭМП при  $E_{кр} > E$ , когда наступает пробой диэлектрика, ток увеличивается скачком (рис. 1.17) [39–42].

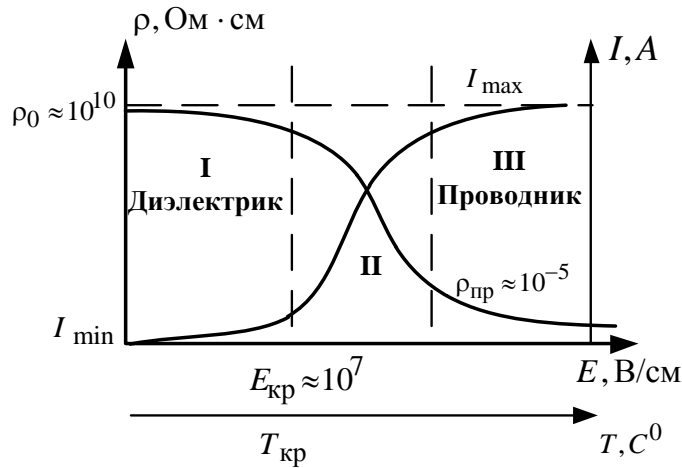


Рисунок 1.17 – Пробой в диэлектрике:  $I$  – ток в диэлектрике (А);  
 $\rho$  – удельное сопротивление (Ом·см);  $T$  – температура ( $C^{\circ}$ )

Для наносекундного ЭМИ уровень поражения полупроводникового элемента определяют пороговыми значениями мощности  $P_{пор}$  либо энергии  $W_{пор}$ , разрушающими структуру полупроводника в результате тепловыведения, например, с помощью модели, предложенной Вуншем, Беллом и Таском, которые оцениваются по формуле [39–42, 46–49]:

$$P_{пор} = \frac{A}{\tau_{и}} + \frac{B}{\sqrt{\tau_{и}}} + \frac{C}{\tau_{и}}, \quad (1.16)$$

где  $\tau_{и}$  – длительность мощного импульса;  $A$ ,  $B$ ,  $C$  – соответствующие коэффициенты в уравнении теплопроводности, зависящие от геометрии и эффективной площади структуры, ее теплоемкости, теплопроводности материала, температуры повреждения, условия теплосъема и характера воздействующего импульса.

Зависимость энергии поражения электромагнитным импульсом от теплопроводности электронных элементов СВТ приведена в Приложении А.

Для определения энергии поражения  $W_{\text{пор}}$ , разрушающей полупроводниковую структуру, используется формула  $W_{\text{пор}} = P_{\text{пор}} \cdot \tau_{\text{и}}$ :

$$W_{\text{пор}} = A \cdot \tau_{\text{и}} + B \cdot \sqrt{\tau_{\text{и}}} + C \cdot \tau_{\text{и}}. \quad (1.17)$$

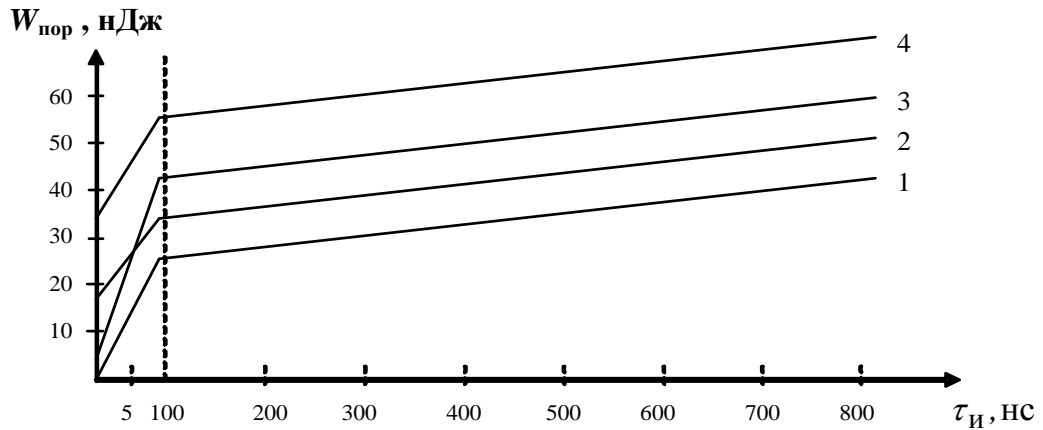
Для «коротких» импульсов ( $\tau_{\text{и}} < 1$  нс) на пороговую мощность  $P_{\text{пор}}$  влияет первое слагаемое (пропорциональное  $1/\tau_{\text{и}}$ ), при  $\tau_{\text{и}} \approx 1 \dots 10$  нс – второе слагаемое (пропорциональное  $1/\sqrt{\tau_{\text{и}}}$ ), а для  $\tau_{\text{и}} > 10$  – третье слагаемое (пропорциональное  $1/\tau_{\text{и}}$ ).

Микросхемы и их компоненты входят в состав больших систем, поэтому площадь поверхности, принимающей излучение, значительно увеличивается, и на ней могут индуцироваться большие токи, способные вызвать перегрузки и перегрев в микросхемах.

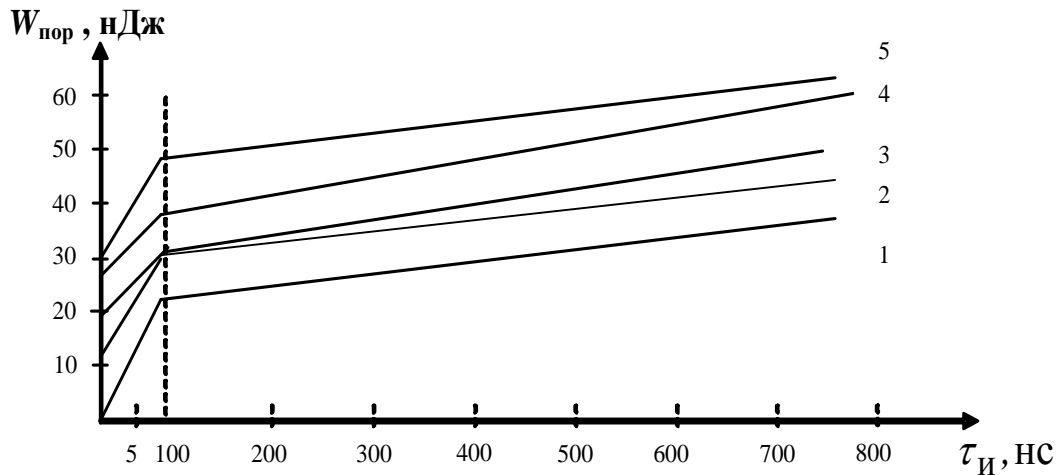
Основной причиной изменения параметров логических микросхем является нарушение функций диодов и транзисторов. Другой тип отказов, который наблюдается при больших длительностях импульсов ( $\tau_{\text{и}} \geq 1$  нс), – плавление металлизации. Отклонение параметров микросхем от норм ТУ при критических уровнях происходит скачком без постепенной деградации при более низких значениях импульса тока, что проявляется при длительностях импульса от 100 мкс до 1 нс. Объяснить это можно резким началом вторичного пробоя в  $p$ - $n$ -переходах. Критические уровни тока и мощности уменьшаются с увеличением длительности импульса. У большинства логических ИМС чувствительными являются входы. Наименьшую стойкость к ЭМИ имеют схемы ТТЛ с входными многоэмиттерными транзисторами из-за низкой электрической прочности этих транзисторов [48-52].

На рисунке 1.18 представлены зависимости пороговой энергии поражения  $W_{\text{пор}}$  от длительности импульсов для ТТЛ схем, планарных транзисторов (рис. 1.18, а) и ИМС с диэлектрической изоляцией, аналоговых и цифровых мик-

росхем (рис. 1.18, б). Из рисунка 1.18, а видно, что кривые 1, 3 – для ТТЛ-схем и 2, 4 – для планарных транзисторов определяют возможные диапазоны критериальных уровней поражения микросхем с диэлектрической изоляцией элементов.



а



б

Рисунок 1.18 – Зависимость пороговой энергии поражения от длительности импульсов: а – транзисторных элементов; б – интегральных микросхем.

Кривые 2, 3 на рисунке 1.18, б определяют нижнюю границу, кривые 4, 5 – верхнюю границу диапазонов уровней поражения цифровых и аналоговых микросхем, а кривая 1 определяет уровни.

Уровни, соответствующие пороговой энергии поражения  $W_{\text{пор}}$  наносекундным электромагнитным импульсом, находятся в диапазонах от 30 до 60 нДж при  $\tau_{\text{и}} = 10$  нс, и составляют 20...40 нДж для  $\tau_{\text{и}} = 3$  нс, изменяются от 20 до 35 нДж для  $\tau_{\text{и}} = 1,5$  нс.

На рисунке 1.19 представлена схема замещения интегральной микросхемы при воздействии мощным ЭМИ на выводы, соответствующие входам, выходам и цепям питания, где длительность импульса  $\tau_{\text{и}} \leq 1$  нс,  $U_{\text{и}}$  – импульсное значение напряжения,  $I_{\text{и}}$  – импульсное значение тока,  $U_{\text{р}}$  – напряжение пробоя перехода,  $R_{\text{в}} = (U_{\text{и}} - U_{\text{р}}) / I_{\text{и}}$  – сопротивление выводов структуры.

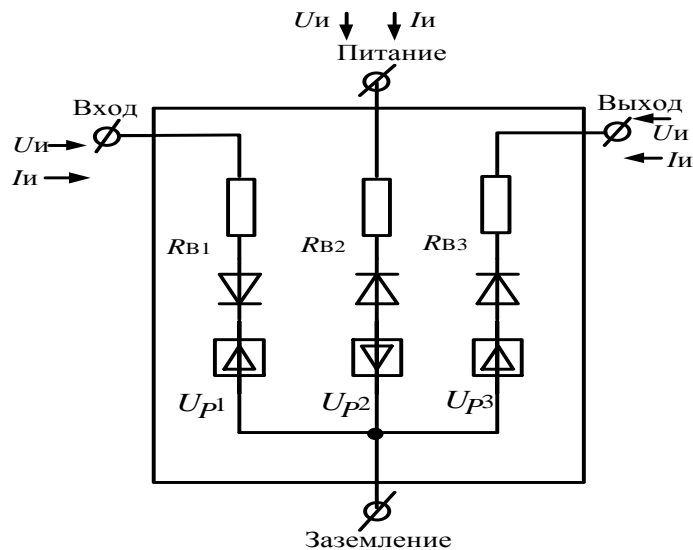


Рисунок 1.19 – Схема замещения интегральной микросхемы при воздействии мощным ЭМИ СВЧ

Таблице 1.10 приведены обобщенные данные для этих показателей, при которых наблюдаются катастрофические отказы различных типов ИМС при длительности импульса  $\tau_{\text{и}} \leq 1$  нс, в которой идентифицированы константы  $A$  и  $B$  модели Вунша-Белла-Таска [46–49]. Для импульсных напряжений с длительностью  $\tau_{\text{и}} > 1$  нс пороговая энергия поражения  $W_{\text{пор}}$  постоянна, поэтому ее назы-

вают критической энергией поражения  $W_{кр}$ . Критическая энергия поражения  $W_{кр}$  находится в прямой зависимости от критической напряженности электрического поля, приводящей к катастрофическим отказам элементов полупроводниковых СВТ, и определяется следующим выражением:

$$W_{кр} = \frac{E_{кр}^2}{R} \cdot t, \quad (1.18)$$

где  $R = 75 \text{ Ом}$  – сопротивление элемента ЭВТ,  $t$  – время воздействия поля ЭМИ.

Таблица 1.10 – Коэффициенты для мощности поражения  $P_{пор}$ , приводящей к катастрофическим отказам ИМС для длительности импульса  $\tau_{и} \leq 1 \text{ нс}$

Режим		$U_p, \text{ В}$	$U_{и}, \text{ В}$	$R_B, \text{ Ом}$
Тип	Вывод			
ТТЛ	Вход	7	16	25
	Выход	15	2,4	23
	Питание	6	40	70
ЭСЛ	Вход	20	15,7	44
	Выход	0,7	7,8	25
	Питание	0,7	8,9	61
МОП	Вход	30	9,2	40
	Выход	0,6	11,6	37
	Питание	3	10,4	46
Аналоговые ИМС	Вход	7	13,2	37
	Выход	7	5,5	42

В таблице 1.11 представлены уровни пороговой энергии и длительности импульса, приводящие к повреждению ППКЭ и ИМС СВТ при воздействии ЭМИ. Резкое уменьшение энергии поражения на интервале от 100 нс до 5...10 нс (рис. 1.16 – 1.18) свидетельствует о переходе между 5 нс и 10 нс к такому механизму поражения, при котором главным фактором становится электрическая напряженность импульсного поля и скорость ее изменения, а нагрев является лишь фоном.

При воздействии электромагнитного импульса на ИМС в результате взаимодействия вторичных электронов с резонирующим объемом возникает «внутренний» ЭМИ, приводящий к резкому увеличению тока  $I$  как в цепи питания, так и во входных и выходных цепях.

Таблица 1.11 – Уровни пороговой энергии, приводящие к повреждению или деградации ППКЭ и ИМС СВТ при воздействии ЭМИ

Тип компонента	Пороговая энергия, Дж	Длительность ЭМИ, $\tau$ , нс
Интегральные микросхемы	$10^{-7} \dots 10^{-3}$	2,5
Чувствительные элементы ЭВМ	$10^{-7} \dots 10^{-3}$	80
Маломощные транзисторы	$10^{-7} \dots 10^{-3}$	180
Маломощные переключа- тельные диоды	$10^{-5} \dots 10^{-1}$	2,5-1600
Конденсаторы	$10^{-4} \dots 10^{-3}$	500
Композиционные и прово- лочные резисторы	$10^{-5} \dots 1$	0,005-10

Из-за протекания больших токов в полупроводниковых приборах и ИМС могут произойти катастрофические отказы: выгорание металлизации или пробой диэлектрика и внутренних полупроводниковых структур. Работоспособность элементов при появлении такого эффекта «электрического блокирования» нарушается и не восстанавливается после окончания воздействия. При этом критическая энергия поражения  $W_{кр}$  элемента определяется электрической напряженностью импульсного электромагнитного поля в дальней зоне  $E_1(t)$  в зависимости от скорости нарастания амплитуды  $E(t)$  по уровню 0,1–0,9 от  $E_{max}(t)$  (рис. 1.11, 1.12).

С учетом эффектов, возникающих в полупроводниковых элементах, комплексный показатель функционального поражения СВТ при воздействии ЭМИ имеет вид [105-113]:

$$E'_{\Phi\Pi}(t) = \max \{ E_{\text{Лпроб}}(t); E_{\text{Тпроб}}(t); E_{\text{ПЗпроб}}(t); E_{\text{крТВП}}(t); E_{\text{крЭБ}}(t) \} \quad (1.19)$$

Критерий функционального поражения элементов СВТ при воздействии ЭМИ:

$$E_{кр} \geq E'_{ФП}(t). \quad (1.20)$$

Для подтверждения приведенных положений на экспериментальной площадке Испытательного центра электромагнитных и механических воздействий «23 Государственного морского проектного института – филиала АО «31 Государственный проектный институт специального строительства», Санкт-Петербург (далее по тексту – «23 ГМПИ») проведены испытания для получения экспериментальных данных по воздействию импульсного электромагнитного поля на средства ЭВТ в соответствии с ГОСТ Р 51320-99 показана схема проведения эксперимента по оценке поражающего действия мощного электромагнитного импульса на средства ЭВТ на основе комплекса «ИМИТАТОР-3Ф» [50, 51].

Он состоит из генератора импульсных напряжений ГИН-400, формирующий поле с амплитудой напряжения  $E \leq 100$  кВ/м, электрической напряженности поля  $H \leq 100 \dots 300$  А/м, длительностью фронта  $\tau_{\phi} = 10$  нс, длительностью импульса  $\tau_{и} = 6$  нс,  $\Delta\tau = 10$  нс, имеющего устройство образования поля с размерами  $4 \times 4 \times 3,5$  м (рис. 1.20).

Принципиальная схема установки представлена на рисунке 1.21.

При экспериментальных исследованиях использовались следующие средства:

- формирователь импульсов поля с участком полеобразующей системы;
- осциллограф вычислительный универсальный *TETRONIXTDS-2022B*;
- генератор напряжения и амплитуды формируемого поля типа ГИН-400;
- регистратор аналого-цифровой СРГ7 с полосой пропускания 5 ГГц;
- аппаратный комплекс измерения поля АК ИП-4113/2, имеющий время нарастания переходной характеристики 45 пс, длительность переходной характеристики 4,4 нс, погрешность коэффициента преобразования 3,4 %;

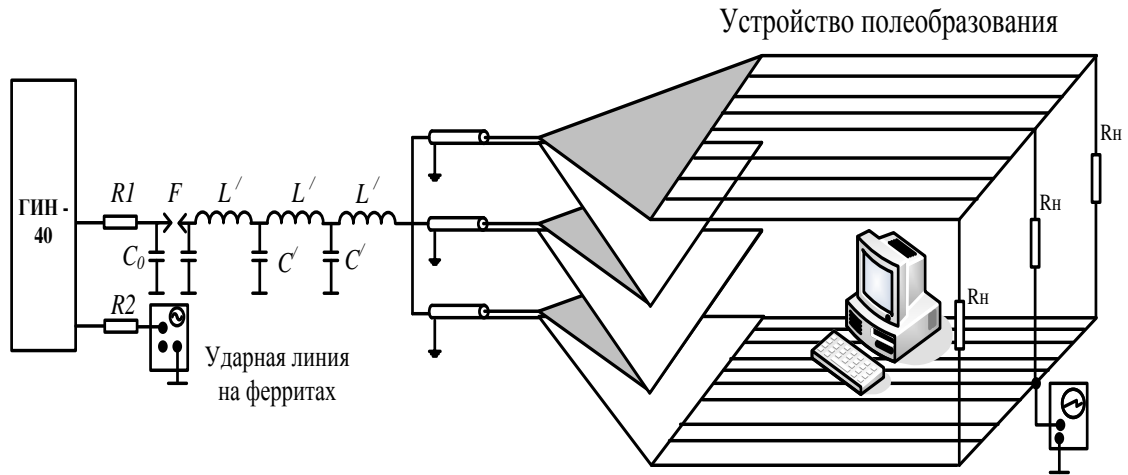


Рисунок 1.20 – Схема проведения эксперимента с помощью имитатора ЭМИ «ИМИТАТОР-3Ф»

– радиочастотная безэховая камера из состава государственного специального эталона ГЭТ 148-93 единиц максимальных значений напряженностей импульсных электрического и магнитного полей (ГСЭ);

– измерительный преобразователь ИППЛ-М, имеющий время нарастания переходной характеристики 120 пс, длительность переходной характеристики 144 нс, погрешность коэффициента преобразования 7,3 %.

Типовые осциллограммы электромагнитного поля сильнооточного импульса тока с амплитудой 102 кА и длительностью 4,2 нс, полученные с помощью осциллографа *TETRONIXTDS-2022B*, представлены на рисунке 1.22. Воздействие сильнооточным импульсом тока амплитудой 102 кА, длительностью 4,2 нс сравнимо с воздействием молнии. На рисунке 1.23 представлено воздействие молнии, сгенерированное установкой ГИН 6000/940 TUR на фрагмент электромагнитного экрана. Катастрофические повреждения микросэлектронной компонентной базы (*ТТЛ*-элементы с диодами Шотки), расположенной на плате СВТ, полученные в результате воздействия ЭМИ, представлены на рисунке 1.24.



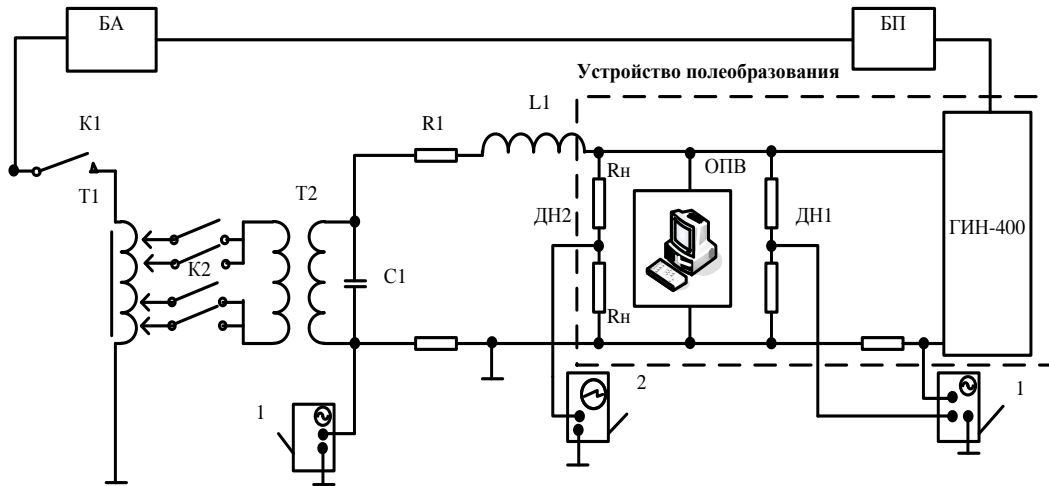


Рисунок 1.21 – Принципиальная схема установки для проведения эксперимента

Т1 – автотрансформатор

Т2 – повышающий трансформатор 220/10кВ

С1 – корректирующая ёмкость

Р1 – защитный резистор

Л1 – защитная индуктивность (200 мкГн)

Дн1 – делитель напряжения, ДИН-25,  $K_d=1000$

Рш1 – шунт сопротивлением  $10^{-2}$  Ом

Рш2 – шунт сопротивлением 20 Ом

Дн2 – делитель напряжения, ДН-6,  $K_d=10\ 000$

1 – осциллографы

2 – вольтметр

ОПВ – объект, подвергающийся воздействию (объект испытаний)

БП – блок поджига

БА – блок автоматики



Рисунок 1.22 – Типовая осциллограмма электромагнитного поля сильноточного импульса тока амплитуда 102кА длительностью 4,2 нс, полученные с помощью осциллографа *TETRONIXTDS-2022B*



Рисунок 1.23 – Воздействие молнии сгенерированной установкой ГИН-6000/940 TUR на фрагмент электромагнитного экрана

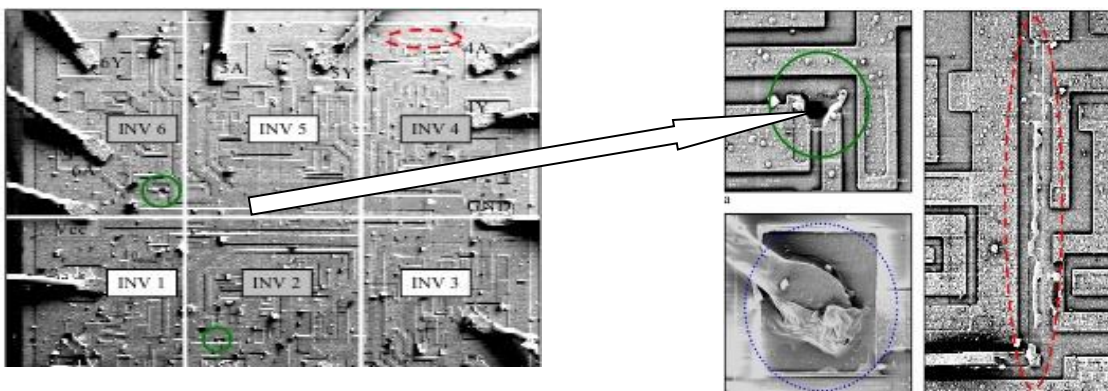


Рисунок 1.24 – Катастрофические повреждения микроэлектронной компонентной базы (диоды Шотки с *TTL*-логикой), полученные в результате воздействия ЭМИ

### *Внутренние электромагнитные излучения и наводки (ВЭМИН)*

Диаграмма возникновения ВЭМИН представлена на рисунке 1.25. В состав СВТ входит различная микропроцессорная электронная компонентная база, работа которой сопровождается изменением ЭМП СВЧ: процессор, оперативная память, видеокарта и др. (табл. 1.12). В цифровых интерфейсах передача данных осуществляется с помощью импульсов напряжений малой длительности в виде двоичных кодовых комбинаций, которые имеют большой коэффициент прямоугольности и широкий спектр частот [52–54].

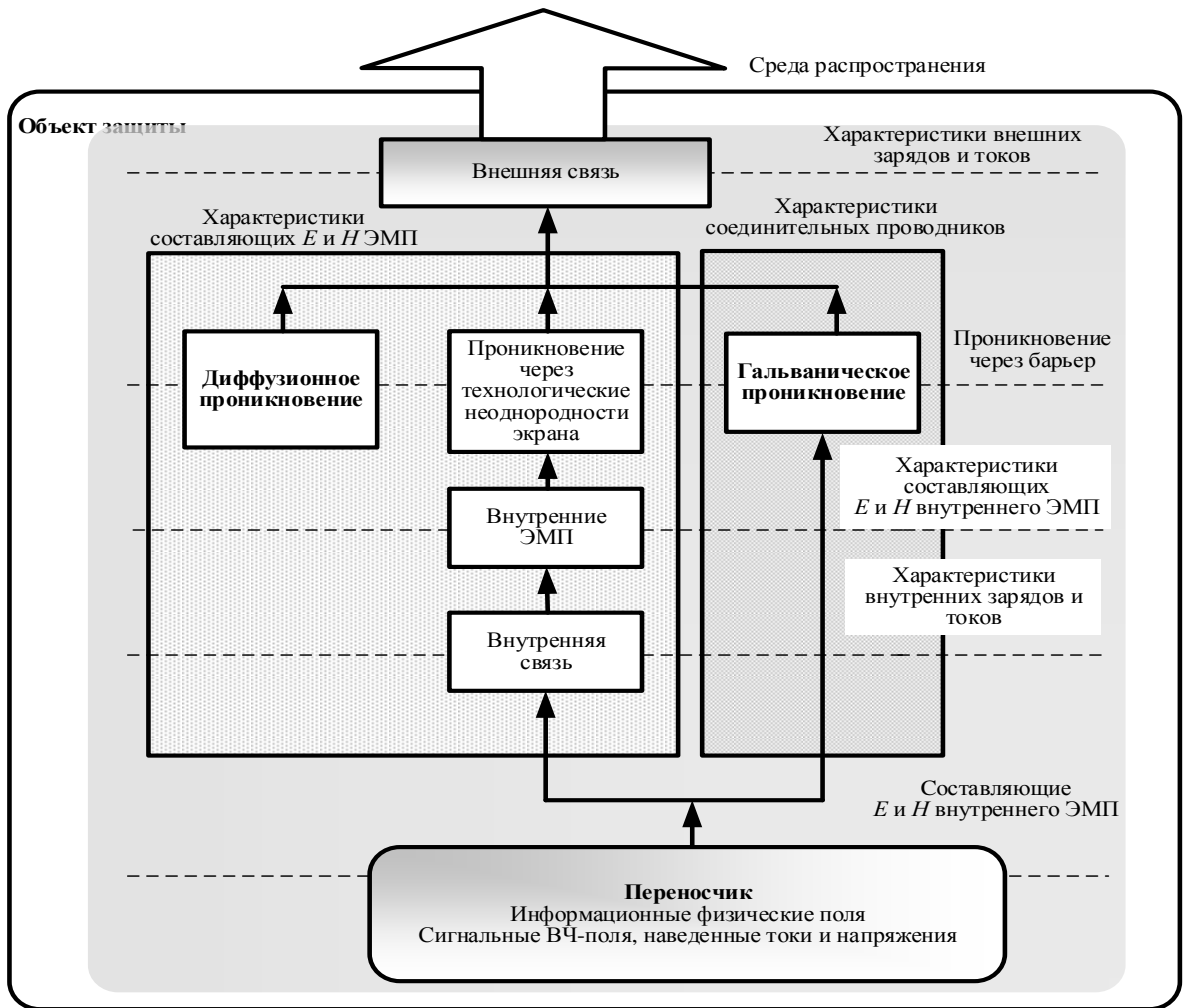


Рисунок 1.25 – Диаграмма возникновения внутренних электромагнитных излучений и наводок

Их ВЧ-составляющие излучаются в пространство, а интенсивность их излучения возрастает с ростом частоты, так как элементы, рассеивающие (излучающие) мощность электромагнитных колебаний, с ростом частоты становятся более согласованными «антеннами» излучения. В некоторых случаях несколько элементов могут представлять собой сфазированную излучающую систему, поэтому такие источники относят к электрическим излучателям [62, 63].

Таблица 1.12 – Излучение микроэлектронных конструктивных компонентов СВТ

№ п/п	Устройство	Тактовая частота (скорость)	Мощность излучения, $\mu\text{Вт}/\text{м}^2 \times \text{кГц}$
1.	Блок питания	50 Гц и гармоники 80–150кГц	250–500/ 2–50
2.	Чипсет (северный мост)	до 533 МГц	до 1
3.	Шина PCI	33–66 МГц	1...10
4.	VGA	до 85 МГц	0,01...0,1
5.	Порт LTP ( <i>IEEE 1284</i> )	0,5– 2 МБ/сек	0,5...1
6.	Порт USB	0,5– 8МБ/сек	0,5...1
7.	IEEE 802 ( <i>Wi-Fi</i> ) скоростной радиодоступ	5; 2,4 ГГц	50...200
8.	Процессор	0,5...3 ГГц	100-200

В связи со спецификой формирования сигналов и ограниченной полосой передатчика в их шинах данных существуют фронты нарастания и спада, которые представлены последовательностью импульсов трапецеидальной формы с разным наклоном сторон, как показано на рисунке 1.26 [62, 63].

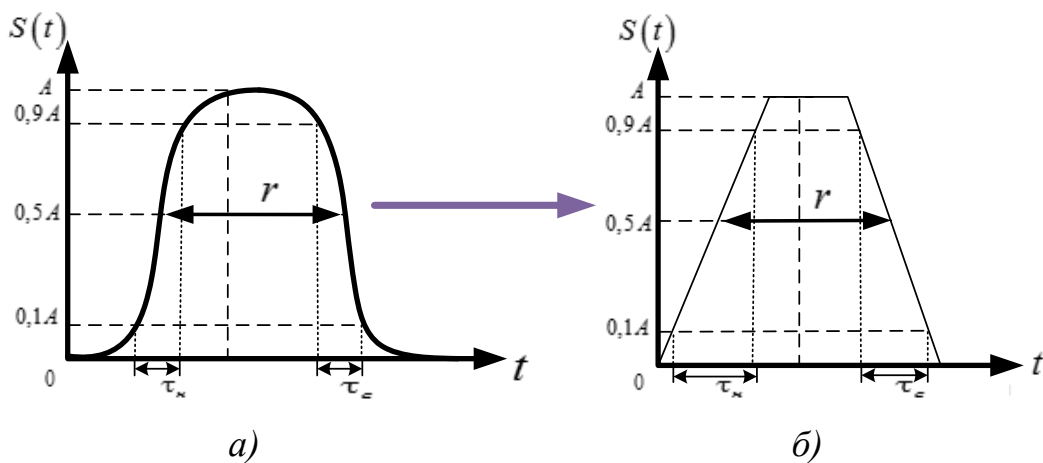


Рисунок 1.26 – Вид сигнала в цифровых интерфейсах

В соответствии с рисунком 1.25 основными параметрами представленной модели сигнала являются амплитуда импульса  $A$ , время нарастания переднего фронта  $\tau_n$ , время спада заднего фронта  $\tau_c$  и длительность импульса  $\tau$ , определяемая по уровню  $0,5A$ . Спектральная плотность мощности (СПМ) одиночного трапецеидального импульса представлена на рисунке 1.27.

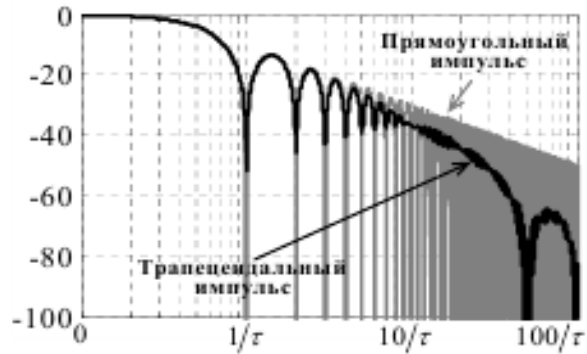


Рисунок 1.27 – СПМ трапецеидального импульса с длительностью переднего фронта  $\tau_H = 0,02 \cdot \tau$

*Принцип негативного действия ВЭМИН*, заключается в формировании вторичных ЭМП, которые излучаются в окружающее пространство: паразитные магнитные и электрические НЧ-поля наводят токи (напряжения) на неинформационные электрические и активные нелинейные цепи (модуляторы), посредством чего образуются ВЧ-токи (напряжения), которые после их модуляции становятся переносчиками информационных НЧ-токов (напряжений) [52-54]. А их информационные поля обусловлены генерацией и взаимным преобразованием информационных НЧ/ВЧ-полей, образующихся посредством излучения колебаний паразитной ВЧ-генерации, вспомогательных ВЧ-генераторов, паразитно-модулированными НЧ-сигналами, а также их гармониками и комбинационными составляющими тактовой частоты ЦАП. Токи и напряжения НЧ-сигналов в неинформационных физических цепях обусловлены их связью с информационными каналами, которые, регистрируются в диапазоне частот 10...12000 МГц с максимумом в диапазоне 100...3000 МГц [31-38, 52-54].

Таким образом, исходя из проведенного выше анализа и в контексте проводимого исследования, *ВЭМИН* – это паразитные радиоэлектромагнитные излучения, возникающие в результате паразитной генерации в электрических цепях в процессе функционирования компонентов объектов КИИ в результате воздействия по ним ЭМИ.

Для оценки параметров паразитных электромагнитных излучений представим СВТ в виде диполя, размещенного в точке **О** сферической системы координат, как показано на рисунке 1.28 [52-54].

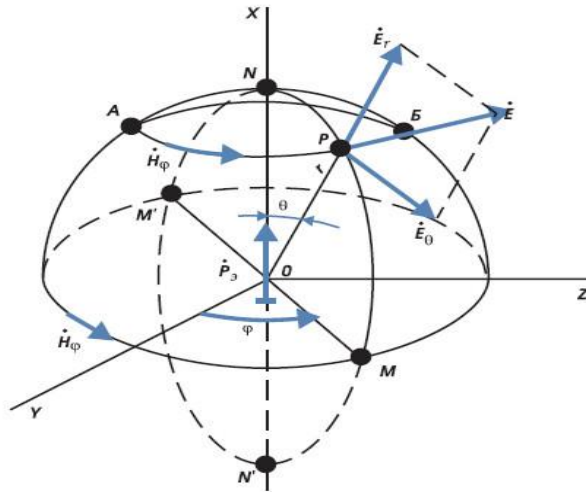


Рисунок 1.28 – Модель излучателя электромагнитного поля

Векторы напряженности магнитного  $\vec{H}$  и электрического  $\vec{E}$  полей связаны с векторным потенциалом зависимостями:

$$\vec{H} = \left( \frac{1}{\mu_a} \right) \times \text{rot} A_3, \quad \vec{E} = \left( \frac{1}{i\omega \varepsilon_a \mu_a} \right) \text{rot} A_a. \quad (1.21)$$

где  $A_3 = \frac{\mu_a I l \exp(-jkr)}{4\pi r}$  – векторный потенциал,  $\varepsilon_a$  – абсолютная диэлектрическая проницаемость;  $\mu_a$  – абсолютная магнитная проницаемость среды;  $I$  – ток в проводнике;  $l$  – длина проводника;  $r$  – расстояние от излучателя до измерительной антенны, м;  $k = 2\pi/\lambda$  – волновое число;  $A_3$  состоит из радиальной, угломестной и азимутальной составляющих –  $A_r$ ,  $A_\theta$  и  $A_\varphi$ , соответственно:

$$\begin{aligned} A_r &= \frac{\mu_a I l \exp(-jkr)}{4\pi r^2} \cos \theta; \\ A_\theta &= -\frac{\mu_a I l \exp(-jkr)}{4\pi r^2} \sin \theta; \\ A_\varphi &= 0 \end{aligned} \quad (1.22)$$

При ВЭМИН (в РЭА проводники – случайные антенны) доминирующей является электрическая составляющая (электрическая напряженность информативных сигналов) ЭМП  $E_{ci}$  – максимально возможный уровень напряженности поля ВЭМИН за период измерений на  $i$ -й частоте, входящей в состав  $j$ -го частотного интервала, мкВ/м. Уровни  $E_{ci}$  за период измерений на  $i$ -й частоте, входящей в состав  $j$ -го частотного интервала измеряются на всех обнаруженных частотах  $f_i$  в режиме *RMS* (среднеквадратичного детектора) [52–54, 63]:

$$E_{ci} = \sqrt{(\varepsilon_{и} E_{иi})^2 - \left( \frac{E_{пi}}{\varepsilon_{и}} \right)^2}, \quad (1.23)$$

где  $E_{иi}$ ,  $E_{пi}$  – значение напряженностей поля ВЭМИН, измеренные на  $i$ -й частоте при включенном и выключенном тесте, соответственно, мкВ/м;  $\varepsilon_{и} = 1 + \sqrt{(10^{0,05 \cdot \sigma_a} - 1)^2 + (10^{0,05 \cdot \sigma_{ип}})^2} - 1$  – среднеквадратическая погрешность измерительного тракта, дБ;  $\sigma_a$ ,  $\sigma_{ип}$  – среднеквадратические ошибки (СКО) калибровки измерительной антенны и измерения амплитуды сигнала измерительным приемником, соответственно, дБ. Отношение  $\Delta_i = \frac{P_c}{P_{ш}}$  с учетом того, что шумы антенны значительно выше собственных шумов анализатора излучения, на входе приемника (анализатора ЭМП) в полосе пропускания входного фильтра  $\Delta F = 1/\tau$ , (спектра), рассчитывается по формуле [52–54, 63]:

$$\Delta_i \approx \max \frac{2 \cdot n_j}{\Delta F_j} \cdot \sum_{\Delta F_j} \left( \frac{E_{ci}}{K_{a,i} \cdot \xi_{ri}} \right)^2, \quad (1.24)$$

где –  $n_j$  – количество измеренных спектральных составляющих, попадающих в  $j$ -й частотный интервал;  $\Delta F_j = f_{вj} - f_{нj}$  – граница частот частотных интервалов излучений СВТ, В/(м·Гц);  $K_{a,i}$  – калибровочный коэффициент антенны анализатора спектра (излучения) на  $i$ -й частоте, 1/м; Гц;  $T$  – период следования

пиксельных импульсов, с;  $\xi_{ri}$  – коэффициент ослабления сигнала на  $i$ -й частоте на трассе «СВТ – средство анализа (анализатора) ЭМП» для различных частот рассчитывается следующим образом [53, 54]:

– для  $f \leq 47,75$  МГц

$$\xi_{ri} = \begin{cases} r^3, & \text{если } r \leq \frac{47,75 \text{ МГц}}{f}; \\ \frac{47,75}{f} \cdot r^2, & \text{если } \frac{47,75 \text{ МГц}}{f} < r \leq \frac{1800 \text{ МГц}}{f}; \\ \frac{8,59 \cdot 10^4 \cdot r^2}{f}, & \text{если } r > \frac{1800 \text{ МГц}}{f}; \end{cases} \quad (1.25)$$

– для частоты  $47,75 \text{ МГц} < f \leq 1800 \text{ МГц}$ :

$$\xi_{ri} = \begin{cases} r^2, & \text{если } r \leq \frac{1800 \text{ МГц}}{f}; \\ \frac{1800 \cdot r^2}{f}, & \text{если } r > \frac{1800 \text{ МГц}}{f}; \end{cases} \quad (1.26)$$

– для  $f > 1800 \text{ МГц}$ :

$$\xi_{ri} = r, \quad (1.27)$$

где  $f$  – частота сигнала, МГц;  $r$  – расстояние «СВТ – измерительная антенна анализатора ЭМП», м; граничные частоты интервалов полосы пропускания  $\Delta F_j$ :

$$\Delta F_j = f_{vj} - f_{hj}; \quad f_{hj} = \frac{10^{-3}(j-1)}{\tau_{и}}; \quad f_{vj} = \frac{10^{-3}j}{\tau_{и}}, \quad (1.28)$$

где  $f_{hj}$  и  $f_{vj}$  – нижняя и верхняя частота  $j$ -го частотного интервала, соответственно, МГц;  $\tau_{и}$  – длительность импульса тестового сигнала.

Измерение  $E_{ci}$  предусматривает нахождение измерительной антенны от излучателя в ближней, промежуточной или дальней зонах в зависимости от  $\lambda$ :



ближняя зона (БЗ) –  $E_{ci} \approx 1/r^3$  (при  $r \leq \lambda/2\pi$ );  
 промежуточная зона (ПЗ) –  $E_{ci} \approx 1/r^2$  (при  $r \approx \lambda$ ); дальняя зона (ДЗ) –  $E_{ci} \approx 1/r$   
 (при  $r \approx 6\lambda$ ) и происходит в направлении максимального излучения СВТ (силовые линии вектора  $E_{ci}$  расположены в меридиональных плоскостях):  
 $E_\theta \xrightarrow{\theta=\pi/2} \max$  в экваториальной плоскости, а на оси диполя  $E_\theta = 0$ ;  
 $E_r \approx \cos \theta$  и достигает максимума на оси диполя, а в экваториальной плоскости  $E_r = 0$ .

В сферической системе координат  $E_{ci} = rE_r + \theta E_\theta + E_\varphi$ , где:

$$\begin{aligned} E_r &= -i \frac{I \exp(-jkr)}{2\pi\omega\epsilon_a} \left( \frac{1}{r^3} + \frac{ik}{r^2} \right) \cos \theta; \\ E_\theta &= -i \frac{I \exp(-jkr)}{4\pi\omega\epsilon_a} \left( \frac{1}{r^3} + \frac{ik}{r^2} - \frac{k^2}{r} \right) \sin \theta; \\ E_\varphi &= 0. \end{aligned} \quad (1.29)$$

С учетом волнового сопротивления среды без потерь  $\rho = \sqrt{\frac{\mu_a}{\epsilon_a}}$  и скорости распространения  $\left( c = 1/\sqrt{\frac{\mu_a}{\epsilon_a}} \right) E_\theta$  определяется следующим выражением:

$$E_\theta = \rho_0 I \left[ \frac{1}{4\pi r^2} - i \left( \frac{\lambda}{8\pi^2 r^3} - \frac{1}{2\lambda r} \right) \exp(-jkr) \right]. \quad (1.30)$$

где  $E_{ci1} = \rho_0 I \frac{1}{r^3}$ ,  $E_{ci2} = \rho_0 I \frac{1}{r^2}$ ,  $E_{ci3} = \rho_0 I \frac{1}{\lambda r}$ .

В БЗ, при  $|kr| \ll 1$ , выражения (1.29) преобразованы к виду:

$$\begin{aligned} E_r &= -i \frac{I}{2\pi\omega\epsilon_a} \cdot \left( \frac{1}{r^3} \right) \cos \theta; \\ E_\theta &= -i \frac{I}{4\pi\omega\epsilon_a} \left( \frac{1}{r^2} \right) \sin \theta; \\ E_\varphi &= 0 \end{aligned} \quad (1.31)$$

В ДЗ, при  $|kr| \gg 1$  или  $r \gg \lambda/(2\pi)$ :

$$E_0 = -i \frac{k^2 I l}{4\pi\omega\epsilon_a} \cdot \frac{\exp(-jkr)}{r} \cdot \sin\theta. \quad (1.32)$$

В ПЗ:

$$E_{ci} = A \sqrt{\left(\frac{\lambda}{4\pi^2 r^3} - \frac{1}{\lambda r}\right)^2 + \left(\frac{1}{2\pi r}\right)^2}, \quad (1.33)$$

где  $A = 0,5\rho_0 I \cdot r$  – энергетический коэффициент.

В общем случае,  $E_{c.i}$  можно определить как:

$$E_{ci} = \sqrt{\left(E_{ci1} - E_{ci3}\right)^2 + E_{ci2}^2}, \quad (1.34)$$

Графики зависимостей  $E_{ci1}$  от расстояния до точки наблюдения  $r$  на частотах 200 и 1000 МГц (рис. 1.29) показывают: вблизи источника преобладает квазистационарная составляющая –  $E_{ci1} \approx 1/r^3$  (1.32), в ДЗ  $-E_{ci3} \approx 1/r$ , а в точке  $r = \lambda/2\pi$ , все три составляющие равны. При уменьшении  $\lambda$  точка смещается в сторону источника, что означает уменьшение размера БЗ. При расстоянии от источника излучений до границы БЗ  $r_{\text{бл}} = \lambda/2\pi\xi$  ( $E_{ci1} = \xi E_{ci2}$ ). Для границы БЗ, так и для границы ДЗ:  $r_{\text{д}} = \xi\lambda/2\pi$  ( $\xi \approx 3...10$ ). Ширина ПЗ зависит от длины волны излучения  $r_{\text{пз}} = \lambda \frac{\xi^2 - 1}{2\pi\xi}$ : при  $\xi \geq 3$  ПЗ равна  $r_{\text{пз}} \approx \xi\lambda/2\pi$ .

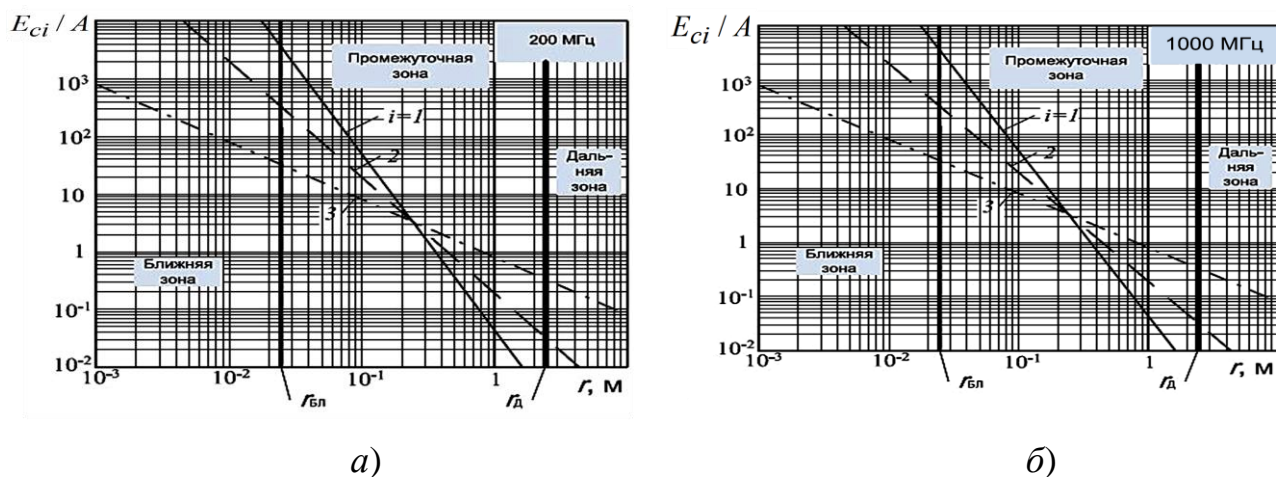


Рисунок 1.29 – Напряженности электрического поля ВЭМИН:

а) на частоте 200 МГц; б) на частоте 1000 МГц

1.3. Анализ основных задач, принципов и методов обеспечения функциональной устойчивости объектов критической информационной инфраструктуры при воздействии электромагнитных импульсов

1.3.1. Задачи и принципы обеспечения функциональной устойчивости объектов критической информационной инфраструктуры

Важным требованием, предъявляемым к КИИ, является поддержание *устойчивости функционирования* её информационной сферы в условиях возможных преднамеренных воздействий ЭМИ, чреватых нанесением ущерба системе и пользователям информации. Достижение этой цели должно осуществляться комплексным использованием всей совокупности организационных, правовых, инженерно-технических, аппаратно-программных средств обеспечения устойчивости и непрерывного контроля за эффективностью мер по их обеспечению [68].

*Задачами обеспечения функциональной устойчивости (ОФУ) КИИ являются [26, 34,35, 56–58]:*

– своевременный доступ легитимных пользователей к информационным ресурсам;

- целостность и подлинность распределенных информационных ресурсов, хранимой, обрабатываемой и передаваемой информации;
- поддержка доверенной общесистемной программной среды информационных автоматизированных систем.

*Принципы обеспечения функциональной устойчивости объектов КИИ [26, 34, 35, 56–58]:*

*а) системность* – учет всех взаимосвязанных, взаимодействующих и изменяющихся во времени элементов, условий и факторов на всех этапах функционирования во всех структурных элементах с учетом взаимодействия объекта с внешней средой при всех видах информационной деятельности и режимах функционирования;

*б) комплексность и развитие средств ОФУ*, предусматривающие согласование разнородных сил и средств при организации и построении целостной системы ОФУ (СОФУ), не содержащей слабых мест на стыках отдельных ее компонентов, а также учете перспектив, базирующихся на достижениях современных технологий;

*в) непрерывность* – принятие соответствующих мер на всех этапах жизненного цикла КИИ: разработка СОФУ должна вестись параллельно с разработкой объектов КИИ, что позволит учесть требования по функциональной устойчивости при проектировании архитектуры и создать более эффективные (как по затратам ресурсов, так и по стойкости) системы;

*г) гибкость управления и применения системы ОФУ* – система не должна нарушать процесс ее нормального функционирования;

*д) разумная достаточность уровня обеспечения устойчивости и простоты применения средств ОФУ КИИ* при котором затраты, риск и размер возможного ущерба были бы приемлемыми (задача анализа риска), что обеспечивает её эффективность (надежность и экономичность), а также создает удобства при её эксплуатации [56, 57];

### 1.3.2. Анализ существующих методов обеспечения функциональной устойчивости объектов инфокоммуникационных систем при воздействии электромагнитных импульсов

#### *Методы обеспечения функциональной устойчивости объектов критической информационной инфраструктуры при воздействии электромагнитных импульсов*

Методы и средства ОФУ объектов КИИ при воздействии ЭМИ должны включать полный перечень мероприятий, обеспечивающих необходимый уровень живучести и помехозащищённости в соответствии с ГОСТами и другими нормативно-техническими документами (НТД), регламентирующими устойчивое функционирование объектов, подразделяются на *организационные, конструкционные, схемотехнические, структурно-функциональные*, которые применительно к конкретному образцу электронного оборудования в зависимости от его функционального назначения предусматривают использование систем мониторинга электромагнитной обстановки [26, 45, 47, 49, 51, 52], а также общее экранирование сооружений, установку местных экранов помещений и экранирование оборудования (компонентов (СВТ) объектов КИИ) – размещение элементов СВТ, создающих электрические, магнитные и электромагнитные поля в пространственно-замкнутых конструкциях.

Экранирование электрического поля (*ЭП*) – диэлектрические экраны, имеющими высокую относительную диэлектрическую проницаемость, заземленные металлические экраны, что способствует нейтрализации электрических зарядов, которые стекают по заземляющему контуру сопротивлением не более 4 Ом [45, 47, 49–51, 74].

Экранирование магнитного поля (*МП*) предусматривает разделение на *низкочастотные* (до 10 кГц) и *высокочастотные МП* (от 100 МГц):

- *низкочастотные* шунтируются экраном за счет большей магнитной проницаемости материала экрана по сравнению с воздухом;
- *высокочастотное* вызывает возникновение в экране переменных индукционных вихревых токов, магнитные поля которых препятствуют распространению побочного магнитного поля.

Экранирование осуществляется на пяти уровнях: *элементов схем; блоков; устройств; кабельных линий; помещений* [49–51, 74].

Элементы схем с высоким уровнем ВЭМИН размещаются в заземленных металлических или металлизированных корпусах. Экранирование с помощью конструкций из листовой стали, металлических сеток и напыления начинается с уровня блоков.

Число уровней и материалов экранирования зависит от [51, 57, 59 – 62, 74]:

- *характеристик ЭМИ* (тип, частота и мощность);
- *наличия или отсутствия других методов обеспечения живучести и помехозащищённости* и должно предусматривать минимизацию затрат на экранирование (экранируются блоки управления, корпус выполняется из стали или металлизировается изнутри (покрывается токопроводящей заземленной пленкой); применение специальных заземлителей и рациональных схем заземления, специальных устройств молниезащиты, кабелей сети питания в свинцовой (алюминиевой) оболочке с высокой электрической прочностью изоляции (не менее 10 кВ) при включении разрядников на входах аппаратуры; рациональные схемные решения и оптимальная прокладка кабельных трасс, сетевого кабеля на участках небольшой длины в стальных трубах; минимизация длины кабельных вводов, особенно в вертикальной плоскости; заземление металлопокровов (оболочки и бронезащиты) кабелей цепей питания; использование кабелей с высокими экранирующими характеристиками, экранирование кабелей металлическими трубами и специальными кабелепроводами; симметрирование линий связи.

*Схемотехнические методы* предусматривают применение аппаратных устройств, предназначенных для снижения токов и напряжений, поступающих на входы устройств и блоков: газонаполненные разрядники (ГНР) и нелинейные ограничители перенапряжений (НОП), которые устанавливаются в соединительных муфтах и на входах кабельных линий и сооружений, варисторы, диоды, дефензоры, стабилитроны, запирающие фильтры нижних частот (ФНЧ), шунтирующие контуры и разделительные трансформаторы.

*К схемотехническим методам* также относятся [34, 45, 47, 51–62]:

а) *резервирование* промышленной сети автономными источниками электропитания;

б) *шунтирование* входных цепей технических средств с целью ограничения поступающих импульсов тока и напряжения на уровне полезного сигнала предусматривает применение:

– схемной защиты (2- или 3-х ступенчатая с применением разрядников, варисторов, специальных защитных ФНЧ и ограничительных стабилизаторов);

– устройств обеспечения устойчивости от импульсных перенапряжений (платы с разрядниками) и гальваническое разделение, понижающих и разделительных трансформаторов со специальными электростатическими экранами и датчиков Холла;

– балансных, компенсационных схем и оптоэлектронных развязок с высокой степенью развязки между входной и выходной цепями, позволяющих передавать электрические сигналы на большое расстояние после преобразования их в световые импульсы.

в) *отключение* входных цепей технических средств от магистральных линий: частичное увеличение входных сопротивлений защищаемых цепей с помощью дефензоров и полным отключением защищаемых цепей с помощью специальных предохранителей;

г) *комбинированные методы* предусматривают совместное применение разрядников и дефензоров с полупроводниковыми ограничителями перенапряжения [51].

Диаграмма применения устройств обеспечения функциональной устойчивости для цепей постоянного и переменного тока показана на рисунке 1.30, а в таблице 1.13 приведены электрические параметры аппаратных средств обеспечения устойчивости СВТ объектов КИИ при воздействии ЭМИ.

Наряду с конструкционными и схемотехническими методами обеспечения функциональной устойчивости объектов при воздействии ЭМИ используются структурно-функциональные методы, основанные на правильном выборе функциональных принципов построения компонентов (СВТ) объектов КИИ.

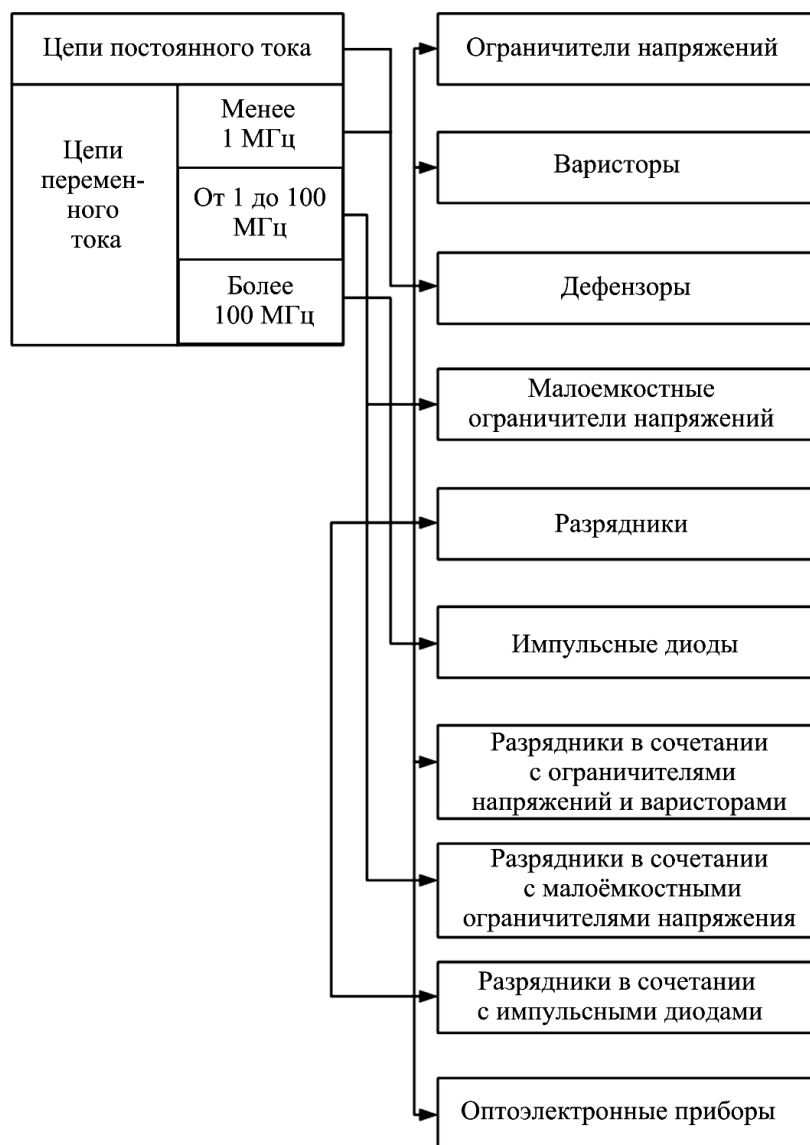


Рисунок 1.30 – Диаграмма применения устройств обеспечения функциональной устойчивости для цепей постоянного и переменного тока

Таблица 1.13 – Электрические параметры аппаратных средств обеспечения живучести СВТ объектов КИИ при воздействии ЭМИ

Основные электрические параметры	Тип аппаратных средств		
	Разрядники	Ограничители перенапряжений	Варисторы
Диапазон рабочих напряжений, В	70–10000	2,5–200	30–2000
Диапазон межэлектродных емкостей, пФ	2–15	100–10 000	300–20 000
Диапазон времени срабатывания, с	$0,4 \cdot 10^{-6}$ – $0,15 \cdot 10^{-6}$	$10^{-11}$ – $10^{-9}$	$10^{-9}$ – $0,5 \cdot 10^{-8}$



Живучесть и помехозащищенность объектов КИИ существенно зависит от исходных принципов, заложенных на начальном этапе проектирования, а разработка правильной функциональной схемы изделия содействует снижению чувствительности ЭС к действию ЭМИ или восстановлению ее работоспособности после воздействия [34, 58–62].

*К структурно-функциональным методам ОФУ объектов КИИ относятся:*

- изменение функциональных принципов построения электронных средств;
- резервирование блоков критичных электронных подсистем;
- введение резервных блоков информации, имеющих защищенность выше, чем у рабочих устройств, а также введение в схемы дополнительных формирующих устройств и развязывающих цепей;
- размыкание цепей в нерабочем состоянии и введение в состав СВТ датчиков ЭМИ, используемых для блокирования нежелательных эффектов и для обнуления цепей, в которых появились ложные сигналы (далее при описании структурно-функциональных решений будут предложены устройства из реализующие [34, 49–51, 73–75].

## **Выводы по главе 1**

Актуальность исследуемой проблемы предопределена возможностью и фактами воздействия электромагнитными импульсами по объектам, обеспечивающим жизнедеятельность населения для дезорганизации правительственных и военных систем управления, экономической и транспортной инфраструктуры, что может приводить к катастрофическим последствиям и наступлению коллапса во всех сферах жизнедеятельности общества на обширной территории. Поражающее воздействие ЭМИ проявляется в разрушении, плавлении и выгорании металлизации контактных дорожек при напряженности электрического поля электромагнитного импульса порядка 1 кВ/м, что влечет за собой сбои, отказы и деградацию параметров ППКЭ компонентов объектов КИИ и информационных систем, искажению обрабатываемой информации, за счет возникающих в ин-

формационных сетях внутренних электромагнитных излучений и наводок, и в итоге приводит к невозможности обеспечения достоверности и непрерывности предоставляемых информационных услуг потребителям. Необходимо также отметить недостаточную устойчивость информационно-управляющих систем с автоматизированным управлением, регулированием и контролем жизненно важных отраслей экономики.

В ходе проведенного в работе анализа выявилась неэффективность многократного дублирования и резервирования оборудования объектов КИИ, несоответствие объемов рационального резерва и номенклатуры запчастей, численности эксплуатационных подразделений, приводящее при воздействии ЭМИ.

Таким образом, главной задачей СОФУ объектов КИИ при воздействии ЭМИ является определение комплекса организационно-технических мер, обеспечивающих предотвращение катастрофических отказов ППКЭ компонентов (СВТ) объектов КИИ и позволяющих гарантировать высокую степень живучести и помехозащищённости электронных систем. Данные положения и анализ, проведенный в первой главе, определяют необходимость проведения дополнительных исследований, связанных с формированием и обоснованием разработки методологии математического моделирования и постановки задачи, связанной с обеспечением живучести и помехозащищённости объектов КИИ в условиях воздействия ЭМИ.

**ГЛАВА 2. ТЕОРЕТИКО-МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ  
ПОСТРОЕНИЯ СИСТЕМЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ  
ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ОБЪЕКТОВ  
КРИТИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ИМПУЛЬСОВ**

2.1. Научные предпосылки разработки методологии обеспечения функциональной устойчивости объектов критической информационной инфраструктуры при воздействии электромагнитных импульсов

Исследования и опыт практических задач показали [26, 34, 35, 56–62], что обеспечение функциональной устойчивости объектов КИИ при воздействии ЭМИ требует создания целостной системы, базирующейся на строгой организации и управлении и осуществления совокупности научно-технических и организационных мероприятий, применения специфических средств и методов ее обеспечения. Данная проблема объединяет совокупность вопросов обеспечения *живучести* и *помехозащищённости* объектов КИИ в условиях совершенствования известных и появления качественно новых видов опасностей и возникающей необходимости, в связи с этим пересмотра традиционных подходов и технологий при решении данных совокупности.

К сожалению, в настоящее время единая научно-методическая база, способная обосновать решение данных вопросов, находится на стадии становления. Причиной этого являются трудности как общего характера, встречающиеся при формировании любой сколько-нибудь сложной методологии, так и специфические, связанные с особенностями проблемы ее функционирования.

*Группа факторов реализации системы обеспечения устойчивого функционирования объектов критической информационной инфраструктуры при воздействии электромагнитных импульсов*

Обеспечение функциональной устойчивости объектов КИИ помимо оценки внешних воздействий предусматривает определение опасностей в зависимости от способов их реализации. При этом необходимы их классификация с оценкой конкретных параметров и определение мероприятий, предназначенных для их оптимального применения. Структура объектов КИИ предопределяет комплексность организационных и технических мер, которые необходимо предпринять с целью обеспечения их функциональной устойчивости в реальных условиях функционирования, и рассматривает как основное и главное требование в осуществлении эффективного противодействия возникающим опасностям [1–8, 26, 34, 35, 58–62]. Система ОФУ должна представлять собой *совокупность целенаправленных действий или математическое множество, область определения подмножеств которого может пересекаться или совпадать при различных областях изменения.*

Если под *функцией* понимать цель ОФУ, а под *аргументом* – варианты действий, то мероприятия по достижению цели является многозначной функцией. В то же время область изменения ее функции может быть достаточно жестко определена, исходя из поставленных целей. В любой организационно-технической системе (ОТС) можно выделить *группу факторов воздействия и реализации, а также математической поддержки* (рис. 2.1).

*Группу факторов воздействия* составляет как электромагнитная обстановка, так и реализация СОФУ – это априорные данные об исходных характеристиках объектов КИИ.

*Группа математической поддержки* объединяет факторы, связанные с математическим аппаратом обработки поступающей информации в виде априорных и апостериорных данных о самой системе (внутренняя информация) и условиях ее функционирования (внешняя информация), показатели качества функционирования системы, требования, критерии, методы и алгоритмы.

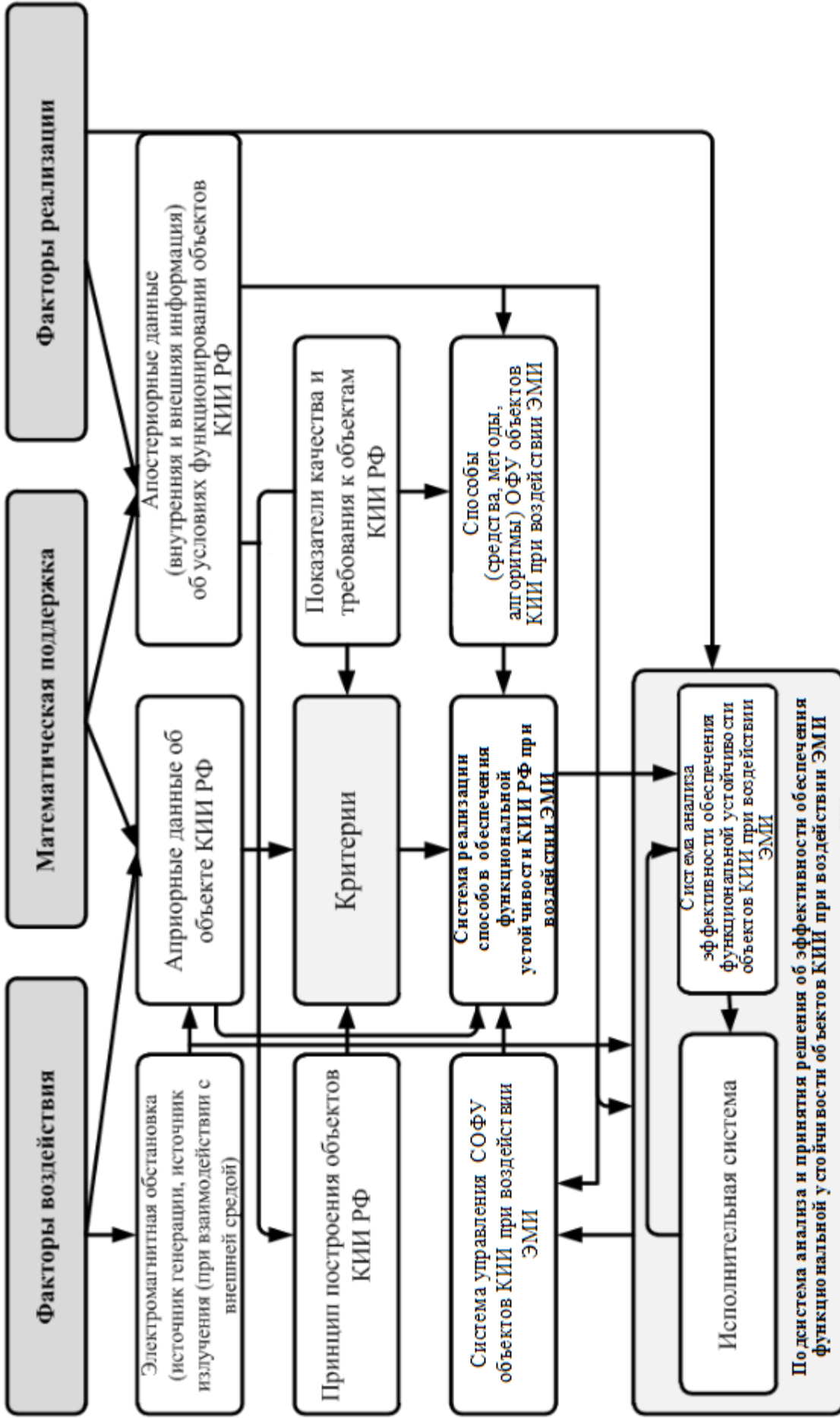


Рисунок 2.1 – Группа факторов реализации системы обеспечения функциональной устойчивости объектов критической информационной инфраструктуры при воздействии электромагнитных импульсов

Проведенный анализ [63–65] показывает, что в настоящее время отсутствует единый взгляд как на принцип выбора, так и разработки критериальных оценок.

*Группу факторов реализации* составляют способ реализации алгоритма ОФУ при воздействии ЭМИ, система принятия решения и исполнительная система, принцип построения КИИ.

Для оценки эффективности функционирования системы применяют два аспекта: *внутренний*, определяющий, насколько «близко» измеряемые параметры системы соответствует требуемым, и *внешний* – по определению вклада в достижение цели функционирования вышестоящей системы (суперсистемы). Иными словами, он позволяет оценить, насколько прирост в эффективности функционирования той или иной *подсистемы* влияет на изменение эффективности функционирования всей *системы* (суперсистемы) [63, 64].

С учетом иерархического построения КИИ и требований к оценке эффективности установлено, что верхние уровни формируют требования к качеству функционирования нижних уровней для достижения требуемого ресурса верхних уровней и коррекцию управлений, принимаемых на нижнем уровне. Применительно к проблеме ОФУ на первый план для внутренней оценки эффективности системы применяются критерии, основанные на показателях живучести и помехозащищённости как отдельных объектов, так и КИИ в целом, а понятие ресурса в данном случае дает возможность выработать критерии сравнения различных систем, участвующих в процессе обработки информации и ОФУ.

Имеющиеся на настоящий момент средства разработки методологии как аппарата применения накопленных теоретических знаний в области практической деятельности объектов КИИ, находящиеся в условиях деструктивных воздействий различной природы и представляющие собой инструмент, обеспечивающий синтез СОФУ при использовании различных математических методов моделирования, как совокупности исследовательских средств, необходимых для решения научной проблемы, реализует лишь индуктивный подход к решению поставленной в работе проблемы [65]. Это не всегда приводит к получению конечного результата, приемлемого по критериям рациональности или оптимальности. Причина противоречия заключается в том, что каждый уровень оценки

предполагает просмотр довольно значительного количества вариантов организации СОФУ, которые могут быть рассчитаны с помощью следующего выражения [64, 65]:

$$N_B = \prod_{m=1}^{M_y} n_m, \quad (2.1)$$

где  $N_B$  – общее количество вариантов организации СОФУ объектов КИИ при воздействии ЭМИ;  $n_m = k_m(k_m - 1)$  – количество вариантов организации системы, предъявляемых для оценки на  $m$ -м уровне;  $M_y$  – количество уровней оценки;  $n_m$  и  $k_m$  – количество неделимых компонентов сложной системы, изменение отношений между которыми влияет на показатель оценки  $m$ -го уровня.

Критериальная часть разрабатываемой методологии должна опираться на общетеоретические подходы [65, 66]. При этом под *критерием* понимается *совокупность определенных правил, обеспечивающих выбор из множества альтернативных вариантов некоторого подмножества, удовлетворяющего условиям пригодности, оптимальности или превосходства*, что зависит от характера решаемой задачи, поставленной цели и содержания объекта исследования и органично вписывается в действующее методологическое обеспечение, разработанное для решения поставленной в работе проблемы. Это предполагает наличие таких элементов, как модели объекта исследований, оценки качества (эффективности) функционирования системы (процесса) и блока закономерностей системного характера. Обозначенный подход позволит, *во-первых*, обеспечить связь с другими разделами науки, *во-вторых*, исходя из заданных требований, синтезировать материальную систему (процесс), либо распределять ресурс этой системы в интересах ее отдельных составляющих, а *в-третьих*, осуществить верификацию отдельных результатов решения проблемы с помощью известных теоретических или математических моделей [65–67]. Специфика указанного подхода состоит в том, что наличие указанных аспектов для нее обязательно. При невыполнении условий, предусмотренных данным подходом, нарушаются функции методологии как инструментария развития знаний в исследуемой области.

Разрабатываемые методологии, как инструменты научного познания, в большинстве случаев, используют комбинированный подход и предполагают выдвижение *гипотез*, составляющих полную группу условий, образующие один из элементов теории, выполняющего систематизирующую функцию исходной формы знаний. Они выступают в форме проблемного знания, составляющего часть исходных предпосылок для разработки методологии. Формирование гипотез опирается на комбинации с *эмпирическим или гипотетико-дедуктивным* методами и базируется на результатах исследований не только в данной предметной области, но и других предметных областях, изучающих закономерности и тенденции развития материальных носителей, определяющих процесс формирования знаний в области построения теорий в исследуемых областях науки. В отличие от аксиомы она не имеет абсолютной силы, но на качественном уровне адекватна сущности физических явлений и выполняет роль переменной величины, а не константы. Помимо основной функции гипотезы выполняют роль дополнительных ограничений по объекту и предмету исследований и конкретизируют цель исследований с определением условий их применимости при проведении исследований [1, 4–6, 9].

Архитектура построения методологии, как основного инструментария исследования, включает ряд уровней, каждый из которых или их комбинация обеспечивает проверку группы гипотез (*гипотетико-дедуктивный метод*), объединенных по общности содержания, природе проявления, глубине и логической силе. В соответствии с целью исследований и решаемой проблемой выделены следующие уровни: *функциональный, морфологический, информационный* [65–68, 78].

В свою очередь, разработка математических методов моделирования в рамках формируемой методологии базируется на объективных закономерностях с выбором наиболее явного типа функционально-информационной связи между элементами моделей. Это необходимо как для изучения и исследования объекта, так и применения их в качестве теоретического базиса решения научной проблемы и определения их эффективности в рамках достижения цели исследования. С учетом этого задачей математического моделирования является восполнение недостающих связей функциональных элементов объекта исследований, выявление основных закономерностей процесса построения СОФУ, накопления



статистики применения до объема, достаточного для доказательства или количественного обоснования выдвигаемых гипотез математизированными теориями [65, 66, 68].

Анализ развития теории и практики разработки методологий показывает, что ее теоретические конструкции опираются на два основных метода – *математический* и *эмпирический* (в широком смысле), подробно описанных в работе Баженова Л. Б. [67].

*Математические теории*, по Ляпунову А. А., делятся по степени развитости на *аксиоматические теории* теоретико-множественного уровня и *логико-математические* теории (дедуктивные теории), широко использующие количественный язык и создающие математические модели для описания и объяснения соответствующего эмпирического материала [65–68, 78].

*Эмпирические теории* (в широком смысле) по степени развитости делятся на *математизированные* и *гипотетико-дедуктивные*.

*Математизированные* теории ориентированы на создание аппарата, исследующего внутренние аспекты технических систем: *новые положения в рамках разрабатываемой методологии должны основываться на принятии способов формирования умозаключений или доказательстве непротиворечивости выдвигаемых аксиом, которые выполняют роль констант для заданных условий функционирования системы, а получаемая при этом методология представляет собой форму знаний о предметной области, последующее развитие которой требует коррекции состава или содержания аксиом* [65–68].

Второй вид математизированных теорий – *гипотетико-дедуктивные* – достаточно часто используются при формировании теоретических конструктов. Их широкое применение обусловлено недостатком исходных данных для разработки методологий или их неполной априорной определенности [67 – 71].

С точки зрения потенциала реализуемых функций, задачи обеспечения функциональной устойчивости (ОФУ) объектов КИИ имеют ярко выраженную неоднородность. Анализ результатов исследований, представленных в работах [56, 58–63, 72, 73], показывает, что в теории оценки качества функционирования инфокоммуникационных систем можно выделить два основных подхода к решению подобных задач. *Первый* определяет их последовательное решение снизу

вверх и обеспечивает переход от частных показателей оценки к обобщенным критериям. *Второй* – заключается в постулировании обобщенного показателя на одном из уровней и выделении для него полной иерархии задач с расчетом необходимых частных показателей оценки. В отношении ОФУ последний подход целесообразно использовать при формировании системы критериев оценки и правил принятия решений о выборе альтернативного варианта организации системы. Информационная база разработки методологии представлена на рисунке 2.2.

Построение СОФУ объектов КИИ при воздействии ЭМИ предполагает воздействие на свойства и функции основных и обеспечивающих подсистем. Для разрабатываемой методологии данный факт выступает в качестве доминанты, определяющей её разработку, с позиций внешнего информационного обеспечения, что определяет конечный целевой эффект, на выявление которого направлена оценка эффективности мероприятий по обеспечению устойчивого функционирования объектов, а синтез внутренних аспектов – на пути и способы достижения поставленных перед системой целей.



Рисунок 2.2. – Информационная база разработки методологии математического моделирования обеспечения функциональной устойчивости объектов критической информационной инфраструктуры при воздействии электромагнитных импульсов

Предложенный подход обеспечивает разработку методологии в виде некоторой иерархической системы взаимосвязанных математических методов моделирования, согласованных по уровням и задачам [65–72, 74–77].

При оптимизации комплекса мероприятий в некоторых случаях может наблюдаться конфликт между свойствами ее материальных носителей в плане их организационного построения. Для исключения подобных ситуаций при проведении оценки устойчивости требуется разработка определенного регламента приоритетов и целей. В этой связи аппарат методологии имеет два аспекта: *внешний* и *внутренний*: *внешний* ориентирован на оценку функциональной устойчивости по показателям качества внешних систем либо эффективности их функционирования в ходе эксплуатации объектов; *внутренний* – на исследование строения КИИ и обеспечение целенаправленного поиска решения проблемы в рамках организационно-технического построения и взаимодействия ее материальных носителей. В качестве операционной среды для внутренних аспектов методологии выступает информационное поле, создаваемое информационно-телекоммуникационными системами и сетями КИИ.

2.2. Разработка методологической схемы решения научной проблемы обеспечения функциональной устойчивости объектов критической информационной инфраструктуры при воздействии электромагнитных импульсов и постановка задачи исследования

В связи с рассмотренными теоретическими предпосылками разработки методологии как способа научного познания и проведенного в рамках первой главы анализа необходима формулировка этапности её разработки и декомпозиции на ряд научных задач, для решения поставленной в работе проблемы, что позволит достичь цель исследования.

Методологическая схема решения научной проблемы (рис. 2.3) позволяет исследовать и изучить предметную область.

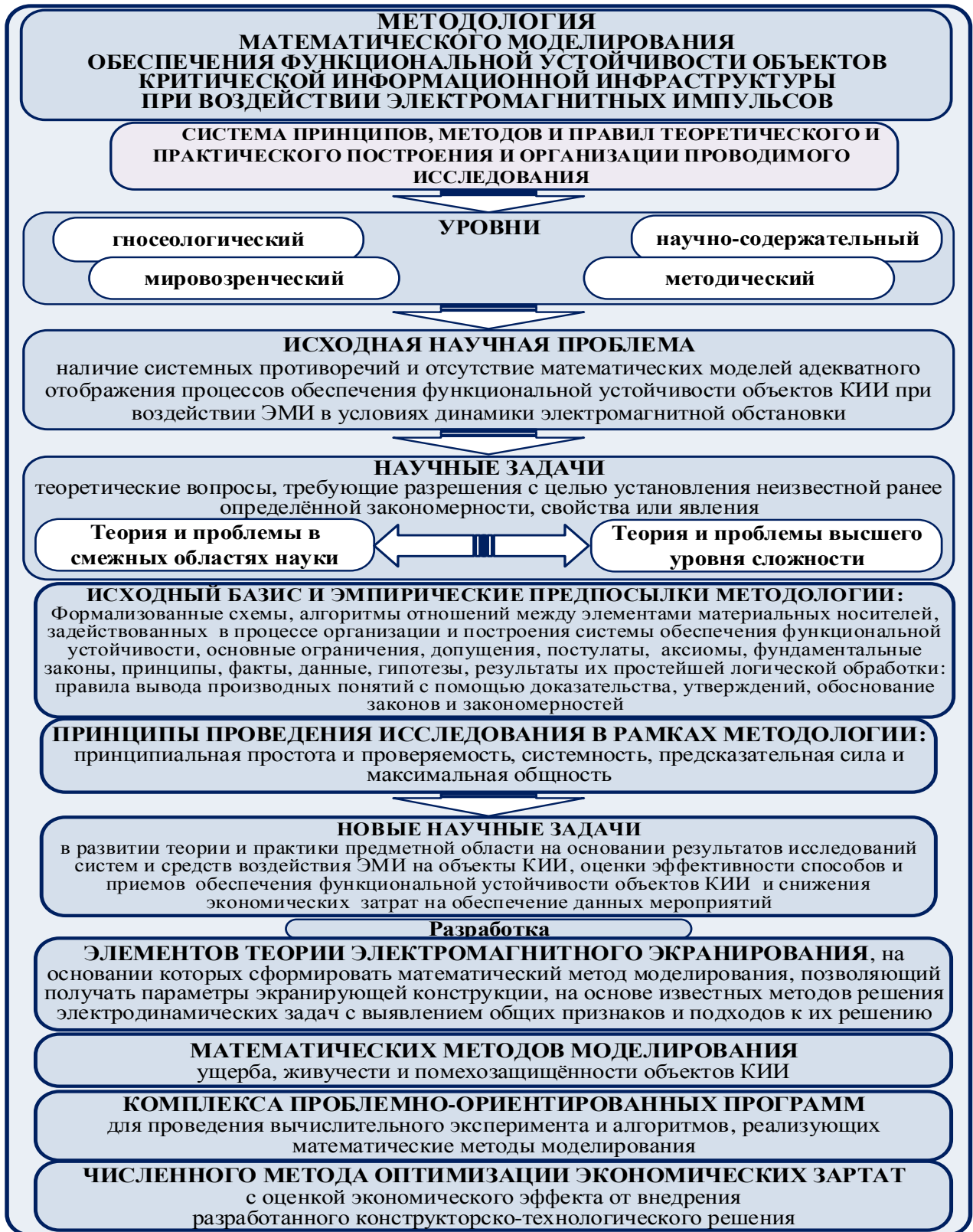


Рисунок 2.3 – Методологическая схема решения научной проблемы обеспечения функциональной устойчивости объектов критической информационной инфраструктуры при воздействии электромагнитных импульсов

Согласно представленной схеме многообразию методов достаточно велико, а сами они весьма специфичны, причем существует достаточное количество публикаций, их описывающих.

Исходным пунктом в разработке элементов предлагаемой методологии является обоснование её формы и типа. Анализ показывает, что предмет исследования находится на пересечении нескольких областей науки, которые находятся в состоянии постоянного движения и развития, образуя тем самым внешнюю систему факторов, позволяющих определить научные предпосылки и условия разработки указанной методологии. Основная трудность при таком подходе заключается в построении формализованной схемы доказательства ввиду многосвязности проводимых аналогий и ассоциаций. Эта проблема решается методами количественного обоснования глубины (силы) гипотез и диспозиции результатов по определенным методологическим правилам.

Система полученных правил, по сути дела, и составляет основное содержание методологии. Разработка конкретного правила опирается на предшествующий опыт. Проверимость и применимость представляемых утверждений обычно обосновываются корректностью применяемого математического аппарата и физической прозрачностью решения [67–71, 74, 78].

Разрабатываемая методология математического моделирования ОФУ объектов КИИ при воздействии ЭМИ направлена на разрешение системных противоречий в целях реализации принципов живучести и помехозащищённости данных объектов с учётом динамики электромагнитной обстановки, базируется на комплексном исследовании проблемы, включающим анализ и синтез структур многофункциональных средств обеспечения устойчивости, отличающуюся интегральной оценкой показателей качества их функционирования на основе критерияльных требований, предъявляемым к объектам КИИ в условиях воздействия ЭМИ и включает в себя разработанные:

– элементы теории электромагнитного экранирования, на основании которых формируется математический метод моделирования экранирующей конструкции, обеспечивающей устойчивое функционирование компонентов объектов КИИ при воздействии ЭМИ, **базирующийся** на учете функционала энергии

(потенциала) электромагнитного поля, **отличающийся** от существующих эффектом обратимости, электрофизических свойств радиопоглощающих полимерных композиционных материалов, формирующих слои в многослойной конструкции, а также формы, количества и расположения в ней технологических неоднородностей на основе известных математических моделей, применяемых для решения электродинамических задач с выявлением общих признаков и подходов к их решению.

– Математический метод моделирования ущерба, наносимого объектам КИИ при воздействии ЭМИ, **базирующийся** на иерархическом ранговом подходе, **отличающийся** учетом атрибутов функциональности объекта, подвергающегося воздействию и предусматривающего систематизацию их критичности с использованием экспертной системы для нахождения функции максимального предотвращенного ущерба при минимизации финансовых затрат.

– Математический метод моделирования системы ОФУ объектов КИИ при воздействии ЭМИ, учитывающий условия их функционирования (п. 1 паспорта научной специальности), включающий:

– математический метод моделирования живучести объектов КИИ при воздействии ЭМИ, **базирующийся** на способах и приемах расчета условной вероятности «попадания» ЭМИ (преодоления им различного рода «препятствий»), **отличающийся** учетом надежности генератора ЭМИ и времени теплового рассеивания (переходных процессов) при тепловом вторичном пробое диэлектрика конструктивных элементов компонентов КИИ, обеспечивающий снижение уровней электромагнитных полей до безопасных величин;

– математический метод моделирования помехозащищённости объектов КИИ при проявлении внутренних электромагнитных излучений и наводок, **базирующийся** на аппарате теории обнаружения наведенного сигнала, **отличающийся** учётом аддитивности наводок электромагнитных излучений и собственных наводок конструктивного элемента КИИ.

– Комплекс проблемно-ориентированных программ, позволяющий проводить вычислительные эксперименты на основе разработанных алгоритмов, реализующих сформированные математические методы моделирования, а также

технологический испытательный стенд для проверки адекватности математической модели экранирующей конструкции на основании результатов натуральных экспериментов с обоснованием и тестированием эффективных вычислительных методов с применением современных компьютерных технологий.

– Численный метод оптимизации экономических затрат в рамках обеспечения функциональной устойчивости объектов критической информационной инфраструктуры в условиях воздействия ЭМИ с целью максимального предотвращения ущерба, **базирующийся** на интеллектуальной технологии оптимизации и стабилизации систем, основанный на применении теории игр (симплекс-метод), **и отличающийся** возможностью выбора вариантов обеспечения их функциональной устойчивости.

2.3. Постановка задачи на разработку математических методов моделирования, составляющих и обосновывающих методологию математического моделирования обеспечения функциональной устойчивости объектов критической информационной инфраструктуры при воздействии электромагнитных импульсов

Как было установлено в первой главе работы, одним из достаточно эффективных методов ОФУ объектов и находящихся в них компонентов при воздействии ЭМИ является экранирование. За последние 30-40 лет экранирующие конструкции (ЭК) изменились от простых устройств до сложных технических систем. С учетом различных подходов к классификации ЭК, основным критерием эффективности их применения следует считать происходящие в них изменения электромагнитных полей. Представленная на рисунке 2.4 классификация позволяет проследить общую тенденцию построения ЭК в рамках развития теории электромагнитного экранирования, выполнить ее декомпозицию и определить специфику проблемы применительно к изменению электромагнитной обстановки. Существующие методы решения такой проблемы лежат в различных областях знаний, накопленных в процессе развития науки, техники и технологии конструкторских разработок.

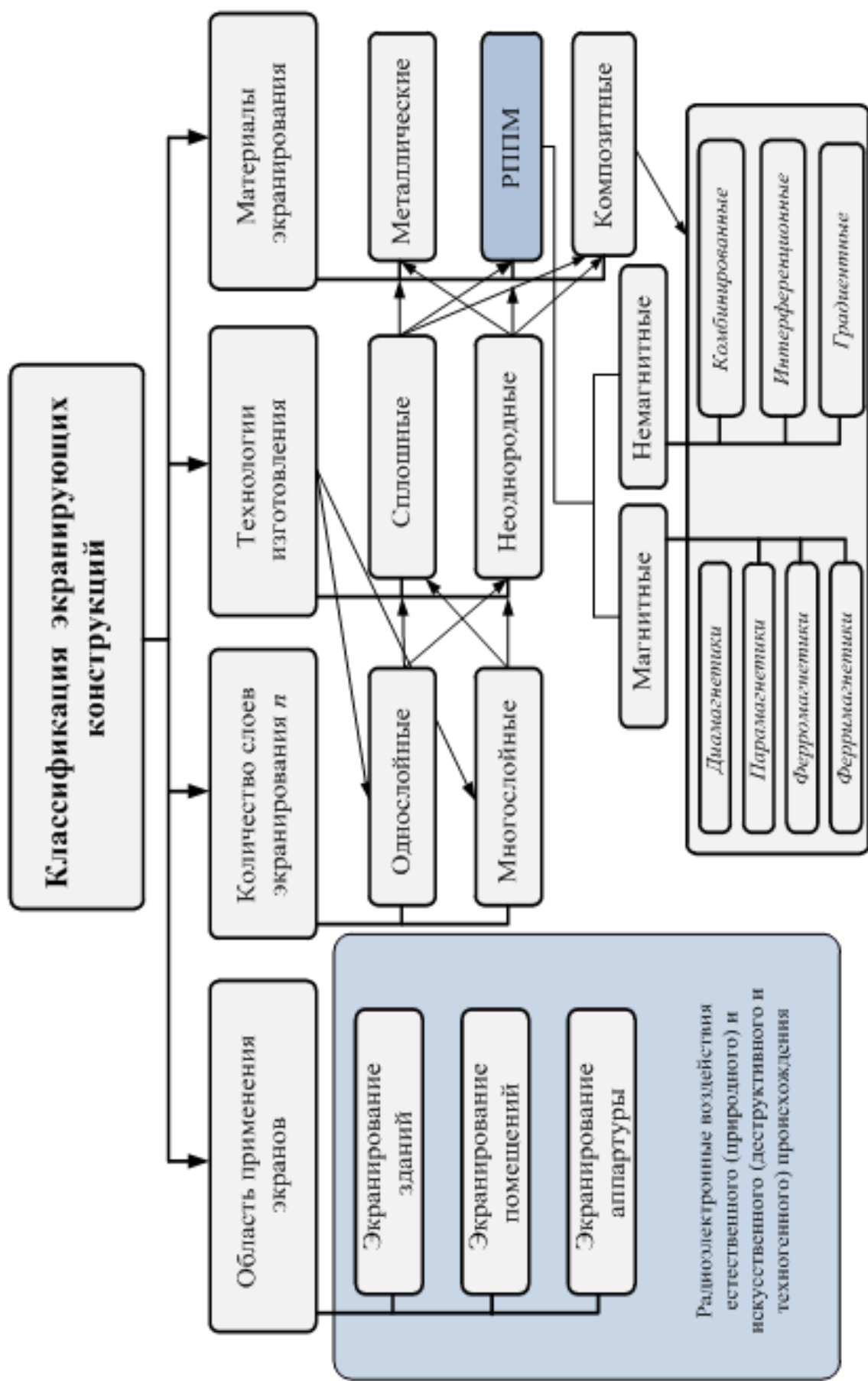


Рисунок 2.4 – Классификация позволяет проследить общую тенденцию построения ЭК в рамках развития теории электромагнитного экранирования



Разработка математических методов моделирования, характеризующихся зависимостью одних элементов от других и выводимостью содержания математических конструкций по определенным методологическим правилам, возможна на основе исходного базиса утверждений, понятий и аксиом электродинамики и теории экранирования.

Анализ показывает, что ядро данного блока могут составлять следующие утверждения [64, 73, 75-77]:

– обеспечение функциональной устойчивости компонентов объектов КИИ может быть достигнуто путем обнаружения возможного воздействия ЭМИ на физическом уровне и предотвращения последствий, при реализации мероприятий повышения живучести и помехозащищённости объектов;

– ограниченность массогабаритных показателей и минимальность финансовых затрат при приемлемых показателях качества обеспечивает востребованность и конструктивно-технологическую реализуемость экранирующих структур двойного назначения;

– функциональная предопределенность представленных задач требует решения ряда проблем, связанных с необходимостью развития теории ЭМЭ с решением внешней и внутренней задач электродинамики, сводящихся к определению токов и напряжений на поверхности отражения, рассеяния и поглощения полей в экранирующей системе, а также обеспечением требуемых характеристик при неопределенности электромагнитной обстановки относительно структуры экранирующих конструкций.

Анализ практики разработки и современное состояние теории и конструктивно-технологических решений построения ЭК показывает, что отсутствие любого из представленных выше утверждений приводит к невозможности ОФУ объектов техническими мерами на электромагнитном уровне в условиях изменения электромагнитной обстановки.

По современным взглядам, проблема экранирования делится на две части – *теоретическую* и *конструктивно-технологическую* [73–80]: *теоретическая*, в свою очередь, декомпозируется на *внутреннюю* и *внешнюю задачи электродинамики*, решаемые в практике построения ЭК, а независимый в этом вопросе подход способствовал формированию двух основных направлений, предусмат-

ривающих сохранение эффективности экранирования, независимо от того, расположен внутри него источник поля или защищаемая область пространства с учетом эффекта обратимости электромагнитных экранов, что имеет большое практическое значение, определившее применение теории ЭМЭ в целях обеспечения живучести и помехозащищённости объектов. В практике построения электромагнитных экранов данные направления выразились в поиске конструктивных решений их проектирования и методов их анализа с целью оптимизации параметров экранирования по заданным требованиям.

Развитие систем генерирования ЭМИ, наличие мобильных и портативных генераторов ЭМИ потребовало совершенствования экранирующих конструкций (ЭК) в направлении реализации технологии двойного назначения (ТДН), что позволит реализовать новые возможности в повышении живучести и помехозащищённости объектов в условиях изменения динамики электромагнитной обстановки.

С усложнением структуры КИИ и объектов одновременно усложняется и задача определения последствий влияния деструктивных факторов и тех мероприятий, которые необходимо предпринять для обеспечения устойчивого функционирования объектов КИИ в реальных условиях. Производимые до настоящего времени исследования по оценке воздействия ЭМИ на различные компоненты объектов КИИ, включая электронные средства сетей связи различного назначения, были направлены в основном на обеспечение их живучести в условиях ядерного взрыва, электростатических разрядов и промышленных импульсных помех [51].

Разработка подобных ЭК приводит к необходимости использования новых научно-теоретических подходов к анализу их характеристик и обоснования их взаимной коррелированности.

Основными проблемами, возникающими при разработке ЭК в целях реализации ТДН, являются:

- совершенствование структуры экрана;
- обоснование применяемых для конструирования экрана материалов и их ЭФС;

– устранение проникновения полей ЭМИ через технологические неоднородности экрана.

Одним из основных стимулов развития теории ЭМЭ является недостаточное научное обоснование конструкторских решений по применению ТДН в рамках комплексного решения проблемы построения ЭК, вследствие чего возникает необходимость развития теории электромагнитного экранирования.

Над данной проблемой в настоящее время работают коллективы: АО «31 ГПИСС», г. Санкт-Петербург); Московского Государственного института электроники и математики, г. Москва; Федерального государственного унитарного предприятия «Московский научно-исследовательский радиотехнический институт» (ФГУП МНИРТИ), г. Москва. Существующее методическое обеспечение направлено на разработку методов оценки стойкости телекоммуникационных систем (ТКС) к воздействию СШП ЭМИ, а также методов и средств оценки воздействия ЭМИ на телекоммуникационные сети – кабельные линии и электронные системы коммутации АТС, оценку устойчивости терминалов систем контроля доступа и видеонаблюдения к воздействию сверхширокополосных (СШП) ЭМИ.

Однако, несмотря на полноту имеющихся для исследования данных, на сегодняшний момент разработка научно-методического аппарата исследования для оценки воздействия ЭМИ на компоненты объектов КИИ, а также методов по обеспечению их устойчивости имеет свою специфику, связанную с анализом условий их функционирования, характеристик средств и способов реализации электромагнитных воздействий, указанных в первой главе.

Следовательно, оценка и анализ проблемы моделирования ЭК показывает, что в практике конструктивно-технологических решений появился ряд новых проблем и противоречий, разрешение которых требует систематизации знаний и фактов в этой области, конструктивной их переработки и построения содержательного математического метода моделирования.

В основу задачи развития и совершенствования теории ЭМЭ положена проверка конструктивности гипотез, предполагающих наличие некоторого «образца», построенного на основании опыта разработки и практической реализа-

ции методов с учётом их определённой степени сходства или энтропии в конечные моменты состояния.

Оценка данных об объекте, полученных в процессе разработки способов построения ЭК на основе известных и разрабатываемых математических моделей и методов, состоит в оценке их последующей применимости в аспекте эффективности. В последующем, полученные результаты должны составить ядро для формирования закономерностей как общего, так и системного характера, проявляющихся в процессе функционирования объектов и их совмещения (комплексирования) с рассматриваемыми объектами. В этом плане методы комплексирования и оценки качества ЭК по показателям эффективности при возможном сохранении независимого относительно известных методов характера должны структурно войти в виде конструкта в разрабатываемую теорию и обеспечить связь между теоретической формой знания и практикой их конструктивно-технологического проектирования (КТП) и последующего практического применения, что предусматривает анализ содержания естественнонаучных и математизированных теорий, а также теоретических конструкций, применяемых в решении задач теоретического и прикладного характера [65, 68, 75]. Учитывая специфику и цель решаемой проблемы, соответствующую этапам разработки и КТП ЭК и имеющегося теоретического базиса исследования данных конструкций, элементы теории и методологии синтеза, а также оценки их качества, рассматриваются и раскрываются в рамках как уже применяемых теоретических методов, так и методов их дополняющих [65, 68, 71, 75].

В соответствии с целью и содержанием исследуемой проблемы элементы теории ЭМЭ разрабатывались, исходя из требований, выступающих в качестве наиболее общих методологических правил и принципов, в рамках которых решается теоретический аспект проблемы: *системность, максимальная общность, простота, проверяемость и предсказательная сила.*

*Системность* – наличие обоснованного компромисса между двумя взаимоисключающими тенденциями: сосредоточение усилий на решении наиболее актуальных задач, предусматривающей сужение области исследований и учет большего количества внешних факторов, определяющих условия и внутренние процессы функционирования ЭК. Как правило, это достигается введением мно-

гоуровневой системы ограничений, позволяющих фиксировать область исследований в ограниченной плоскости, не нарушая наиболее существенных системных связей исследуемого объекта как внутренних, так и внешних [68, 71].

*Максимальная общность* – выбор и обоснование форм используемой и разрабатываемой теории как процесса развития знаний в области проведения исследования через функции связи и частичного взаимного поглощения теоретических конструктов, предлагаемых и существующих в других разделах науки.

*Простота* – разделение на ряд более простых категорий (элементов) независимо от длины и сложности логической или теоретической цепочки.

*Проверяемость и предсказательная сила* – обусловлены широким спектром задач, для решения которых разрабатываются элементы теории ЭМЭ. Разрабатываемая теория и её элементы направлены на решение расчетных задач, а требуемая глубина прогноза достигается соответствующей композицией математических моделей, а точность прогноза – объемом статистики, получаемой при моделировании процесса управления параметрами ЭК.

Разрабатываемая методология в рамках проводимого исследования и архитектура формирования математической модели объекта остаются постоянными при любых изменениях внешнего (воздействующего) фактора и выступают как инвариант теоретической конструкции.

На основании вышеизложенного можно утверждать, что любая известная или разрабатываемая теория в рамках проводимых исследований в конечном итоге предусматривает систематизацию и объяснение полученного знания и новой информации о предметной области. Перечень требований и функций любой теории должен отражать методическую направленность и характер решаемых задач [65–68].

Проблема ОФУ объектов КИИ и функционирующих в них компонентов (СВТ, линейное и сетевое оборудование) при воздействии ЭМИ носит системный и комплексный характер как в техническом, так и теоретическом плане.

При решении данной проблемы на первый план выдвигаются вопросы, которые определяют:

– анализ параметров и оценку воздействия ЭМИ на совокупность электрически связанных технических систем и инженерных коммуникаций с учетом их электромагнитных связей и взаимных влияний;

– разработку общих мер ОФУ экранирование и применение местных экранов, а также перечень и порядок сбора исходных данных для оценки состояния элементов ЭК;

– методы оценки соответствия фактической устойчивости объектов КИИ при воздействии ЭМИ предъявляемым требованиям.

Для уяснения сущности проблемы ОФУ объектов КИИ при воздействии ЭМИ в рамках математического моделирования ЭК обратимся к рисунку 2.5. Указанная формализованная структура содержит управляющую и управляемую подсистемы ОФУ [72, 76, 78].

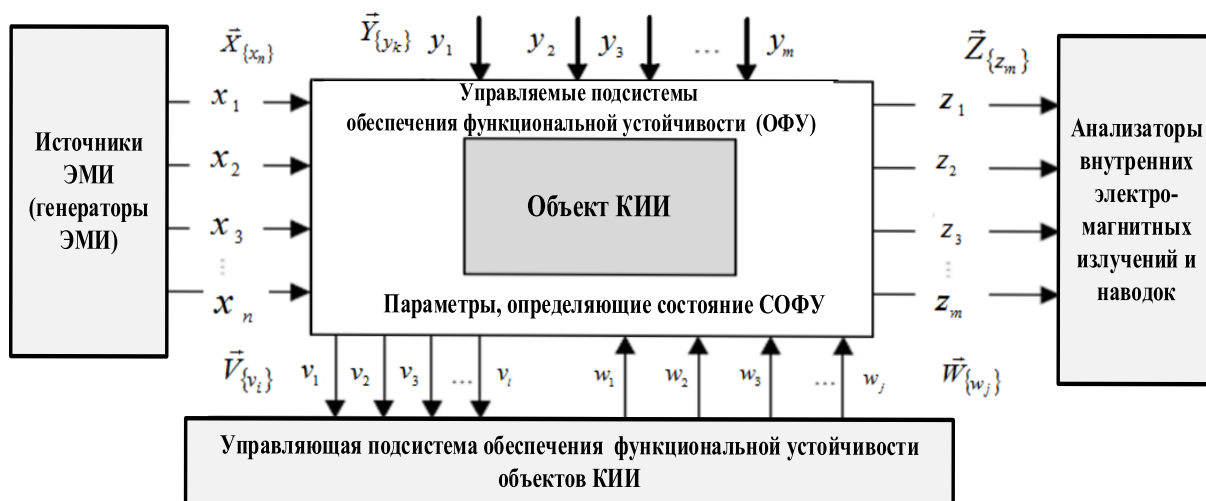


Рисунок 2.5 – Формализованная структура системы обеспечения функциональной устойчивости объектов при воздействии ЭМИ

*Управляемыми подсистемами* является совокупность технологий, объединенных единством избранной цели ОФУ.

*Управляющая подсистема* – совокупность технических средств управления и контроля состояния системы ОФУ.

Систему ОФУ можно характеризовать следующей группой переменных:  $\vec{X}_{\{x_n\}}$  – множество, обусловленное полями ЭМИ с формализованным описанием амплитудных, частотных, временных и энергетических характеристик генераторов ЭМИ, представляющих совокупность входных воздействий на систему по требованиям стандартов [59, 78];  $\vec{Z}_{\{z_m\}}$  – множество выходных сигналов, обусловленное внутренними электромагнитными излучениями с формализованным описанием их амплитудных, частотных, временных и энергетических характеристик;  $\vec{Y}_{\{y_k\}}$  – множество внешних возмущений (электромагнитный шум, радиоактивный фон и т.п.);  $\vec{V}_{\{v_i\}}$  – множество признаков, характеризующих техническое состояние СОФУ: совокупность внешних параметров, характеризующих электрофизические свойства материалов экранирующих конструкций, конструктивные особенности экрана средств ЭВТ и его технологические неоднородности, взаимное влияние технологических неоднородностей друг на друга, а также совокупность внутренних параметров СВТ, представляющих собой стойкость конструктивных элементов СВТ к воздействующим полям;  $\vec{W}_{\{w_j\}}$  – множество управляющих воздействий, формируемых оператором подсистемы ОФУ.

Исходя из проведенного анализа поражающего воздействия мощного ЭМИ, установлено, что для предотвращения последствий данных воздействий компоненты объектов КИИ должны быть максимально защищены как естественными помехозащитными свойствами материалов ограждающих конструкций, так и специально принятыми мерами и средствами ОФУ. Показатель, определяющий экранирующие свойства конструкции, дает возможность получить функционал, отражающий задачу её построения, с целью обеспечения живучести и помехозащищенности функционирующих на объектах КИИ СВТ, линейного и сетевого оборудования при воздействии ЭМИ, и представляемый следующим выражением:

$$\eta_{E(H)} = f\left(\vec{X}_{\{x_n\}}; \vec{Z}_{\{z_m\}}; \vec{Y}_{\{y_k\}}; \vec{V}_{\{v_i\}}; \vec{W}_{\{w_j\}}\right) \text{ при } \eta_{E(H)} \geq \eta_{E(H)\text{крит}} - \Delta\eta, \quad (2.2)$$

$$P_{\text{ФУОКИИ}} \geq P_{\text{ФУОКИИ}}^{\text{треб}}.$$

где  $\eta_{E(H)_{\text{крит}}}$  – критериальное требование, предъявляемое к экранирующим конструкциям по качеству экранирования;  $\Delta\eta$  – допустимое отклонение реального коэффициента экранирования от критериального требования по качеству экранирования.

Критериальные показатели коэффициента (эффективности) экранирования назначаются в зависимости от рассматриваемой области (зоны) объекта (сооружения):

– зоны слабой функциональной устойчивости (объекта, не имеющего сплошного экрана, пространство вблизи входов и вводов коммуникаций) –  $\eta_{E(H)_{\text{крит}}} \leq 20\text{дБ}$ ;

– зоны средней функциональной устойчивости (центральные объемы объекта) –  $\eta_{E(H)_{\text{крит}}} \leq 90\text{дБ}$ ;

– зоны высокой функциональной устойчивости (центральные помещения объема объекта) –  $\eta_{E(H)_{\text{крит}}} \geq 120\text{дБ}$ .

Допустимое отклонение реального коэффициента экранирования от критериального требования по качеству экранирования  $\Delta\eta = \pm 14\%$ .

При выполнении указанных критериальных показателей эффективности должно достигаться следующее требование к  $P_{\text{ФУ}_{\text{окии}}}^{\text{треб}} \geq 0,95$ .

Этапность математического моделирования может быть представлена в виде блок-схемы, изображенной на рисунке 2.6.

С учетом наличия показателя, а также практики расчета и построения ЭК, для адекватного математического моделирования её параметров наиболее целесообразно использовать подход, ориентированный на использование *математических моделей обратных задач дифракции*, которые эффективны при *синтезе импедансного покрытия*, связанных с направленным изменением характеристик рассеяния в *волновой зоне* по сравнению с идеально проводящим телом и заключающийся в выборе физически реализуемой конструкции (ФРК), которая в пределах заданной точности моделирует ЭМП с требуемыми характеристиками [80]. Данный метод моделирования снимает проблему единственности решения



присущих задачам идентификации, где необходимо определить реальный объект, создающий наблюдаемое ЭМП [79, 80]. В данном аспекте, который предусматривает впоследствии ФРК, решение задачи дифракции будет предусматривать *синтез импедансного слоистого покрытия тела вращения* с целью минимизации обратного поперечника, расположенных в полупространстве с потерями, в компактном классе тел [80].

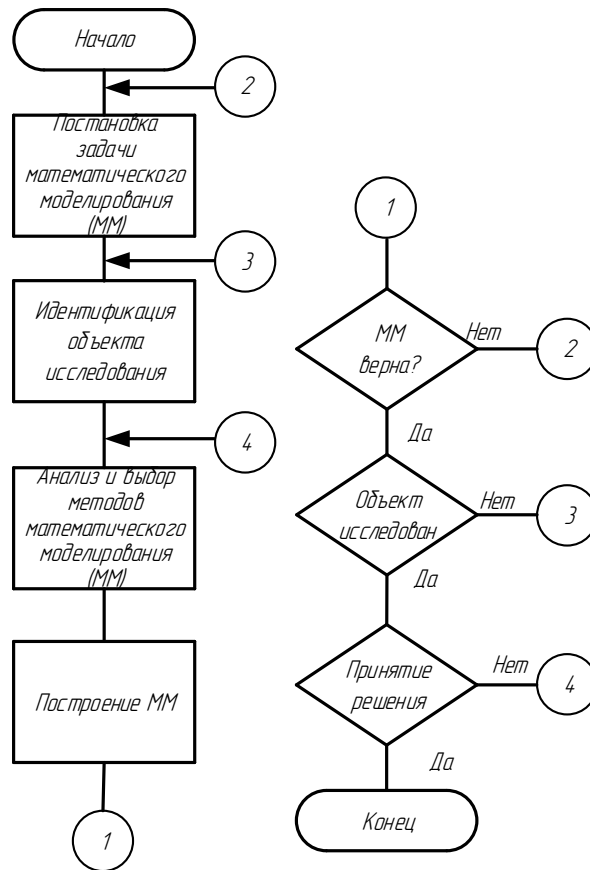


Рисунок 2.6 – Этапность математического моделирования экранирующей конструкции

Предлагаемый метод удобен с точки зрения *управления энергетическими характеристиками в волновой зоне* с целью направленного *изменения характеристик рассеяния в данной зоне по сравнению с идеально проводящим телом*, что предусматривает *вариационную постановку* и быстрые алгоритмы решения прямых *дифракционных задач линейно поляризованной плоской волны*, распространяющейся вдоль оси симметрии  $\{E^0, H^0\}$ , *в классе импедансов, который автоматически удовлетворяет условиям ФРК* [80]. В [81, с. 9] указано,

**что «...для собственных значений во всех вариантах обобщённого метода существуют стационарные функционалы, и применение метода Рунца приводит к одним и тем же трансцендентным уравнениям, из которых собственные значения обобщенного метода находить обычно проще, чем собственную частоту»**, что подтверждает возможность использования **вариационной постановки Рунца для решения скалярных (внутренних и внешних) задач дифракции в рамках решаемой проблемы.**

При внешнем воздействии  $\{\mathbf{E}^0, \mathbf{H}^0\}$  постановка задачи синтеза на теле предусматривает граничные условия (ГУ) Леонтовича первого рода:

$$\begin{aligned} \operatorname{rot} \mathbf{H}_j &= -i\omega \varepsilon_j \mathbf{E}_j, \operatorname{rot} \mathbf{E}_j = i\omega \mu_j \mathbf{H}_j, \text{ в } D_j, \quad j = 1, 2, \dots, L, \\ \left[ \nu, \mathbf{E}_j^N \right]_{\eta_l} &= \xi \left[ \nu, [\nu, \mathbf{H}_j^N] \right]_{\eta_l}, \eta_l \in \mathcal{S} \quad \text{на} \quad \partial D, \\ \left\{ \sqrt{\varepsilon_L} \mathbf{E}_L; \sqrt{\mu_L} \mathbf{H}_L \right\}, R/R &+ \left\{ \sqrt{\mu_L} \mathbf{H}_L; -\sqrt{\varepsilon_L} \mathbf{E}_L \right\} = \mathbf{O}(R^{-1}), R \rightarrow \infty \end{aligned} \quad (2.3)$$

где  $\mathbf{E}_j, \mathbf{H}_j$  – вектора напряженности ЭМП;  $\nu = \{\beta; 0; -\alpha\}$  – в цилиндрической системе координат,  $\beta \neq \pm\sqrt{2}$ ;  $\{\eta_l\}_{l=1}^L$  – множество точек коллокации;  $L$  – размерность подпространства. Границы раздела сред с различными электрофизическими (электродинамическими) характеристиками  $\{\varepsilon_L, \mu_L\}_{j=1}^L$  представляют собой односвязные поверхности вращения  $\{\partial D_j\}_{j=0}^{L-1} \in A^{(2,\alpha)}$ .

Когда поверхность слоистого тела представляет собой **частопериодическую гофру**, тогда рассматриваемая задача дифракции предусматривает потери на поверхности тела (в стенках тела на границе  $S$ ), и однородная задача (она не зависит от граничных условий) будет, как правило, **самосопряженной**, а собственные значения – **вещественными** [81, с. 9]. Следовательно, соответствующая вспомогательная задача **вещественная** (собственные значения в той области, где эти потери присутствуют). Тогда при  $\operatorname{Im}\{\varepsilon_L; \mu_L\} = 0$  характеристики  $\{\varepsilon_L, \mu_L\}_{j=1}^L$  принимают постоянные значения в областях  $D_j$ .

Приближенное решение задачи (2.3) находится с учетом следующего представления внешнего воздействия [80]:

$$\begin{aligned} \mathbf{E}_j^N &= \mathbf{E}_j^{N+} + (1 - \delta_{jL}) \mathbf{E}_j^{N-}, & \mathbf{H}_j^N &= \mathbf{H}_j^{N+} + (1 - \delta_{jL}) \mathbf{H}_j^{N-} \\ \mathbf{E}_j^{N\pm} &= \sum_{n=1}^{N_j} p_{nj}^{e\pm} \text{rotrot}(\psi_{nj}^{\pm} \mathbf{e}_x) + p_n^{h\pm} i\omega\mu_j \text{rot}(\psi_{nj}^{\pm} \mathbf{e}_y), \\ \mathbf{H}_j^{N\pm} &= \sum_{n=1}^{N_j} -p_{nj}^{e\pm} i\omega\varepsilon_j \text{rot}(\psi_{nj}^{\pm} \mathbf{e}_x) + p_{nj}^{h\pm} \text{rotrot}(\psi_{nj}^{\pm} \mathbf{e}_y), \\ \psi_{nj}^{\pm} &= h_0^{(1,2)}(k_j R_{\eta z_n^j}), & R_{\eta z_n^j}^2 &= \rho^2 + (z - z_n^j)^2, & k_j^2 &= \omega^2 \varepsilon_j \mu_j, \end{aligned} \quad (2.4)$$

где  $\{z_n^j\}_{n=1}^{N_j} = \omega_0^j$  – множества вспомогательных источников;  $\{p_{nj}^{e\pm}, p_{nj}^{h\pm}\}$  – коэффициенты разложения приближенного решения (2), которые определяются из граничного условия  $\min_{p^{e,h}} \left\| \left[ v, \mathbf{E}_j^N + \mathbf{E}^0 \right] \right\|_{L(\varphi)}$  лишь на образующей поверхности вращения  $\varphi$ , т.е. осуществлен переход от поверхностной аппроксимации поля  $[v, \mathbf{E}^0]$  к решению задачи одномерной аппроксимации и имеет вид конечной линейной комбинации элементарных функций;  $\delta_{jL}$  – символ Кронекера;  $\psi_{nj}^{\pm}$  – функция, означающая представление поля в виде суперпозиции «приходящих» и «уходящих» волн внутри каждого слоя. На рисунке 2.7 представлены графики распределения плотности вероятности электрической и магнитной составляющей ЭМП ЭМИ в соответствии с ТТХ ЭМИ, соответственно. На рисунке 2.8 представлен график СПМ ЭМИ.

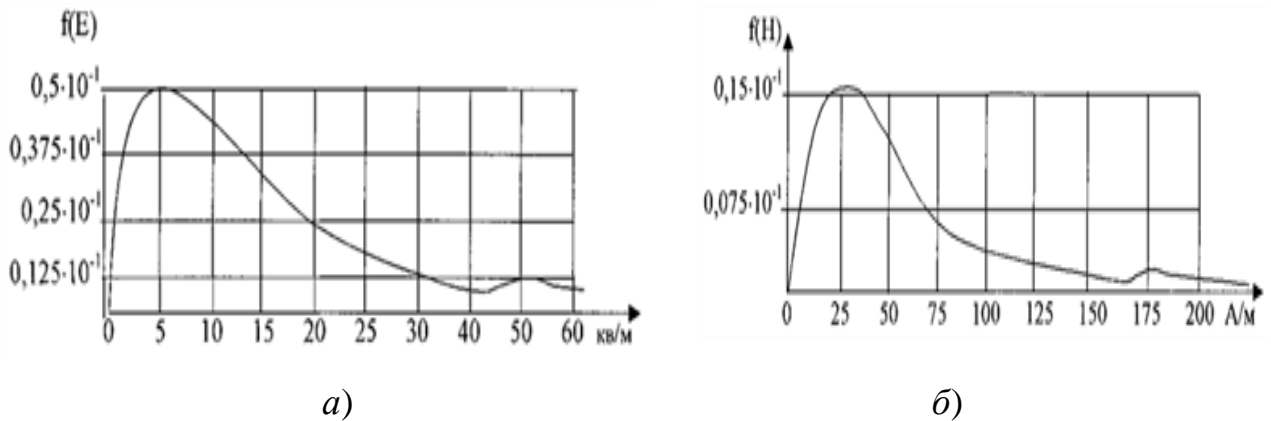


Рисунок 2.7 – Распределение плотности вероятности электрической и магнитной составляющей ЭМП ЭМИ

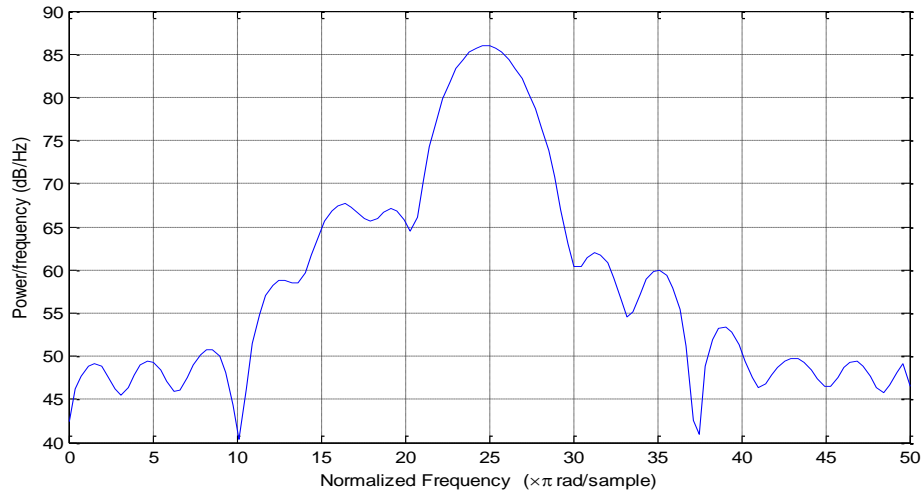


Рисунок 2.8 – График СПМ ЭМИ

В качестве наблюдаемых величин рассматриваются компоненты диаграммы направленности рассеянного поля (если диэлектрик не находится в замкнутом резонаторе), то  $\{\mathbf{E}, \mathbf{H}\}$  удовлетворяет еще условию излучения представленной формулой Шулейкина-Ван-дер Поля:

$$E_{\theta} = H_{\varphi} = \frac{e^{-ik_e R}}{R} \mathbf{F}(\theta, \varphi) [\mathbf{1} + \mathbf{O}(R^{-1})]; \quad (2.5)$$

$$H_{\theta} = -E_{\varphi} = \frac{e^{-ik_e R}}{R} \mathbf{F}(\theta, \varphi) [\mathbf{1} + \mathbf{O}(R^{-1})],$$

$$R \rightarrow \infty$$

где  $(R, \theta, \varphi)$  – сферические координаты точки  $M$ ,  $(\theta, \varphi) \in \Omega$ ;  $\mathbf{F}(\theta, \varphi)$  – диаграмма направленности рассеянного поля, определяемая с помощью выражения:

$$\mathbf{F}(\theta, \varphi) = \mathbf{I}(Z)\mathbf{J}(Z) \text{ на } \Omega \quad (2.6)$$

где  $\mathbf{I}(Z)$  – интегрофункциональный оператор, действующий из  $\partial D$  на  $\Omega$ , линейно зависящий от поверхностного импеданса  $Z$  и задающий область его локализации, что обеспечивает условие конструктивной реализуемости (УКР);  $\mathbf{J}$  представляет собой аналитическую функцию параметра  $Z$  в области значений  $\text{Re}Z \geq 0$ , в силу чего  $\mathbf{F}(\theta, \varphi)$  также будет аналитической функцией параметра

$Z$  при  $\text{Re } Z \geq 0$ , что также обеспечивает УКР. При этом вопросы, связанные с возможностью аппроксимации  $\mathbf{F}(\Theta, \varphi)$  выбором  $Z$  при фиксированных значениях  $\omega$ ,  $\partial D$ ,  $\{\mathbf{E}^0, \mathbf{H}^0\}$ , до сих пор еще не получили строгого математического обоснования. При этом в стороне остается вопрос о величине достигнутого максимума. Следовательно, граничная задача с учетом доказательства теоремы единственности определения  $Z$  (2.3) имеет единственное решение.

С учётом того, что в работе предстоит решать задачи по построению ФРК, представляющей собой в общем случае периодическую структуру (**частопериодическую гофру**), необходимо сформировать на границах раздела сред периодические ГУ [83]. Основное их предназначение состоит в том, что с их помощью анализ бесконечной решетки сводится к анализу одного периода, в связи с чем появляется возможность численного решения задачи, поскольку область, в которой теперь ищется поле ограничена в плоскости  $XOY$ :

$$\begin{aligned} \vec{E}_{\bar{A}'} &= \vec{E}_{\bar{A}} \cdot \exp(-i\Phi_y), & \vec{H}_{\bar{A}'} &= \vec{H}_{\bar{A}} \cdot \exp(-i\Phi_y), \\ \vec{E}_{\bar{B}'} &= \vec{E}_{\bar{B}} \cdot \exp(-i\Phi_x), & \vec{H}_{\bar{B}'} &= \vec{H}_{\bar{B}} \cdot \exp(-i\Phi_x). \end{aligned} \quad (2.7)$$

где  $\Phi_{x,y}$  – постоянные, определяющие фазовые сдвиги между элементами периодической решетки;  $\vec{E}_{\bar{A},\bar{B}}$ ,  $\vec{E}_{\bar{A}',\bar{B}'}$ ,  $\vec{H}_{\bar{A},\bar{B}}$ ,  $\vec{H}_{\bar{A}',\bar{B}'}$  – напряженности электрических и магнитных полей ЭМП между стенками  $A$  и  $B$  волновода, соответственно. А граничные условия волновода в свою очередь представляются следующим образом:

$$\begin{aligned} E_y &= 0, & E_z &= 0 & \text{при} & x = 0, & x = A; \\ E_y &= 0, & E_z &= 0 & \text{при} & y = 0, & y = B; \\ A_y^{\circ} &= 0, & & & \text{при} & x = 0, & x = A; \\ \partial A_y^{\circ} / \partial y &= 0, & & & \text{при} & y = 0, & y = B. \end{aligned} \quad (2.8)$$

Задача синтеза поверхностного импеданса в соответствии с [83] представляется следующим образом:

$$\min_{Z_S \in Z} \sigma(Z_S, \xi_l) \text{ при } Z_S = \text{const}, \quad (2.9)$$

где  $\sigma(Z_S, \xi_l)$  – обратный поперечник рассеяния;  $Z_S$  – допустимые значений импеданса:

$$Z_S = \sum_{l=1}^L Z_l g_l(\varphi), \text{Re } Z_l \geq 0, \quad (2.10)$$

где  $Z_l$  – коэффициенты, подлежащие определению, а  $g_l(\varphi)$  – базис на области локализации поверхностного импеданса.

В [81, с.85], также указано, что в качестве алгоритма для нахождения собственных элементов вспомогательных однородных задач может быть использован  $Z$ -метод (применение в качестве собственной функции **импеданса**, при котором наступает резонанс и существуют нетривиальные решения на заданной частоте), в котором используются интегральные уравнения (с простыми ядрами) для собственных функций, коими являются *действительные собственные импедансы* предусматривающий граничные условия импедансного типа или вспомогательные импедансные граничные условия (ИмГУ), представляющий собой параметр, играющий роль собственного значения.

Для решения задачи минимизации (2.9) можно использовать градиентные методы, предусматривающие нахождение функционала:

$$\sigma_{Z_S \in Z}(Z_S, \xi_l) = \{F(\mathbf{E}, \mathbf{H})\} \quad (2.11)$$

соответствующего решению задачи (2.3). Применение вспомогательных импедансных ГУ означают полную (изоляцию) экранировку рассматриваемой области от остального объема, то есть описывают непрозрачную пленку, повторяющую форму тела, что, в свою очередь, указывает на самосопряжённую, относительно скалярного произведения функции Грина (интегральный оператор на поверхности  $S$ ), задачу [7]. Для решения задачи (2.9) используются градиентные методы, предусматривающие в последующем нахождение функционала (2.11) с учетом линейности ГУ (3) по  $Z_S$ .

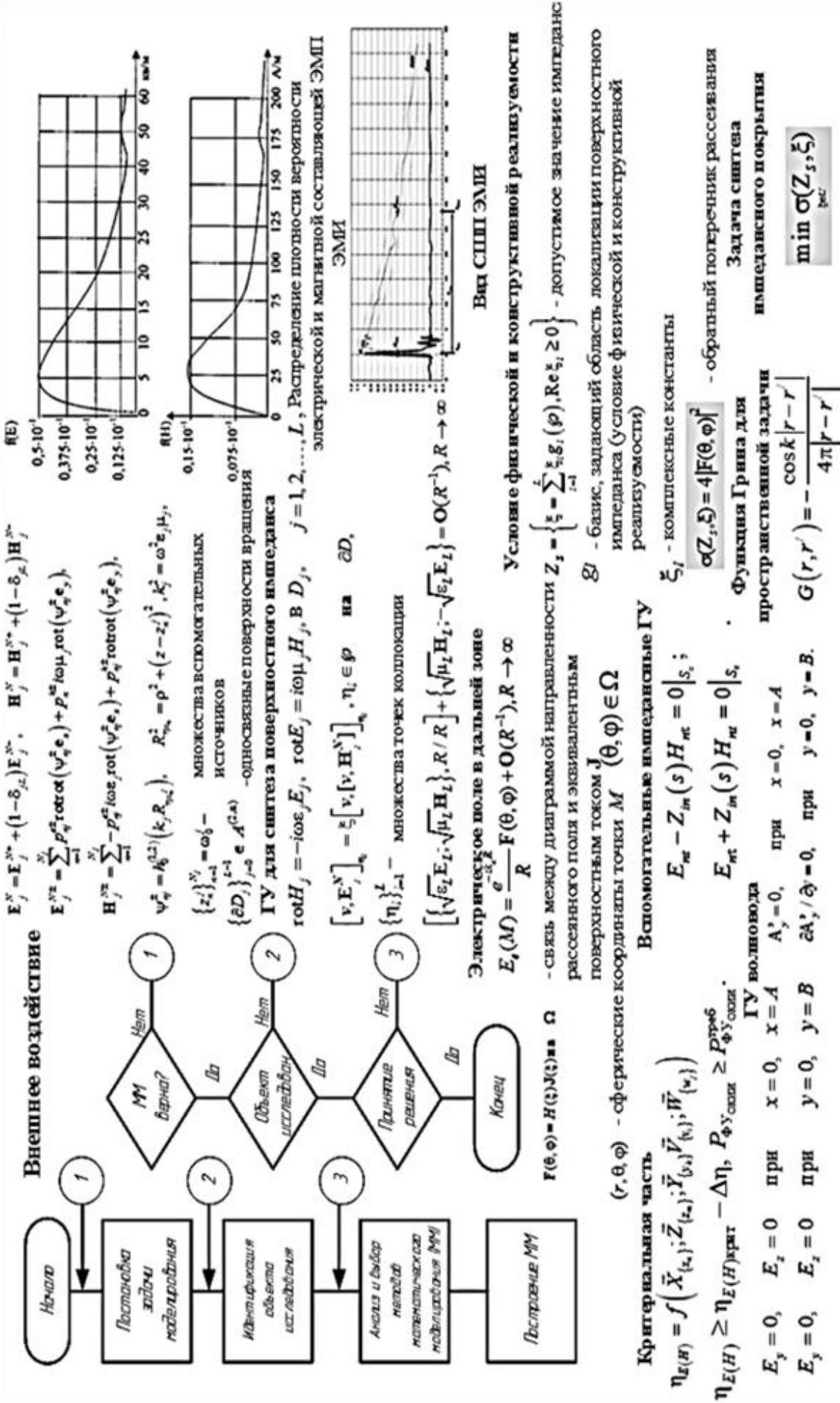


Рисунок 2.9 – Постановка задачи математического моделирования экранирующей конструкции в целях решения обратной задач дифракции (синтез поверхностного импеданса)

В соответствии с [81, с. 86], примем ограничение, при котором нет потерь кроме, как на поверхности тела. Соответствующие уравнения для внутренней задачи дифракции в этом случае отличается тем, что функция Грина **вещественна**:

$$G(r, r') = -\frac{\cos k|r-r'|}{4\pi|r-r'|} \quad (2.12)$$

а собственные значения  $Z$  (импедансы) при этом также **вещественны**.

Применение вспомогательных ИмГУ (выр. 2.12)

$$U(r)^+ - U(r)^- - Z_i \left( \frac{\partial U(r)^+}{\partial N} + \frac{\partial U(r)^-}{\partial N} \right) = 0|_{S_z}, \quad (2.13)$$

означают полную (изоляцию) **экранировку** рассматриваемой области от остального объема, то есть описывают непрозрачную пленку, повторяющей форму тела, что, в свою очередь, указывает на **самосопряжённую относительно скалярного произведения** функции Грина (интегральный оператор на поверхности  $S$ ). Для решения задачи (2.9) используются градиентные методы, предусматривающие в последующем нахождение функционала [81, с. 86] (2.3) с учетом линейности ГУ (2.3) по  $\xi_i$  [80]. Концептуально постановка задача может быть представлена в виде, изображенном на рисунке 2.9.

### **Вывод по 2-й главе**

Рассмотренный в главе теоретико-методологический подход к формированию методологии математического моделирования процессов обеспечения функциональной устойчивости объектов КИИ в условиях деструктивных воздействий с учётом различных методов моделирования в электродинамике, позволит на единой методологической основе решать два типа задач: *во-первых*, определять численные значения критериев оценки, по которым принимается ре-



шение о соответствии эффективности разрабатываемых мероприятий по обеспечению живучести и помехозащищённости заданным требованиям и обосновывать силы и средства, привлекаемые для организации соответствующих, и *вторых*, рассчитать показатели эффективности процесса обеспечения функциональной устойчивости на любом из заданных уровней, используя фиксированный ресурс сил и средств, выделенных на ее организацию. Комбинированный способ применения методов обеспечивает возможность достижения компромисса при возникновении различного рода конфликтов между материальными объектами, определяющими процесс организации указанной системы.

Выполнена постановка задачи математического моделирования, предусматривающая достижение требуемого коэффициента экранирования с учетом решения обратной задачи дифракции с целью получения ФРК на основании нахождения функционала (2.9).

Таким образом, исходя из проведенного анализа, можно сформулировать цели исследования диссертации, для реализации которых необходимо решить следующие **научные задачи, связанные с разработкой:**

– элементов теории электромагнитного экранирования, на основании которых формируется математический метод моделирования экранирующей конструкции, обеспечивающей устойчивое функционирование компонентов объектов КИИ при воздействии ЭМИ, **базирующийся** на учете функционала энергии (потенциала) электромагнитного поля, **отличающийся** от существующих эффектом обратимости, электрофизических свойств РППКМ, формирующих слои в многослойной конструкции, а также формы, количества и расположения в ней технологических неоднородностей на основе известных математических моделей, применяемых для решения электродинамических задач с выявлением общих признаков и подходов к их решению;

– математического метода моделирования ущерба, наносимого объектам КИИ при воздействии ЭМИ, **базирующегося** на иерархическом ранговом подходе, **отличающегося** учетом атрибутов функциональности объекта, подвергающегося воздействию и предусматривающего систематизацию их критичности с использованием экспертной системы для нахождения функции максимального предотвращенного ущерба при минимизации финансовых затрат.

– математического метода моделирования системы ОФУ объектов КИИ при воздействии ЭМИ, учитывающие условия их функционирования (п. 1 паспорта научной специальности), включающий:

– математический метод моделирования живучести объектов КИИ при воздействии ЭМИ, **базирующийся** на способах и приемах расчета условной вероятности «попадания» ЭМИ (преодоления им различного рода «препятствий»), **отличающийся** учетом надежности генератора ЭМИ и времени теплового рассеивания (переходных процессов) при тепловом вторичном пробое диэлектрика конструктивных элементов компонентов КИИ, обеспечивающий снижение уровней электромагнитных полей до безопасных величин;

– математический метод моделирования помехозащищённости объектов КИИ при проявлении внутренних электромагнитных излучений и наводок, **базирующийся** на аппарате теории обнаружения наведенного сигнала, **отличающийся** учётом аддитивности наводок электромагнитных излучений и собственных наводок конструктивного элемента КИИ.

– комплекса проблемно-ориентированных программ, позволяющего проводить вычислительные эксперименты на основе разработанных алгоритмов, реализующих сформированные математические методы моделирования, а также технологического испытательного стенда для проверки адекватности математической модели экранирующей конструкции на основании результатов натуральных экспериментов с обоснованием и тестированием эффективных вычислительных методов с применением современных компьютерных технологий (п. 3, 5, 6 паспорта научной специальности).

– численного метода оптимизации экономических затрат в рамках обеспечения функциональной устойчивости объектов КИИ в условиях воздействия ЭМИ с целью максимального предотвращения ущерба, **базирующегося** на интеллектуальной технологии оптимизации и стабилизации систем, основанный на применении теории игр (симплекс-метод) и **отличающегося** возможностью выбора вариантов обеспечения их функциональной устойчивости.

**ГЛАВА 3. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ,  
СОСТАВЛЯЮЩИЕ И ОБОСНОВЫВАЮЩИЕ МЕТОДОЛОГИЮ  
МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ  
ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ОБЪЕКТОВ  
КРИТИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ  
ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ИМПУЛЬСОВ**

3.1. Анализ математических методов решения электродинамических задач в целях разработки математического метода моделирования экранирующей конструкции

Математические методы моделирования представляют собой некое теоретическое и схематическое представление об исследуемом объекте, сущностей и явлений с помощью идеализированных абстракций, описываемых с помощью математических законов и зависимостей, позволяющих определить необходимые (интересующие) характеристики (свойства) исследуемых объектов в реальных условиях их функционирования. Элементы математической модели (методов моделирования) рассматриваются вместе с определенными преобразованиями и операциями над ними – систем правил, следуя которым можно «воспроизвести» ход моделируемого процесса [63, 67, 70, 71]. Таким образом, математические методы моделирования в совокупности предусматривают наличие описательных (вербальных), имитационных и концептуальных моделей как системы элементов с заданными на них отношениями и логическими операциями, совместно отражающими эти отношения и операции в аналитической или алгоритмической форме.

Основными компонентами моделирования, в рамках такого подхода, являются: исходные основания или аксиоматика теории; идеализированный объ-

ект (некая абстрактная модель существующих свойств, связей изученных объектов); логика теории – совокупность определенных правил (положений); введение нового знания – доказательства в модернизируемую теорию; совокупность утверждений, законов, заложенных в основу данной теории и её философские основания.

Разнообразие методов решения сложных электродинамических задач, предусматривающих применение различных численных и аналитических подходов, которые существенно различаются по сложности и объему вычислений, необходимых для достижения одинаковой точности, определяется приемлемой вычислительной сложностью алгоритмов, а также имеющимся временным и вычислительным ресурсом.

Из фундаментальных знаний дедуктивным способом можно вывести *частные модели*, представляющие собой теоретизацию и конкретизацию человеческого опыта (теоретические схемы) для описания определенной части реальности, выражая их существенные связи, с их последующим обобщением [63, 67, 70 – 72].

Традиционные (наиболее часто используемые) математические методы моделирования в электродинамике представлены на рисунке 3.1 [74–76, 82, 83].

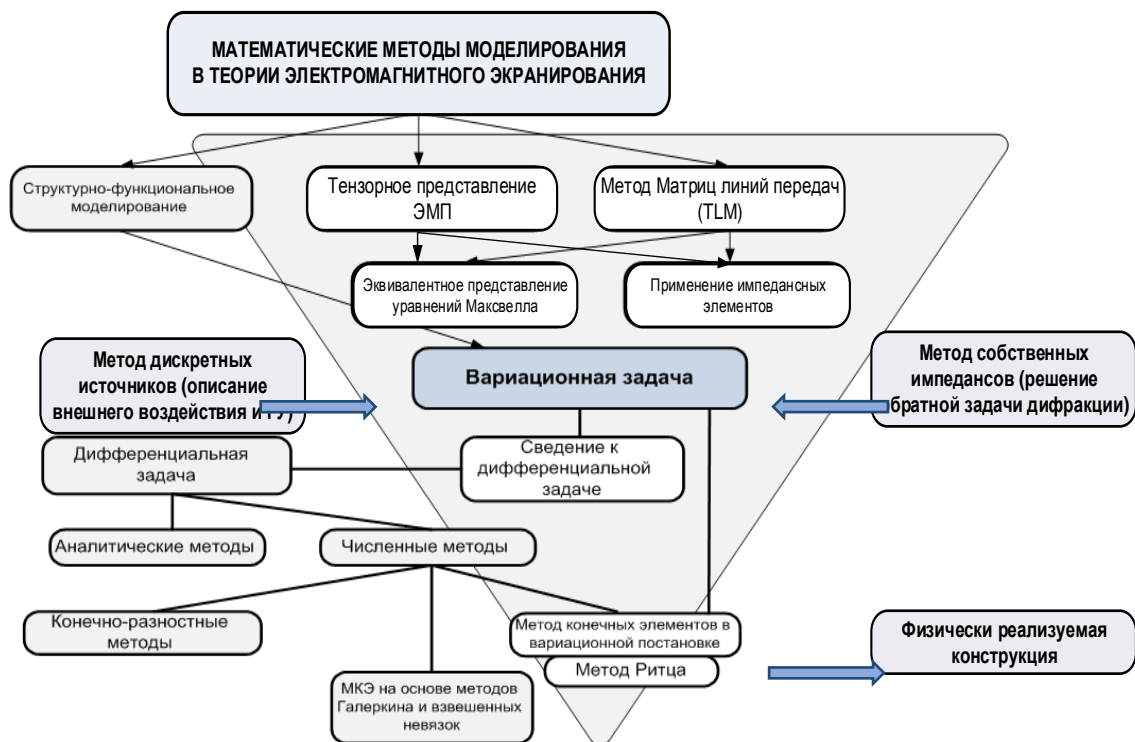


Рисунок 3.1 – Традиционные методы моделирования в электродинамике

Оптимальные процедуры решения независимо от их математической формы требуют примерно одинакового объема вычислений для получения численного результата.

*Первая группа* – структурно-функциональное математическое моделирование объектов, которые описываются системами дифференциальных или интегро-дифференциальных уравнений (ДУ, ИДУ). Для анализа электродинамических процессов системой ДУ или уравнениями Максвелла, описывающих ЭМП и их связи с электрическими зарядами и токами в вакууме и сплошных средах, нужно задать *граничные условия* (ГУ), определяющие плотность стороннего электрического тока  $J$  и электрического заряда  $\rho$  на границе раздела сред в зависимости от ЭФС материалов, образующих электродинамическую структуру. Это является достаточно сложной процедурой в виду того, что по большей части они задаются эмпирически, без учета процессов, происходящих при изменении частотных и энергетических свойств электромагнитной волны.

*Вторая группа* – дискретно-сеточные и тензорный методы решения электродинамических задач.

В большинстве случаев электродинамические задачи (ЭДЗ) сводятся к первой группе. Однако они могут быть сформулированы и в вариационной постановке поиска оптимума функционала, который может быть сведен к ДУ (если это возможно). С помощью аналитических методов можно решить узкий класс задач, которые преимущественно являются искусственными и трудоёмкими. Численные методы обладают свойством универсальности, что позволяет решать задачи, для которых аналитическое решение невозможно или слишком трудоёмко. К ним, в частности, можно отнести конечно-разностные методы. Ввиду того, что многие математические модели (ММ), используемые в электродинамике, описываются ДУ или их системой с краевыми условиями (КУ) первого, второго и третьего рода, точное решение краевых задач (КЗ, англ. *BVP – boundary value problem*) удастся получить лишь для немногих частных случаев. В связи с этим общий способ их решения заключается в использовании различных приближенных ММ, что предопределяет в дальнейшем для расчета ЭМП применение моделей на основе дискретизационных сеточных методов (ДСМ), использующих раз-

личные приближенные расчетные модели, построенные по определенным правилам с целью достижения максимальной точности и эффективности расчетов. Данный подход предполагает аппроксимацию искомой непрерывной функции совокупностью приближенных значений, рассчитанных в некоторых точках области – *узлах*, образующих сетку и представляющая собой дискретную модель области определения искомой функции, что позволяет свести дифференциальную КЗ к системе нелинейных в общем случае алгебраических уравнений относительно неизвестных узловых значений функций [82, 84, 86–94]. Таким образом, осуществляется приближенная замена бесконечномерной проблемы по определению непрерывной функции на конечномерную задачу вычисления нескольких отдельных (дискретных) параметров этой функции.

При разработке математических методов моделирования, позволяющих в последующем разработать математическую модель экранирующей конструкции и обеспечивающей впоследствии устойчивое функционирование компонентов объектов КИИ при воздействии ЭМИ, целесообразно применение математических методов моделирования, применяемых для решения вычислительных задач в электродинамике. В виду того, что модель (в общем понимании) представляет собой объект (материальный, математическая зависимость, программа для ПЭВМ и т.п.), находящийся в отношении подобия к моделируемому объекту, процесс моделирования предусматривает определение критериев данного подобия при протекании электромагнитных процессов на объектах с различными электромагнитными характеристиками (электрофизическими свойствами (ЭФС)), в основном предположении, что электромагнитные процессы на модели и объекте (предмет исследования) описываются уравнениями Максвелла. В связи с данными положениями, процесс моделирования будет сводиться к определению критериев подобия протекания электромагнитных процессов на объектах с различными ЭФС [80–84].

С целью выбора и обоснования аппарата для дальнейшего математического моделирования в рамках рассматриваемой проблемы проведём анализ существующих методов решения сложных электродинамических задач, предусматривающих применение различных численных и аналитических подходов, которые существенно различаются по сложности и объему вычислений, необходимых

для достижения одинаковой точности. Оптимальные процедуры решения независимо от их математической формы требуют примерно одинакового объема вычислений для получения численного результата.

Для анализа электродинамических процессов, в соответствии с уравнениями Максвелла – системой ДУ, описывающих ЭМП и его связь с электрическими и токами в вакууме и сплошных средах, мы должны задать ГУ, определяющие значение плотности стороннего электрического тока  $J$  и электрического заряда  $\rho$  на границе раздела сред в зависимости от ЭФС, образующих электродинамическую структуру. Это является достаточно сложной процедурой в виду того, что по большей части они задаются эмпирически, без учета процессов, происходящих при изменении частотных и энергетических свойств электромагнитной волны.

Наиболее часто используемыми способами численного анализа задач электродинамики являются методы: *конечных разностей во временной области (МКРВО)*; *моментов (МОМ)*; *асимптотические методы (метод физической оптики (МФО), геометрическая теория дифракции (ГТД) и метод краевых волн (МКВ))*; *квазистационарного приближения*; *расчета по импульсным характеристикам, расчетно-теоретический частотный, тензорный и конечных элементов (МКЭ), дискретных источников и собственных колебаний* [80–83, 85]. В ходе непосредственного решения указанной в работе задачи будет производиться упоминание используемых методов с их теоретическим описанием. Рассмотрим их подробнее.

*Метод конечных разностей во временной области.*

В 1966 г. Йе (Yee) разработал технику, реализующую явную конечно-разностную схему второго порядка для решения вихревых уравнений Максвелла в пространстве и времени. В пространственной сетке для конечно-разностной аппроксимации он поместил векторы  $E_x, E_y, E_z, H_x, H_y, H_z$ . Рассматриваемая одномерная область  $\Theta$  представляет собой отрезок  $[0, s]$ , который разбивается точками  $x_i = ih$ , где  $i = 0, 1, 2, \dots, n$  на  $n$  равных частей длины  $h = s/n$  каждая,  $h$  – шаг сетки. Множество точек в Гильбертовом пространстве

$G = \{x_i = ih | i = 0, 1, 2, \dots, n\}$  называется равномерной одномерной координатной сеткой [83]. Отрезок  $[0, s]$  можно также разбить на  $n$  частей, вводя произвольные точки  $0 < x_1 < x_2 < \dots < x_{i-1} < x_i < x_{i+1} < \dots < x_{n-1} < s$ .

Координатная сетка  $G = \{x_i | i = 0, 1, 2, \dots, n, x_0 = 0, x_n = s\}$  будет иметь шаг  $h_i = x_i - x_{i-1}$ , который зависит от номера  $i$  узла  $x_i$ . Если  $h_i \neq h_{i+1}$  хотя бы для одного номера  $i$ , то координатная сетка  $G$  называется неравномерной (рис. 3.2, а). Двухмерной равномерной сеткой называют множество точек (рис. 3.2, б)  $G = \{(x_i = ih_1, y_j = jh_2), | i = 0, 1, 2, \dots, n, j = 0, 1, 2, \dots, m\}$  или  $G = \{(x_i, y_j), | i = 0, 1, 2, \dots, n, j = 0, 1, 2, \dots, m, x_0 = 0, x_n = s_1, y_0 = 0, y_m = s_2\}$ .

Соответственно неравномерная трехмерная сетка представляет собой множество (рис. 3.2, в):

$$G = \left\{ (x_i, y_j, z_k), | i = 0, 1, 2, \dots, n, j = 0, 1, 2, \dots, m, k = 0, 1, 2, \dots, l, x_0 = 0, x_n = s_1, y_0 = 0, y_m = s_2, z_0 = 0, z_l = s_3 \right\}.$$

Мелкозернистость сетки обычно определяется размерами наименьших деталей, которые нужно моделировать. Объем сетки должен быть достаточно большим, чтобы охватить весь объект, и находится большей частью в ближнем поле. Существенным недостатком этого метода является то, что при некоторых конфигурациях размер задачи выходит из-под контроля [82, 83].

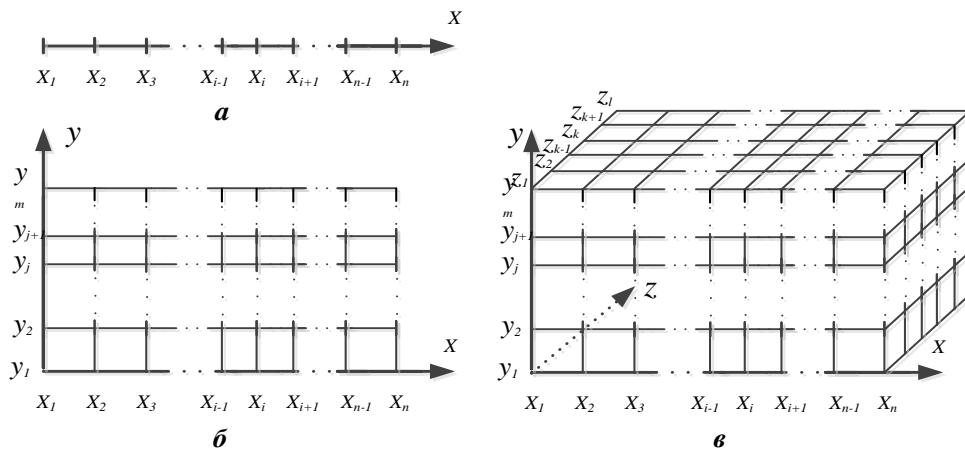


Рисунок 3.2 – Координатные сетки:



$a$  – одномерная;  $b$  – двумерная;  $v$  – трехмерная

*Метод моментов (МММ)* – это способ решения сложных ИУ путем сведением их к системе простых линейных. Уравнение, решаемое МММ, обычно представляется в виде ИУ электрического поля (ИУЭП) или магнитного поля (ИУМП) [82, 83]. В МММ решается операторная задачи:

$$L(f) = g, \quad (3.1)$$

где  $L(f)$  – оператор, заданный в некотором пространстве функций, а  $g$  – известная функция. Скалярное произведение  $\langle f, g \rangle$  должно удовлетворять следующим условиям:

$$\begin{aligned} \langle f, g \rangle &= \langle g, f \rangle, \\ \langle \alpha f + \beta g, h \rangle &= \alpha \langle f, h \rangle + \beta \langle g, h \rangle, \\ \langle f^*, f \rangle &> 0, \quad \text{если } f \neq 0, \\ \langle f^*, f \rangle &= 0, \quad \text{если } f = 0, \end{aligned} \quad (3.2)$$

где  $\alpha$  и  $\beta$  постоянные, а  $*$  означает комплексное сопряжение (3.1).

Неизвестная функция  $f$  представляется в виде следующего разложения:

$$f = \sum_n A_n \varphi_n \quad (3.3)$$

где  $\varphi_n$  – базисные функции, а  $A_n$  неизвестные коэффициенты. При подстановке формулы (3.1) в (3.3) получим:

$$\sum_n A_n L(\varphi_n) = g, \quad (3.4)$$

а введение тестовых функций, в свою очередь, определяет скалярное произведение:

$$\sum_n A_n \langle \psi_n L(\varphi_n) \rangle = \langle \psi_n g \rangle. \quad (3.5)$$

Выражение (3.5) представляет собой систему линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) относительно неизвестных коэффициентов  $A_n$ , решая которую автоматически определяется функция  $f$ . Применение *МОМ* к ИУ не очень эффективно в случае произвольных конфигураций со сложной геометрией и в отношении диэлектриков, что неприемлемо для анализа внутренней области проводящих корпусов (внутренняя задача электродинамики) [82].

#### *Асимптотические методы электродинамики*

*Метод физической оптики (МФО)*. В основном применяется при расчете больших апертурных антенн, что порождает СЛАУ очень большого порядка и не может передать ряд важных свойств ЭМП, таких как затекание токов на теневую часть поверхности тела. Такая ЭДЗ подразумевает уточнение и дополнение, заключающееся в её приближенном решении о дифракции плоской волны на металлическом клине (волнового уравнения для области тени и полутени) с помощью *геометрической теории дифракции (ГТД)* и *метода краевых волн (МКВ)* [82], в рамках которых выделяется геометрооптическая часть поля – плоская волна, отраженная от граней клина и цилиндрическая волна, порождаемая кромкой клина, что приводит к уточнению геометрооптического решения задачи о дифракции на клине, добавляя к нему поле в виде цилиндрической волны [76, 82]. Принципы МКВ были разработаны Уфимцевым П.Я., и так же, как и для ГТД, основной задачей для него является дифракция на клине (рис. 3.3).

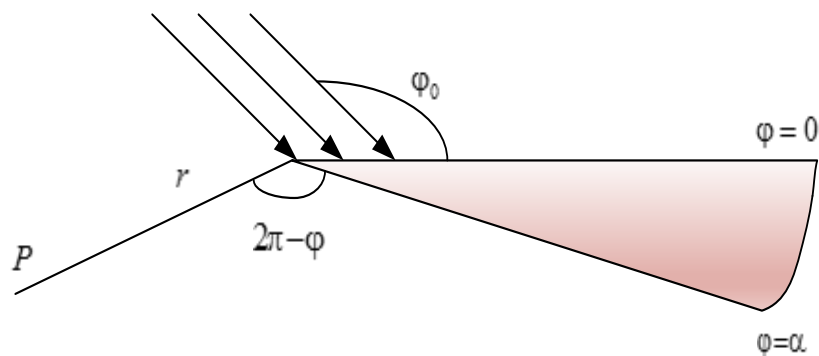


Рисунок 3.4 – Дифракция плоской волны на клине

При применении *МКВ* на части разделяется не рассеянное поле, а токи на поверхностях клина – выделяется *равномерная* и *неравномерная* части токов:

*равномерная часть* – ток, равный удвоенному магнитному полю падающей волны, то есть ток, используемый в рамках МФО; *неравномерная часть* – краевая волна, это добавка к равномерной части, обусловленная дифракцией на кромке клина [82]. Дифракционные лучи порождаются лучами, падающими на неоднородные участки тела: острия, ребра, линии разрыва кривизны, а также лучами, которые касаются поверхности тела и порождают бесконечное множество дифракционных лучей – при падении луча первичного поля (первичного луча) на острие (вершина конуса), что предусматривает их распространение во всех направлениях, образуя сферическую волну, а при падении луча на ребро дифракционные лучи в каждой точке ребра образуют конус, который показан на рис. 3.4 (угол раствора конуса  $\beta$  равен углу падения луча  $\alpha$ ).

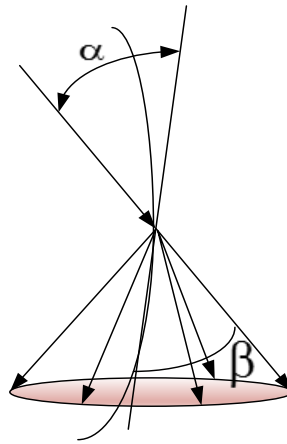


Рис. 3.4 – Формирование конуса дифракционных лучей

Образование лучей в области тени гладкого выпуклого тела отлично от закона образования лучей у остриев и ребер: лучи «срываются» с поверхности теневой части тела и получили название «волн соскальзывания».

Амплитуда дифракционного луча пропорциональна амплитуде порождающего его первичного луча в точке падения:

$$u_d = \frac{e^{-iks}}{\sqrt{J}} \cdot D(t_i, t_d) u_i. \quad (3.6)$$

где  $\mathbf{J}$  – якобиан перехода к лучевым координатам, величина пропорциональная площади поперечного сечения лучевой трубки,  $t_i$  и  $t_d$  направления (орты) падающего и дифракционного лучей;  $D(t_i, t_d)$  – коэффициент дифракции (КД) и определяется локальными особенностями геометрии тела в окрестности падающего луча или геометрии тела в окрестности точки отрыва дифракционного луча и находится из решения соответствующей «ключевой задачи». При небольших вариациях параметров покрытия решение данной задачи приводит к значительному и существенному изменению указанных методов, что требует учёта значительного числа параметров поверхности, большого объема вычислений, что при сложной геометрии приводит к увеличению объема памяти ЭВМ и как результат – численные погрешности решения могут оказаться слишком большими [76, 82].

#### *Метод квазистационарного приближения*

Математическое описание процессов, происходящих при проникновении ЭМП в ферромагнитный экран, в этом методе осуществляется с помощью системы уравнений Максвелла, решение которых в квазистатическом приближении при условии постоянной магнитной проницаемости и синусоидальных воздействующих полей сводится к решению уравнений Гельмгольца электрического типа. Это осуществляется частотным или численным методом.

Применимость метода квазистационарного приближения правомерна при следующих допущениях:

- поперечные размеры экрана должны значительно превышать его толщину;
- магнитная проницаемость ферромагнитного экрана принималась постоянной во времени и не зависящей от напряженности магнитного поля;
- не учитываются токи смещения в экране;
- реальная форма экрана сооружения заменяется (приводится к виду) одной из канонических форм – цилиндрической или сферической.

Эти ограничения позволили решить в квазистационарном приближении задачу об экранировании ЭМП в полупроводящей или непроводящей среде.

Строгое решение задач для экранирующих конструкций реальной формы чрезвычайно затруднительно, однако считается допустимым разбиение всех разновидностей экранов на три группы по виду оболочки канонической формы: сфера, цилиндр большой протяженности, пара одинаковых плоскопараллельных пластин, для которых известны точные решения краевой задачи в аналитической форме. Решение задачи экранирования в рамках принятых ограничений и, принимая во внимание воздействие однородных ЭМП, достигается представлением формул для расчета коэффициентов экранирования с учетом частотных характеристик экрана сферической формы и направления воздействующих полей. Для других форм экранов используются формулы приведения к форме сферы. Получение временных зависимостей полей, проникших через экраны, достигается обратным преобразованием Фурье их гармонических составляющих.

*В методе расчета по импульсным характеристикам* решение производится численным методом интегралов свертки (интеграл Дюамеля) воздействующих составляющих ЭМИ и импульсных характеристик (ИХ) экрана [83]. Знание ИХ позволяет рассчитать с помощью свертки любой нестационарный процесс рассеяния при произвольной зависимости падающего поля от времени. Кроме того, преобразование Фурье импульсной характеристики позволяет рассчитать экранирующие свойства конструкции в частотном представлении. Импульсная характеристика представляет собой реакцию экрана при воздействии на него дельта-импульса (единичного импульса), при котором форма полей экрана совпадает с ИХ. Она может быть определена при известных частотных характеристиках (ЧХ), определяемых либо экспериментально-гармоническим методом, либо теоретическим решением задачи экранирования любым из перечисленных методов. Расчет напряженности поля внутри экрана  $E_i(t)$  при использовании этого метода ведется при помощи интеграла свертки воздействующего поля  $E_e(t)$  и импульсной характеристики экрана  $K(t - \tau)$ :

$$E_i(t) = \int_{t_1}^{t_2} K(t - \tau) \cdot E_e(t) d\tau, \quad (3.7)$$

где  $\tau$  – длительность воздействующего импульса;  $t$  – текущее время.

Сложность расчета указанным методом заставляет ограничиться рассмотрением простейших пространственных геометрических форм однородных экранов.

*Расчетно-теоретический частотный метод* является наиболее универсальным для оценки защитной способности экранов при воздействии ЭМИ в широком амплитудно-временном диапазоне в связи с тем, что он основан на представлении воздействующего ЭМИ в виде гармонических составляющих электрических и магнитных полей. При этом возможны способы задания амплитудно-временных параметров воздействующих ЭМП в виде типовых форм, таблиц или графиков. Для аналитического задания составляющих полей ЭМИ они представляются в виде суммы экспонент (выражения (1.13) и (1.14) [32, 33, 51].

#### *Тензорный метод решения электродинамических задач*

Суть тензорных методов состоит в признании *инвариантности* объекта в пространстве (вектора, многомерного объема в геометрии; измеряемой величины в физике) – реальный объект существует в пространстве измерений со стороны наблюдателя, который в заданных им системах координат измеряет объект с помощью введенной меры: *если компоненты объекта при переходе от одной системы координат к другой преобразуются по линейным законам, то это является признаком измеримости объекта и такой объект называется тензором* [69, 79, 83–88]. В качестве обобщения понятия *тензора* рассматривается *абстрактная система* процессов и структур одного типа, а конкретные системы рассматриваются как ее «проекции» в координаты, заданные структурой связей. Г. Кроном была предложена модель ЭМП как топологической структуры с использованием электрических, магнитных и диэлектрических цепей (рис. 3.5), что позволило объединить непрерывный анализ с дискретным (графы) для рационального решения сложных задач и исследования сложных систем путём их расчленения [69, 79, 83–88].

При использовании тензорных методов формируются эквивалентные двух- или четырехполюсные цепи на основе *RLC*-элементов с распределенными параметрами, реализующими аппроксимирующую функцию, отражающую характер

реальных физических процессов и позволяющую использовать их для моделирования электродинамических процессов в слоистых средах. *RLC*-цепи являются математическими абстракциями физически реальных полей, а в модели исследуемого пространства является основным элементом – **тензором**, с помощью которого устанавливается соответствие модели первоначальной системе, а соединение цепей показывает, как отдельные тензоры должны объединяться в единое целое [86-88].

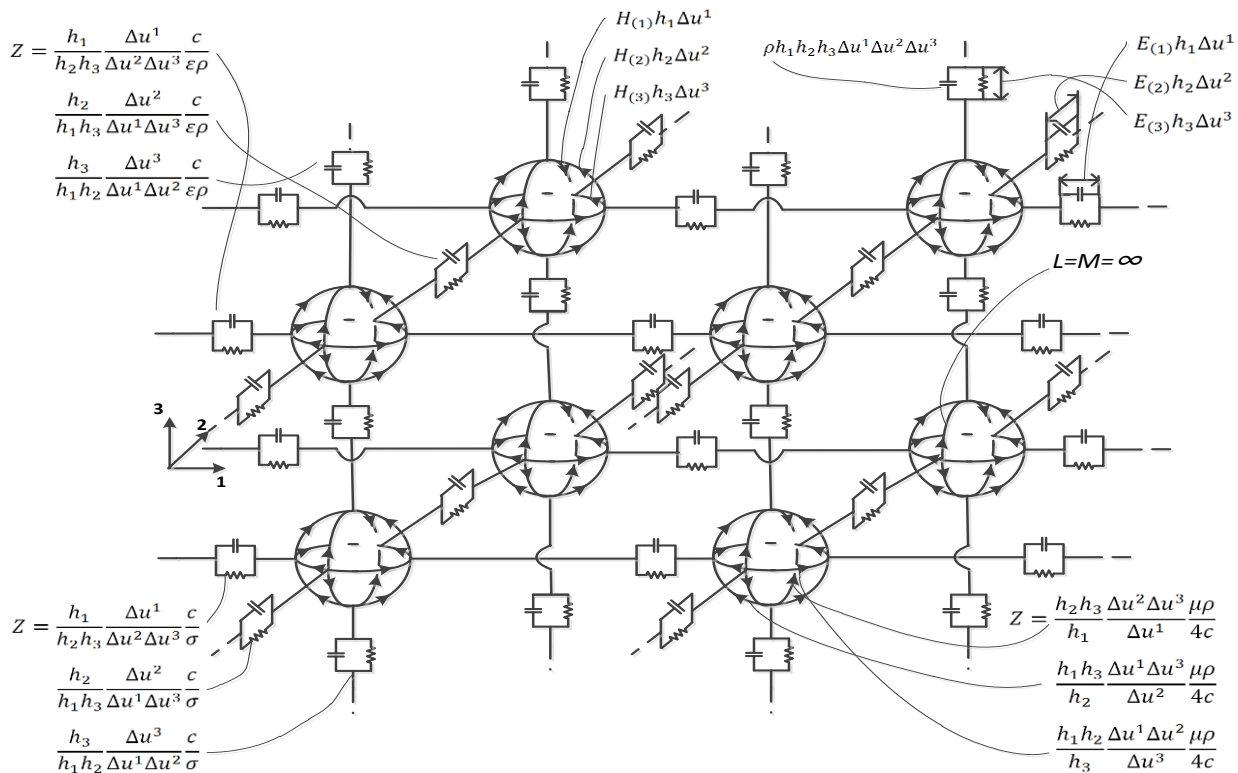


Рисунок 3.5 – Топологическая модель электромагнитного поля с представлением области пространства в виде электрической схемы

Данный подход является удобным средством для изучения свойств системы, выражаемых через параметры *RLC*-элементов, а электрические *I* и *U* в возбужденных цепях соответствуют зависимым переменным системы. Эквивалентная *RLC*-цепь устройства собирается путем объединения эквивалентных схем элементов пространства: сначала производится разделение сложной анализируемой области на простые однотипные узлы, а затем осуществляется процедура рекомпозиции устройства из элементарных узлов: ЭДЗ сводится к задаче находж-

дения параметров цепи многополюсников, эквивалентной всей анализируемой области пространства – тензорные уравнения анализируемой системы отражают связь параметров и переменных величин [79, 80, 82, 85, 86, 88].

Часто предполагается, что электрическая цепь топологически выражается графом только нуль- или одномерных пространств (точки или линии). Это справедливо, если импеданс  $Z$  имеет активное сопротивление. Однако импеданс  $Z_s$  невозбужденной электрической цепи может содержать как индуктивности, так и ёмкости (рис. 3.5).

Отображающая алгебраическая система в этом случае содержит векторы магнитного  $\psi^\alpha$  и электрического потока  $D^\alpha$ , электрический заряд  $\rho$  и т. д. (рис. 3.6). Следует отметить, что узловые точки, ветви и плоскости имеют свой первоначально приписанный им импеданс  $Z$ .

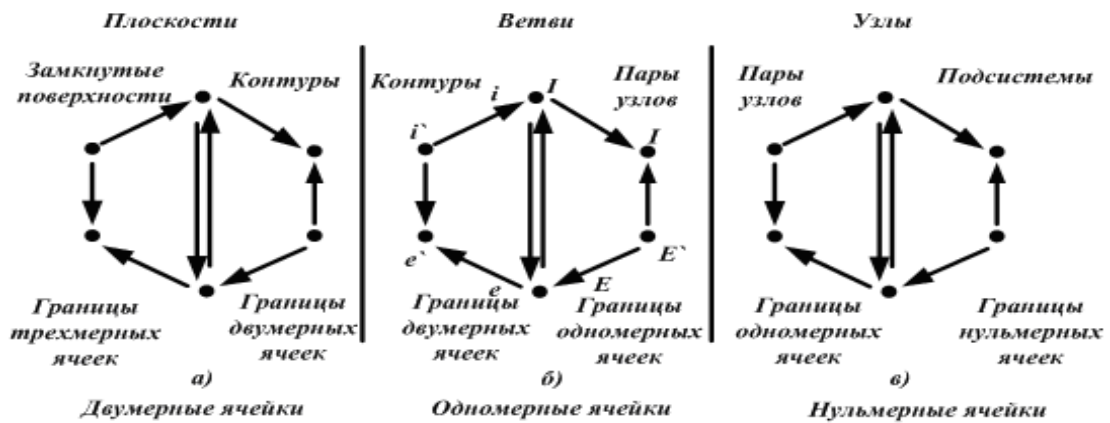


Рисунок 3.6 – Алгебраическая диаграмма для магнитной и диэлектрической цепи: *a* – магнитные потоки, *б* – электрические токи, *в* – диэлектрические потоки

Импеданс  $Z'$  для граничных элементов (других вертикальных линий) получается (или выводится) из поверхностного импеданса  $Z_s$  центральных вертикальных линий:

$$Z_s = R_{\alpha\beta} + L_{\alpha\beta} \frac{d}{dt} + S_{\alpha\beta} \int dt. \quad (3.8)$$



Возбужденные цепи индуцируют реальные магнитные и диэлектрические потоки, связывающие некоторые из контуров или проходящие между пластинами конденсатора. Три изолированные алгебраические диаграммы сливаются в одну алгебраическую диаграмму с 7 вертикальными стрелками, как показано на рисунке 3.5.

Каждая из семи вертикальных линий (изоморфизмы) соответствует одному из уравнений Максвелла для поля. Магнитные и диэлектрические диаграммы преобразования взаимозаменяемы.

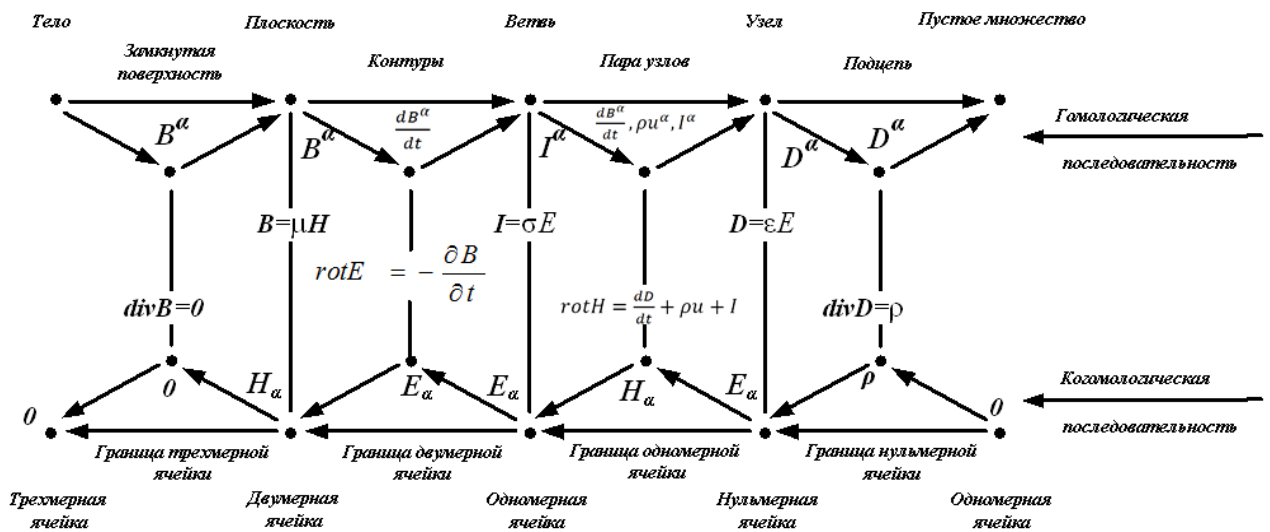


Рисунок 3.7 – Алгебраическая диаграмма уравнений Максвелла для электромагнитного поля

*Эквивалентность между параметрами цепи и поля*

В методе Матриц линий передач (англ. *Transmission Length Method, TLM*), а также основанном на его теоретических положениях методе импедансного аналога ЭМП (МИАП), базирующихся на тензорном представлении поля, для двумерных задач (для  $H$ -волн вида  $H_z = 0, E_x = E_y = 0$  при отсутствии сторонних источников тока и зарядов) сеточный вакуум должен моделировать процессы, описываемые стационарными уравнениями Максвелла [83–85, 87]. Для проведения анализа в трехмерном пространстве необходимо одновременное описание всех шести компонент ЭМП. С целью формирования трехмерной модели необ-

ходимо взять три системы уравнений для двумерного случая в  $x$ - $y$ ,  $y$ - $z$  и  $z$ - $x$  плоскостях [36, 37, 85–88]:

$$-i\omega\varepsilon_a \frac{\partial E_x}{\partial t} = \frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z}; \quad -i\omega\varepsilon_a \frac{\partial E_y}{\partial t} = \frac{\partial H_z}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial z}; \quad -i\omega\varepsilon_a \frac{\partial E_z}{\partial t} = \frac{\partial H_x}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial x}; \quad (3.9)$$

$$-i\omega\mu_a \frac{\partial H_x}{\partial t} = \frac{\partial E_z}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial z}; \quad -i\omega\mu_a \frac{\partial H_y}{\partial t} = \frac{\partial E_x}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial x}; \quad -i\omega\mu_a \frac{\partial H_z}{\partial t} = \frac{\partial E_y}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial y},$$

что полностью определяет эквивалентность уравнений Кирхгофа с уравнениями Максвелла в трехмерном случае:  $U_x \equiv E_x$ ;  $U_y \equiv E_y$ ;  $I_x \equiv H_x$ ;  $I_y \equiv H_y$ ;  $I_z \equiv H_z$ ;  $\varepsilon_0 \equiv C$  (емкость на единицу длины линий);  $\mu_0 \equiv L$  (индуктивность на единицу длины линий);  $\varepsilon \equiv 2\left(1 + \frac{Y_0}{4}\right)$ ;  $\mu \equiv 2\left(1 + \frac{Z_0}{4}\right)$ ;  $k_m \equiv \frac{G_0 \cdot C}{\Delta l \cdot L}$ , где  $\varepsilon_0 = 2C$ ,  $\mu_0 = L$  – диэлектрическая и магнитная проницаемость среды, соответственно,  $k_0 = \omega\sqrt{\mu_0\varepsilon_0}$  – волновое число. Данному представлению уравнений Максвелла соответствует  $RLC$ -цепь замещения элемента пространства, эквивалентная уравнению передачи длинных линий (рис. 3.7): напряжение  $U$  на конденсаторах определяется напряженностью электрического поля  $E_z$ , а токи  $I_z$  и  $I_y$  через катушки индуктивности определяются значениями напряженностей магнитного поля  $H_y$  и  $H_z$  соответственно [79, 80, 82, 85, 86, 88]:

$$U = E_z \Delta_x, \quad I_x = H_y \Delta_y, \quad I_y = H_x \Delta_x, \quad (3.10)$$

где  $\Delta_x, \Delta_y, \Delta_z$  – геометрические размеры конечномерного элемента вдоль осей  $x, y, z$ . Элементы эквивалентной схемы определяются параметрами пространства [36, 79, 85 – 88]:

$$C_{00} = \varepsilon_0 \frac{\Delta_x \Delta_y}{\Delta_z}, \quad L_{x0} = \mu_0 \frac{\Delta_x \Delta_z}{\Delta_y}, \quad L_{y0} = \mu_0 \frac{\Delta_y \Delta_z}{\Delta_x}. \quad (3.11)$$

Схема сеточного вакуума объединяет эквивалентные схемы элементов пространства. Уравнения сетки задаются системой (3.11), что задает однозначное соответствие между моделью поля  $(E_z, H_y, H_x)$  и сеточной LC-цепью (напряжение  $U$  и токи  $I_x, I_y$ ) [85–87].

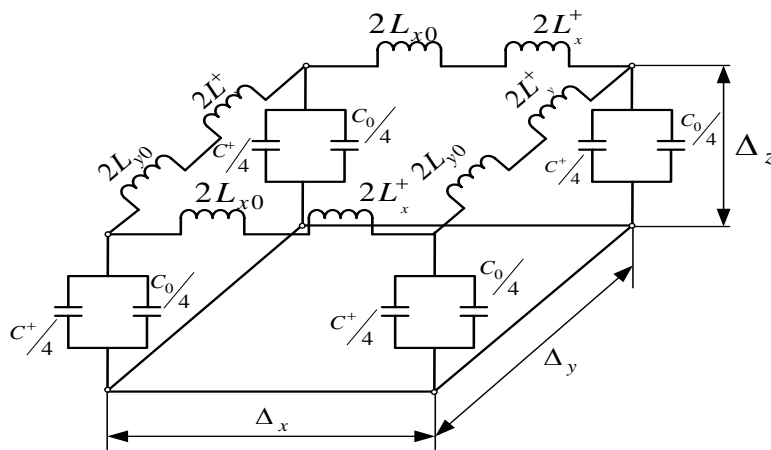


Рисунок 3.8 – Моделирование LC-цепью элемента пространства диэлектрического и магнитного заполнения

Эквивалентная схема элемента пространства преобразуется в схему (рис. 3.8), называемую моделью *информационного многополюсника*, в которой  $L$ - и  $C$ -элементы, вносимые веществом, с учетом абсолютной диэлектрической  $\epsilon_a$  и магнитной проницаемости  $\mu_a$  представляются следующим образом:

$$\epsilon_a = \epsilon_0 \epsilon, \quad C^+ = \epsilon_a \frac{\Delta_x \Delta_y}{\Delta_z}, \quad (3.12)$$

$$\mu_a = \mu_0 \mu, \quad L_x^+ = \mu_a \frac{\Delta_x \Delta_z}{\Delta_y}, \quad L_y^+ = \mu_a \frac{\Delta_y \Delta_z}{\Delta_x}.$$

При наличии потерь в веществе к эквивалентной схеме (рис. 3.8) подключаются сопротивления – параллельно к емкостям и последовательно к индуктивностям [85–88]. В рамках проведенного исследования была разработана «Программа трансформации уравнений Максвелла в уравнения Кирхгофа на основе тензорного представления электромагнитного поля «KronTensor», на которую

получено Свидетельство о государственной регистрации программ на ЭВМ № 2019666919 от 15.12.2019г. Внешний вид интерфейса программы представлен на рисунке 3.9 [88].

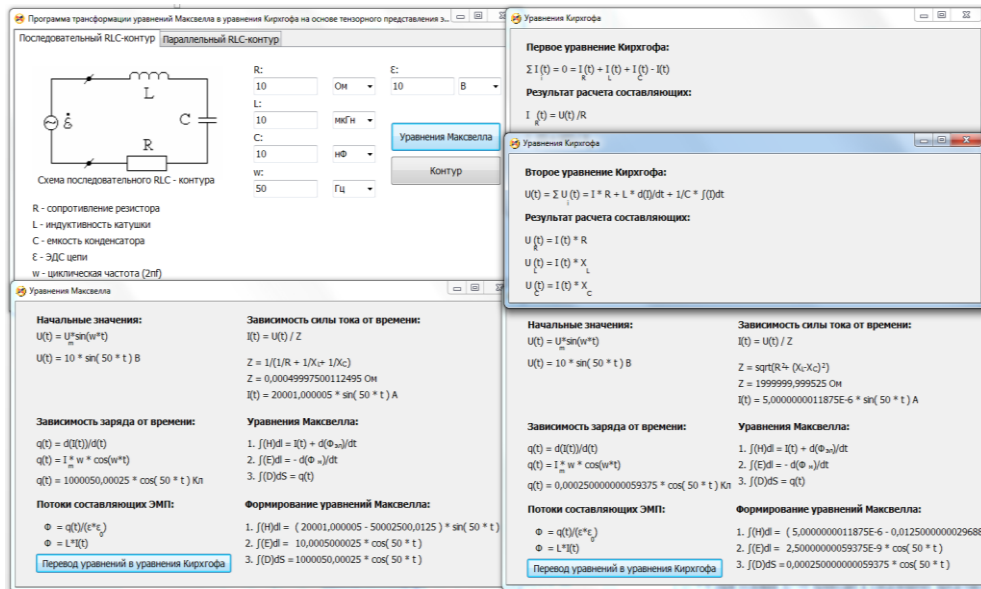


Рисунок 3.9 – Внешний вид интерфейса «Программа трансформации уравнений Максвелла в уравнения Кирхгофа на основе тензорного представления электромагнитного поля «KronTensor»

### Метод конечных элементов (МКЭ)

Из физики известно, что электродинамические системы имеют тенденцию к минимуму разности электрических и магнитных энергий. В математической физике этот подход, представляющий собой *вариационный численный метод* решения электродинамических задач, включающих сложную геометрию и неоднородную среду, основанный на замене непрерывной величины дискретной сеточной моделью (ДСМ) и приводящей, как результат, к минимизации функционала энергии, получил название «*вариационный МКЭ*» или «*метод Ритца*» – решение КЗ эквивалентно решению *экстремальной задачи* при осуществлении дискретизации исследуемого пространства. Соответственно, реализацию проекционных методов, самым распространенным из которых является метод Бубнова-Галёркина, возможно производить с использованием метода Ритца [89–96].

Этапность решения ЭДЗ МКЭ следующая (рис. 3.10):



Рисунок 3.10 – Общая схема решения задачи МКЭ

– исследуемая область пространства разбивается на элементарные дискретные ячейки в виде *треугольников* и/или *тетраэдров* с  $(n+1)$  вершинами в  $n$ -мерном пространстве (триангуляция Делоне, форма и плотность элементов адаптируются к требованиям задачи): количество вершин у ячеек точно соответствует количеству коэффициентов аппроксимирующей функции в таком пространстве (рис. 3.11);

– в каждом из *элементов* произвольно выбирается вид аппроксимирующей функции – в простейшем случае это полином Чебышева первой либо второй степени. Вне своего элемента аппроксимирующая функция равна нулю;

– *коэффициенты* аппроксимирующих функций выражаются через значения функций в «узлах» элементов (на границах между элементами);

– составляются СЛАУ, число которых равно количеству неизвестных значений в «узлах», на которых ищется решение исходной системы и прямо пропорционально количеству элементов и ограничивается возможностями ЭВМ. Необходимый минимум для решения ДУ – линейная аппроксимация на подобластях. Для двумерных областей линейная аппроксимация имеет вид  $u=a_1+b_1x+c_1y$ ,  $v=a_2+b_2x+c_2y$ .

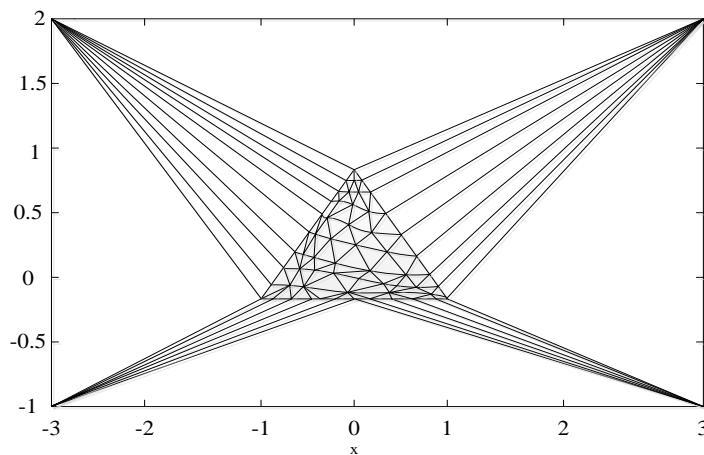


Рисунок 3.11 – Триангуляция Делоне реальной и искусственной областей

Точность решения зависит от того, насколько мала величина каждого из отдельных элементов. С целью выбора размеров ячейки необходимо установить критерий малой вариации поля в ее пределах, при котором оно корректно аппроксимируется простой линейной функцией, а последующий анализ позволяет установить наличие областей, в которых поле имеет большую скорость изменения [89-96]. После этого осуществляется повторное разбиение, которое уже содержит ячейки меньшего размера в критических областях, а в качестве вершин новых ячеек используются узлы координатной сетки. Далее ЭДЗ решается повторно для нового разбиения. Данные положения будут подтверждены при имитационном 3D-компьютерном моделировании в главе 4.

3.2. Математический метод моделирования экранирующей конструкции, базирующийся на учете функционале энергии (потенциала) электромагнитного поля, отличающийся от существующих эффектом обратимости, электрофизических свойств радиопоглощающих полимерных композиционных материалов, формирующих слои в многослойной конструкции, а также формы, количества и расположения в ней технологических неоднородностей обеспечивающей ослабление воздействующих электромагнитных полей СВЧ-диапазона на компоненты объектов критической информационной инфраструктуры

3.2.1. Элементы теории электромагнитного экранирования для формирования математического метода моделирования экранирующей конструкции

*Общие положения теории электромагнитного экранирования*

Электромагнитное экранирование представляет собой сложный электродинамический процесс, связанный с распространением электромагнитных полей источника ЭМИ в средах с различными ЭФС и зависящий от относительных диэлектрической  $\epsilon$  и магнитной проницаемости  $\mu$ , удельной электрической проводимости  $\sigma$  анализируемых сред и конструктивных особенностей экрана, т. е. количества слоёв, геометрических размеров и формы экранирующей конструкции, а также от расположения и компоновки технологических неоднородностей экрана и их взаимодействия друг с другом [33, 44–49, 97–101].

Аналитическое решение задач экранирования ЭМП производится для экранов канонических форм (цилиндрической, сферической или эллипсоидальной), поэтому при расчетах защитных свойств геометрические формы экрана следует приводить к каноническому виду.

Для качественной оценки защитной способности электромагнитного экрана используют коэффициент экранирования, под которым *понимается отношение максимальной напряженности электрического и магнитного полей ЭМИ в*

заданной точке пространства при отсутствии экрана к напряженности электрического и магнитного полей в той же точке при его наличии.

Защитная (экранирующая) способность выражается в дБ [33, 44–49, 97–101]:

$$\eta_E [\text{дБ}] = 20 \lg \frac{E_1}{E_3}; \quad (3.13)$$

$$\eta_H [\text{дБ}] = 20 \lg \frac{H_1}{H_3}, \quad (3.14)$$

где  $E_1$ ,  $H_1$  – напряженности электрического и магнитного полей воздействующего ЭМИ;  $E_3$ ,  $H_3$  – электрическая и магнитная напряжённость поля ЭМИ, проникающего внутрь экранирующей конструкции. Далее, величины, будем обозначать, как  $E^{in}$  и  $H^{in}$ . При анализе необходимо достичь максимума коэффициента экранирования с целью снижения величины проникающего внутрь экранирующего объема электрической и магнитной напряженности, что приведёт к снижению энергии поражения, воздействующей на конструктивные элементы средств ЭВТ.

Электромагнитные излучения проникают внутрь экранирующей конструкции (ЭК) через технологические неоднородности, а также из-за неидеальности ЭФС экранирующих материалов. В соответствии с этим необходимо рассмотреть основные положения теории электромагнитного экранирования (ЭМЭ), позволяющие выявить свойства электромагнитных экранов для построения математических методов моделирования в рамках развития рассматриваемой теории. Для рассмотрения общих принципов экранирования рассмотрим плоский проводящий экран.

Бесконечно протяженный плоский металлический экран толщиной  $d$ , находящийся в воздухе представлен на рисунке 3.12.

На экран с одной стороны падает плоская электромагнитная волна, которая на границе раздела двух сред с различными ЭФС (*воздух–металл* и *металл–воздух*) при взаимодействии с ним отражается от его поверхности, проникает в толщу экрана, поглощается материалом экрана, многократно отражается от его



стенки и частично проникает в экранируемую область [45]. Все перечисленные процессы сопровождаются потерями энергии волны, что позволяет записать выражение для определения суммарного коэффициента экранирования [97-101]:

$$\eta_{\Sigma} [\text{дБ}] = \eta_{\text{отр}} + \eta_{\text{погл}} + \eta_{\text{мотр}}. \quad (3.15)$$

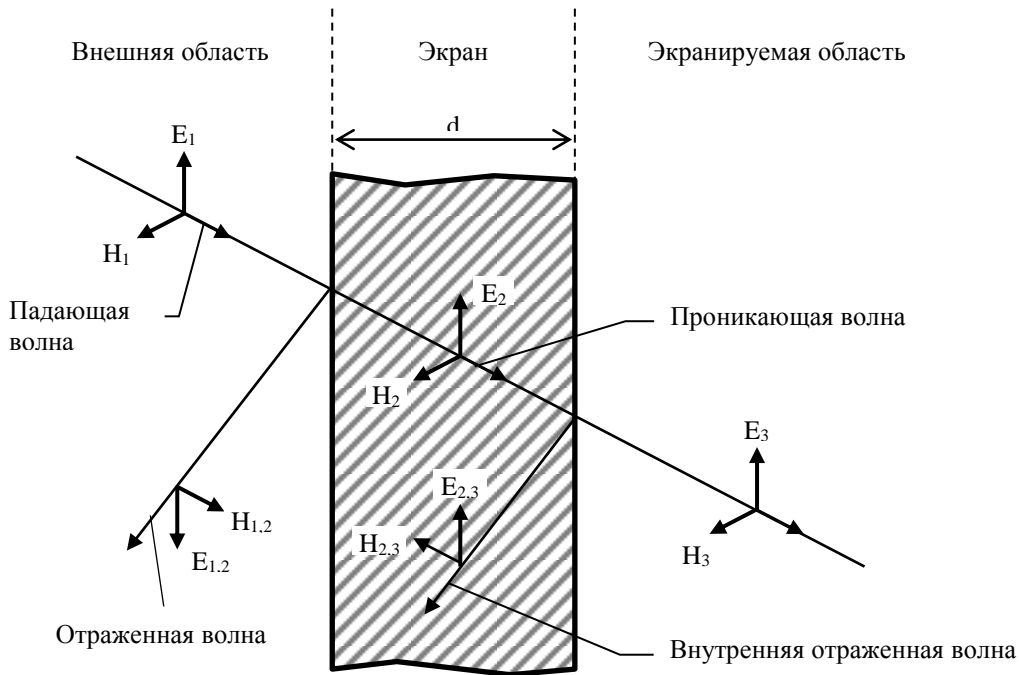


Рисунок 3.12 – Отражение и преломление падающей электромагнитной волны

Распространяющаяся ЭМВ характеризуется полным волновым сопротивлением среды (импеданс) [102–106]:

$$Z_0 = \dot{E} / \dot{H}. \quad (3.16)$$

В ДЗ излучения для плоской волны справедливо равенство:

$$Z_0 = Z_c = \sqrt{j\omega\mu_0 / (\sigma + j\omega\epsilon_0)}, \quad (3.17)$$

где  $Z_c$  – полное характеристическое сопротивление;  $\omega$  – циклическая частота, рад/с;  $\epsilon_0$  – электрическая постоянная (абсолютная диэлектрическая проницаемость вакуума);  $\mu_0$  – магнитная постоянная. При  $\sigma \gg j\omega\epsilon$   $Z_B$ :

$$Z_0 = Z_3 = \sqrt{\omega\mu_0 / \sigma}, \quad (3.18)$$

где  $Z_3$  – полному сопротивлению экрана. А для диэлектрика при  $\sigma \ll j\omega\epsilon_0$ :

$$Z_0 = Z_3 = \zeta_0 = \sqrt{\mu_0 / \epsilon_0}. \quad (3.19)$$

На границе раздела двух сред потери на отражение связаны с различными значениями  $Z_B$  этих сред: при прохождении ЭМВ через экран она встречает на своем пути две границы раздела (рис. 3.13).

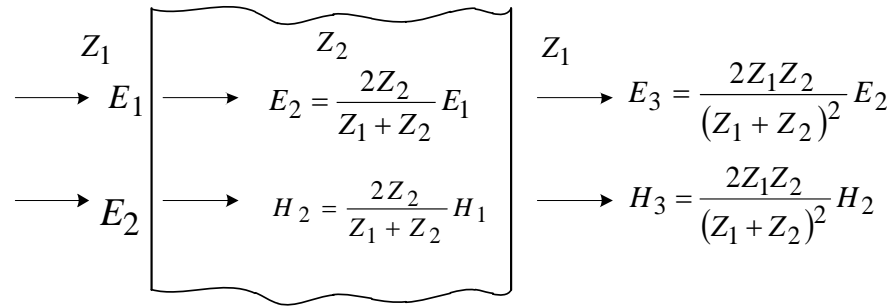


Рисунок 3.13 – Частичные отражения и преломления на поверхности экрана компонент электромагнитного поля

Электрическое и магнитное поля отражаются от каждой границы по-разному. Наибольшие потери на отражение наблюдаются у экрана, изготовленного из материала с высокой проводимостью и малой магнитной проницаемостью [45, 97–106].

В БЗ излучения  $r < \lambda / 2\pi$  волновое сопротивление, создаваемое точечным высокоомным источником электрического и магнитного полей, описываются следующими выражениями:

$$|Z_0|_{\text{эл}} = 1 / \omega \cdot \epsilon_0 \cdot r, \quad (3.20)$$

$$|Z_0|_{\text{м}} = \omega \cdot \mu_0 \cdot r, \quad (3.21)$$

где:  $r$  – расстояние от источника до экрана, м.

В электрическом и магнитном полях ближней зоны источника излучения потери на отражение составляют, соответственно:

$$\eta_{\text{отр.эл}} [\text{дБ}] \approx 20 \cdot \lg(1/4 \cdot \omega \cdot \varepsilon_0 \cdot r |Z_3|), \quad (3.22)$$

$$\eta_{\text{отр.м}} [\text{дБ}] \approx 20 \cdot \lg(\omega \cdot \varepsilon_0 \cdot r / 4 \cdot |Z_3|). \quad (3.23)$$

Потери электрического поля  $BZ$  излучения на отражение оказываются больше по сравнению с потерями плоской волны, они, в конечном итоге и определяют в основном процесс экранирования [45]. Согласно (3.22) и (3.23), потери магнитного поля  $BZ$  излучения на отражение меньше, чем у плоской волны, и при низких частотах ими можно пренебречь.

Поверхностный эффект в проводниках приводит к уменьшению амплитуды, проникающих в металлический экран электрических и магнитных полей за счет токов, индуцируемых в металле и вызывающих омические потери и нагрев экрана, что обуславливает потери на поглощение (рис. 3.14).

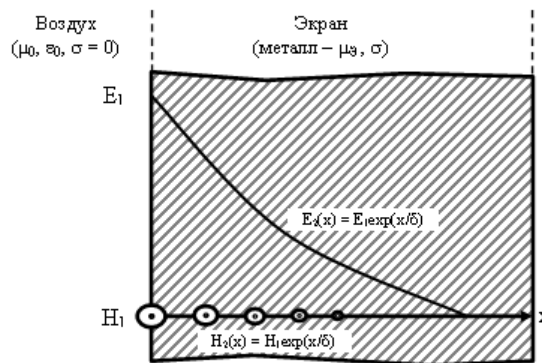


Рисунок 3.14– Ослабление электромагнитного поля в поглощающей среде

Соответственно многократные отражения обусловлены волновыми процессами в толщине экрана.

Напряженности электрического и магнитного полей в металле убывают по экспоненциальному закону:

$$E_2 = E_1 \cdot \exp(-x/\delta); \quad H_2 = H_1 \cdot \exp(-x/\delta), \quad (3.24)$$

где:  $E_2$  и  $H_2$  – соответственно, напряженности электрического и магнитного полей на расстоянии  $x$  от поверхности экрана;  $\delta = \sqrt{2/\omega\mu_3\sigma}$  – глубина скин-

слоя, определяемая как расстояние, которое должна пройти электромагнитная волна в металле экрана, чтобы ослабнуть в  $e = 2,71828$  раз.

В соответствии с [45, 97–101] проникновение ЭМИ в замкнутый экранированный объем для случая, когда толщина слоя насыщения гораздо больше толщины стенки экрана  $\delta_{\text{нас}} \gg d$ , аналогично процессам в цепи с сосредоточенными параметрами (рис. 3.15). Падение напряжения на сопротивлении  $R_{\text{эЕ}}$  (рис. 3.15, а) соответствует напряженности поля в экранируемом объеме, а напряжение источника – напряженности электрического поля электромагнитных излучений. Аналогично проникновение магнитных полей в замкнутый сплошной экран количественно определяется процессами в цепи, представленной на рисунке 3.15, б. Процесс многократного отражения в тонком экране представлен на рисунке 3.16. Потери на поглощение в экране толщиной  $d$  описываются следующим выражением:

$$\eta_{\text{погл.}} [\text{дБ}] = 8,69 \cdot d / \delta = 6,16 \cdot d \cdot \sqrt{\omega \cdot \mu_a \cdot \sigma}. \quad (3.25)$$

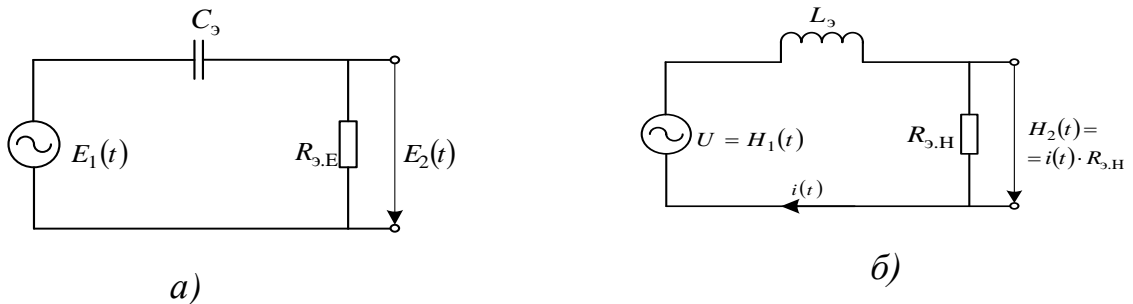


Рисунок 3.15 – Эквивалентные схемы замещения для процессов экранирования: а – магнитное; б – электрическое

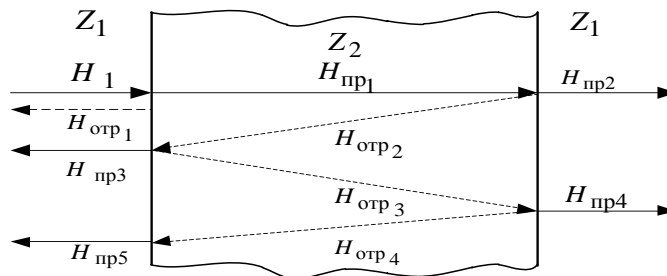


Рисунок 3.16 – Многократные отражения в тонком экране

Корректирующий коэффициент многократного отражения для магнитного поля в экране с толщиной стенки  $d$  при глубине скин-слоя  $\delta$  определяется выражением:

$$\eta_{\text{м.отр.}} [\text{дБ}] = 20 \cdot \lg[1 - \exp(-2 \cdot d / \delta)]. \quad (3.26)$$

Корректирующий коэффициент имеет отрицательную величину, что указывает на уменьшение качества экранирования тонким экраном вследствие многократных отражений.

В зависимости от частоты поля различают три режима работы экранов: *на низких частотах* – электростатический и магнитостатический; в области *высоких частот* – электромагнитный; в области *сверхвысоких частот* ( $f \geq 10^9$  Гц) – волновой режим [97–106].

Понятие высокой или низкой частоты в теории экранирования определяется соотношением величин глубины скин-слоя  $\delta$  и толщины стенки экрана:  $\delta < d$  – низкая частота;  $\delta > d$  – высокая частота.

Наибольший интерес представляет волновой режим работы, при котором коэффициент экранирования за счет поглощения энергии увеличивается с ростом  $d$ ,  $\delta$ , значений электропроводности и магнитной проницаемости материала экрана.

Отражение ЭМП происходит из-за несоответствия волнового сопротивления  $Z_c$  материала экрана и окружающей среды в данном диапазоне частот (рис.3.28). Коэффициенты экранирования за счет отражения поля зависят от типа воздействующего поля из-за различных величин волнового сопротивления диэлектрика в электрической, магнитной и электромагнитной волнах. Границей между электромагнитным и волновым режимами экранирования считают длину излучаемой волны, соизмеримую с характерным размером (диаметром) экрана. Таким образом, *качество экранирования* зависит от типа и частоты воздействующего поля, электрических характеристик окружающей среды и электрофизических характеристик материала экрана: удельной электропроводности материала  $\sigma$ , электрической  $\varepsilon$  и магнитной  $\mu$  проницаемости, толщины стенки  $d$  и геометрических размеров экрана.

Приведенные положения справедливы для металлических экранов. Однако металлические экраны не обеспечивают необходимого качества экранирования компонентов объектов КИИ от воздействия ЭМИ в широкой полосе частот, поэтому возникает необходимость использовать дополнительные экранирующие слои. Высокое экранирующее действие многослойных экранов, состоящих из чередующихся немагнитных и магнитных слоев, определяется физическими процессами, происходящими в комбинированных экранах [97–101, 107–109]:

- отражение энергии ЭМП на многочисленных границах раздела сред с различными ЭФС;
- благоприятным обратным действием отдельных слоев экранов друг на друга, связанным с взаимодействием наведенных в них вихревых токов от внешнего воздействия;
- исключением эффекта насыщения ферромагнитных материалов экранов за счет применения материалов с высокой электропроводимостью и малой магнитной проницаемостью и т.п.

Чтобы исключить насыщение, *первый слой* составного многослойного экрана, обращенный к источнику поля, выполняется из материала с высоким уровнем насыщения или РППКМ, а *второй слой* – из материала с высокой магнитной проницаемостью и низким уровнем насыщения, что уменьшает напряженность как и электрического, так и магнитного поля до значения, ниже насыщения второго слоя [113–117]. Экранирующий эффект определяется ослаблением энергии поля ЭМИ за счет поглощения в толще материала и отражения, обусловленного различными характеристическими сопротивлениями на границах раздела сред. Чем больше разница характеристических сопротивлений сред, тем выше экранирующее действие экрана. Поэтому в многослойных экранах из материалов с различными ЭФС и характеристическими сопротивлениями ( $Z_{c1} \neq Z_{c2} \dots \neq Z_{cn}$ ) используется система многократных отражений. Следовательно, для получения высоких качественных показателей экранирования целесообразно применение многослойных комбинированных конструкций, состоящих из последовательно чередующихся радиопоглощающих полимерных композиционных материалов (покрытий) и металлических слоев [107-109].

Экранирующие свойства экранов определяются коэффициентами экранирования ( $\eta_E$ ,  $\eta_H$ ) выражения (3.13) и (3.14). Таким образом, качество экранирования будет иметь максимальное значение при минимальном уровне полей ЭМИ и внутреннего электромагнитного излучения, ослабленных электромагнитным экраном, что достигается выбором материалов с соответствующими ЭФС и конструктивными особенностями построения экранирующих конструкций.

Пример многослойной плоскопараллельной структуры (МНС), которая представляет собой набор магнетодиэлектрических слоев различной толщины (металлических и полимерных) и различных ЭФС представлен на рисунке 3.17 [82].

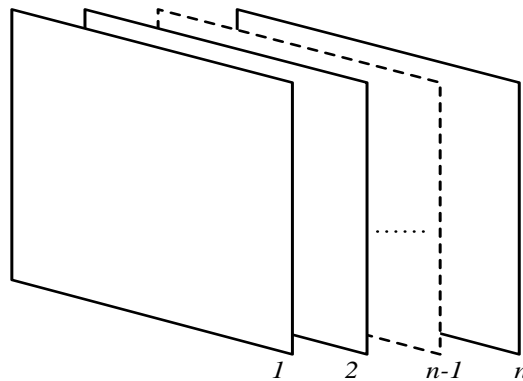


Рисунок 3.17 –Многослойная плоскопараллельная структура

При воздействии ЭМИ в сантиметровом и миллиметровом диапазонах длин волн общее затухание такой структуры зависит от порядка расположения слоев, их защитных свойств, которые определяются ЭФС применяемых материалов, что уменьшает вносимые потери в экранируемые цепи аппаратуры по сравнению со сплошным магнитным экраном такой же толщины.

Для определения коэффициента экранирования многослойных экранов в соответствии с [82, 97–110] воспользуемся следующим выражением:

$$\eta_{об} = \frac{\prod_{n=1}^N \eta_n}{\left(1 - \prod_{n=1}^N w_n\right)}, \quad (3.27)$$

где  $n$  – номер экранирующего слоя;  $\eta_n$  – коэффициенты экранирования отдельных слоев экранов, начиная с наружного;  $w_n$  – соответствующие коэффициенты обратного действия слоев экранов друг на друга.

Для достижения высоких защитных свойств в многослойных экранах необходимо применять разнородные по своим электрофизическим свойствам материалы в виде комбинации радиопоглощающих полимерных композиционных (РППКМ) и ферромагнитных материалов.

К достоинствам РППКМ при применении их в качестве экранирующего материала относятся [111–116]:

- обеспечение необходимого качества электромагнитного экранирования в полосе частот от  $10^4$  до  $10^{11}$  Гц, устраняющей паразитные электромагнитные волны на частотах до 50 ГГц;

- состав и конструкция материала, способствующее плавному изменению магнитной и электрической проницаемости по требуемому закону, что обеспечивает минимальное отражение электромагнитных волн;

- высокое значение действительной и мнимой составляющих диэлектрической проницаемости при удельных электрических сопротивлениях  $\rho < 100 \dots 200 \text{ Ом} \cdot \text{м}$  – для длины волны  $\lambda = 3,2 \text{ см}$ ; действительная и мнимая проницаемости соответственно равны:  $\varepsilon' = 40$  и  $\varepsilon'' = 106$ .

Ввиду различных коэффициентов обратного действия для слоев экрана из РППКМ и ферромагнитных материалов важным является вопрос о порядке расположения слоев по отношению к источнику помехонесущего поля. Следовательно, для получения высоких качественных показателей экранирования применим многослойный комбинированный экран, который состоит из последовательно чередующихся слоёв радиопоглощающих и металлических слоев.

Использование МСЭ в качестве устройств, способных обеспечить живучесть и помехозащищенность объектов при воздействии ЭМИ имеет свои особенности. Так, в процессе прохождения сквозь стенку экрана полей импульсных электромагнитных излучений их частотный спектр сдвигается в область более низких частот в отличие от синусоидальных полей, у которых частота воздействующего поля для всех слоев остается неизменной. В результате этого на каж-



дый последующий слой многослойного экрана воздействует поле с более низким спектром частот, нежели внешняя помеха.

При импульсном воздействии коэффициенты обратного действия соответственно равны  $w_1 = -1$ ,  $w_2 = w_3 = \dots = w_i = 0$ , так как второй и последующие слои подвержены низкочастотному воздействию, которое соответствует области слабого экранирования. При этом параметры импульсного поля, воздействующего на второй и последующие слои, существенно отличаются от параметров внешнего ЭМИ и определяются электрофизическими и конструктивными характеристиками первого слоя. Следовательно, выражение для определения общего экранного затухания многослойного комбинированного экрана имеет вид:

$$\eta_{\text{пмп об}} = \prod_{i=1}^N \eta_n. \quad (3.28)$$

С учетом вышеприведенных факторов, принятых в ходе выдвижения гипотезы о преимуществе применения многослойного экранирования по отношению к однослойному, математический метод моделирования экранирующей конструкции, базирующийся на учете потенциала электромагнитного поля, отличающийся от существующих эффектом обратимости, электрофизических свойств радиопоглощающих полимерных композиционных материалов, формы и расположения технологических неоднородностей в многослойной конструкции позволяет сравнивать качественные показатели экранирования, во-первых, как однослойных, так и многослойных экранов, во-вторых, как однородных экранов, так и экранов с технологическими неоднородностями.

Согласно выражениям (3.13) и (3.14), качество экранирования будет иметь максимальное значение при минимальном уровне потенциала электромагнитного поля, проникающего в экранированный объем. Это достигается выбором материалов, обладающих такими электрофизическими свойствами, которые обеспечат максимальное ослабление импульсного электромагнитного поля, проникающего в экранированный объем, а также конструктивными особенностями экранирующих конструкций. Геометрические размеры волноводов определяются, исходя из выполнения условия их запердельности с учётом длины волны

ЭМИ. Количество волноводов зависит от экранируемого объема и их геометрических размеров.

*Характеристики излучений электромагнитных полей, наводимых на многослойных экранирующих конструкциях (периодическое возбуждение многослойной структуры) с технологическими неоднородностями в виде запердельных волноводов при воздействии электромагнитных излучений*

Рассмотрим падение плоской волны под углом  $\varphi$  на многослойную экранирующую поверхность (рис. 3.18).

Сначала предположим, что электрическое поле имеет *горизонтальную поляризацию* и содержит только компоненту  $E_y$ , а магнитное поле – компоненты  $H_x, H_z$ . Реакция на воздействующий импульс получается только при известных значениях начальных импульсов.

Непрерывность касательных компонент  $E$ - и  $H$ - полей по всей границе диэлектрик/диэлектрик выполняется автоматически, например, на границе диэлектрик/диэлектрик в плоскости  $x$ . Исходя из анализа рисунка 3.31 видно, что аппроксимация исследуемой области пространства с эквивалентностью параметров цепей и уравнений Максвелла приводит к возможности оценки распределения составляющих ЭМП в проектируемой экранирующей конструкции в трехмерной области с помощью конечно-элементного анализа [79– 83, 90–96, 107–110].

Реальная решетка ограничена в плоскости  $XOY$ . Пределы им ставят идеально проводящие вертикальные стенки, которые могут быть бесконечно протяженными по оси  $OZ$ , а могут быть и конечной длины, если в плоскости  $XOY$  имеются металлические или магнитные экраны. В отсутствие хотя бы одного горизонтального экрана из данной структуры возможно излучение в бесконечный волновод, ось которого направлена вдоль оси  $OZ$  [82].

Однако, если ее размеры велики, то краевые эффекты сказываются несущественно, по крайней мере, на параметрах элементов решетки, удаленных от её границ. Поэтому эффективным средством моделирования такой структуры является модель в виде бесконечной по обоим осям  $OX$  и  $OY$  решетки. В этой модели и возникает задача о периодическом возбуждении неоднородной многослойной структуры электрическими и магнитными полями [106–111]. Следовательно,

структура, показанная на рисунке 3.18, может быть применима для решения волноводных задач.

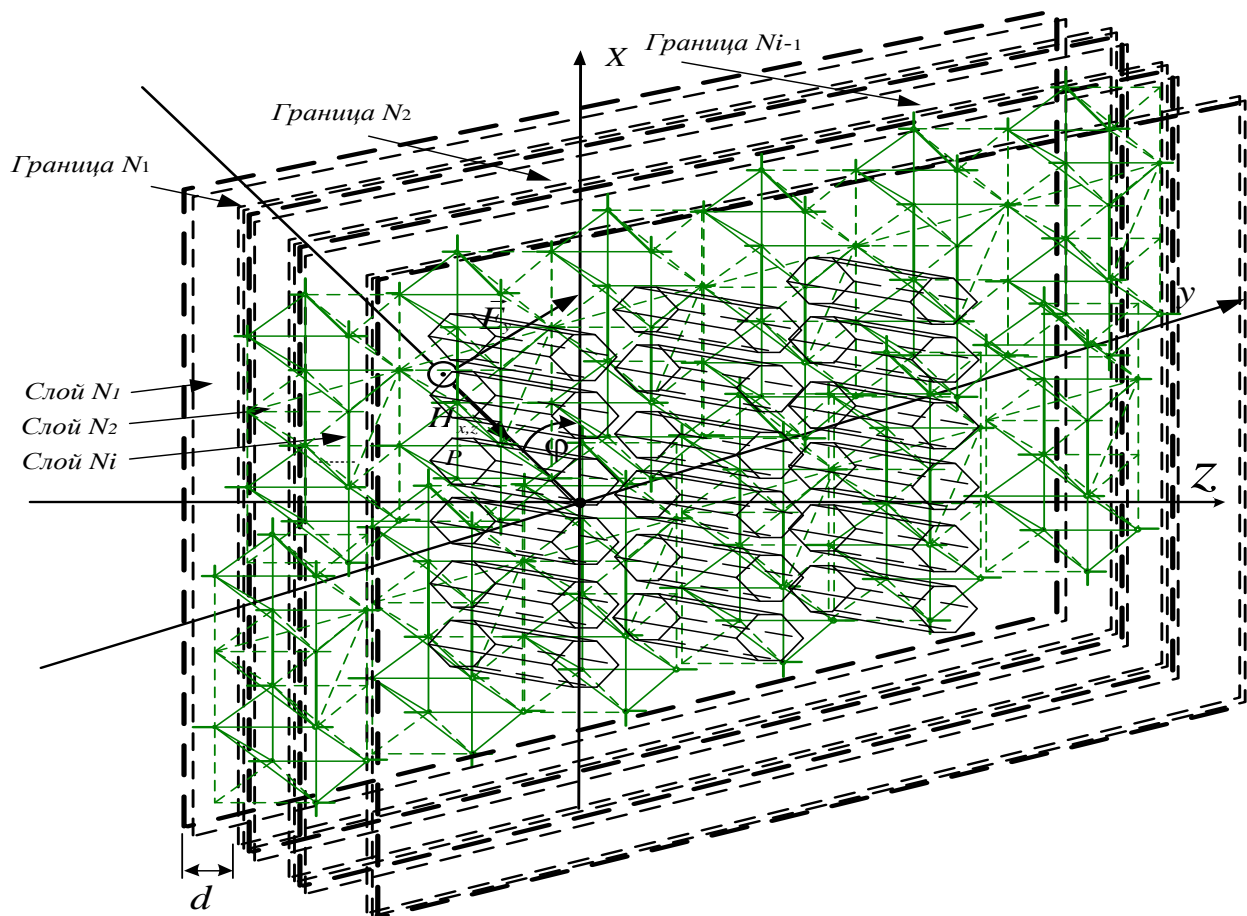


Рисунок 3.18 – Схема падения волны горизонтальной поляризации на многослойную экранирующую конструкцию с технологическими неоднородностями в виде запредельных волноводов в форме полых шестиугольных призм

Граничные условия (ГУ) для электрического поля в области волновода в рассматриваемом случае представлены системой [36, 82]:

$$\begin{aligned}
 E_y = 0, \quad E_z = 0 & \quad \text{при} \quad x = 0, \quad x = a, \\
 E_y = 0, \quad E_z = 0 & \quad \text{при} \quad y = 0, \quad y = b. \\
 A_y^3 = 0, & \quad \text{при} \quad x = 0, \quad x = a \\
 \partial A_y^3 / \partial y = 0, & \quad \text{при} \quad y = 0, \quad y = b.
 \end{aligned} \tag{3.29}$$

Компоненты падающего на экран ЭМП в принятых координатах можно записать в виде:

$$E_y = E_0 e^{-ik_0(z \cos(\phi) + x \sin(\phi))}, \quad H_x = \left( \frac{E_0}{Z_0} \right) / e^{-ik_0(z \cos(\phi) + x \sin(\phi))} \cdot \cos(\phi); \quad (3.30)$$

$$H_z = \left( \frac{E_0}{Z_0} \right) / e^{-ik_0(z \cos(\phi) + x \sin(\phi))} \cdot \sin(\phi), \quad k_0 = \omega \sqrt{\mu_0 \varepsilon_0},$$

где  $E_0$  – амплитуда падающего электрического поля, В/м.

Для анализа процесса распространения электромагнитной волны через многослойные экранирующие поверхности (МСЭП) разделим расчетную область от 0 до  $\infty$  на  $N$  слоев (последний слой полубесконечный). Данное разбиение имеет  $N-1$  границ, которые имеют координаты  $Z_1, Z_2, \dots, Z_i, \dots, Z_{N-1}$ . Электрофизические свойства (характеристики) каждого  $i$ -ого слоя постоянны и характеризуются магнитной проницаемостью  $\mu_i$  и относительной диэлектрической проницаемостью материала  $\varepsilon_i$  соответствующего слоя.

С учетом независимости свойств среды от координаты  $x$ , можно записать уравнения Максвелла в виде запаздывающей волны для каждого слоя в декартовой системе координат и в частотном представлении:

$$E_y^i = \tilde{E}_y^i(z) e^{-ik_0 x \sin(\phi)}, \quad H_x^i = \tilde{H}_x^i(z) e^{-ik_0 x \sin(\phi)}, \quad H_z^i = \tilde{H}_z^i(z) e^{-ik_0 x \sin(\phi)}. \quad (3.31)$$

$$\frac{\partial^2 \tilde{E}_y^i(z)}{\partial z^2} = i\omega \mu_0 \mu_i \tilde{H}_z^i(z); \quad (3.32)$$

$$ik_0 \varepsilon_i \sin(\phi) \tilde{E}_y^i(z) = i\omega \mu_0 \mu_i \tilde{H}_z^i(z); \quad (3.33)$$

$$\frac{\partial \tilde{H}_x^i}{\partial z} + ik_0 \sin(\phi) \tilde{H}_z^i(z) = i\omega \varepsilon_0 \varepsilon_i E_y^i(z). \quad (3.34)$$

Выражение (3.34) отражает связь  $\tilde{E}_y^i(z)$  и  $\tilde{H}_z^i(z)$  в каждом слое в виде:

$$\tilde{H}_z^i(z) = \tilde{E}_y^i(z) \cdot \sin(\varphi) \cdot \left( \frac{\varepsilon_i \cdot \sqrt{\mu_0 \varepsilon_0}}{\mu_a} \right). \quad (3.35)$$

Подставляя (3.33) в (3.34) для электрического поля можно получить следующее уравнение:

$$\frac{\partial^2 \tilde{E}_y^i(z)}{\partial z^2} - \gamma_i \tilde{E}_y^i(z) = 0, \quad (3.36)$$

где  $\gamma_i = ik_0 \varepsilon_i \sin(\varphi)$ .

С учетом констант  $C_1^i$  и  $C_2^i$ , характеризующих падающую и отраженную волны в слоях, решение системы уравнений (3.31-3.134) имеет вид:

$$\tilde{E}_y^i = C_1^i e^{-\gamma_i \tilde{h}_i} + C_2^i e^{-\gamma_i \tilde{h}_i}, \quad (3.37)$$

$$\tilde{H}_x^i = -\frac{C_1^i}{Z_i} e^{-\gamma_i \tilde{h}_i} + \frac{C_2^i}{Z_i} e^{-\gamma_i \tilde{h}_i},$$

где  $\tilde{h}_i = \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0 (\varepsilon_i - \sin^2(\varphi))}}$  – коэффициент диэлектрической связи слоёв.

В первом слое константа  $C_1^1 = E_0$  характеризует исходную падающую волну. В последнем слое  $C_2^N = 0$ , так как он полубесконечен, отраженной волны не возникает. Остальные константы находятся из условия непрерывности  $E_y^i$  и  $H_x^i$  на каждой границе. В итоге получим систему из  $2N$  линейных алгебраических уравнений с  $2N$  неизвестными [118]:

$$\begin{aligned} C_1^1 &= E_0; \\ C_1^1 e^{-\gamma_1 Z_1} + C_2^1 e^{\gamma_1 Z_1} - C_1^2 e^{-\gamma_2 Z_1} - C_2^2 e^{-\gamma_2 Z_1} &= 0; \\ \frac{C_1^1}{Z_1} e^{-\gamma_1 Z_1} - \frac{C_2^1}{Z_1} e^{\gamma_1 Z_1} - \frac{C_1^2}{Z_2} e^{-\gamma_2 Z_1} + \frac{C_2^2}{Z_2} e^{-\gamma_2 Z_1} &= 0; \\ \dots\dots\dots & \end{aligned} \quad (3.38)$$

$$\begin{aligned}
& C_1^i e^{-\gamma_i Z_i} + C_2^i e^{\gamma_i Z_i} - C_1^{i+1} e^{-\gamma_{i+1} Z_1} - C_2^{i+1} e^{-\gamma_{i+1} Z_i} = 0; \\
& \frac{C_1^i}{Z_i} e^{-\gamma_i Z_i} - \frac{C_2^i}{Z_i} e^{\gamma_i Z_i} - \frac{C_1^{i+1}}{Z_{i+1}} e^{-\gamma_{i+1} Z_1} + \frac{C_2^{i+1}}{Z_{i+1}} e^{-\gamma_{i+1} Z_i} = 0; \\
& \dots\dots\dots \\
& C_1^{N-1} e^{-\gamma_{N-1} Z_{N-1}} + C_2^{N-1} e^{\gamma_{N-1} Z_{N-1}} - C_1^N e^{-\gamma_N Z_{N-1}} - C_2^N e^{-\gamma_N Z_{N-1}} = 0; \\
& \frac{C_1^{N-1}}{Z_{N-1}} e^{-\gamma_{N-1} Z_{N-1}} - \frac{C_2^{N-1}}{Z_{N-1}} e^{\gamma_{N-1} Z_{N-1}} - \frac{C_1^N}{Z_N} e^{-\gamma_N Z_{N-1}} - \frac{C_2^N}{Z_N} e^{-\gamma_N Z_{N-1}} = 0; \\
& C_2^N = 0,
\end{aligned}$$

решение которой позволяет определить неизвестные константы и поле в расчетной области.

Расчет электромагнитных полей при падении плоской волны вертикальной поляризации под углом  $\Phi$  на многослойную экранирующую поверхность аналогичен случаю горизонтальной поляризации при условии, что магнитное поле имеет горизонтальную поляризацию и только компонент  $H_y$ , а электрическое поле – компоненты  $E_x$  и  $E_z$ .

Компоненты падающего на экран электромагнитного поля в принятых координатах можно записать в следующем виде:

$$\begin{aligned}
H_y &= \frac{E_0}{Z_0} e^{-ik_0(z \cos(\varphi) + x \sin(\varphi))}; \\
E_x &= \frac{E_0}{\cos(\varphi) \times e^{-ik_0(z \cos(\varphi) + x \sin(\varphi))}}; \\
E_z &= \frac{E_0}{\sin(\varphi) \times e^{-ik_0(z \cos(\varphi) + x \sin(\varphi))}}.
\end{aligned} \tag{3.39}$$

Уравнения Максвелла для каждого слоя в этом случае имеют вид:

$$\begin{aligned}
\frac{\partial H_y^i}{\partial z} &= -i\omega \varepsilon_0 \varepsilon_i E_x^i; \\
\frac{\partial H_y^i}{\partial x} &= i\omega \varepsilon_0 \varepsilon_i E_z^i; \\
\frac{\partial E_x^i}{\partial z} - \frac{\partial E_z^i}{\partial x} &= -i\omega \mu_0 \varepsilon_i H_y^i.
\end{aligned} \tag{3.40}$$

Ввиду независимости свойств среды от координаты  $X$  можно найти решение в виде запаздывающей электромагнитной волны:

$$\begin{aligned} H_y^i &= \tilde{H}_y^i(z) e^{-ik_0 x \sin(\varphi)}; \\ E_x^i &= \tilde{E}_x^i(z) e^{-ik_0 x \sin(\varphi)}; \\ E_z^i &= \tilde{E}_z^i(z) e^{-ik_0 x \sin(\varphi)}. \end{aligned} \quad (3.41)$$

Тогда система уравнений (3.40) после подстановки (3.41) примет вид:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \tilde{H}_y^i(z)}{\partial z} &= -i\omega \varepsilon_0 \varepsilon_i \tilde{E}_z^i(z); \\ -ik_0 \mu_i \sin(\varphi) \tilde{H}_y^i(z) &= i\omega \varepsilon_0 \varepsilon_i \tilde{E}_z^i(z); \\ \frac{\partial \tilde{E}_x^i}{\partial z} + ik_0 \sin(\varphi) \tilde{E}_z^i(z) &= -i\omega \mu_0 \mu_i H_y^i(z). \end{aligned} \quad (3.42)$$

Из анализа выражений (3.42) можно получить выражение для магнитного поля:

$$\frac{\partial^2 \tilde{H}_y^i(z)}{\partial z^2} - \gamma_i' \tilde{H}_y^i = 0, \quad (3.43)$$

где  $\gamma_i' = ik_0 \mu_i \sin(\varphi)$ .

Дальнейшее решение задачи аналогично случаю горизонтальной поляризации. Выражения (3.43) позволит в дальнейшем произвести расчет минимума функционала энергии в целях определения коэффициента экранирования многослойной экранирующей конструкции с технологическими неоднородностями в виде запредельных волноводов в форме полых шестиугольных призм при воздействии электромагнитных излучений.

### 3.2.2. Определение функционала энергии (потенциала) электромагнитного поля на основе метода конечных элементов и тензорного представления электромагнитного поля

В соответствии с [81, с.146] решение однородных задач, таких как поиск собственных значений, предусматривает поиск функционала и предполагает использование вариационного метода Ритца. Получаемые функционалы будут содержать двукратные интегралы по рассматриваемой области или по её границе.

Для определения функционала энергии (потенциала) электромагнитного поля применим частный случай *метода собственных колебаний*, а именно  $Z$ -метод, предусматривающий учёт собственных значений в граничном условии импедансного типа, в целях решения двумерной скалярной задачи дифракции, в котором собственным значением является импеданс поверхности. Импедансные граничные условия предусматривают условия исчезновения на границе тела либо поля, либо нормальной производной.

#### *Сопоставление LR-цепей и эквивалентных конечно-элементных ячеек*

В целях решения представленной ранее задачи создания ФРК на основе *синтеза поверхностного импеданса* в дальнейшем будем использовать эквивалентные схемы в качестве удобного метода изучения свойств системы, выраженных через её используемые параметры. В соответствии с тензорной природой ЭМП, и основ  $TLM$  и МИАП [79, 84, 86, 87, 97] для корректного моделирования поверхностного импеданса необходимо учитывать потери проводников, как эквивалентов покрытий. Проектируемая конструкция – это сложная структура с сильно неоднородными областями и/или криволинейными структурами. В  $TLM$  с целью дискретизации пространства используется сетка *Аль-Муктара и Ситча* (рис. 3.19): пересекающиеся линии передачи сети могут быть перегружены для адаптации плотности сети к локальной неоднородности полей. Кроме того, этот алгоритм адаптирован для обработки криволинейных структур – любая ортогональная криволинейная система координат может быть легко применена к задаче из-за того, что алгоритм не зависит от вида дискретизации пространства



[79, 86]. Ячейка с размерами  $\Delta u$ ,  $\Delta v$ ,  $\Delta w$  параметрически сопоставляется с единичной ячейкой с виртуальной длиной  $\Delta l$  (рис. 3.20). Ячейка с большими размерами формально эквивалентна ячейке с меньшими размерами, но более высокой диэлектрической проницаемостью. Увеличенное время распространения импульса (подобласти потерь) может быть учтено путём подключения сосредоточенного резистора (резистивной заглушки Джонса – **resistive stub**) через каждый узел сетки (рис.3.21) [86].

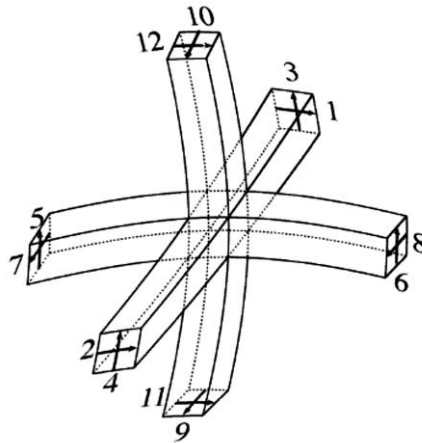


Рисунок 3.19-Трехмерная криволинейная сетка *Аль-Муктара* и *Ситча*

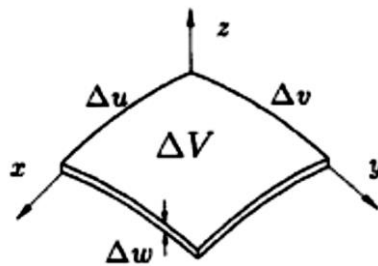


Рисунок 3.20-Элемент объема  $\Delta V$  в плоскости  $x-y$

Метрические параметры обрабатываются так же, как и параметры материала. Однако, поскольку криволинейная сетка анизотропная, сопротивления «заглушки» зависят от направления  $u$ ,  $v$  и  $w$  соответственно.

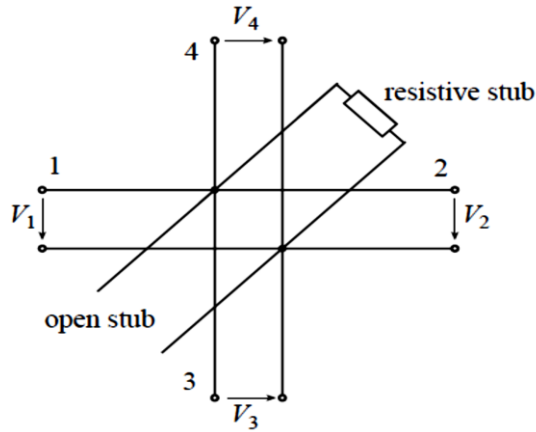


Рисунок 3.21 – Двумерный узел шунтирования с заглушками

Нормированные сопротивления «заглушки» задаются системой:

$$y_{0u} = 2 \left( \frac{vw}{u\Delta t} \cdot \frac{\epsilon_r}{c} - 2 \right);$$

$$y_{0v} = 2 \left( \frac{wu}{v\Delta t} \cdot \frac{\epsilon_r}{c} - 2 \right); \quad (3.44a)$$

$$y_{0w} = 2 \left( \frac{uv}{w\Delta t} \cdot \frac{\epsilon_r}{c} - 2 \right);$$

$$z_{0u} = 2 \left( \frac{vw}{u\Delta t} \cdot \frac{\mu_r}{c} - 2 \right);$$

$$z_{0v} = 2 \left( \frac{wu}{v\Delta t} \cdot \frac{\mu_r}{c} - 2 \right); \quad (3.44б)$$

$$z_{0w} = 2 \left( \frac{uv}{w\Delta t} \cdot \frac{\mu_r}{c} - 2 \right).$$

Нестабильности, вызванные отрицательными допусками «заглушек», устраняются уменьшением временного шага  $\Delta t$ . Для быстрой численной сходимости метода применяется гибридная матрично-сетчатая реализация. В этом случае на всем протяжении линии передачи временной шаг  $\Delta t$  и скорости  $v_n$  распространения импульсов синхронизированы. Поверхностное сопротивление (поверхностный импеданс)  $Z_A$  – это сопротивление квадратичного поверхностного

элемента произвольной размерности, при условии, что тангенциальное поле внутри него однородно и задается следующим выражением:

$$Z_A = R_A + jX_A = (1 + j) \sqrt{\frac{\omega \mu}{2\sigma}}; \quad (3.45)$$

где  $\mu$ - магнитная проницаемость, а  $\sigma$ -проводимость. Поверхностный эффект

$$d = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu \sigma}}.$$

имеет глубину проникновения

Прямоугольный поверхностный элемент с длинами сторон  $\Delta u$  и  $\Delta v$  для поверхностных составляющих тока протекающих в  $u$ -и  $v$ -направлениях имеет сопротивления:

$$Z_u = Z_A \cdot \frac{\Delta u}{\Delta v}; \quad (3.46)$$

$$Z_v = Z_A \cdot \frac{\Delta v}{\Delta u}, \quad (3.47)$$

и моделируются с произвольной точностью с помощью «лестничной сетки» (англ. *staircase mesh*, *SC-mesh*), предназначенной для описания тонкого проводящего листа, расположенного посередине между двумя диэлектрическими слоями (рис. 3.22).

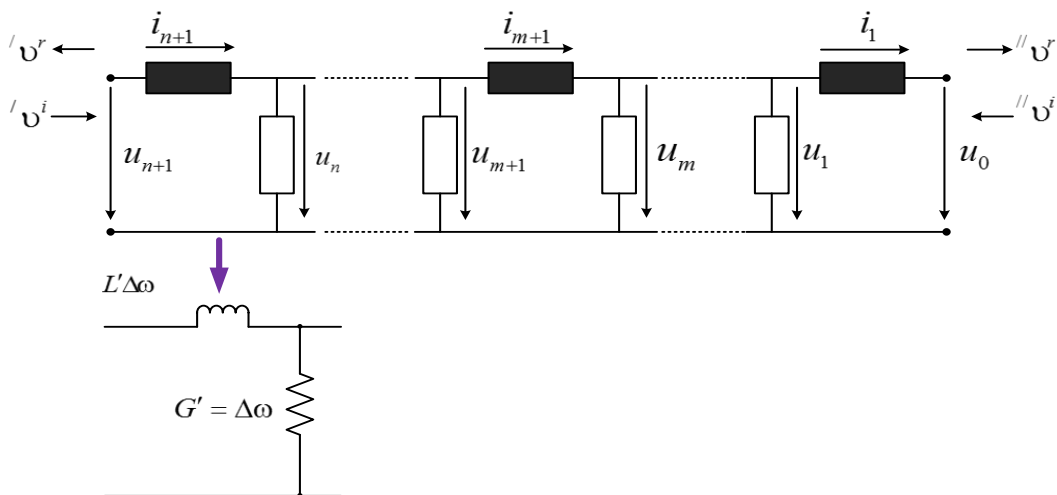


Рисунок 3.22–  $LR$ -лестничная сетка ( $SC$ - $mesh$ ) для моделирования поверхностного импеданса

Для сохранения симметрии *SC-mesh* составлена из  $n$  сосредоточенных резисторов, соединенных параллельно, и  $n + 1$  сосредоточенных индуктивностей, соединенных последовательно, то есть состоит из большого количества *LR*-секций, что формирует неоднородность импеданса  $Z_A$ .

Предполагается, что площадь поверхности и её кривизна велики по сравнению с глубинами проникновения поверхностного эффекта  $d$ . Ячейка поверхностного элемента, которая моделирует затухающую плоскую электромагнитную волну, распространяющуюся нормально к поверхности, «пренебрегает» связью с соседними ячейками. Поверхность проводника преобразуется в поверхностные элементы с длинами сторон  $\Delta u$  и  $\Delta v$  соответственно.

Для этого в направлении  $w$ , нормальном к поверхности проводника, вводится дискретизация с длиной интервала  $\Delta w$ , которая выбирается малой по сравнению с глубиной проникновения поверхностного эффекта  $d$  и поэтому может быть значительно меньше, чем  $\Delta u$  и  $\Delta v$  соответственно. При моделировании элемента объема  $\Delta V$  с размерами  $\Delta u$ ,  $\Delta v$  и длиной  $\Delta w$  индуктивности  $L'_u \Delta w$  и  $L'_v \Delta w$  для составляющих тока в  $u$ -и  $v$ -направлениях задаются:

$$L'_u \Delta w = \mu \cdot \frac{\Delta u \Delta w}{\Delta v}; \quad (3.48)$$

$$L'_v \Delta w = \mu \cdot \frac{\Delta v \Delta w}{\Delta u}, \quad (3.49)$$

а, параллельные проводимости  $G''_u \Delta w$  и  $G''_v \Delta w$ , соответственно:

$$G'_u \Delta w = \sigma \cdot \frac{\Delta v \Delta w}{\Delta u}; \quad (3.50)$$

$$G'_v \Delta w = \sigma \cdot \frac{\Delta u \Delta w}{\Delta v}. \quad (3.51)$$

Каскадирование бесконечного числа элементов согласно рисунку 3.22 дает характеристические сопротивления левой стороны:

$$\tilde{Z}_u = Z_s \cdot \frac{\Delta u}{\Delta v}; \quad (3.52)$$

$$\tilde{Z}_v = Z_s \cdot \frac{\Delta v}{\Delta u}, \quad (3.53)$$

где

$$Z_s = Z_A \sqrt{1 + 2j \left( \frac{\Delta w}{d} \right)^2}; \quad (3.54)$$

Для случая  $\Delta w \rightarrow 0$  получаем  $\tilde{Z}_{u,v} \rightarrow Z_{u,v}$ , а при  $\Delta w \ll d$  мы получаем:

$$Z_s = \sqrt{\frac{\omega \mu}{2\sigma}} \left[ 1 + j - (1 - j) \left( \frac{\Delta w}{d} \right)^2 \right]. \quad (3.55)$$

Поверхностный импеданс  $Z_i$ , моделируемый *SC-mesh* с конечным числом *LR*-секций при изменении  $i$  от 1 до  $n$ , определяется следующим образом:

$$Z_i = \omega L' \Delta w + \frac{1}{G' \Delta w + \frac{1}{Z_{i-1}}}. \quad (3.56)$$

При условии определения глубины проникновения  $d_0$  как  $\Delta w$  на достаточно высокой частоте  $f_0$  *SC-mesh*, содержащая  $n$  *LR*-секций, будет представлять собой *широкополосную модель поверхностного эффекта*. Точность такой модели на нижней частоте зависит от глубины проникновения  $d_0$  и количества секций и возрастает с их увеличением. *SC-mesh* описывается набором уравнений состояния, а *LR*-секции, входящие в состав сетки, представляются следующими уравнением состояния дискретного времени:

$$\frac{d}{dt} i_{n+1} = - \left( \frac{1}{LG_0} + \frac{1}{LY_0} \right) i_{n+1} + \frac{1}{LG_0} i_n + \frac{1}{L} v^i, \quad (3.57)$$

где  $v^i$  – падающий импульс волны напряжения в конце «лестницы»,  $Y_0 = \sqrt{2(1 + G_0/4)}$  – проводимость линии сопряжения *SC-mesh* (проводимость узла);  $G_0 = k_M \Delta l Z_0$  – нормализованный характеристический *адмитанс*, связанный с магнитной восприимчивостью вещества  $k_M$ . Уравнение состояния на внутренних *LR*-секций имеют вид:

$$\frac{d}{dt}i_{n+1} = \frac{1}{LG_0}i_{n+2} - \frac{2}{LG_0}i_{n+1} + \frac{1}{LG_0}i_n, \quad (3.58)$$

**Выходное уравнение напряжения импульса** волны в конце «лестницы» задается следующим образом:

$${}^{//}\upsilon^r = {}^{//}\upsilon^i + \frac{1}{Y}I, \quad (3.59)$$

где  $I$  – ток через соседнюю индуктивность.

Вся сетка при напряжениях волны импульсов  ${}^{\prime}\upsilon^i$ ,  ${}^{//}\upsilon^i$ ,  ${}^{\prime}\upsilon^r$  и  ${}^{//}\upsilon^r$  на обоих концах «лестницы» (рис. 3.22) описывается уравнением состояния, представляющим собой набор обыкновенных ДУ:

$$\frac{d}{dt}I = AI + \frac{2}{L}\upsilon^i, \quad (3.60)$$

с

$$I = \begin{bmatrix} i_1 \\ i_1 \\ \cdot \\ \cdot \\ i_n \\ i_{n+1} \end{bmatrix}; \quad \upsilon^i = \begin{bmatrix} -{}^{//}\upsilon^i \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ {}^{\prime}\upsilon^i \end{bmatrix}; \quad A = \begin{bmatrix} -\alpha & \gamma & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ \gamma & -\beta & \gamma & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & \gamma & -\beta & \gamma & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \gamma & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & -\beta & \gamma \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & \gamma & -\alpha \end{bmatrix}, \quad (3.61)$$

где

$$\alpha = \frac{1}{LY_0} + \frac{1}{LG_0}; \quad \beta = \frac{2}{LG_0}; \quad \gamma = \frac{1}{LG_0}, \quad (3.62)$$

представляют собой постоянные детерминированные ЭФС РППКМ каждого слоя ФРК. Рассмотрение неоднородных сред с потерями, в соответствии с положениями, представленными в [82], предусматривает преобразование структуры *SC-mesh* (рис. 3.15), к виду, представленному на рисунке 3.16.

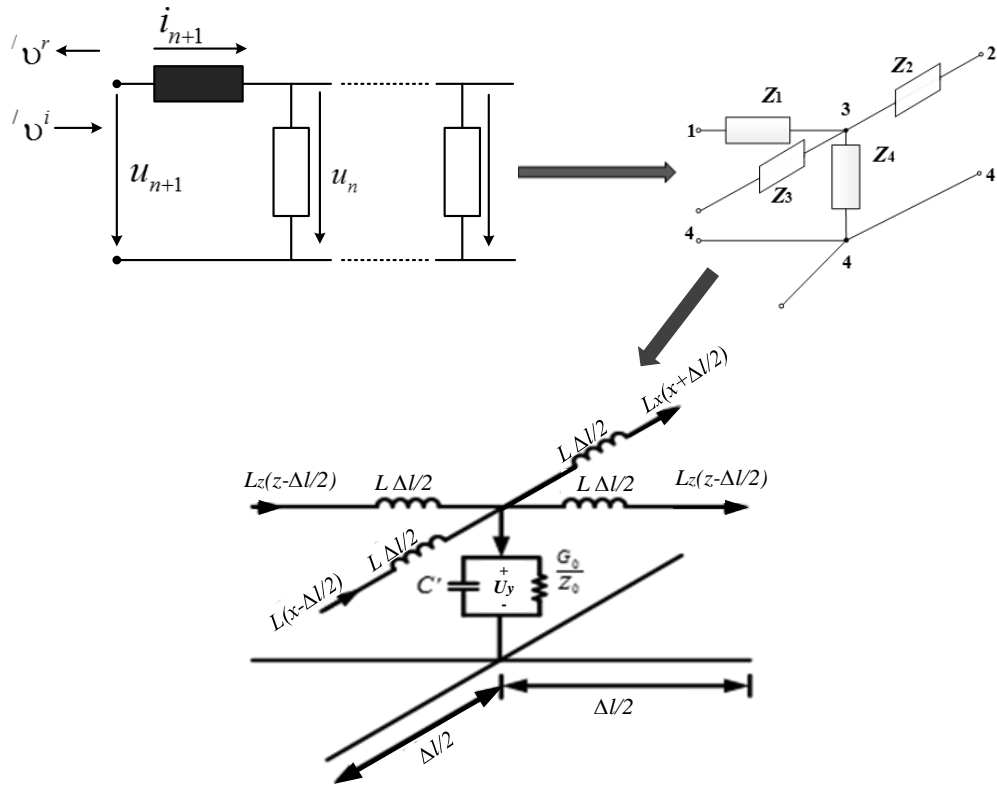


Рисунок 3.22 – Преобразование структуры *SC-mesh* в эквивалентную конечно-элементную ячейку, представляющая собой одномерный *TEM*-волновод

Таким образом, *LR*-секция (рис. 3.23) представляет собой конечно-элементную ячейку «треугольник-звезда» (одномерный *TEM*-волновод) [82–85, 118–121].

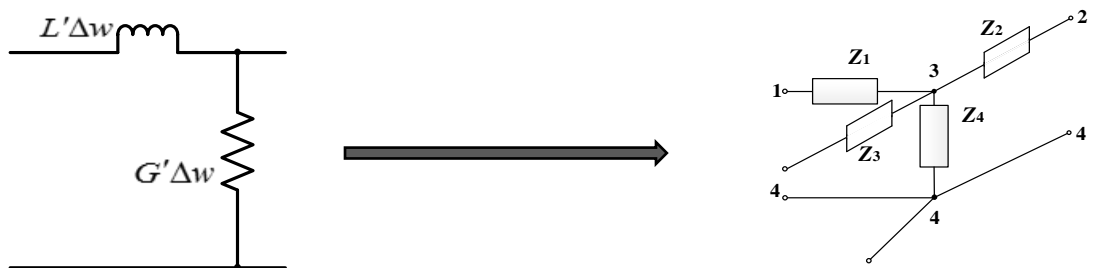


Рисунок 3.23 – Преобразование *LR*-секцию *SC-mesh* в эквивалентную ей конечно-элементную ячейку в виде «треугольник-звезда»

При этом в [82] указывается, что с целью учёта свойств вещества и моделирования неоднородной среды, «погруженного» в *SC-mesh*, к парам клемм сетки дополнительно подключены реактивные двухполюсники с емкостью:

$$C' = CY_0 \frac{\Delta l}{2} \quad (3.63)$$

где  $C$  – емкость шунта на единицу длины главной линии  $\Delta l$ , что на низких частотах приведёт к увеличению диэлектрической постоянной (где  $\epsilon$  не является постоянной). Полная емкость шунта в каждом узле становится равной:

$$C'' = 2C\Delta l \left( 1 + \frac{Y_0}{4} \right). \quad (3.64)$$

*Определение минимума функционала энергии (потенциала) электромагнитного поля для трехмерного случая*

В этом подразделе будет рассмотрена внешняя задача дифракции на замкнутой (не уходящей в бесконечность) поверхности  $S_z$ , обладающей импедансными свойствами. На рисунке 3.24 представлена триангуляция Делоне произвольной расчетной области  $\Omega$  с последующим её представлением в виде треугольной сетки [90–96, 109, 122–124].

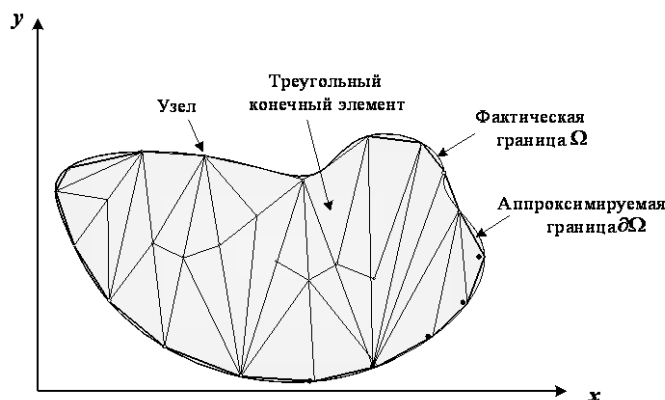


Рисунок 3.24 – Двумерная расчетная область  $\Omega$  с разбиением её на треугольные домены



В соответствии с принятыми положениями и ограничениями (п.2.3 с .119), при котором рассматривается задача дифракции на поверхности с ИмГУ, предусматривающими исчезновения на границе либо поля, либо его нормальной производной, искомое поле  $U(r)$  в области  $\Omega$  может быть представлено уравнением [81]:

$$\Delta U + k^2 U = f \quad (3.65)$$

и на её границе  $S$  импедансному граничному условию (КУ II рода):

$$U(r)^+ - U(r)^- - Z_i \left( \frac{\partial U(r)^+}{\partial N} + \frac{\partial U(r)^-}{\partial N} \right) = 0|_{S_z} \quad (3.66)$$

где  $N$  – направление внешней по отношению к рассматриваемой области нормали. В случае если  $\Omega$  – бесконечномерная область, то дифрагированное поле должно удовлетворять условию излучения:

$$u = \frac{e^{-ikR}}{R} F(\theta, \varphi), \quad R \rightarrow \infty \quad (3.67)$$

Собственный импеданс  $Z_{in}$  в общем случае комплексное число. Его мнимая часть ( $\text{Im} Z_{in} \leq 0$ ) характеризует потери энергии на излучение и поглощение в стенках тела. При ранее принятых ограничениях и рассмотрении ЭК как частопериодической гофре, предусматривающей потери только в стенках тела при отсутствии потерь на излучение,  $Z_{in}$  – вещественно ( $\text{Im} Z_{in} = 0$ ) и, как следствие, дифракционная задача становится *самосопряженной* [81, с.89]) и в соответствии с  $\Delta u_n + k^2 u_n = 0$  являются функциями  $k$ , а резонанс наступает, когда один из собственных импедансов близок к значению истинного импеданса задачи дифракции, то есть  $Z_{in}(k) \approx Z_i(k)$  и, в частности, для краевого условия (КУ) I рода [85]:

$$U = 0|_S \text{ или } \frac{\partial U}{\partial N} = 0|_{S_z}, \quad (3.68)$$

когда  $Z_{in}$  мало или велико, соответственно.

Как было указано выше, для закрытых резонаторов ( $\text{Im} Z_{in} = 0$ ) корни уравнения  $Z_{in}(k) - Z_i = 0$  вещественны, мы имеем место с бесконечными резонансами на частотах, равным этим корням. Если импеданс является функцией точки  $s$  на поверхности тела  $S_Z (Z_i = Z_i(s))$ , то есть вместо (3.65) должно выполняться следующее ИмГУ (КУ II рода) и граничное условие (3.68) заменяем ИмГУ:

$$u_n + Z_{in}(s) \frac{\partial u_n}{\partial N} = 0 \Big|_S \quad (3.69)$$

где  $Z_{in}(s)$  – функцией точки  $s$ , зависящая от  $Z_i(S)$  и содержащая некий числовой параметр, который мы примем за собственное значение.

Получим *функционал* для собственных значений сформулированной однородной задачи относительно  $Z$ -метода, когда собственным значением является *импеданс* поверхности тела, изотропный и постоянный по всей поверхности [81]. Принимаем, что в поле нет других тел кроме тела с импедансной поверхностью  $S_Z$  так что  $\varepsilon \equiv 1$ .

Найдем такое значение импеданса  $Z_i$ , при котором существует нетривиальное решение уравнения:

$$\Delta u + k^2 Z_i(s) u = 0 \quad \mathbf{в} \quad \Omega^+, \quad (3.70)$$

$$\Delta u + k^2 u = 0 \quad \mathbf{в} \quad \Omega^-, \quad (3.71)$$

где  $\Omega^+$  – внешнее пространство,  $\Omega^-$  – внутренний объем (эти области «развязанные»). С условием непрерывности функции  $u$  и её нормальной производной на границе диэлектрика  $S_Z$ :

$$\begin{aligned} u^+ - u^- \Big|_{S_Z} &= 0, \\ \frac{\partial u^+}{\partial N} - \frac{\partial u^-}{\partial N} \Big|_{S_Z} &= 0, \end{aligned} \quad (3.72)$$

и условием на границе  $S_z$ :

$$u|_{S_z} = 0. \quad (3.73)$$

Собственные значения однородной задачи  $Z_{in}(s)$  вводятся с помощью вспомогательных импедансных ГУ, которые должны выполняться на  $S_z$ :

$$E_{nt} - Z_{in}(s)H_{n\tau} = 0|_{S_z}; \quad E_{n\tau} + Z_{in}(s)H_{nt} = 0|_{S_z}. \quad (3.74)$$

где  $t, \tau$  – взаимно перпендикулярные орты, касательные к  $S_z$  и образующие с внешней нормалью  $N$  области  $V$  правую тройку.

Собственные функции должны удовлетворять в рассматриваемой области однородным уравнениям Максвелла:

$$\text{rot}H_n - ikE_n = 0; \quad \text{rot}E_n + ikH_n = 0. \quad (3.75)$$

Необходимо определить функционал  $F(\bar{E})$ , стационарный на (3.74) и (3.75) и равный в стационарных точках соответствующим собственным значениям. В данном случае правомерно применять вариационный аппарат, в частности, метод Рунца, предусматривающий минимизацию функционала. Начнём с предположения, что  $S_z$  – замкнутая поверхность, окружающая всё поле. Первый промежуточный функционал  $F(\bar{E})$ , для которого выполняется условие (3.45) с КУ I и II рода (ИмГУ), заданными на  $S_z$  в области  $\Omega$ , представляется в следующем виде [81,85]:

$$F(\bar{E}) = \int_V (\text{rot}E)^2 d\Omega - k^2 \int_{V^-} E^2 d\Omega + \frac{ik}{\omega} \int_{S_z} (E_t^2 + E_\tau^2) dS_z. \quad (3.76)$$

Этот функционал стационарен на решениях однородной задачи – в стационарных точках он принимает нулевые значения, что является необходимым условием решения дифракционной задачи на частотофрагирующей поверхно-

сти [81, с. 151]. Условия (3.74), (3.75) являются для (3.76) естественными. Разрешая равенство  $F(\bar{E})=0$  относительно  $S_z$ , получим второй промежуточный функционал:

$$W_{\approx 2}(E) = \frac{ik \left\{ \int_V [k^2 E^2 - (\mathbf{rot}E)^2] d\Omega + 2 \int_{S_z} [E_t^2 (\mathbf{rot}E)_\tau - E_\tau^2 (\mathbf{rot}E)_t] dS \right\}}{\int_{S_z} [(\mathbf{rot}E)_t^2 + (\mathbf{rot}E)_\tau^2] dS}. \quad (3.77)$$

Если при каком-то определенном  $Z$ -резонаторе существуют собственные колебания на данной частоте, то и в другом резонаторе, с той же поверхностью  $S_z$ , но с импедансом  $1/Z_i$ , так же существуют собственные колебания на той же частоте (инвариант, относительно подстановки  $Z_i \rightarrow 1/Z_i$ ). Тангенциальные составляющие допустимых функций  $E$  для этих функционалов должны быть непрерывными на  $S_z$ , а тангенциальные составляющие  $\mathbf{rot}E$  – «разрывными», для обеспечения возможности «разрыва» компонент собственных полей. В соответствии с приведенными положениями рассмотрим решение двумерной краевой задачи для конечных элементов в частотной области, применяя метод Рунца к функционалу (3.77).

Для этого осуществим аппроксимацию области  $\Omega$  (рис.3.24) с целью поиска «функций формы», заданных внутри каждого элемента (домена), который позволит определить перемещения поля внутри данного элемента по перемещениям в узлах или вдоль краев сетки (в местах стыков конечных элементов) посредством соответствующих полиномов. Неизвестные значения поля находят путем минимизации некоторого функционала энергии (потенциала)  $\min F(\bar{E})$  [83, 86, 87, 90–96]. После чего получается СЛАУ, которое описывает всю энергию в анализируемой конфигурации, что и является конечным этапом при поиске решения электродинамической задачи. По сути, решение сводится к аппроксимации сплошной среды с бесконечным числом степеней свободы

$N^{DOF} \rightarrow \infty$  (неизвестные значения «функции формы», связанные с узлами сетки или краями, англ. *DOF – The Degrees of Freedom*) совокупностью подобластей, имеющих конечное число  $N^{DOF} \rightarrow \lim \Phi_e$  (функция с конечным носителем) [93–96], что, по сути, и предопределило название метода.

Описание изогнутой части границы  $\partial\Omega$  нерегулярной сеткой значительно лучше, чем регулярной прямоугольной сетки, которая обычно используется в МКРВО. Как видно из рисунка 3.24, сетка может иметь различные размеры элементов (различную плотность – *Different Densities, DD*) в разных областях. Плотность сетки зависит от ожидаемого характера распределения поля, свойств материала (сильная нелинейность или неоднородность), типа и формы границы и так далее. Если в исследуемом домене предполагается линейное изменение неизвестной функции  $\Phi_e$ , домен называется линейным.

Анализ начнем с одного домена. Представленные ниже ДУ описывают решение МКЭ КЗ в частотной (комплексной) плоскости, связанной с распространением электромагнитной волны (ЭМВ) в экранирующем объеме. Выражение (3.77) преобразуется к виду:

$$F(\bar{E}) = -\frac{\partial}{\partial x} \left( \alpha_x \frac{\partial \Phi_e(x, y)}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left( \alpha_y \frac{\partial \Phi_e(x, y)}{\partial y} \right) + \beta \Phi_e(x, y), \quad (x, y) \in \Omega \subseteq R^2 \quad (3.78)$$

$$\Phi_e(x, y) = p, \quad (x, y) \in \partial_1 \Omega \quad (3.79)$$

$$\left( \alpha_x \frac{\partial \Phi_e(x, y)}{\partial x} \cdot \vec{e}_x + \alpha_y \frac{\partial \Phi_e(x, y)}{\partial y} \cdot \vec{e}_y \right) \cdot \vec{n} + \gamma \Phi_e(x, y) = q, \quad (x, y) \in \partial_2 \Omega \quad (3.80)$$

где  $\Phi_e(x, y)$  – неизвестная скалярная функция формы (СФФ, *Scalar function of the shape – SFS*);  $\Omega$  – расчетная область, а  $\partial_1 \Omega$  и  $\partial_2 \Omega$  – её границы;  $\alpha, \beta, \gamma$  – постоянные детерминированные свойства материалов (ЭФС);  $p, q$  – заранее определенные функции на  $\partial\Omega$ ;  $\vec{n}$  – вектор нормали  $\partial\Omega$ ;  $\vec{e}_x, \vec{e}_y$  – компоненты вектора распространения электрической моды ЭМВ;  $F(E)$  – линейный функционал.

Анализ электродинамических задач при помощи МКЭ не предусматривает нахождения решения КЗ в дифференциальной форме (3.78) – (3.80). Применение метода Ритца предполагает вычисление интеграла энергии ЭМП с помощью эквивалентной интегральной функции (ЭИФ), что приводит к необходимости интегрирования их остатков с некоторым набором весовых функций  $\omega_i$  при  $i = 1, 2, 3 \dots N$ .

Для того, чтобы иметь квадратичную СЛАУ, количество весовых функции  $\omega_i$  должно быть равно числу  $DOF$ . С целью последующей дискретизации система (3.78) – (3.80) может быть представлена следующим образом:

$$F(\bar{E}) = \iint_{\Omega} \omega_i \cdot (\beta \Phi_e(x, y) - f) d\Omega = - \iint_{\Omega} \nabla \omega_i \cdot \left[ \nabla \left( \alpha_x \frac{\partial \Phi_e(x, y)}{\partial x} \cdot \vec{e}_x + \alpha_y \frac{\partial \Phi_e(x, y)}{\partial y} \cdot \vec{e}_y \right) \right] d\Omega - \int_{\partial_1 \Omega} \omega_i \left( \alpha_x \frac{\partial \Phi_e(x, y)}{\partial x} \cdot \vec{e}_x + \alpha_y \frac{\partial \Phi_e(x, y)}{\partial y} \cdot \vec{e}_y \right) \cdot \vec{n} dl - \int_{\partial_2 \Omega} \omega_i (\gamma \Phi_e(x, y) - p) \cdot dl. \quad (3.81)$$

$$\int_{\partial_2 \Omega} \omega_i \cdot (\gamma \Phi_e(x, y) - p) dl = 0. \quad (3.82)$$

Выражение (3.81) представляет собой решение ЭИФ при ГУ Дирихле (значение  $\Phi$  вдоль  $\partial_2 \Omega$  должна быть равна переменной  $p$ ). В уравнении (3.82) с учетом выражения (3.81) интегралом по границе  $\partial_1 \Omega$  можно пренебречь. Следовательно, значение весовых функций на этой границе также принимают нулевые значения  $\omega_i = 0$ . В связи с этим выражение (3.81) принимает следующий вид:

$$F(\bar{E}) = \iint_{\Omega} \omega_i \cdot (\beta \Phi_e - f) d\Omega = - \iint_{\Omega} \nabla \omega_i \cdot \left[ \nabla \left( \alpha_x \frac{\partial \Phi_e(x, y)}{\partial x} \cdot \vec{e}_x + \alpha_y \frac{\partial \Phi_e(x, y)}{\partial y} \cdot \vec{e}_y \right) \right] d\Omega. \quad (3.83)$$

Выражение (3.83), при высказанных выше допущениях является ЭИФ решения КЗ. Значение неизвестной функции формы  $\Phi_i^e(x, y)$  внутри треугольного линейного домена может быть определено при помощи полиномиального приближения следующим образом:

$$\Phi_e^i(x, y) = a + bx_e^i + cy_e^i, \quad (3.84)$$

где  $i$  – верхний индекс, указывающий локальное приближение внутри элемента в местных декартовых координатах  $x, y$ . Так как искомая функция  $\Phi_e^i(x, y)$  является скалярной, вполне логична аппроксимация этой функции внутри домена своими параметрами в узлах треугольника вместо констант  $a, b$  и  $c$  (рис. 3.25).

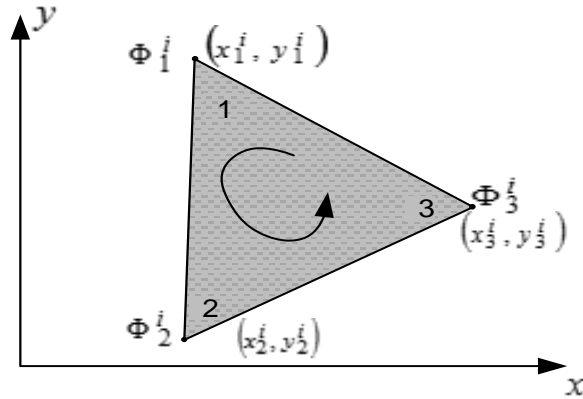


Рисунок 3.25 – Треугольный домен с локальной нумерацией узлов и 3-мя степенями свободы

Для этого запишем выражение (3.84) в матричной форме для каждого узла треугольника отдельно:

$$\begin{bmatrix} \Phi_1^i \\ \Phi_2^i \\ \Phi_3^i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x_1^i & y_2^i \\ 1 & x_2^i & y_2^i \\ 1 & x_3^i & y_3^i \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} = [S^i] \cdot \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix}, \quad (3.85)$$

Все символы из выражения (3.85) показаны на рисунке 3.25. Параметры аппроксимации в (3.85), то есть константы  $a, b$  и  $c$ , можно найти из этого же выражения следующим образом:

$$\begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x_1^i & y_2^i \\ 1 & x_2^i & y_2^i \\ 1 & x_3^i & y_3^i \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Phi_1^i \\ \Phi_2^i \\ \Phi_3^i \end{bmatrix} = [S^i]^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \Phi_1^i \\ \Phi_2^i \\ \Phi_3^i \end{bmatrix}. \quad (3.86)$$

Согласно (3.86), для вычисления параметров  $a$ ,  $b$ ,  $c$  нужно найти матрицу, обратную (3.85). Определитель матрицы в два раза превышает площадь соответствующего элемента:

$$\det[S^i] = 2 \cdot A = (x_1^i \cdot y_2^i - x_2^i \cdot y_1^i) + (x_2^i \cdot y_3^i - x_3^i \cdot y_2^i) + (x_3^i \cdot y_1^i - x_1^i \cdot y_3^i) = [(x_2^i - x_1^i)(y_3^i - y_1^i) - (x_3^i - x_2^i)(y_2^i - y_1^i)] \quad (3.87)$$

С учетом определителя (3.87) матрицу, обратную матрице (3.86), представим в следующем виде:

$$\begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix}^{-1} = \frac{1}{2A} \begin{bmatrix} x_2^i \cdot y_3^i - x_3^i \cdot y_2^i & x_3^i \cdot y_1^i - x_1^i \cdot y_3^i & x_1^i \cdot y_2^i - x_2^i \cdot y_1^i \\ y_2^i - y_3^i & y_3^i - y_1^i & y_1^i - y_2^i \\ x_3^i - x_2^i & x_1^i - x_3^i & x_2^i - x_1^i \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Phi_1^i \\ \Phi_2^i \\ \Phi_3^i \end{bmatrix}. \quad (3.88)$$

Выражение (3.84) в матричной форме в соответствии с (3.88) можно представить в следующем виде:

$$\begin{aligned} \Phi_e^i &= [1 \quad x \quad y] \cdot \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix}^{-1} = \\ &= [1 \quad x \quad y] \cdot \frac{1}{2A} \begin{bmatrix} x_2^i \cdot y_3^i - x_3^i \cdot y_2^i & x_3^i \cdot y_1^i - x_1^i \cdot y_3^i & x_1^i \cdot y_2^i - x_2^i \cdot y_1^i \\ y_2^i - y_3^i & y_3^i - y_1^i & y_1^i - y_2^i \\ x_3^i - x_2^i & x_1^i - x_3^i & x_2^i - x_1^i \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (3.89)$$

Очевидно, что  $SFS$  линейно увеличивается с движением по краю треугольника, начиная и заканчивая в 1-м узле. Выражение (3.89), необходимое для поиска неизвестной  $SFS \Phi_e^i(x, y)$  над произвольным узлом треугольного линейного домена (в отношении ее узловых значений), удобно представить в следующем виде:

$$\Phi_e^i(x, y) = [1 \quad x \quad y] \cdot \sum_{i=1}^3 {}_L \Phi_e^i(x, y), \quad (3.90)$$

где  ${}_L \Phi_e^i(x, y)$ , для  $e = 1, 2, 3$  – линейные скалярные функции формы ( $LSFS$ , *Linear scalar function of the shape*) или **интерполяционные функции с конечным носи-**



*телем*, связанные нижним индексом узлами треугольника, и представляет собой дуальный антисимметричный единичный тензор (псевдотензор), что еще раз подтверждает гипотезу о возможности совместного применения МКЭ и тензорного анализа, в рамках рассматриваемого математического метода моделирования. Функции  ${}_L\Phi_i^e$  имеют нулевую тангенциальную составляющую вдоль всех сторон элемента, за исключением  $i$ -той, вдоль которой она равна единице (рис. 3.26) [83, 86, 87, 90–96].

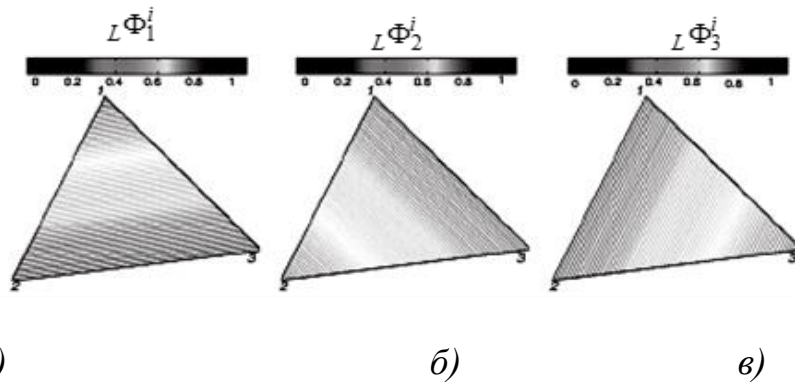


Рисунок 3.26 – Линейные скалярные функции формы, связанные с соответствующими узлами треугольного элемента: *a* – с узлом 1; *б* – с узлом 2; *в* – с узлом 3.

Таким образом, выполняется условие *непрерывности тангенциальной составляющей полей* на межэлементных границах  $\partial\Omega$ . Эти функции – финитны, поскольку они отличны от нуля лишь на одном из КЭ при последующей дискретизации. Сравнение выражений (3.88) и (3.89) даёт следующую систему уравнений для *LSFS*:

$$\begin{aligned} {}_L\Phi_1^i(x, y) &= \frac{1}{2A} \cdot [(x_2^i \cdot y_3^i - x_3^i \cdot y_2^i) + (y_2^i - y_3^i) \cdot x + (x_3^i - x_2^i) \cdot y]; \\ {}_L\Phi_2^i(x, y) &= \frac{1}{2A} \cdot [(x_3^i \cdot y_2^i - x_1^i \cdot y_3^i) + (y_3^i - y_1^i) \cdot x + (x_1^i - x_3^i) \cdot y]; \\ {}_L\Phi_3^i(x, y) &= \frac{1}{2A} \cdot [(x_1^i \cdot y_2^i - x_2^i \cdot y_1^i) + (y_1^i - y_2^i) \cdot x + (x_2^i - x_1^i) \cdot y]. \end{aligned} \quad (3.91)$$

Система (3.91) представляет собой нечто иное, как абсолютный антисимметричный единичный тензор – *псевдотензор Леви-Чивита* [81, 97]. Имея си-

стему (3.61), можно показать следующие свойства *LSFS* для каждой точки  $x, y$  в треугольнике:

$${}_L\Phi_e^i(x_j^i, y_j^i) = \begin{cases} 0, & i \neq j; \\ 1, & i = j. \end{cases} \sum_{i=1}^3 {}_L\Phi_e^i(x, y) = 1. \quad (3.92)$$

Это означает, что соответствующая функция каждого конкретного узла треугольника равна **1** и **0** в остальных двух узлах, на что и указывает выражение (3.92) – сумма значений всех трех функций формы равна **1** в любой точке треугольника.

По теории МКЭ существуют различные типы весовых функций. Наиболее развитым, с точки зрения точности, является метод Галеркина, использующий весовые функции как функций формы, т.е.  $\omega_i = L_i^e$ .

Вернемся теперь к дискретизации расчетной области, представленной на рисунке 3.18. Дискретизации области математически представляется следующим образом:

$$\Omega = \bigcup_{i=1}^n \Omega^i, \quad (3.93)$$

где  $n$  – количество субдоменов или элементов  $\Omega^e$  при дискретизации.

При переходе с «локального» элементарного показателя на «глобальные» индексы (в определенном индексе элемента  $e$ , индекс  $k$  имеет значения 1, 2 и 3) выражение для определения скалярной функции формы (3.60) преобразуется к виду:

$$\Phi_e^i(x, y) = \sum_{i=1}^3 {}_L\Phi_e^i(x, y). \quad (3.94)$$

Поддержка определенной функции  ${}_L\Phi_e^i$  означает набор элементов, содержащихся в определенном узле  $n$ , т. е. в пространстве, где функция формы существует. Это делает возможным определение локального характера формы функций, в связи с тем, что неизвестная функция  $\Phi_e^i(x, y)$  в любом элементе находится в зависимости только от функции формы узлов этого элемента. Согласно

выражению (3.64) для каждой  $L\Phi_e^i, i = 1, 2, \dots, N_n$  получается система  $N_j$  уравнений с  $N_n$  неизвестными коэффициентами. Система уравнений является линейной, если параметры  $\alpha, \beta, \gamma$  являются константами и не зависят от значения поля в определенной точке. Если они зависят от поля, то решается нелинейная задача.

*Переход от двумерной области исследований в трехмерную* необходим ввиду того, что для моделирования распространения поля электромагнитных излучений в качестве объекта анализа выбран *домен – тензор – LC-ячейка*, поэтому произведем конечно-элементный анализ уравнения Гельмгольца в трехмерной области  $\nabla^2\Phi + k^2\Phi = \zeta$ .

Сначала разделим область пространства на четырехгранные трехмерные комплекс-элементы, получившие название *Лагранжевы тетраэдры* (далее – тетраэдр) (рис. 3.27), где  $P_{ijk}$  – точка оценки функции формы с помощью локальных координат.

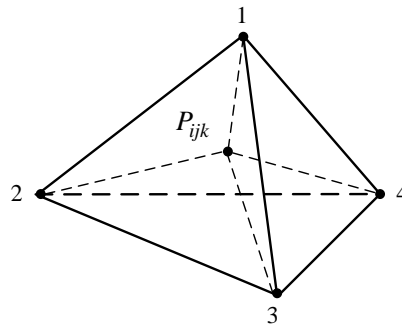


Рисунок 3.27 – Трехмерный комплекс-элемент (тетраэдр)

Значение неизвестной *SFS*  $\Phi_e^i(x, y, z)$  в некоторой точке внутри тетраэдра вычисляется при помощи полиномиального приближения следующим образом [83, 86, 87, 90–96, 109, 110]:

$$\Phi_e^i(x, y, z) = a + bx_e^i + cy_e^i + dz_e^i \quad (3.95)$$

Искомая функция  $\Phi_e^i(x, y, z)$  скалярная, поэтому логична аппроксимация этой функции внутри элемента своими параметрами в узлах треугольника вместо констант  $a, b, c$  и  $d$ .

*Представление треугольных конечных элементов тетраэдром Паскаля*

Объединенные треугольные конечные элементы (тетраэдры) в совокупности могут быть представлены тетраэдром Паскаля (тетраэдром высшего порядка). Необходимо отметить, что в элементы более высокого порядка в дополнение к основным узлам вводятся вторичные (боковые и / или интерьер) узлы таким образом, чтобы обеспечить требуемое количество узлов для определения  $\Phi_e^i(x, y, z)$ .

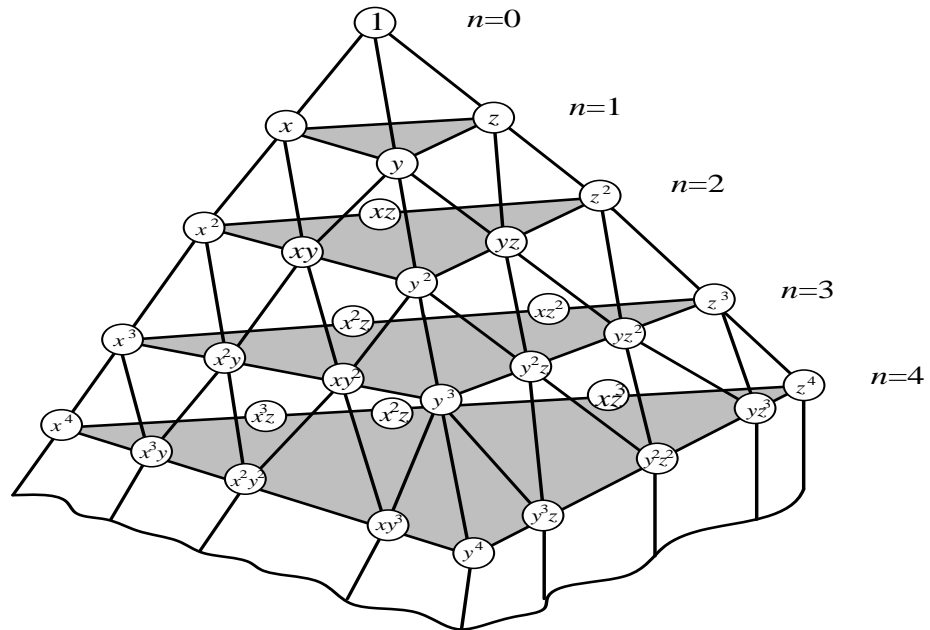


Рисунок 3.28 – Тетраэдр Паскаля

Тетраэдр Паскаля – это совокупность трехмерных треугольных комплекс-элементов (рис. 3.28), интерполяционный полином  $\Phi_e^i(x, y, z)$  которого имеет вид метрического тензора пространства (**тензор Эйнштейна**):

$$\Phi_e^i(x, y, z) = \sum_{n=1}^4 a_n x^n. \quad (3.96)$$

В соответствии с *Vox Counting Theorem* и *Willson Theorem* «*k* – мерная пирамида Серпинского», описываемая биномиальными коэффициентами разложения  $(x + y + z)^n$ , при  $n \geq 0$ , ассоциирована с «тетраэдром Паскаля» [116, 117, 120, 123, 124]. Для этого запишем выражение в матричной форме для каждого узла тетраэдра отдельно:

$$\begin{bmatrix} \Phi_1^i \\ \Phi_2^i \\ \Phi_3^i \\ \Phi_4^i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x_1^i & y_1^i & z_1^i \\ 1 & x_2^i & y_2^i & z_2^i \\ 1 & x_3^i & y_3^i & z_3^i \\ 1 & x_4^i & y_4^i & z_4^i \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \\ d \end{bmatrix} = [S^i] \cdot \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \\ d \end{bmatrix}. \quad (3.97)$$

где

$$\Phi_1^i = \frac{1}{6V} \cdot \begin{bmatrix} 1 & x & y & z \\ 1 & x_2 & y_2 & z_2 \\ 1 & x_3 & y_3 & z_3 \\ 1 & x_4 & y_4 & z_4 \end{bmatrix}; \quad (3.98)$$

$$\Phi_2^i = \frac{1}{6V} \cdot \begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 & z_1 \\ 1 & x & y & z \\ 1 & x_3 & y_3 & z_3 \\ 1 & x_4 & y_4 & z_4 \end{bmatrix}; \quad (3.99)$$

$$\Phi_3^i = \frac{1}{6V} \cdot \begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 & z_1 \\ 1 & x_2 & y_2 & z_2 \\ 1 & x & y & z \\ 1 & x_4 & y_4 & z_4 \end{bmatrix}; \quad (3.100)$$

$$\Phi_4^i = \frac{1}{6V} \cdot \begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 & z_1 \\ 1 & x_2 & y_2 & z_2 \\ 1 & x_3 & y_3 & z_3 \\ 1 & x & y & z \end{bmatrix}. \quad (3.101)$$

Выражения (3.98) – (3.101) представляют собой антисимметричные 4-тензоры [81]. Из этих четырех систем уравнений могут быть определены коэффициенты  $a$ ,  $b$ ,  $c$  и  $d$ .

Определитель системы уравнения представляется в виде:

$$\det = \begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 & z_1 \\ 1 & x_2 & y_2 & z_2 \\ 1 & x_3 & y_3 & z_3 \\ 1 & x_4 & y_4 & z_4 \end{bmatrix} = 6V, \text{ где } V \text{ – объем тетраэдра.}$$

Таким образом, функция формы  $\Phi_e^i(x, y, z)$  в трехмерной области может быть представлена в матричном виде:

$$\Phi_e^i(x, y, z) = \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \\ d \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & x & y^2 & z^3 \\ z^2 & 1 & x^3 & y^4 \\ y^3 & z^4 & 1 & x^2 \\ z & y^2 & x^4 & 1 \end{bmatrix}. \quad (3.102)$$

Применение *ТЕМ*-волноводов, как правило, связано с собственным анализом частично или неоднородно заполненных волноводов СВЧ [116, 117, 120, 123–126]. В результате частичного заполнения диэлектрика, ЭМВ в таком волноводе имеют одновременно ненулевые компоненты напряженности электрического  $E_z$  и магнитного поля  $H_z$ , т. е. появляются гибридные моды. Таким образом, краевая задача для частично заполненного диэлектрического волновода имеет вид:

$$\nabla(\nabla \times \bar{E}) - \nabla(\nabla \times \bar{B}) = 0 \text{ в } \Omega; \quad (3.103)$$

$$\vec{n} \times (\nabla \times \bar{E}) = 0 \text{ на } \partial_1 \Omega; \quad (3.104)$$

$$\vec{n} \times (\nabla \times \bar{B}) = 0 \text{ на } \partial_2 \Omega. \quad (3.105)$$

где  $\Omega$  – поперечное сечение неоднородно заполненного СВЧ-волновода (расчетной области);  $\partial_1 \Omega$  – граница проводящей стенки волновода;  $\partial_2 \Omega$  – граница, совпадающая с линией его симметрии.

Условие (3.104) означает, что *тангенциальная составляющая электрического поля равна нулю на поверхности идеально проводящей стенки*. Аналогично для тангенциальной составляющей магнитного поля выражение (3.105).

Границы  $\partial_1 \Omega$  и  $\partial_2 \Omega$  называются электрическими и магнитными стенками волновода соответственно. Представление КЗ выражениями (3.103) – (3.105)

предполагает использование ЭИФ для вычисления интеграла энергии электромагнитного поля [109, 117, 126].

Функционал энергии (3.83) в интегральной форме для двумерного случая в плоскости  $x$ - $z$  с представляется следующим образом:

$$F(\vec{E}) = -\frac{1}{2} \iint_{\Omega} \nabla \left[ \nabla \left( \alpha_x \beta_x \gamma_x \frac{\partial^2 \Phi_e^i(x, z)}{\partial x^2} \cdot \vec{e}_x + \alpha_z \beta_z \gamma_z \frac{\partial^2 \Phi_e^i(x, z)}{\partial z^2} \cdot \vec{e}_z \right) \right] d\Omega. \quad (3.106)$$

где  $\alpha, \beta, \gamma$  – постоянные детерминированные ЭФС РППКМ каждого  $i$ -ого слоя постоянны и характеризуются магнитной проницаемостью  $\mu_i$ , относительной диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon_i$  и проводимостью материала  $\sigma$  соответствующего слоя;  $\vec{e}_x, \vec{e}_z$  – компоненты вектора распространения электрической моды электромагнитной волны (ЭМВ).

В области низких частот ( $\Delta l / \lambda < 0,1$ ) скорость волны приблизительно равна  $v = c / \sqrt{2}$ . Это возникает в результате того, что у данных отрезков на единицу длины приходится двойная индуктивность, в то время как емкость на единицу длины остается неизменяемой.

Функционал  $F(\vec{E})$  имеет минимальное значение  $\vec{E}$  вектора КЗ (3.103) – (3.105). Следовательно, эквивалентную вариационную КЗ можно записать в виде стационарного состояния функционала (3.89), то есть:

$$\delta F(\vec{E}) = 0; \quad (3.107)$$

$$\vec{n} \times \vec{E} = 0 \text{ на } \partial_1 \Omega.$$

С учетом тензорной природы поля и установленной ранее эквивалентности уравнений Максвелла и Кирхгофа (3.9) можно представить матричную структуру ковариантного антисимметричного 4-мерного тензора 2-го ранга как совокупность 3-мерного вектора и псевдовектора Леви-Чивита в координатах  $x, y, z$  [109, 127, 128]:

$$\mathfrak{S}_{ijk} = [-\mathbf{E}, \tilde{\mathbf{H}}] = \begin{bmatrix} 0 & -E_x & -E_y & -E_z \\ E_x & 0 & -H_z & H_y \\ E_y & H_z & 0 & -H_x \\ E_z & -H_y & H_x & 0 \end{bmatrix}, \quad (3.108)$$

где

$$\mathbf{E} = \begin{bmatrix} 0 & E_x & E_y & E_z \\ -E_x & 0 & 1 & 1 \\ -E_y & 1 & 0 & 1 \\ -E_z & 1 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad \text{— 3-мерный полярный тензор в виде матрицы преобразований 4-мерного пространства (пространство Минковского)}$$

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} 0 & H_z & -H_y \\ -H_z & 0 & H_x \\ H_y & -H_x & 0 \end{bmatrix} \quad \text{— псевдовектор 2-го ранга (Леви-Чивита) магнитного поля в виде антисимметричной матрицы } 3 \times 3.$$

В целях анализа распределения полей электромагнитных излучений в экранирующем объеме с волноводами КЗ при решении волновых задач в трехмерной области выглядит следующим образом:  $\nabla(\nabla \times \bar{E}) - \nabla(\nabla \times \bar{B}) = 0$  в  $\Omega \subseteq R^2$ ;

$$\bar{n} \times (\nabla \times \bar{E}) = 0 \quad \text{на} \quad \partial_1 \Omega; \quad \frac{1}{\mu} \bar{n} \times (\nabla \times \bar{H}) = 0 \quad \text{на} \quad \partial_2 \Omega;$$

$\bar{n} \times (\nabla \times \bar{E}) + \frac{1}{\mu} \bar{n} \times (\nabla \times \bar{H}) = 0$  на  $\partial_3 \Omega$  — собой поглощающее ГУ ( $\partial_3 \Omega$  — область поглощения энергии ЭМП).

Инвариантность тензора поля представим как свертку контрвариантных и ковариантных компонент, с учетом  $E_i = -E^i$ ,  $H_i = -H^i$ :

$$F_{ijk} F^{ijk} = -(E_x)^2 - (E_y)^2 - (E_z)^2 - (E_x)^2 + (H_z)^2 + (H_y)^2 - (E_y)^2 + (H_z)^2 + (H_x)^2 - (E_z)^2 + (H_y)^2 + (H_x)^2 = 2(\mathbf{H}^2 - \mathbf{E}^2) \quad (3.109)$$

Для решения трехмерных волновых задач в целях анализа распределения ЭМП в волноводе, КЗ выглядит следующим образом:



$$\nabla(\nabla \times \bar{E}) - \nabla(\nabla \times \bar{B}) = 0 \text{ в } \Omega \subseteq R^2; \quad (3.110)$$

$$\vec{n} \times (\nabla \times \bar{E}) = 0 \text{ на } \partial_1 \Omega; \quad (3.111)$$

$$\frac{1}{\mu} \vec{n} \times (\nabla \times \bar{H}) = 0 \text{ на } \partial_2 \Omega; \quad (3.112)$$

$$\vec{n} \times (\nabla \times \bar{E}) + \frac{1}{\mu} \vec{n} \times (\nabla \times \bar{H}) \text{ на } \partial_3 \Omega \quad (3.113)$$

где  $\partial_3 \Omega$  – область поглощения энергии ЭМП. Выражение (3.109) играет важную роль: оно используется для доказательства градиентной инвариантности тензора ЭМП через 4-потенциал  $(\text{rot}_4 A)_{ij} = \nabla_i A_j - \nabla_j A_i$  и для того, чтобы вывести 1-ю пару уравнений Максвелла из выражения для тензора поля  $(dF)_{ijk} = \nabla_i F_{jk} + \nabla_j F_{ki} + \nabla_k F_{ij}$ . Выражение (3.94) представляет собой поглощающее ГУ, которое используется для ограничения расчетной области в волноводе.

Эквивалентный функционал энергии (потенциал)  $\min F(\mathbf{E}, \mathbf{H})$  ЭМП с учетом возможности представления функции с конечным носителем в виде **контр-вариантного тензора 3-го ранга**:

$$\Phi_e^{ijk}(x, y, z) = \begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \\ \gamma \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 & x^2 \cdot y \cdot z^3 - x \cdot y^2 \cdot z^3 & x^3 \cdot y \cdot z^2 - x \cdot y^3 \cdot z^2 \\ x \cdot y^2 \cdot z^3 - x^2 \cdot y \cdot z^3 & 0 & x^3 \cdot y^2 \cdot z - x^2 \cdot y^3 \cdot z \\ x \cdot y^3 \cdot z^2 - x^3 \cdot y \cdot z^2 & x^2 \cdot y^3 \cdot z - x^3 \cdot y^2 \cdot z & 0 \end{bmatrix} \quad (3.114)$$

и применением **правила Эйнштейна** выглядит следующим образом [96]:

$$\min F(\mathbf{E}, \mathbf{H}) = \nabla_i \left( \mathfrak{N}_{jk} \Phi_e^{jk}(y, z) \right) + \nabla_j \left( \mathfrak{N}_{ik} \Phi_e^{ik}(x, z) \right) + \nabla_k \left( \mathfrak{N}_{ij} \Phi_e^{ij}(x, y) \right). \quad (3.115)$$

В рамках проведённого исследования была разработана «Программа для расчета эквивалентного функционала энергии (потенциала) электромагнитного поля на основе его тензорного представления и МКЭ *«EnergyPotential»*, на кото-

рую получено Свидетельство о государственной регистрации программы на ЭВМ [129]. Внешний вид интерфейса программы представлен на рисунке 3.29.

Рисунок 3.29 – Внешний вид интерфейса «Программа для расчета эквивалентного функционала энергии (потенциала) электромагнитного поля на основе его тензорного представления и метода конечных элементов «*EnergyPotential*»

Установлено, что при трехмерном моделировании данных процессов необходим расчет матриц большого объема, получаемых при дискретизации КЭ, и требуется объем оперативной памяти в несколько гигабайт, поэтому решение такой задачи возможно только при распараллеливании вычислений в системах автоматизированного проектирования (САПР), представляющие программируемые системы конечно-элементного анализа *ANSOFT HFSS 11.0* фирмы *ANSYS* и *COMSOL Multiphysics 5.4 (COMSOLv. 5.4)* (глава 4).

3.2.3. Определение коэффициентов экранирования многослойных экранирующих конструкций с различными типами технологических неоднородностей

*Коэффициент экранирования сплошной многослойной экранирующей конструкции*

С учетом выдвинутых выше положений о построении ФРЭК было указано, что при воздействии ЭМИ в сантиметровом и миллиметровом диапазонах длин волн общее экранное затухание многослойного экрана зависит от порядка расположения слоев и определяется их защитными свойствами, а за счет внешнего слоя экрана, выполненного из РППКМ, уменьшаются вносимые потери в экранируемые цепи аппаратуры по сравнению со сплошным магнитным экраном такой же толщины [33, 44–49, 82, 96–101]. В связи с этим, наибольший выигрыш в экранировании импульсного поля при применении многослойного экрана по отношению к однослойному дает структура *полимер – металл – полимер*, которая при электрическом и магнитном экранировании в зависимости от частотного диапазона, типа применяемого РППКМ, его структуры и ЭФС обладает высокими экранирующими свойствами.

При оценке коэффициента экранирования *составной сплошной многослойной структуры* будем рассматривать экранирующие структуры, выполненные в виде параллелепипедов. Проникновение полей ЭМИ в замкнутый экранированный объем для случая, когда толщина слоя насыщения гораздо больше толщины стенки экрана  $\delta_{\text{нас}} \gg d$ , аналогично процессам в цепи с сосредоточенными параметрами, представленными на рисунке 3.15.

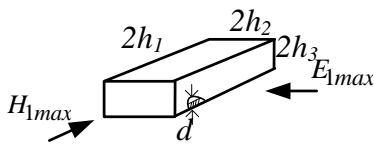
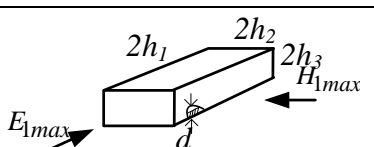
Коэффициент экранирования в данном случае зависит от ЭФС и сопротивлений составляющих его слоев, геометрических размеров экрана, характеристик воздействующего на СВТ поля ЭМИ [44–49]:

$$\eta_{E(\text{ПМП})} = 20 \cdot \lg \left[ \frac{1}{3 \cdot ((\beta - \alpha) \cdot R_{\text{ЭЭ}} \cdot C_{\text{Э}})^2} \cdot \frac{(\varepsilon_0 \cdot \sigma_r \cdot \alpha)^2 \cdot d \cdot V}{6 \cdot \varepsilon_r \cdot \exp \left( \frac{1}{\frac{\varepsilon_0 \cdot \sigma_r \cdot V \cdot \alpha}{2 \cdot \varepsilon_r} - 1} \right)} \right]; \quad (3.116)$$

$$\eta_{H(\text{пмп})} = \left[ 20 \cdot \lg \left( \left( (\beta \cdot L_{\text{э}} / R_{\text{э,Н}})^2 \cdot (\beta \cdot L_{\text{э}} / R_{\text{э,Н}} - 1) \right)^2 \cdot \frac{(\mu_0 \cdot \sigma_r \cdot \alpha)^2 \cdot d \cdot V}{6 \cdot \mu_r \cdot \exp \left( \frac{1}{\frac{\mu_0 \cdot \sigma_r \cdot V \cdot \alpha}{2 \cdot \mu_r} - 1} \right)} \right) \right] \quad (3.117)$$

где  $R_{\text{эЕ}}$ ,  $R_{\text{эН}}$  – электрическое и магнитное сопротивления экранирующей оболочки из РППКМ;  $V$  – объем экранирующей конструкции;  $C_{\text{э}}$ ,  $L_{\text{э}}$  – емкость и индуктивность экранирующей оболочки из РППКМ (табл. 3.1);

Таблица 3.1 – Значения эквивалентных электрических сопротивлений, емкостей и индуктивностей корпуса экрана из композиционного материала

Форма экрана	Ориентация в пространстве	Электрическое экранирование		Магнитное экранирование	
		$C_{\text{э}}, \Phi$	$R_{\text{эЕ}}, \text{Ом}$	$L_{\text{э}}, \text{Гн}$	$R_{\text{эН}}, \text{Ом}$
Прямоугольная		$6 \cdot \epsilon_r \cdot h_1$	$\frac{h_2}{2 \cdot (h_1 + h_3) \cdot \sigma \cdot d}$	$\frac{2 \mu_r \cdot \sigma \cdot h_2}{h_1}$	$\frac{2 \cdot (h_3 + h_2)}{h_1 \cdot \sigma \cdot d}$
		$6 \cdot \epsilon_r \cdot h_2$	$\frac{h_1}{2 \cdot (h_2 + h_3) \cdot \sigma \cdot d}$	$\frac{2 \cdot \mu_r \cdot h_1 \cdot h_3}{h_2}$	$\frac{2 \cdot (h_3 + h_1)}{h_2 \cdot \sigma \cdot d}$

$\epsilon_0$ ,  $\mu_0$  – электрическая и магнитная постоянные, соответственно, связанные между собой соотношением  $\epsilon_0 = (120 \cdot \pi)^2 \cdot \mu_0$ ;  $\epsilon_r$ ,  $\mu_r$  – соответственно, электрическая и магнитная проницаемости ферромагнитного материала;  $\sigma_r$  – удельная проводимость материала;  $d$  – толщина экранирующего слоя.

*Коэффициент экранирования многослойной экранирующей конструкции с плоскими технологическими неоднородностями*

Для нормального функционирования СВТ и достижения требуемого теплового режима конструкций экранов необходимо предусматривать соответствующий

ющие технологические электрические неоднородности для доступа к узлам и блокам, вентиляции, которые образуют дополнительный канал для проникновения поля.

Поэтому для оценки полей, проникающих внутрь экрана, необходимо учитывать его геометрические размеры, форму и толщину стенок, волновое сопротивление и частоту воздействующего ЭМИ [36, 118, 119, 121].

Типовыми технологическими неоднородностями в экранах СВТ являются прямоугольные и круглые (эллиптические) отверстия.

Расчет проникновения импульсного электромагнитного поля через технологические неоднородности произведен, исходя из условия, что источник поля находится вне экрана СВТ.

Пусть объём  $V$  является конечным и расположен на таком большом расстоянии от отверстия, что падающее поле в отверстии имеет характер сферической  $T$ -волны. Геометрия задачи приведена на рисунке 3.30. Бесконечный экран расположен в плоскости  $xOy$ . Центр совпадает с началом координат. Прошедшие в экран поля аппроксимируются полями, проникшими через малое отверстие в плоском экране бесконечной протяженности. Поля, проникающие через малое отверстие в плоском экране, можно найти следующим образом. Отверстие заменяется эквивалентными электрическим и магнитным диполями, находящимися в центре отверстия на внутренней (теневого) стороне экрана.

Эквивалентные дипольные моменты дают возможность сравнительно просто рассчитать поля, излучаемые этими диполями. Полученные результаты справедливы на расстояниях от отверстия, значительно превышающих его размеры [33, 49].

На расстоянии  $r$  от центра отверстия, значительно превышающем его линейные размеры, электрическое поле в защищаемой области пространства может быть найдено как поле некоего эквивалентного элементарного электрического диполя, расположенного на поверхности сплошного экрана перпендикулярно к ней (рис. 3.30).

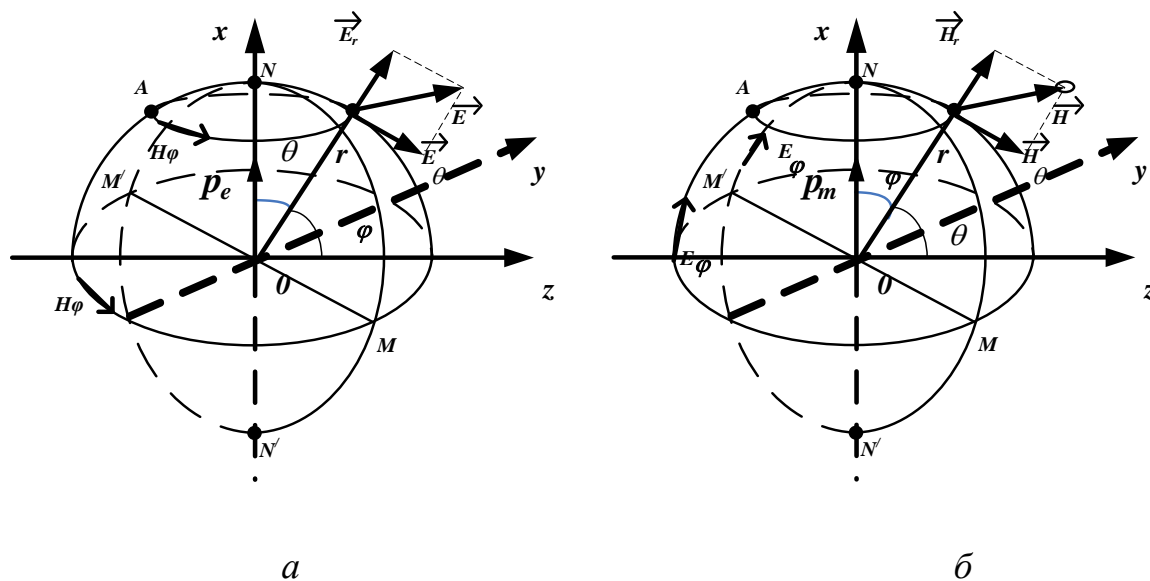


Рисунок 3.30 – Конфигурация падения электромагнитной волны на отверстие в плоском идеальном экране:

*a* – электрическое поле; *б* – магнитное поле.

Электрический вектор этого поля лежит в плоскости, перпендикулярной плоскости экрана, и имеет две составляющие:  $E_r$ , совпадающую по направлению с радиус-вектором, проведенным от диполя в точку наблюдения, и  $E_\theta$ , перпендикулярную этому радиус-вектору. Магнитный вектор имеет только одну составляющую –  $H_\varphi$ , лежащую в плоскости, параллельной экрану, перпендикулярно указанному радиус-вектору.

При  $r \gg \lambda / 2\pi$ , поля, создаваемые электрическим диполем определяются с помощью следующих выражений [44–49]:

$$E_r = 0; E_\theta = \frac{P_e}{4\pi \cdot \epsilon_r \cdot r^3} \cdot (r \cdot 2 \cdot \cos\theta + \theta \cdot \sin\theta); H_\varphi = \varphi \cdot \frac{P_m}{4\pi \cdot r^3 \cdot \mu_0} \cdot \sin\theta, \quad (3.118)$$

где  $\epsilon_r$  – диэлектрическая проницаемость экранирующего слоя экрана,  $\epsilon_0$  – электрическая постоянная;  $r, \theta, \varphi$  – базисные единичные векторы сферической системы координат;  $P_e$  – момент эквивалентного электрического диполя, который зависит от напряженности поля  $E_1$ . Данная составляющая суще-

ствовала бы при отсутствии отверстия в месте экрана, фактически занятом отверстием, а также от размеров и формы отверстий и определяется из выражения, представленного в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Исходные параметры для определения степени проникновения электрических и магнитных полей через плоские технологические неоднородности в экранах

Форма отверстия	Эквивалентный дипольный момент		Электрическая и магнитная поляризуемости	
	$P_e$	$P_m$	$\chi_E$	$\chi_H$
Прямоугольное длиной $a$ и шириной $b$	$\frac{E_1 \cdot \varepsilon_r \cdot a \cdot b^2}{64 \sqrt{1 + \left(\frac{b}{a}\right)^2}}$	$\frac{H_1 \cdot \left(1 + \frac{b}{4a}\right)}{64}$	$\pi \sqrt{\frac{1}{a^2} + \frac{1}{b^2}}$	$\frac{\pi}{b}$

Аналогично определяется поле, создаваемое магнитным диполем в правом полупространстве, расположенном на правой стороне бесконечно идеально проводящего экрана. На расстоянии  $r$  от центра отверстия, значительно превышающем его линейные размеры, поле в защищаемой области пространства может быть найдено как поле эквивалентного витка с током (магнитного диполя), расположенного на поверхности сплошного экрана перпендикулярно ей и линиям поля  $H$  под экраном при отсутствии отверстия.

Магнитный вектор этого поля имеет две составляющие:  $H_r$ , совпадающую по направлению с радиус вектором, проведенным от диполя в точку наблюдения, и  $H_\theta$  – перпендикулярную этому радиус вектору и параллельную поверхности экрана.

Электрический вектор имеет только одну составляющую –  $E_\varphi$ , лежащую в плоскости, перпендикулярной экрану, и перпендикулярно указанному радиус-вектору [34–37, 44–49, 115].

При  $r \gg \lambda/2\pi$  поля, создаваемые магнитным диполем определяются с помощью следующих выражений [33 – 37] :

$$H_r = 0; H_\theta = \frac{P_m}{4\pi \cdot \mu_r \cdot r^3} \cdot (r \cdot 2 \cdot \cos\theta + \theta \cdot \sin\theta); E_\varphi = \varphi \cdot \frac{P_e}{4\pi \cdot r^3 \cdot \varepsilon_0} \cdot \sin\theta, \quad (3.119)$$

где  $\mu_r$  – магнитная проницаемость экранирующего слоя экрана;  $P_m$  – момент эквивалентного магнитного диполя. Он зависит от напряженности поля  $H_1$ , которая существовала бы при отсутствии отверстия в месте экрана, фактически занятом отверстием, а также от размеров и формы отверстий и определяется из выражения, представленного в таблице 3.2.

Таким образом, поля, проникающие в правое полупространство через плоские технологические неоднородности различной формы, определяются с помощью следующих выражений:

$$E_+^{in} = E_\theta + E_\varphi = \frac{P_e}{4\pi \cdot \varepsilon_r \cdot r^3} \cdot (r \cdot 2 \cdot \cos\theta + \theta \cdot \sin\theta) + \varphi \cdot \frac{P_e}{4\pi \cdot r^3 \cdot \varepsilon_0} \cdot \sin\theta; \quad (3.120)$$

$$H_+^{in} = H_\theta + H_\varphi = \frac{P_m}{4\pi \cdot \mu_r \cdot r^3} \cdot (r \cdot 2 \cdot \cos\theta + \theta \cdot \sin\theta) + \varphi \frac{P_m}{4\pi \cdot r^3 \cdot \mu_0} \cdot \sin\theta. \quad (3.121)$$

Однако выражения (3.120) и (3.121) не учитывают влияние толщины стенки экрана на процесс проникновения электрических и магнитных полей через технологические отверстия в экране.

Ослабление поля в процессе его проникновения через отверстия стенки толщиной  $d$  определяется с помощью следующего выражения:

$$S_{E,H} = \exp(-\chi_{E,H} \cdot d), \quad (3.122)$$

где  $\chi_E, \chi_H$  – электрическая и магнитная поляризуемость отверстий, значения которой представлены в таблице 3.2.

В связи с приведенными положениями поля, проникающие в экранирующие объёмы, представляются следующими выражениями:



$$\begin{aligned}
 E_+^{in} &= \frac{p_e \cdot \exp(-\chi_E \cdot d)}{4\pi \cdot r^3} \cdot \left( \frac{1}{\varepsilon_r} \cdot (r \cdot 2 \cdot \cos\theta + \theta \cdot \sin\theta) + \varphi \cdot \frac{1}{\varepsilon_0} \cdot \sin\theta \right); \\
 H_+^{in} &= \frac{p_m \cdot \exp(-\chi_H \cdot d)}{4\pi \cdot r^3} \cdot \left( \frac{1}{\mu_r} \cdot (r \cdot 2 \cdot \cos\theta + \theta \cdot \sin\theta) + \varphi \cdot \frac{1}{\mu_0} \cdot \sin\theta \right).
 \end{aligned}
 \tag{3.123}$$

Коэффициент экранирования экрана с учетом наличия плоских технологических неоднородностей толщиной  $d$  определяется следующими выражениями:

$$\begin{aligned}
 \eta_{iE} [\text{дБ}] &= 20 \cdot \lg \left[ \frac{E}{\frac{p_e \cdot \exp(-\chi_E \cdot d)}{4\pi \cdot r^3} \cdot \left( \frac{1}{\varepsilon_{r_i}} \cdot (r \cdot 2 \cdot \cos\theta + \theta \cdot \sin\theta) + \varphi \cdot \frac{1}{\varepsilon_0} \cdot \sin\theta \right)} \right]; \\
 \eta_{iH} [\text{дБ}] &= 20 \cdot \lg \left[ \frac{H}{\frac{p_m \cdot \exp(-\chi_H \cdot d)}{4\pi \cdot r^3} \cdot \left( \frac{1}{\mu_{r_i}} \cdot (r \cdot 2 \cdot \cos\theta + \theta \cdot \sin\theta) + \varphi \cdot \frac{1}{\mu_0} \cdot \sin\theta \right)} \right].
 \end{aligned}
 \tag{3.124}$$

Коэффициент экранирования экрана с учетом его многослойности определяется следующими выражениями:

$$\begin{aligned}
 \eta_E [\text{дБ}] &= \prod_{i=1}^3 \eta_{iE}; \\
 \eta_H [\text{дБ}] &= \prod_{i=1}^3 \eta_{iH},
 \end{aligned}
 \tag{3.125}$$

где  $i$  – номер слоя многослойного экрана.

*Определение коэффициента экранирования многослойных экранирующих конструкций с технологическими неоднородностями в виде запердельных волноводов в форме полых шестиугольной призмы*

Для получения максимального коэффициента экранирования многослойной экранирующей конструкции её технологические неоднородности предлагается выполнить в виде запердельных волноводов (ЗПВ) в форме полых шестиугольных призм. Этот выбор обосновывается тем, что при определенных соот-

ношениях между размерами волновода и длиной волны  $\lambda$  импульсного электромагнитного поля возможность его проникновения внутрь экрана практически исключена, то есть по отношению к импульсным электромагнитным полям, воздействующим на экранированные конструкции, волноводная система ведет себя как фильтр с полосой задерживания, совпадающей с полосой, в которой сосредоточена основная часть энергии их спектра. Часть электромагнитной энергии, прошедшей на выход волновода, определяет эффективность его действия как фильтра верхних частот (ФВЧ) в полосе задерживания [74–76, 131]. Волноводный ФВЧ обеспечивает затухание в полосе задерживания, так как на частотах ниже критической фронт волны, распространяющийся в волноводе, имеет постоянную фазу, а амплитуда напряжённости поля ЭМИ уменьшается по экспоненциальному закону, в связи с тем, что при выполнении соотношения  $\lambda \geq \lambda_{\text{кр}}^{mn}$  для данного волновода фронт волны ЭМИ становится под углом к оси волновода, а при очень большой длине волны – практически параллельно ей. Волна ЭМИ совершает колебания между боковыми стенками и вдоль оси волновода, уменьшаясь тем сильнее, чем более параллелен фронт его оси. Таким образом, волна внутри волновода распространяется многократно, отражаясь от стенок волновода, не перемещаясь вдоль него.

Запредельный волновод направлен во внутреннюю, экранируемую область, для того чтобы не создавать у своего среза локального увеличения напряженности электромагнитных полей и тем самым не снижать своей эффективности. Для снижения неблагоприятного влияния большого отверстия на защитные свойства экранов его заменяют системой малых отверстий, то есть по сути дела сотовой решёткой.

В волноводе в форме полых шестиугольных призм распространяются магнитные волны типа  $H_{mn}$ , у которых компоненты  $H_z \neq 0$ , а  $E_z = 0$  (направление оси совпадает с продольной осью волновода), и электрические волны  $E_{mn}$ , у которых компоненты  $E_z \neq 0$ , а  $H_z = 0$ , и определяются в соответствии с положениями, приведенными в [105, 106, 115, 117, 118]. При выполнении условия  $\lambda \geq \lambda_{\text{кр}}^{mn}$ , для бесконечного спектра типа волн с индексами  $m=0, 1, 2, \dots$  и

$n = 0, 1, 2, \dots$ , происходит быстрое снижение электропрочности волновода в полосе задерживания и наблюдается довольно резкое затухание электромагнитной волны, в связи с чем скачком меняется характер распространения волн в волноводе, что обеспечивает максимальное ослабление индукции  $B_{\max}$  и эффективное ослабление воздействия поля ЭМИ. Критическая длина волны для волн типа  $H_{mn}$  и  $E_{mn}$  определяется следующим выражением [79,80, 119]:

$$\lambda_{\text{кр}}^{mn} = \frac{2}{\sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2}}, \quad (3.126)$$

где  $a$  – размер наибольшего сечения волновода,  $b$  – размер наименьшего сечения волновода.

В этой связи, с позиций моделирования, запредельный волновод по отношению к электромагнитной волне на входе ведет себя как фильтр, который эффективно ослабляет колебания на частотах, лежащих ниже известного предела, и в значительно меньшей степени ослабляет колебания на частотах, лежащих выше данного предела. Частота, лежащая ниже известного предела, называется критической частотой запредельного волновода  $f_{\text{кр}}^{mn}$  и для волновода в форме полый шестиугольной призмы определяется следующим выражением:

$$f_{\text{кр}}^{mn} = \frac{c}{\left(\lambda_{\text{кр}} \cdot \sqrt{\varepsilon_0 \cdot \mu_0}\right)}, \quad (3.127)$$

где  $c$  – скорость света в свободном пространстве.

Оптимальное соотношение, при котором волновод обеспечивает максимальное экранное затухание, определяется выражениями:

– для диапазона частот до 1000 МГц:

$$a = \lambda_{\min} / 10. \quad (3.128)$$

– для диапазона частот свыше 1000 МГц:

$$a = \lambda_{\min} / 5. \quad (3.129)$$

Сложность конструктивно-технологического решения требует применения метода, позволяющего одновременно учитывать конструктивные особенности технологических неоднородностей экрана, их компоновку, взаимное влияние волноводов на электрические характеристики экранов. Для оценки качественных показателей экранирования конструкции с технологическими неоднородностями в виде ЗПВ в форме полых шестиугольных призм, объединенными в сотовую решётку, необходимо определение минимума функционала энергии (потенциала) для конструкции с технологическими неоднородностями в виде ЗПВ – выражение (3.105), затухания и ослабления поля ЭМИ при отражении, вносимом каждым волноводом, поправочных коэффициентов отражения, числа волноводов и их объединения. Выражение для определения качества экранирования такой конструкции с технологическими неоднородностями в виде ЗПВ в форме полых шестиугольных призм, объединенных в сотовую решётку, представляется в следующем виде [109, 129]:

$$\eta_{(E(H))} = 20 \lg(\min F(\mathbf{E}, \mathbf{H}) \cdot [\mathbf{A}_M \cdot S_B \cdot \Gamma \cdot K \cdot N_B]), \quad (3.130)$$

где  $\mathbf{A}_M$  – аппроксимирующий множитель, зависящий от длины волны и характеристик ЭМИ:

$$\mathbf{A}_M = \exp \cdot \left( \frac{\lambda}{4,05 \cdot \gamma} \right), \quad (3.131)$$

$\gamma$  – нормирующий множитель, зависящий от характеристик ЭМИ [34, 131]:

$$\gamma = \frac{1}{\left( \frac{\alpha}{\beta} \right)^{\frac{\alpha}{\beta-\alpha}} - \left( \frac{\alpha}{\beta} \right)^{\frac{\beta}{\beta-\alpha}}}; \quad (3.132)$$

$S_B$  – ослабление, вносимое волноводом в форме полый шестиугольной призмы при отражении:

$$S_B = \frac{(Z_{H(E)}^{mn} \cdot \lambda)^2 + q^2}{4a \cdot Z_{H(E)}^{mn} \cdot \lambda} \text{ при } r \gg q; \quad (3.133)$$

$r$  – радиус ближней зоны, м;  $Z_H^{mn}$  (Ом) – характеристическое сопротивление волновода для волн типа  $H_{mn}$  и  $E_{mn}$ ;  $Z_H^{10}$  (Ом) – характеристическое сопротивление волновода для волн типа  $H_{10}$  [79, 80]:

$$Z_H^{10} = \frac{Z_c}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda_{кр}^{10}}\right)^2}}, \quad (3.134)$$

где  $Z_c$  (Ом) [79, 80]:

$$Z_c = 120 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}}; \quad (3.135)$$

$$Z_{11}^E = Z_c \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda_{кр}^{11}}\right)^2}. \quad (3.136)$$

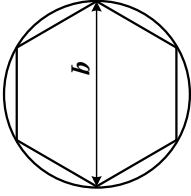
характеристическое сопротивление  $Z_{11}^E$  волновода для волн типа  $E_{11}$  [79, 80]:

$\Gamma$  – поправочный коэффициент отражения волновода также зависит от изменения характеристического сопротивления среды, заполняющей волновод  $Z_c$ , и характеристического сопротивления волновода для волн различного типа  $Z_H^{10} Z_E^{11}$ :

$$\Gamma = \left( \begin{array}{c} 1 - \frac{1}{Z_{H(E)}^{mn}} \cdot f \cdot q - 1 \\ \frac{1}{Z_{H(E)}^{mn}} \cdot f \cdot q + 1 \end{array} \cdot 10^{\frac{B_{\max}}{10}} \right), \quad (3.137)$$

где  $B_{\max}$  – затухание, вносимое волноводом (табл. 3.3).

Таблица 3.3 – Типы волн и затухание их в запердельном волноводе, выполненного в форме полой шестиугольной призмы

Тип волновода	Волна	$\lambda_{\text{кр}}, \text{ м}$	Затухание $B_{\max}$ на единицу длины, дБ/м
	$H_{10}$	$2q$	$l/q$
	$E_{11}$	$\frac{2q}{\sqrt{1+q^2}}$	$\frac{l\sqrt{1+q^2}}{q}$

$q$  – сечение волновода в форме полой шестиугольной призмы

$K$  – поправочный коэффициент взаимного влияния волноводов друг на друга [130–134]. Между волноводами в сотовой структуре существует взаимное влияние. Взаимная связь между волноводами приводит к увеличению полного сопротивления всего экрана, что влечет увеличение коэффициента экранирования всей конструкции в целом. Учёт взаимного влияния волноводов друг на друга осуществляется с помощью поправочного коэффициента, определяемого с помощью следующего выражения [76–82]:

$$K = \coth \left[ 10^{\frac{B_{\max}}{10}} \cdot \left( \frac{Z_{H(E)}^{mn}}{Z_c} \right) \right]. \quad (3.138)$$

$N_B$  – поправочный коэффициент числа волноводов в сотовой решётке определяет необходимое количество запердельных волноводов в форме полых шестиугольных призм в сотовой решётке с учетом многослойности экранирующей конструкции в зависимости от предъявляемых предельных (критериальных) тре-

бований к качеству экранирования, эквивалентного объема, зависящего от геометрических размеров экранирующей конструкции, электрофизических свойств и толщины образующих слоев, применяемых для экранирования материалов:

$$N_B = -10 \cdot \lg \left[ \left( \frac{0,25}{\eta_{E(H)_{\text{крит}}}} \right)^{\frac{3}{2}} \cdot \left( \frac{V_{\Sigma \text{ЭКВ}}}{V_{\text{ЭКВ}}} \right) \right]. \quad (3.139)$$

где  $\eta_{E(H)_{\text{крит}}}$  – предельное (критериальное) значение коэффициента экранирования сплошного многослойного экрана, дБ;  $V_{\Sigma \text{ЭКВ}}$  – эквивалентный объем ЭК, зависящей от количества и геометрических размеров слоев, образующих экран:

$$V_{\Sigma \text{ЭКВ}} = \sum_{i=1}^3 [h_1 \cdot h_3 \cdot I \cdot d_i], \quad (3.140)$$

где  $h_1, h_3$  – параметры, учитывающие геометрические размеры экранирующей конструкции (её длина и высота);  $I$  – количество слоёв в составе экранирующей конструкции;  $d_i$  – толщина слоя (с соответствующими электрофизическими характеристиками слоя экранирующей конструкции,  $i$  – номер слоя многослойного экрана);  $V_{\text{ЭКВ}}$  – эквивалентный объем одного волновода сотовой решётки:

$$V_{\text{ЭКВ}} = l_B \cdot S_{\text{ЭКВ}}, \quad (3.141)$$

где  $S_{\text{ЭКВ}}$  – эквивалентная площадь волновода, которая для волновода в форме полых шестиугольных призм, формы согласно [54, 58], определяется с помощью следующего выражения:

$$S_{\text{ЭКВ}} = S_{\text{В}} \sqrt[3]{\alpha l}, \quad (3.142)$$

где  $S_{\text{В}}$  – площадь сечения волновода в форме полый шестиугольной призмы,  $\alpha l$  – поляризуемость волновода:

$$\alpha l = \left\{ \frac{1}{2 \cdot \ln(0,628)} \right\}; \quad (3.143)$$

$l_{\text{В}}$  – длина волновода, определяемая в зависимости от частотного диапазона и вносимого затухания.

В предлагаемом варианте применение волноводов в форме полых шестиугольных призм длиной  $l_{\text{В}}$  согласуется с положениями, представленными в [54, 58, 79–82]:

$$l_{\text{В}} = \frac{B_{\text{max}} \cdot q}{k}. \quad (3.144)$$

$k$  – эффективность одной ячейки в зависимости от частотного диапазона воздействующего импульса и формы волновода, дБ [109, 129, 130–133].

Результатом математического моделирования является сравнение качественных показателей экранирования для многослойной однородной и неоднородной моделируемых многослойных экранирующих конструкций, с последующим определением допустимого отклонения  $\Delta\eta$ , позволяющим сделать вывод о соответствии предложенного математического метода моделирования реальным результатам. Представленный математический метод моделирования как инструмент исследования позволяет обосновывать экранирующие конструкции на этапе проектирования объектов КИИ и дорабатывать средства обеспечения живучести и помехозащищённости для существующих компонентов объектов КИИ.

3.3. Математический метод моделирования ущерба, наносимого объектам критической информационной инфраструктуры, позволяющий на основе иерархически рангового подхода определять перечень возможных сценариев и степень опасности возникновения неблагоприятных ситуаций для

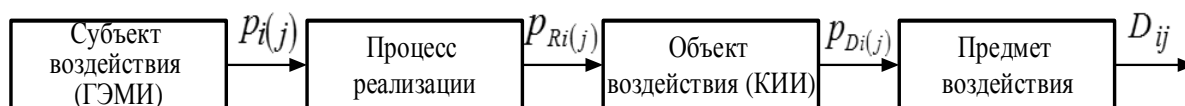


анализируемого объекта, связанных с его функциональной устойчивостью в условиях воздействия электромагнитных импульсов

3.3.1. Теоретические предпосылки оценки ущерба, наносимого объектам критической информационной инфраструктуры при воздействии электромагнитных импульсов

Для корректного выбора параметров при количественном анализе возможного ущерба системе, подвергающейся воздействию ЭМИ, применим следующую схему (рис. 3.32) [55, 56, 58–64, 75, 78, 134–136]:

- 1) *субъект воздействия* – активная составляющая процесса, способная влиять на другие составляющие посредством выполнения каких-либо действий;
- 2) *процесс реализации воздействия* – конкретная операция или сценарий, осуществляемая субъектом для достижения цели;
- 3) *объект воздействий* – пассивная составляющая процесса, находящаяся под влиянием субъекта;
- 4) *предмет воздействия* – цель действия субъекта (предметом может являться какое-либо свойство объекта, характеристика или ее определенное значение).



$P_i(j)$  – вероятность  $i(j)$ -го воздействия,

$P_{Ri}(j)$  – вероятность достижения цели  $i(j)$ -м воздействием;

$P_{Di}(j)$  – вероятность нанесения ущерба в результате  $i(j)$ -го воздействия;

$D_{ij}$  – величина нанесенного ущерба вида  $ij$

Рисунок 3.32 – Схема воздействия на объекты инфокоммуникационных систем и ее параметры

Разделение вида ущерба подразумевает построение нескольких различных независимых распределений риска для каждого вида ущерба (катастрофические или функциональные отказы и образование вспомогательных электромагнитных излучений и наводок).

Размер наносимого ущерба  $D_{ij}$  целесообразно связать с предметом реализуемых на объект КИИ воздействий.

Теоретически наиболее оптимальным для обеспечения требуемого уровня функциональной устойчивости объектов при воздействии ЭМИ является такой подход к оценке ущерба, при котором любой ущерб  $D_{ij}$ , нанесенный объектам и вызванный реализацией в отношении них опасностей, приводится к одинаковой единице измерения.

Ущерб может быть оценен исходя из предназначения данных объектов и с учетом важности для нее каждого из предметов воздействия [60-64].

С этой целью за основу определения ущерба  $D_{ij}$  предлагается взять количество успешно реализованных воздействий  $Att_k$ , соответствующих определенному виду опасностей, а риск для каждого из предметов воздействия рассчитывать отдельно. В этой связи актуальным и необходимым становится определение вероятностей реализации воздействий на объект.

Адекватная оценка рисков при реализации воздействий на объект основана на анализе функционирования системы в течение некоторого промежутка времени  $T$  (количеством воздействий, реализованных на конкретном временном интервале). В данном случае целесообразно применить распределение Пуассона, которое моделирует случайную величину, т. е. число событий, произошедших за фиксированное время, при условии, что данные события происходят с фиксированной интенсивностью и независимо друг от друга [58, 60–64, 75, 78, 135–137].

В большинстве случаев входящий поток неуправляем и зависит от ряда случайных факторов. Число воздействий  $Att_k$ , возникающих в единицу времени и интервал между соседними воздействиями, также являются случайными величинами. Однако среднее количество воздействий в единицу времени и средний интервал между ними (т. е. средняя интенсивность воздействий) предполагаются заданными [58, 60–64, 78, 135–137].

Среднее число воздействий на объект за исследуемый интервал времени  $T$  называется приведенной интенсивностью воздействий и определяется следующим соотношением:

$$\lambda = \frac{T}{T_0}, \quad (3.145)$$

где  $T_0$  – среднее значение временного интервала между воздействиями или их интенсивность, возникающих на исследуемом интервале времени.

Простейший поток событий реальных процессов достаточно хорошо описывается законом распределения Пуассона и обладает несколькими важными свойствами[58, 60–64, 78]: *стационарностью* – неизменностью вероятностного режима потока по времени; *отсутствием последействия* – взаимной независимостью поступления того или иного числа событий в непересекающиеся промежутки времени (воздействия одного типа можно считать независимыми); *ординарностью* – невозможностью одновременного наступления двух или более событий (вероятность такого события неизмеримо мала на рассматриваемом интервале времени).

При простейшем потоке для оценки распределения воздействий целесообразно применять формулу, учитывающую длину выбранного интервала  $T$  функционирования объекта:

$$p_k = \frac{(\lambda_0 T)^k}{k!} e^{-\lambda_0 T}. \quad (3.146)$$

Интенсивность  $\lambda_0$  равна числу воздействий в единицу времени, соответствующую единице измерения выбранного интервала  $T$ . Вероятность того, что за время  $T$  произойдет именно  $k$  успешно реализованных воздействий  $Att_k$  (при их средней интенсивности  $\lambda$ ) на данном интервале, с учетом выражения (3.146), вычисляется следующим образом:

$$p_k = \frac{\lambda^k}{k!} e^{-\lambda}. \quad (3.147)$$

Однако на практике мы имеем дело с *нестационарными* процессами. Существует также наличие *последействия*, когда количество  $Att_k$  в конце исследуемого интервала зависит от их эффективности в начале интервала. Наблюдается и явление *неоднородности*, когда одновременно осуществляются однотипные воздействия. С достаточно высоким приближением для оценки распределе-

ния вероятностей возникновения воздействий можно применить общую теорему А. Я. Хинчина, в соответствии с которой *входящий поток представляется в виде суммы большого числа независимых потоков  $N$ , ни один из которых не является сравнимым по интенсивности со всем суммарным потоком*. Таким образом, *общий поток воздействий можно разбить на подпотоки воздействий каждого типа, реализуемых отдельно*. Отметим, что «активность» воздействий относительно разных объектов может варьироваться в достаточно широких пределах и зависеть от назначения и масштаба системы, степени ее открытости, а также иных факторов. Таким образом, необходимо ввести коэффициент  $K_{и}$  интенсивности, характеризующий среднее число воздействий на объекты за единицу времени вне зависимости от их сложности [64].

Этот коэффициент представляет собой множитель для всех приведенных выше начальных значений интенсивности:

$$K_{и} = \frac{\lambda_{i(j)}}{T}, \quad (3.148)$$

где  $\lambda_i$  – интенсивность «внешнего» воздействия (ЭМИ на объекты, вызывающие катастрофические и функциональные отказы),  $\lambda_j$  – интенсивность «внутреннего» воздействия (появление ВЭМИН).

Для оценки интенсивности воздействия воздействий следует исходить из сложности их реализации. Для адекватной оценки интенсивности воздействий с учетом особенностей применения возможных мер обеспечений живучести и помехозащищённости целесообразно их разделить на внешние и внутренние.

В соответствии с этим введем два различных коэффициента интенсивности: внешних  $K_{ex}$  и внутренних воздействий  $K_{in}$  :

$$K_{ex} = \frac{\lambda_i}{T}; \quad (3.149)$$

$$K_{in} = \frac{\lambda_j}{T}. \quad (3.150)$$

Полученные интенсивности принимаются в качестве параметра для распределения вероятностей воздействий каждого типа, т. е. вероятность числа попыток злоумышленника провести воздействие, и не имеют отношения к их эффективной реализации. При этом интенсивность «сложного» воздействия представляет собой сумму интенсивностей возникновения каждого воздействия по отдельности:

$$\lambda_c = \sum_{ij \in m} \lambda_{ij}, \quad (3.151)$$

где  $m$  – общее число воздействий.

Для оценки риска, с учетом величин ущербов от различных воздействий, таких распределений недостаточно. Возникает необходимость рассмотрения вероятностной модели к общей шкале ущерба для всех видов воздействий. При этом величины ущербов, наносимых различными воздействиями, должны быть сопоставимыми и иметь одинаковую размерность.

Введем множество  $D_c = \{D_{i(j)}\}$ , характеризующее величину ущерба от каждой из исследуемых воздействий. При этом любое из перечисленных воздействий нарушает целостность информации и влечет за собой одинаковый ущерб  $D_c$  независимо от их типа. В общем случае зависимость величины среднего ущерба при реализации воздействий от среднего времени ее действия не имеет четкого определения. Однако при учете множества разрушающих воздействий ущерб представляет собой сумму ущербов, нанесенных всеми воздействиями в соответствующем количестве повторений [78, 135-137]:

$$D_C = \sum_{\forall ij} D_{ij}. \quad (3.152)$$

Поскольку распределения числа возникающих воздействий являются дискретным, то для нахождения искомого дискретного распределения разобьем рассматриваемый интервал ущерба  $[D_{\min}; D_{\max}]$  на  $\mathfrak{Z}$  участков:

$$D_C = [D_{\min} + \eta \cdot \Delta D; D_{\max} + (\eta + 1) \cdot \Delta D], \quad \text{при } \eta = \overline{0, \mathfrak{Z}}. \quad (3.153)$$

Исходная формула закона распределения Пуассона подразумевает 100 % реализацию всех видов воздействий, возникающих с интенсивностью  $\lambda_{i(j)}$ . Однако практически из некоторого числа  $m$  возникших воздействий будут реализованы только  $k \leq m$  воздействий, и задача сводится к нахождению закона распределения вероятностей  $p_m$  отдельных воздействий при данном условии.

По закону Пуассона закон распределения вероятностей  $p_m(\lambda_{i(j)})$  реализации воздействий имеет вид:

$$p_m(\lambda_{i(j)}) = \frac{p_{i(j)} \lambda_{i(j)}^m}{m!} e^{-p_{i(j)} \lambda_{i(j)}}, \quad (3.154)$$

где  $p_i$  – вероятность  $i$ -го воздействия – воздействия ЭМИ на объекты;  $p_j$  – вероятность появления внутренних электромагнитных излучений и наводок, с учетом того, что на данном интервале времени при интенсивности  $\lambda_{i(j)}$  возникло было именно  $m$  воздействий.

Так как данная величина попадает в интервал  $[D_{\min} + \eta \cdot \Delta D; D_{\max} + (\eta + 1) \cdot \Delta D]$ , для расчета вероятности нанесения суммарного ущерба при реализации воздействий необходимо учесть все возможные их комбинации  $m$  на исследуемом интервале  $[D_{\min}; D_{\max}]$ :

$$p_{D_{ij}} = \bigcup_{D_{\min}}^{D_{\max}} p_m(\lambda_{i(j)}). \quad (3.155)$$

Для отдельных воздействий вероятность нанесения ущерба преобразуется к выражениям:

$$p_{D_i} = \bigcup_{D_{\min}}^{D_{\max}} p_m(\lambda_i); \quad (3.156)$$

$$p_{D_j} = \bigcup_{D_{\min}}^{D_{\max}} p_m(\lambda_j).$$

Поскольку предполагается, что все воздействия взаимно независимы, вероятность реализации их комбинаций  $m \in M$  равна произведению вероятностей соответствующего числа воздействий каждого вида. Таким образом, в связи с представленными положениями выражение для распределения вероятностей нанесения комплексного ущерба в условиях воздействия независимых в совокупности воздействий принимает окончательный вид:

$$p_{D_c} \left( I \bigcup_{\forall ij, m \in M} J \right) = 1 - (1 - p_{D_i}) \cdot (1 - p_{D_j}), \quad (3.157)$$

где  $i \in I, j \in J$ .

3.3.2. Математический метод моделирования ущерба, наносимого объектам критической информационной инфраструктуры при воздействии электромагнитных излучений, базирующийся на иерархически ранговом подходе

Неотъемлемой частью оценки ущерба является оценка рисков нанесения ущерба объектам КИИ от реализации воздействий различной природы. Она предполагает учет следующих характеристик объектов [5, 70, 75-78, 135-140]:

1. архитектуру (внутреннее строение) объекта;
2. «степень критичности» и ценность активов объекта;
3. процедуры ОФУ объекта КИИ, учитывающие установленную «модель опасностей» объекта со стороны потенциальных злоумышленников и определяющие степень эффективности мероприятий по противодействию вероятным опасностям.

*Математический метод моделирования ущерба, наносимого объектам КИИ при воздействии ЭМИ* построен на основе размеченной системы переходов (ориентированный граф, рис. 3.33), состояния  $\overline{Cd}_{(x,y)}$  которой отвечают состояниям объектов КИИ, а *переходы* – шагам потенциальных воздействий, что предусматривает представление исходного объекта КИИ в виде *ранговой иерархии элементов* и задания значений всех *атрибутов* (задание структурной модели объектов КИИ). С этой целью в работе разработан *иерархически ранговый подход* (ИРП, англ. – *Hierarchical Range Approach, HRA*), предусматривающий применение *рангов* – показателей, характеризующих относительный уровень «ценности (важности)» анализируемого объекта в группе других таких же объектов организационной системы, и предусматривающих в зависимости от их важности упорядочение, с помощью выбранной для системы «объект воздействия – опасность» оценочной шкалы сравнения, и, благодаря чему дающих основание для присвоения им определенной ранговой категории. Объекты, соответствующие листовым вершинам дерева, являются корневыми (*высшими*) рангами [78, 135, 138, 139].



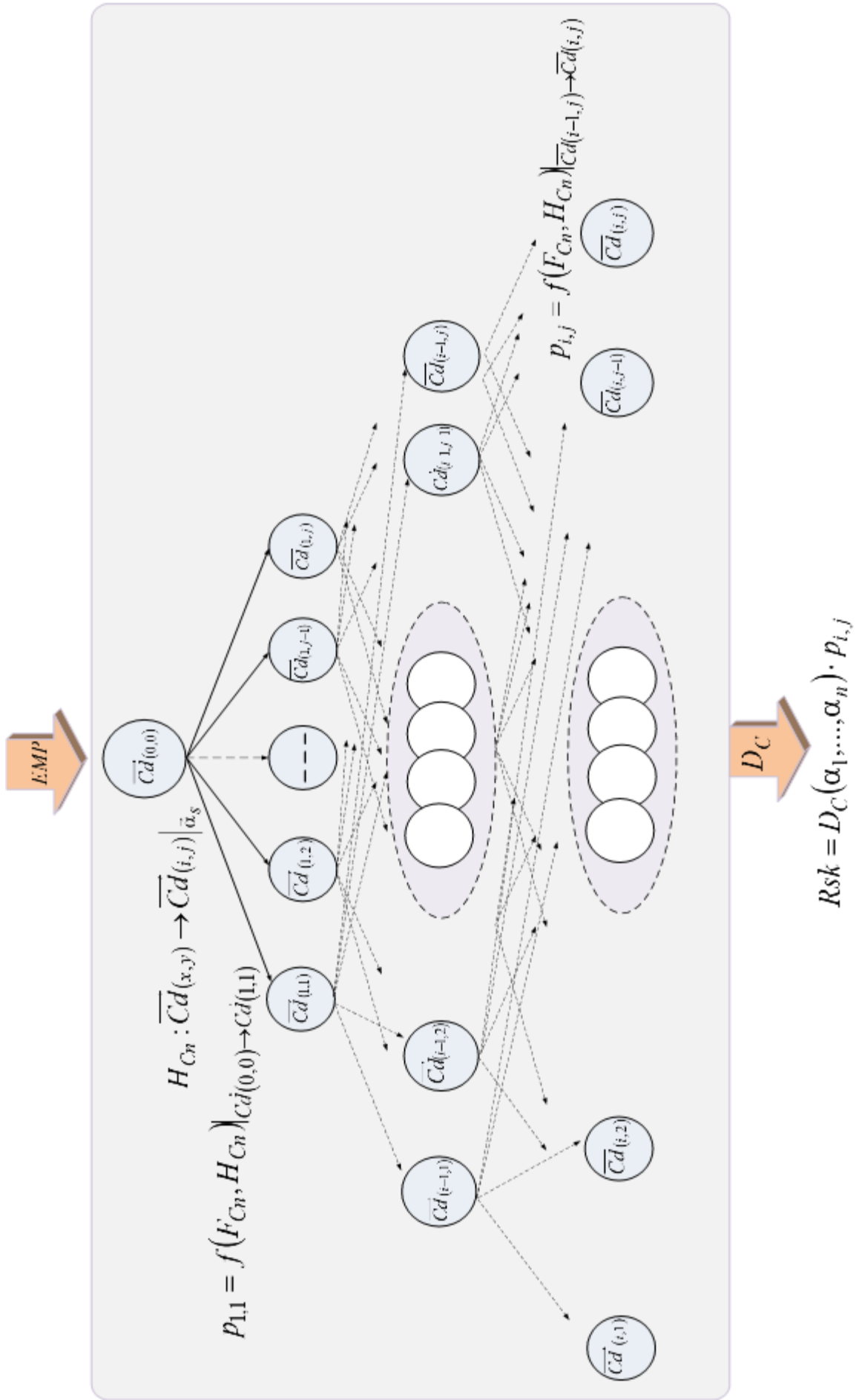


Рисунок 3.33 – Система переходов для определения состояния объектов КИИ в условиях воздействия ЭМИ

Каждый ранг  $s = 0, 1 \dots n$  имеет набор *атрибутов* – отдельные составляющие КИИ, позволяющие группировать объекты с одинаковыми (похожими) свойствами и функциональностью:

1. *Атрибут «уровень устойчивости объектов КИИ»* ( $L$ ):  $L = 1$  – базовый;  $L = 2$  – средний;  $L = 3$  – высокий;  $L = 4$  – максимально допустимый.

2. *Атрибут «функция устойчивости объекта КИИ»*: требования и предположения по обеспечению принятых на объекте процедур ОФУ с их корректной интеграцией в рамках подсистем в составе объектов.

3. *Атрибут «опасности, присущие данному объекту КИИ»*: отказ, выход из строя – функциональные и/или катастрофические отказы оборудования, появление внутренних электромагнитных излучений и наводок.

4. *Атрибут «состояние объекта КИИ»*  $\overline{Cd}_{(x,y)}$ , как следствие реализации воздействия характеризуется вектором  $\vec{\alpha}_s = (\alpha_1, \dots, \alpha_n)$ , где:

$$\vec{\alpha}_s = \begin{cases} 1, & \text{при } L_k \text{ объект устойчив;} \\ 0 & \text{иначе} \end{cases} \quad (3.158)$$

$$s = 0, 1 \dots n; x = 0, 1 \dots, i - 1, l; y = 0, 1 \dots, j - 1, j.$$

В таблице 1 представлена информация о наборе атрибутов объекта КИИ, направленных на оценку устойчивости объектов и показывающая «степень их влияния» на возможность возникновения ущерба в зависимости от действий, предпринимаемых в ходе реализаций опасностей объектам КИИ. В таблице используются следующие обозначения:  $Rng_i$  – ранг объекта КИИ;  $\alpha_i, \dots, \alpha_n$  – список всех возможных значений атрибутов;  $w_s^{Thr} \in W$  – «вес» соответствующего значения атрибута объектов КИИ по отношению к  $Thr$ , показывающего «степень его влияния» на возможность её реализации.

Таблица 3.4 – Информация о наборе атрибутов объекта КИИ, направленных на оценку устойчивости объектов

Наименование атрибута	Показатели				
Ранг объектов КИИ, $s = 1, \dots, n-1, n$	$Rng_s$	$Rng_s$	...	$Rng_s$	$Rng_s$
Уровень устойчивости объектов КИИ, $k = 1..4$	$L_k$	$L_k$	...	$L_k$	$L_k$
Значения $\bar{\alpha}_s$	$\{0,1\}$	$\{0,1\}$	...	$\{0,1\}$	$\{0,1\}$
Вес атрибутов $W$ , присущих данному объекту КИИ по отношению к опасности $Thr$	$w_1^{Thr}$	$w_2^{Thr}$	...	$w_{n-1}^{Thr}$	$w_n^{Thr}$
Состояние объектов КИИ $\bar{Cd}_{(x,y)}$ , $x = 0, 1, \dots, i-1, i; y = 0, 1, \dots, j-1, j$ .	$\bar{Cd}_{(0,0)}$	$\bar{Cd}_{(1,1)}$	...	$\bar{Cd}_{(x-1,y-1)}$	$\bar{Cd}_{(x,y)}$

Считаем, что для каждой  $Thr$  имеются функции:

–  $F_{Cth} : [0,1]$  – задает вероятность возникновения опасности в данном состоянии объектов КИИ;

–  $H_{Cn} : \bar{Cd}_{(x,y)} \rightarrow \bar{Cd}_{(i,j)} | \bar{\alpha}_s$  – задает правило перехода объектов КИИ в следующее состояние по текущему его состоянию;

–  $D_C \rightarrow \mathbb{R}$  – определяет по данному состоянию величину ущерба, нанесенного объектам КИИ, в случае если указанное состояние будет достигнуто;  $p_{i,j} = f(F_{Cth}, H_{Cn})$  – вероятность нанесения ущерба объекту КИИ при достижении состояния  $\bar{Cd}_{(i,j)}$ . Каждый атрибут влияет на вероятность  $p_{i,j}$  перехода объекта в следующее состояние по текущему его состоянию независимо от значений других атрибутов (рис. 3.33).

В этом случае  $W = \mathbb{R}^+$  и  $F_{Cth} = \prod_{s=0}^n \bar{\alpha}_s w_s^{Thr}$ . Реализация каждой  $Thr$  представляет нанесение ущерба ресурсам объектов КИИ и характеризуется ненулевыми позициями вектора  $\bar{\alpha}_s \in \{0,1\}$ .

Величина ущерба  $D_C$  объектов КИИ в условиях воздействия характеризуется определенными значениями атрибутов, например, функциональное поражение

ние компонентов (СВТ) объектов и/или возникновение внутренних электромагнитных излучений и наводок, приводящее к искажению достоверности предоставления информационных ресурсов потребителям:

$$D_C(\alpha_1, \dots, \alpha_n) = \begin{cases} N \text{ единиц ущерба,} & \text{если } \alpha_s = 0; \\ 0 & \text{иначе.} \end{cases} \quad (3.159)$$

Результатом выполнения работы будет являться вектор  $\overline{Cd}_0 \in \{0,1\}^n$ , показывающий начальное состояние объектов КИИ в системе переходов, в котором пути, ведущие из начальной вершины, отвечают возможным сценариям воздействия ЭМИ.

Далее для каждого необработанного состояния  $\overline{Cd}_{(i,j)} = (\alpha_1, \dots, \alpha_n)$  с условием  $D_C(\overline{Cd}_{(i,j)}) \leq \Delta_{TD}$  (где  $\Delta_{TD}$  – верхний порог величины ущерба, при котором он еще не считается существенным для функционирования объектов КИИ), для каждой  $Thr$  вычисляется значение вероятности состояния  $H_{Cn}(Cd_{(0,0)} \rightarrow Cd_{(1,1)})_{\bar{\alpha}_S}$ . Если окажется, что  $p_{i,j} \geq \Delta_{TD}$ , то в текущей системе переходов порождается новое состояние ОКИИ, определяемое  $H_{Cn}$  и значением вероятности  $p_{i,j}$ . И, если  $H_{Cn}$  в системе переходов уже существует, то новое состояние не порождается, а лишь пересчитывается вероятность его возникновения. Указанная последовательность шагов повторяется до тех пор, пока возможно порождение новых состояний объектов КИИ.

Величина опасности  $Rsk_{,,}$ , характеризующая для воздействия ЭМИ  $Dng_{EMF}$  возможность нанесения объектам КИИ ущерба, определяется произведением:

$$Rsk = D_C(\alpha_1, \dots, \alpha_n) \cdot p_{i,j}. \quad (3.160)$$

Система ОФУ выполняет функцию полного или частичного предотвращения воздействия на исследуемый объект КИИ. В качестве показателя оптималь-

ности СОФУ предлагается принять вероятность предотвращения ущерба  $P_{D_C \text{пред}}$  наносимого объекту КИИ в указанных условиях.

Ущерб  $D_C$  может определяться в абсолютных единицах: экономических потерях при катастрофических отказах компонентов объектов (СВТ), временных затратах и объеме «доступной» информации и т. д. Практически оценить ущерб весьма затруднительно, особенно на ранних этапах проектирования СОФУ. Поэтому целесообразно вместо *абсолютного ущерба* использовать *относительный ущерб*, представляющий степень опасности электромагнитных импульсов для объекта КИИ.

Степень опасности в исследовании определяется экспертным путем в предположении, что вероятность применения ЭМИ по объекту КИИ составляют полную группу событий  $0 \leq D_C \leq 1$ ;  $\sum_{\forall ij=1}^n D_{ij} = 1$ . Задача синтеза и построения

СОФУ объекта КИИ при воздействии ЭМИ представляет собой поиск оптимального варианта при поиске равновесия в смешанных стратегиях, применяемых в теории игр. Предложенные численные методы моделирования позволяют анализировать возможные опасности относительно объектов КИИ, выявлять слабые места в СОФУ, вырабатывать адекватные предложения по улучшению состояния системы и осуществлять управление рисками неблагоприятных для данных объектов событий.

Общий предотвращенный СОФУ ущерб обозначим как  $\bar{D}_C$ , а предотвращенный ущерб за счет реализаций мероприятий по устойчивости объектов в условиях воздействия излучений через  $\bar{D}_{RS}$ . Сформулируем в общем виде задачу синтеза средств ОФУ объекта КИИ в условиях воздействия ЭМИ: *необходимо выбрать такой вариант ОФУ, который обеспечивает минимизацию наносимого ущерба  $D_C$  в условиях воздействия ЭМИ при минимальных финансовых затратах  $Exp$  на её создание. Задача минимизации ущерба  $D_C$ , заменяется эквивалентной ей задачей максимального предотвращения ущерба  $\bar{D}_C$  от воздействия*

угроз при допустимых затратах, выделяемых на СОФУ  $Exp_{adm}$  при фиксированном векторе распределения средств поражения  $\overline{Df}$ .

Предотвращаемый ущерб в общем виде определяется зависимостью  $\overline{D}_C = F(p_{D_{ij}}; \overline{Df}; P_{D_{C-пред}})$ , а предотвращенный ущерб за счет реализации мероприятий по обеспечению функциональной устойчивости объектов КИИ при воздействии ЭМИ зависимостью:

$$\overline{D}_{RS} = F(p_{D_{ij}}; \overline{Df}; P_{D_{C-пред}}) \rightarrow \max. \quad (3.161)$$

$Exp_{adm} \rightarrow \min$

Однако наиболее сложным вопросом является определение вероятности оценки предотвращенного ущерба в условиях воздействия ЭМИ  $\overline{P}_{D_{C-пред}}$  при проектировании СОФУ, которая определяется полнотой учета качественных и количественных требований к СОФУ объектов КИИ при их проектировании т. е.:

$$\overline{P}_{D_{C-пред}} = f_i(x_{i1}, \dots, x_{ij}, \dots, x_{im}), \quad (3.162)$$

где  $x_{ij}$  – степень выполнения  $i$ -го требования к СОФУ для устранения  $j$ -го внешнего воздействия,  $i = \overline{1, m}; j = \overline{1, n}$ .

Степень выполнения  $i$ -го количественного требования определяется его близостью к требуемому или оптимальному значению. Для оценки степени выполнения  $i$ -го количественного требования к СОФУ объектов КИИ удобнее всего использовать его нормированное значение  $x_{ij} (i = \overline{1, m}; j = \overline{1, n}), 0 \leq x_{ij} < 1$ .

Разложив функцию (3.162) в ряд Макларена и ограничиваясь первыми членами ряда, получим [137, 138, 141]:

$$\overline{P}_{D_{C-пред}} = P_{D_{C-пред}}(0) + \sum_{j=1}^m \frac{\partial P_{D_{C-пред}}}{\partial x_{ij}} x_{ij}, \quad (3.163)$$

где  $P_{D_{C\text{пред}}}(0) = 0$  – вероятность предотвращения СОФУ воздействия ЭМИ при невыполнении требований по живучести и помехозащищённости;

$\frac{\partial P_{D_{C\text{пред}}}}{\partial x_{ij}} = \gamma_{ij}^{\text{opt}}$  – величина, характеризующая степень влияния  $i$ -го требования

на вероятность предотвращения СОФУ воздействия ЭМИ. Очевидно, что

$$0 \leq \gamma_{ij}^{\text{opt}} \leq 1; \sum_{j=1}^m \gamma_{ij}^{\text{opt}} = 1 \text{ для } i = \overline{1, n}.$$

После подстановки в выражение (3.163) соответствующих значений получаем:

$$\overline{P}_{D_{C\text{пред}}}(x_{ij}; i = \overline{1, n}; j = \overline{1, m}) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \gamma_{ij}^{\text{opt}} \cdot \overline{x}_{ij} + \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \gamma_{ij}^{\text{opt}} \cdot \mu(x_{ij})^{\text{opt}}. \quad (3.164)$$

Таким образом, задача синтеза СОФУ объектов КИИ сводится к оптимальному обоснованию количественных и качественных требований к системе при допустимых экономических затратах (при ограничении):

$$\min \text{Exp}(x_{ij}) \leq \text{Exp}_{\text{доп}} \text{ при } i = \overline{1, m}; j = \overline{1, n}. \quad (3.165)$$

3.4. Математический метод моделирования системы обеспечения функциональной устойчивости объектов критической информационной инфраструктуры при воздействии электромагнитных импульсов, базирующийся на способах и приемах расчета условной вероятности их «попадания» (преодоления им различного рода препятствий) и математического вероятностного аппарата классического обнаружения наведенного сигнала

Как уже было определено выше, проблема ОФУ объектов при воздействии деструктивных факторов, воздействующих на объекты КИИ как независимо друг от друга, так и комплексно, с различной степенью перколяции, имеет ярко выраженный комплексный характер как в техническом, так и в организационном

отношениях, что требует формирование комплексной концепции обеспечения живучести и помехозащищённости объектов КИИ, функционирующих в заданных условиях. Оценка уровня ОФУ в данных условиях предполагает учет как *внутренних*, обусловленных заданными показателями надежности, заложенными при проектировании объекта и предусматривающих его функционирование в условиях расчетных воздействий, так и *внешних* (интенсивность, режим и время воздействия) факторов их функционирования, что предполагает, в зависимости от их структуры объекты, избирательное восприятие ими излучения ЭМИ. Насыщенность структуры объектов КИИ ТКО влечет за собой усложнение задачи по оценке последствий влияния воздействующих факторов и тех мер, которые необходимо предпринять с целью обеспечения живучести и помехозащищённости объектов и их работоспособности в реальных, в том числе и нерасчётных, условиях функционирования [78, 135, 141–143], что, в свою очередь, требует учёт условий эксплуатации объектов КИИ, их компонентов (СВТ), средств обеспечения их функциональной устойчивости (живучести и помехозащищённости), характеристик среды распространения, параметров генераторов ЭМИ. Данные факторы будут учтены непосредственно при разработке соответствующего математического метода моделирования, в рамках которого необходим критерий, определяющий степень достижения требуемых показателей функциональной устойчивости.

Таким образом, под функциональной устойчивостью объектов КИИ будем пониматься их способность выполнять требуемые функции как в расчётных условиях функционирования, так и в условиях, создаваемых внешними дестабилизирующими факторами (воздействие ЭМИ) с соблюдением определенной степени адекватности реализованных механизмов обеспечения живучести и помехозащищённости существующим в данной среде функционирования рискам при минимальных отклонениях от требуемых показателей устойчивости [141–143].

Критерий устойчивости объектов КИИ в условиях воздействия ЭМИ представлен выражением [75]:

$$P_{\text{ФУОКИИ}} \geq P_{\text{ФУОКИИ}}^{\text{треб}}. \quad (3.166)$$



где  $P_{\text{ФУОКИИ}}$  – достигаемая вероятность устойчивого функционирования объектов КИИ в условиях воздействия ЭМИ;  $P_{\text{ФУОКИИ}}^{\text{треб}} \geq 0,95$  – требуемая вероятность устойчивого функционирования.

Функциональная устойчивость объектов КИИ в условиях воздействия ЭМИ определяется с помощью следствия теоремы умножения для независимых событий, согласно которой вероятность совместного появления независимых событий равна произведению их вероятностей:

$$P_{\text{ФУОКИИ}} = P_{\text{выжОКИИ}} \cdot P_{\text{ПзащОКИИ}}, \quad (3.167)$$

где  $P_{\text{выжОКИИ}}$  – вероятность выживания объекта КИИ при воздействии ЭМИ;  $P_{\text{ПзащОКИИ}}$  – помехозащищенность объектов КИИ в условиях возможного появления внутренних электромагнитных излучений и наводок. В случае невыполнения критерия осуществляется коррекция исходных данных с последующим повторением процедуры расчета критических напряженностей, характеризующих ЭМИ и поля, приводящего к образованию внутренних электромагнитных излучений и наводок, до тех пор, пока не будут исчерпаны возможности по применению предлагаемых мер устойчивости компонентов с учетом реальных условий функционирования объектов КИИ.

В случае невыполнения критерия осуществляется коррекция исходных данных с последующим повторением процедуры расчета критических напряженностей (потенциалов ЭМП), характеризующих ЭМИ и поля, приводящего к образованию внутренних электромагнитных излучений и наводок, до тех пор, пока не будут исчерпаны возможности по применению предлагаемых мер устойчивости компонентов с учетом реальных условий функционирования объектов КИИ.

3.4.1. Математический метод моделирования живучести объектов критической информационной инфраструктуры при воздействии электромагнитных импульсов, базирующийся на способах и приемах расчета условной вероятности их «попадания» (преодоления ими различного рода препятствий)

*Под живучестью* объектов КИИ в работе понимается способность данных объектов эффективно функционировать в условиях нерасчетных внешних дестабилизирующих воздействий, в данном случае – при воздействии ЭМИ, и адаптироваться в течение заданного времени к изменяющимся условиям для выполнения основной функции – передачи через электронное оборудование каналов связи с приемлемым (в минимальном объеме) для потребителей качеством и в заданных временных интервалах [55, 56, 58, 75].

Исходные данные для оценки живучести сгруппированы по 5-ти уровням. К ним относятся:

- *характеристики генераторов ЭМИ*:  $P_{\text{и}}$  – пиковая мощность;  $E_{\text{max}}$  – максимальное значение напряженности поля ЭМИ в области источника излучения (потенциал ЭМП);  $\tau_{\text{и}}$  – длительность ЭМИ;  $f$  – частота ЭМИ;  $W_1$  – энергия импульса на  $1 \text{ м}^2$  на различном удалении (табл. 1.7); где  $r_{\text{фп}}$  – радиус функционального поражения;

- *характеристики среды распространения*:  $\mathcal{R}$  – интерференционный множитель и  $\xi$  – коэффициент ослабления электромагнитной энергии в свободном пространстве в соответствии с выражением (1.15);

- *условие эксплуатации СВТ*: размер контролируемой зоны  $r_{\text{кз}}$  и наличие (отсутствие) экрана;

- *характеристики СВТ и их средств обеспечения их живучести*.

Показатели, оценивающие живучесть объектов КИИ, представляются численными значениями вероятности нахождения определяющих живучесть данных объектов компонентов (СВТ) и параметров их конструктивных элементов в

установленных пределах допусков при различных значениях уровней полей ЭМИ [62, 63, 75].

В качестве обобщенного показателя живучести при воздействии ЭМИ на объекты КИИ выступает вероятность выживания объекта при выполнении условия:

$$P_{\text{ВЫЖОКИИ}} \geq P_{\text{ВЫЖОКИИ}}^{\text{треб}}, \quad (3.168)$$

где  $P_{\text{ВЫЖОКИИ}}$  – вероятность выживания объектов КИИ, определяемая [56, 57, 144]. В соответствии с [55–57, 75, 144] для оценки живучести объектов требуются исходные данные о структуре объектов КИИ, взаимном удалении его компонентов друг от друга, степени обеспечения устойчивости по каждому фактору, расстоянии их от точки электромагнитного воздействия, характеристике поражающего воздействия. В соответствии с этим к частным показателям стойкости относится безусловная вероятность выживания элемента, блока элементов и СВТ в целом:

$$\begin{aligned} P_{\text{ВЫЖ.Э}} \left[ \{q_i\} \in \{q_{i\text{ДОП}}\} \right] &\geq P_{\text{ВЫЖ.Э}}^{\text{ТР}}; \\ P_{\text{ВЫЖ.БЛ}} \left[ \{q_i\} \in \{q_{i\text{ДОП}}\} \right] &\geq P_{\text{ВЫЖ.БЛ}}^{\text{ТР}}; \\ P_{\text{ВЫЖ.СВТ}} \left[ \{q_i\} \in \{q_{i\text{ДОП}}\} \right] &\geq P_{\text{ВЫЖ.СВТ}}^{\text{ТР}}, \end{aligned} \quad (3.169)$$

где  $\{q_i\}$  и  $\{q_{i\text{ДОП}}\}$  – параметры, определяющие стойкость конструктивных элементов СВТ в пределах допусков в условиях воздействия ЭМИ.

Критериальная часть метода представлена выражениями:

$$\begin{aligned} E_{\text{ПМП}}^{\text{in}} &< E_{\text{крп}}; \\ W_2 &< W_{\text{крп}}; \\ K_{\Gamma} &\geq K_{\Gamma}^{\text{ТР}}; \end{aligned} \quad (3.170)$$

$$\left( P \left( K_{\Gamma} \geq K_{\Gamma}^{\text{ТР}} \right) \geq P_{\text{ТР}} \left( K_{\Gamma} \geq K_{\Gamma}^{\text{ТР}} \right) \right),$$

где  $E_{крп}$  и  $W_{крп}$  – критическая напряженность электрической составляющей ЭМИ и пороговая энергия (потенциал ЭМП), приводящие к поражению СВТ;  $K_{Г}$  – коэффициент готовности СВТ;  $K_{Г}^{тр}$  – требуемый коэффициент готовности средства ЭВТ, определяемый в виде:

$$K_{Г}^{тр} = \max \left\langle K_{Г\ 1}^{тр}; K_{Г\ 2}^{тр}; \dots; K_{Г\ j}^{тр}; \dots; K_{Г\ n}^{тр} \right\rangle; \quad (3.171)$$

где  $P_{зад} \left( K_{Г} \geq K_{Г}^{тр} \right)$  – заданная вероятность безотказной работы;

$P_{тр} \left( K_{Г} \geq K_{Г}^{тр} \right)$  – вероятность безотказной работы требуемая;  $W_2$  – энергия ЭМИ,

воздействующая на конструктивные элементы СВТ в экранированном объеме.

Выполненный таким образом анализ проявления свойства живучести объекта КИИ в целом на различных уровнях оценки дает возможность сделать вывод о том, что количественной мерой живучести объектов является вероятность его выживания  $P_{выжОКИИ}$ , то есть вероятность того, что в случае воздействия по нему деструктивного ЭМИ он сохранит работоспособность и будет выполнять возложенные на него функции.

С целью повышения конструктивности математического метода моделирования функциональной устойчивости в отношении элемента СВТ, блока элементов СВТ, СВТ и объектов КИИ в целом разработана блок-схема алгоритма оценки живучести объектов КИИ в условиях воздействия ЭМИ, представленная на рисунке 3.34.

Вероятность выживания блока элементов, средств ЭВТ и объекта в целом определяется с помощью следствия теоремы умножения для независимых событий, согласно которой вероятности совместного появления нескольких событий, независимых в совокупности, равна произведению вероятности этих событий [147, 148]. Вначале определяются вероятности выживания элементов. Для определения вероятности выживания блока элементов необходимо перемножить вероятности выживания элементов от 1-го до  $n$ -го между собой.

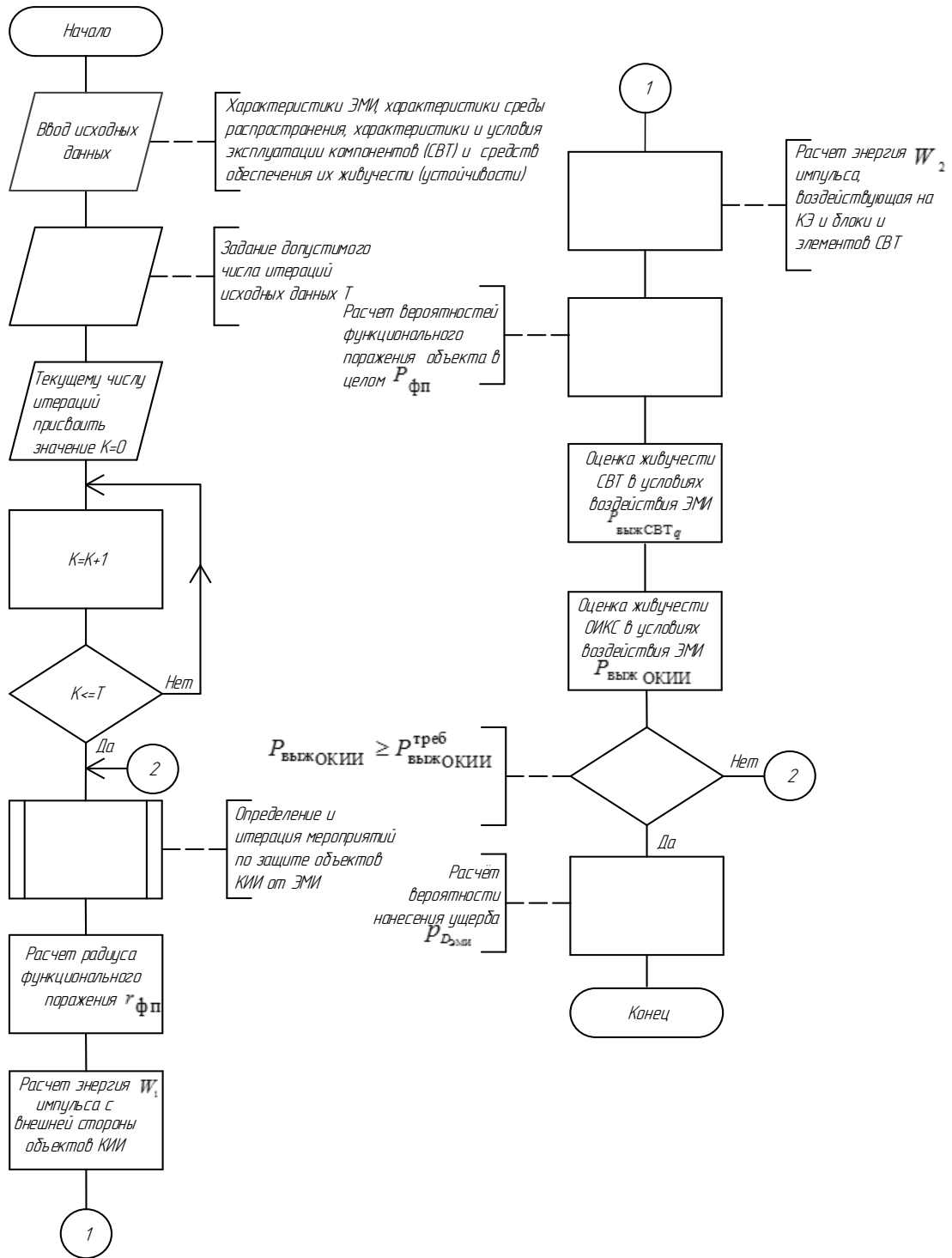


Рисунок 3.34 – Блок-схема алгоритма оценки живучести объектов КИИ в условиях воздействия ЭМИ

Затем производятся те же самые действия относительно средства ЭВТ, используя вероятности выживания блока элементов от 1-го до  $n$ -го. И, наконец, определяется вероятность выживания объекта средства ЭВТ в целом, которая

вычисляется с помощью вероятности выживания средств ЭВТ также от 1-го до  $n$ -го.

На первом этапе расчета, исходя из совокупности исходных данных и цели оценки в отношении объекта, определяются критические напряженности электрического поля, приводящие к функциональному поражению элементов средств ЭВТ, блока элементов и средства ЭВТ в целом:

$$\left. \begin{aligned} E_{\text{кр}11} &= \min \{ E_{11\text{Лпроб}}; E_{11\text{Тпроб}}; E_{11\text{ПЗпроб}}; E_{11\text{ТВП}}; E_{11\text{ЭБ}} \}; \\ E_{\text{кр}12} &= \min \{ E_{12\text{Лпроб}}; E_{12\text{Тпроб}}; E_{12\text{ПЗпроб}}; E_{12\text{ТВП}}; E_{12\text{ЭБ}} \}; \\ &\dots\dots\dots \\ E_{\text{кр}1j} &= \min \{ E_{ij\text{Лпроб}}; E_{ij\text{Тпроб}}; E_{ij\text{ПЗпроб}}; E_{ij\text{ТВП}}; E_{ij\text{ЭБ}} \}; \\ &\dots\dots\dots \\ E_{\text{кр}1m} &= \min \{ E_{im\text{Лпроб}}; E_{im\text{Тпроб}}; E_{im\text{ПЗпроб}}; E_{im\text{ТВП}}; E_{im\text{ЭБ}} \} \end{aligned} \right\}; \quad (3.172)$$

$$E_{\text{кр}} = \min \{ E_{\text{кр}1}; E_{\text{кр}2}; \dots; E_{\text{кр}j}; \dots; E_{\text{кр}n} \}; \quad (3.173)$$

$$\left. \begin{aligned} E_{\text{кр}1} &= \min \{ E_{\text{кр}11}; E_{\text{кр}12}; \dots; E_{\text{кр}1j}; \dots; E_{\text{кр}1m} \}; \\ E_{\text{кр}2} &= \min \{ E_{\text{кр}21}; E_{\text{кр}22}; \dots; E_{\text{кр}2j}; \dots; E_{\text{кр}2m} \}; \\ &\dots\dots\dots \\ E_{\text{кр}i} &= \min \{ E_{\text{кр}i1}; E_{\text{кр}i2}; \dots; E_{\text{кр}ij}; \dots; E_{\text{кр}im} \}; \\ &\dots\dots\dots \\ E_{\text{кр}n} &= \min \{ E_{\text{кр}n1}; E_{\text{кр}n2}; \dots; E_{\text{кр}nj}; \dots; E_{\text{кр}nm} \} \end{aligned} \right\}; \quad (3.174)$$

Затем рассчитываются критические энергии поражения [86, 87, 131, 132,101–107]:

$$W_{\text{кр}n} = \frac{E_{\text{кр}n}^2}{R} \cdot t, \quad (3.175)$$

где  $R$  – сопротивление типового КЭ СВТ;  $t$  – время воздействия ЭМИ.

На втором этапе, учитывая случайный характер уровня критической энергии поражения на входе средства ЭВТ при воздействии ЭМИ, радиус ФП  $r_{\text{ФП}}$ ,

определяющий расстояние от источника ЭМИ до СВТ объектов КИИ, вычисляется с помощью следующего выражения:

$$r_{\text{фп}} = \sqrt{\frac{-\ln\left(P_{\text{зад}}\left(K_{\Gamma} \geq K_{\Gamma}^{\text{TP}}\right)\right) \cdot P_{\text{и}} \cdot G_{\text{ЭМИ}} \cdot \eta_{\text{фЭМИ}} \times \mathfrak{R} \cdot \xi \cdot \beta \cdot \tau \cdot f_{\text{проц}} \cdot \nu_a \cdot S_{\text{э}}}{f \cdot W_{\text{кр}} \cdot \alpha}}, \quad (3.176)$$

где  $W_{\text{кр}}(\text{Вт} \cdot \text{с})$  – критическое значение энергии, при котором наступает ФП элемента СВТ объектов КИИ (табл. 1.8, 1.12);  $P_{\text{и}}$  (Вт) – пиковая мощность генератора ЭМИ (табл. 1.8);  $G_{\text{ЭМИ}}$  – коэффициент направленного действия антенной системы генератора ЭМИ в направлении объектов КИИ (табл. 1.3 – 1.6);  $\eta_{\text{фЭМИ}}$  – коэффициент полезного действия антенной системы источника направленного излучения ЭМИ;  $\mathfrak{R}$  – интерференционный множитель;  $\alpha$ ,  $\beta$  – коэффициенты аппроксимации формы ЭМИ с учетом его длительности  $\tau$  (нс) и частоты (Гц);  $\xi$  – множитель ослабления в свободном пространстве, определяемый выражением (1.15);  $S_{\text{э}}(\text{м}^2)$  – площадь экрана СВТ;  $\nu_a$  – коэффициент использования площади экрана;  $f_{\text{проц}}$  (Гц) – тактовая частота работы типового процессора СВТ. График изменения радиуса функционального поражения  $R_{\text{фп}}$  в зависимости от заданной вероятности безотказной работы  $P_{\text{БО}}$  представлен на рисунке 3.35.

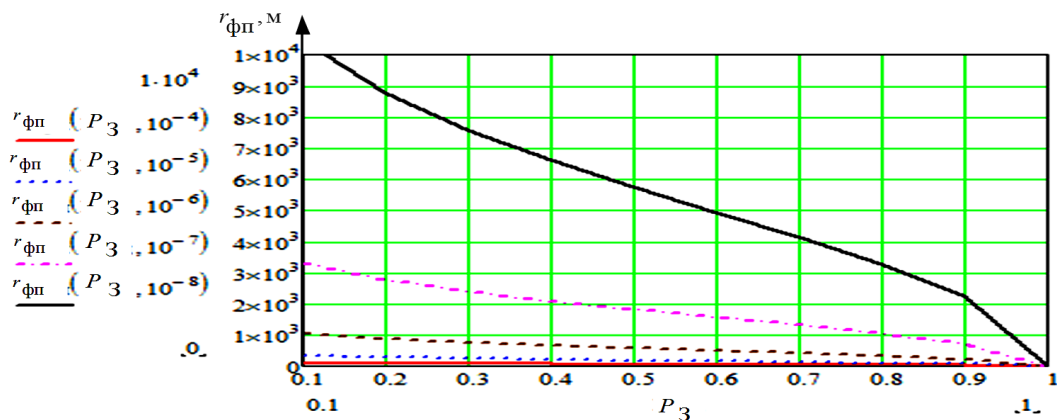


Рисунок 3.35 – График изменения радиуса функционального поражения  $r_{\text{фп}}$  в зависимости от заданной вероятности безотказной работы  $P_{\text{БО}}$

На третьем этапе в зависимости от полученного результата энергия импульса с внешней стороны подвергнутого воздействию объекта определяется как:

$$W_1 = \frac{E_{\max}^2 \cdot v_a \cdot S_3 \cdot (\beta - \alpha)^2}{48 \cdot \pi^4 \cdot \rho_0} \cdot \left( \frac{1}{f_1^3 - f_2^3} \right) \text{ при } r < r_{\text{фп}}; \quad (3.177)$$

$$W_1 = \frac{v_a \cdot S_3}{\rho_0} \int_{t_1}^{t_2} E_1^2(t) dt \text{ при } r > r_{\text{фп}}, \quad (3.178)$$

где  $E_{\max}$  – максимальная амплитуда электрической напряженности поля ЭМИ (В/м);  $\rho_0 = 377$  Ом – волновое сопротивление свободного пространства;  $f_1, f_2$  – нижняя и верхняя частоты воздействующего ЭМИ (Гц) соответственно;  $E_1(t)$  – напряженность ЭМИ, определяемая с помощью выражения (1.13).

На четвертом этапе с учетом ослабляющего действия экрана рассчитывается энергия импульса, воздействующего на КЭ, блоки и элементов СВТ:

$$W_2 = \frac{v_a \cdot S_3}{\rho_0} \cdot \int_{t_1}^{t_2} E_{in}^2(t) dt, \quad (3.179)$$

где  $E_{in}$  – напряженность электрической составляющей поля электромагнитного импульса. На пятом этапе рассчитывается вероятность функционального поражения  $P_{\text{фпм}}$ , по правилу расчета условной вероятности и выражению:

$$P_{\text{фпм}} = \frac{P_{\text{T}}(0 < P_{\text{П}} < 1)}{P_{\text{П}}} \cdot \left( 1 - \exp \left( -\sigma^2 \cdot \frac{2 \cdot W_2}{W_{\text{крп}} \cdot \left( -\frac{\tau}{\zeta} \right)} \right) \right), \quad (3.180)$$



где  $0 < P_{\Pi} < 1$  – безусловная вероятность применения ЭМИ по СВТ;  $P_{\Gamma}(0 < P_{\Pi} < 1)$  – условная вероятность «попадания» ЭМИ по СВТ при применении ЭМО (с учетом надежности генератора ЭМИ и преодоления им различного рода препятствий), определяется по координатному круговому нормальному закону поражения (ККНЗП) [195]:

$$P_{\Gamma}(P_{\Pi} > 0) = P_{\text{откл}} \cdot \left( 1 - \hat{\Phi}_{\sigma} \left( \frac{r_{\text{фп}} - \hat{r}_{\text{зп}}}{\sigma} \right) \right) \quad (3.181)$$

где  $\hat{\Phi}_{\sigma}$  – функция плотности нормального распределения радиуса зоны поражения  $\hat{r}_{\text{зп}}$ ;  $P_{\text{откл}}$  – вероятное отклонение ЭМИ от центра объекта воздействия;  $\sigma = 0,477$  – постоянная нормального закона распределения;  $\zeta$  – постоянная времени теплового рассеивания конструктивного элемента СВТ объектов КИИ. Графики изменения вероятности функционального поражения  $P_{\text{фп}m}$  в зависимости от радиуса функционального поражения  $r_{\text{фп}}$  и критической энергии поражения средств ЭВТ  $W_{\text{кр}}$  представлены на рисунках 3.36 и 3.37, соответственно.

Вероятность выживания  $P_{\text{выжСВТ}q}$  определяется с помощью формулы произведения вероятностей, учитывающих аксиому мультипликативности, как [196]:

$$P_{\text{выжСВТ}q} = 1 - \prod_{m=1}^M P_{\text{фп}m}. \quad (3.182)$$

Вероятность выживания объектов КИИ в условиях воздействия ЭМИ вычисляется следующим образом:

$$P_{\text{выжОКИИ}} = \prod_{q=1}^k P_{\text{выжСЭВТ}q}. \quad (3.183)$$

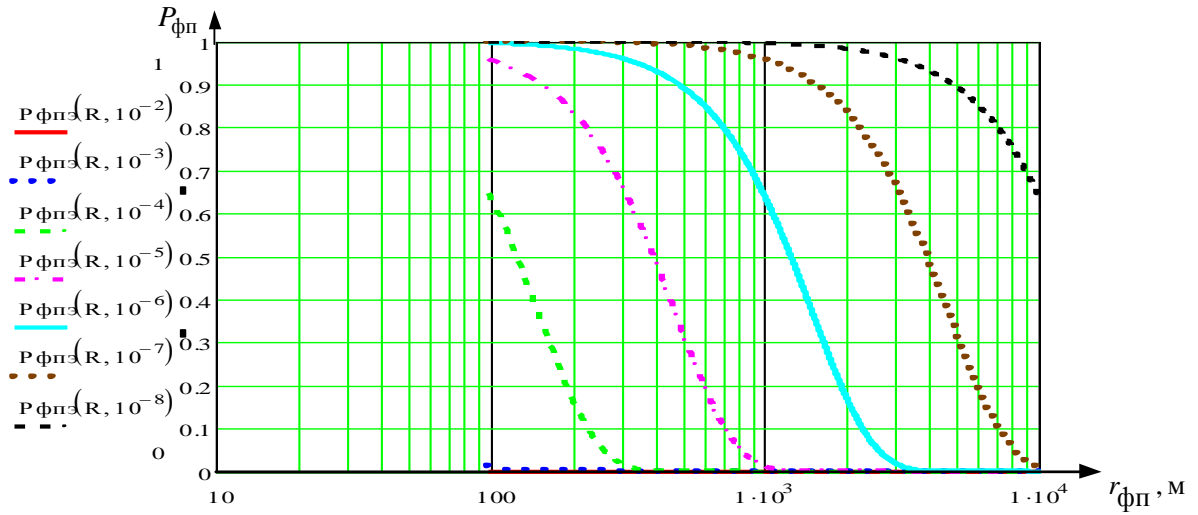


Рисунок 3.36 – График изменения вероятности поражения  $P_{фп}$  в зависимости от радиуса поражения  $r_{фп}$ , критической энергии поражения средств ЭВТ  $W_{кр}$  и мощности ЭМИ

Для воздействия ЭМИ вероятность нанесения ущерба, с учетом выражения (3.157), определяется как:

$$P_{D_{ЭМИ}} = \bigcup_{D_{\min}}^{D_{\max}} P_{фп}(\lambda_i); \quad (3.184)$$

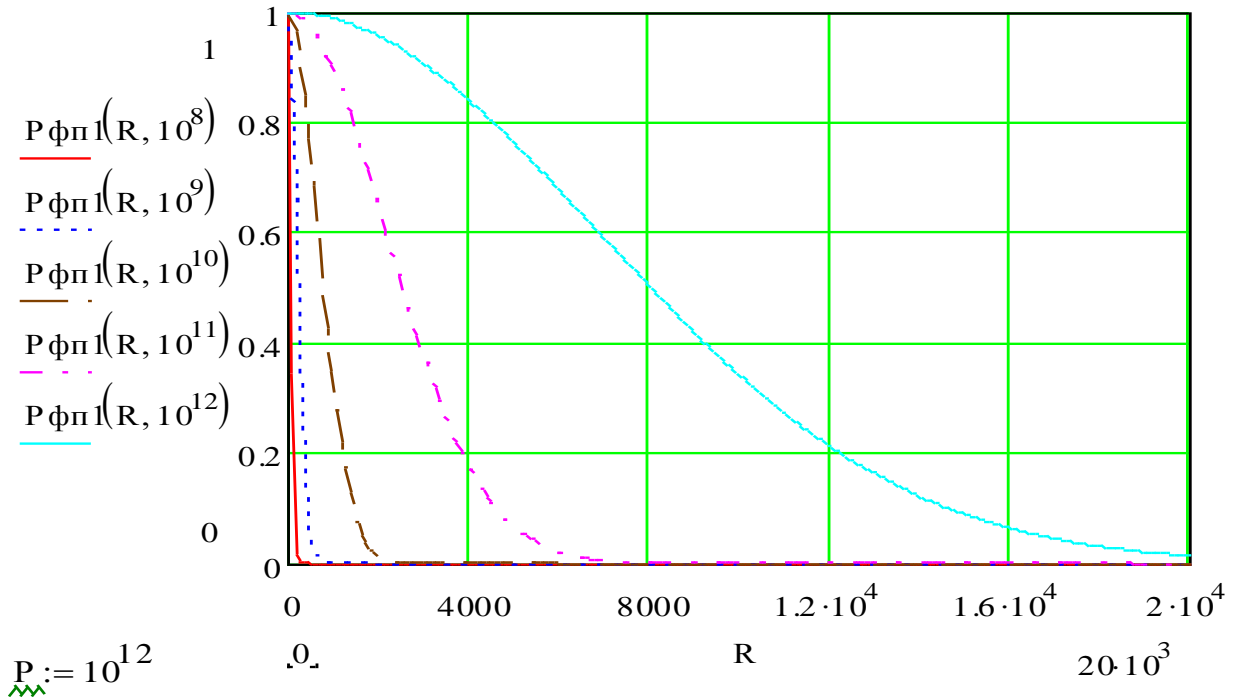


Рисунок 3.37 – График изменения вероятности функционального поражения  $P_{фпl}$  в зависимости от радиуса функционального поражения  $r_{фп}$

3.4.2. Математический метод моделирования помехозащищённости объектов критической информационной инфраструктуры при воздействии электромагнитных импульсов, базирующийся на математическом вероятностном аппарате классического обнаружения наведенного сигнала

Блок-схема алгоритма оценки помехозащищённости объекта КИИ при возникновении внутренних электромагнитных излучений и наводок представлена на рисунке 3.38. Показатели помехозащищённости, так же как и в случае оценки живучести, представляются вероятностями, с которыми при различных значениях уровней электрической составляющей ЭМИ и наведенного сигнала эти параметры находятся в установленных пределах допусков [64, 75, 78].

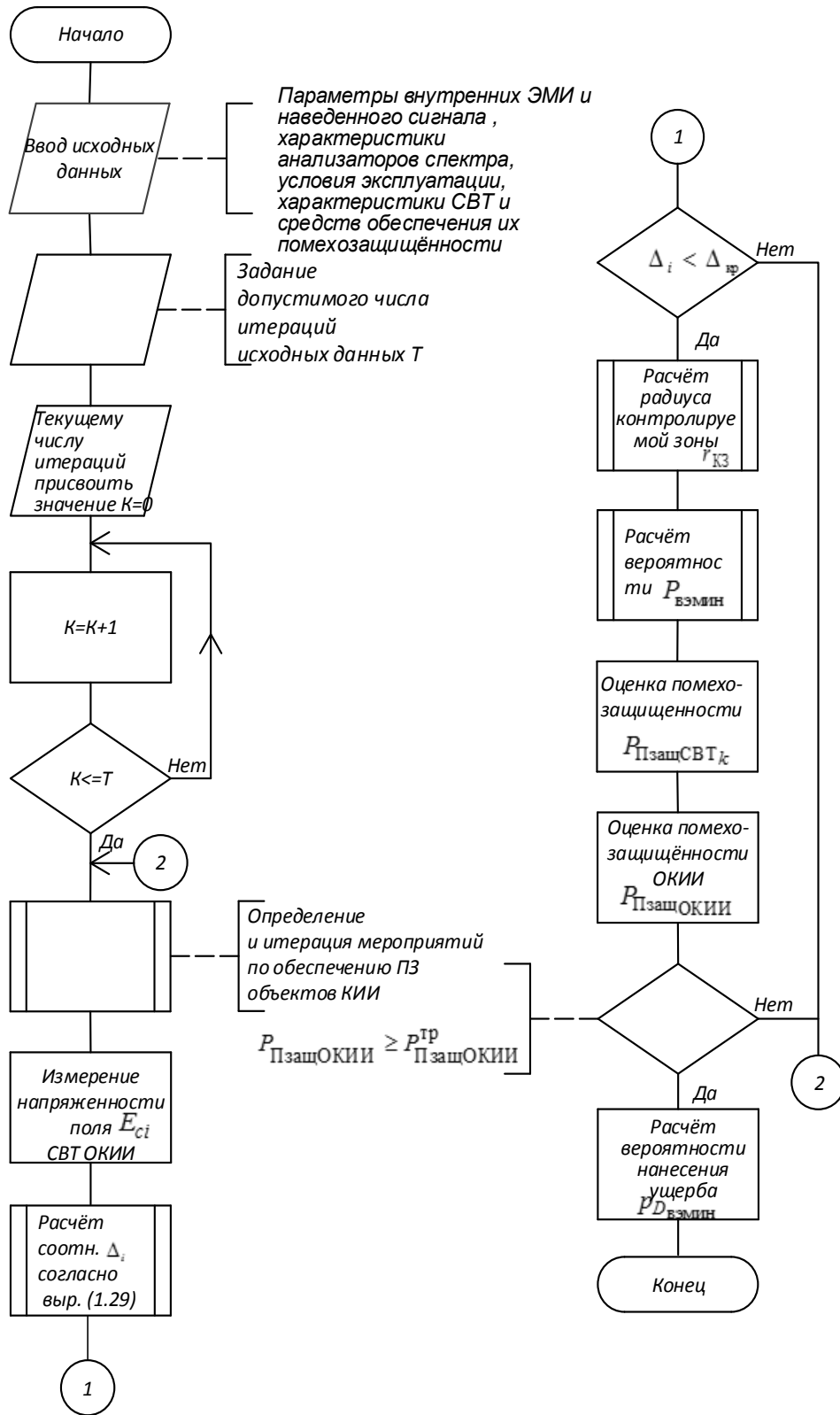


Рисунок 3.38 – Блок-схема алгоритма оценки помехозащищенности объекта КИИ при возникновении внутренних электромагнитных излучений и наводок

В данном методе исходные данные сгруппированы по 3-м уровням, к которым относятся [53, 54, 78, 146]:

1) *параметры внутренних электромагнитных излучений и наведенного сигнала*: –  $E_{ci}$  – напряженность  $i$ -й спектральной составляющей внутреннего электромагнитного излучения и наведенного сигнала, входящей в состав  $j$ -го частотного интервала, В/м (выр. 1.23);

–  $\Delta F_j = f_{вj} - f_{нj}$  – граница частот частотных интервалов указанных излучений (выражение 1.28) [51, 56, 146];

2) *характеристики устройства анализа внутренних электромагнитных излучений и наводок (составляющие выр. 1.24)*;

*условия эксплуатации, характеристики СВТ и их средств помехозащитности*: размер контролируемой зоны  $r_{кз}$  и  $r_2$ , наличие (отсутствие) экрана.

Выполненный анализ проявления свойства помехозащитности объекта КИИ на различных уровнях оценки дает возможность сделать вывод о том, что качественной мерой помехозащитности объектов КИИ является вероятность помехозащитности  $P_{\text{ПзащОКИИ}}$  при выполнении условия [75]:

$$P_{\text{ПзащОКИИ}} \geq P_{\text{ПзащОКИИ}}^{\text{тр}} \quad (3.185)$$

где  $P_{\text{ПзащОКИИ}}$  – вероятность помехозащитности объектов КИИ при возникновении внутренних электромагнитных излучений и наводок (наведенных сигналов).

Критериальная часть методики представлена выражением:

$$\Delta_i < \Delta_{\text{кр}}, \quad (3.186)$$

где  $\Delta_{\text{кр}} = \frac{P_{ci}}{P_{\text{ш}}}$ , при котором возможно возникновение наведенного сигнала.

Вероятность появления внутренних электромагнитных излучений и наводок (наведенного сигнала) определяется вероятностью:

$$P_{\text{вЭМИН}} \approx \Phi\left(\Delta_i \cdot \sqrt{N_{\text{и}}} - (\Phi)^{-1}(1 - P_{\text{лт}})\right), \quad (3.187)$$

где  $\Phi = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt$  – функция нормального закона распределения;

$N_{\text{и}} = f_{\text{вЭМИН}} \cdot t_{\text{а}}$  – количество осредненных импульсов ВЭМИН,  $f_{\text{вЭМИН}}$  – частота ВЭМИН,  $t_{\text{а}}$  – время анализа;  $\Delta_i$  – соотношение сигнал-шум (см. описание составляющих выр. 1.24 (стр. 63));

$P_{\text{лт}} = \frac{1}{2} \left\{ 1 - \Phi \left[ \sqrt{\frac{\rho}{2}} \cdot \left( \frac{P_0}{P_{\text{ПСП}}} - 1 \right) \right] \right\}$  – вероятность «ложной тревоги», где  $P_{\text{ПСП}}$  – среднее значение помехи,

$P_0$  – порог обнаружения;  $\rho = \Delta F_j \cdot T$  – параметр временного накопления,  $T$  – период измерения (рис. 3.39).

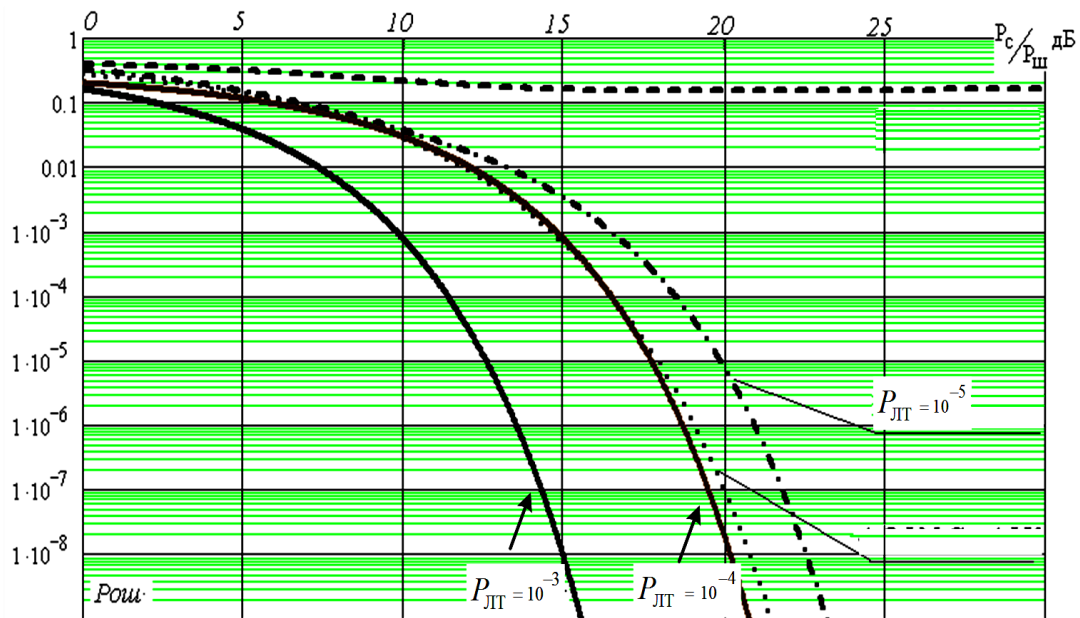


Рисунок 3.39 – Зависимость вероятности  $P_{\text{лт}}$  от  $\Delta_i$

Помехозащищенность объектов КИИ в условиях возможного появления внутренних электромагнитных излучений и наводок определяется выражением

$P_{\text{ПзашОКИИ}} = \prod_{k=1}^K P_{\text{ПзашСВТ}_k}$ , где  $P_{\text{ПзашСВТ}_k}$  – помехозащищенность от ВЭМИН отдельного СВТ определяется по аксиоме аддитивности, т.е.  $P_{\text{ПзашСВТ}_k} = 1 - P_{\text{вэмин}}$ .

Графики изменения вероятности возникновения внутренних электромагнитных излучений  $p_j$  в зависимости от радиуса зоны  $r_2$  и напряженности поля внутренних электромагнитных излучений и наводок представлены на рисунке 3.40.

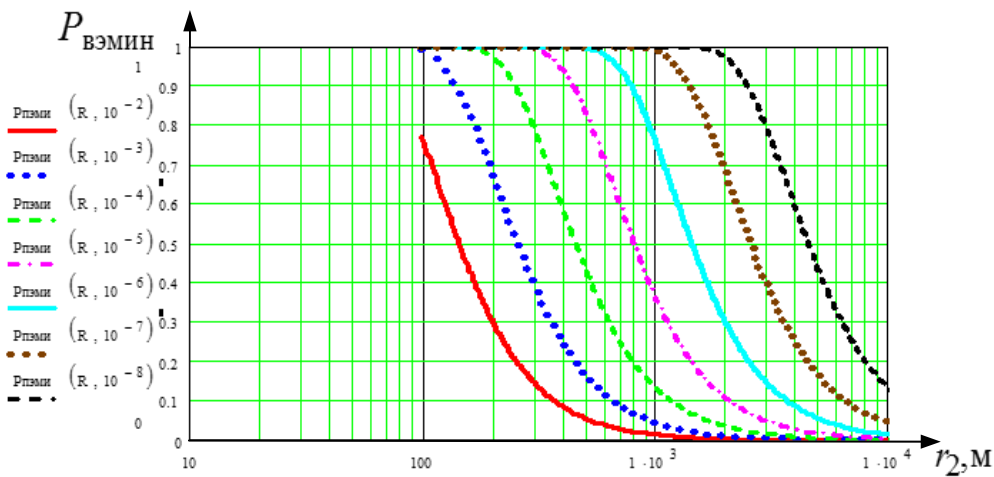


Рисунок 3.40 – Графики изменения вероятности  $P_{\text{вэмин}}$  в зависимости от радиуса зоны  $r_2$  и электрической напряженности поля наведенного сигнала.

Вначале определяется живучесть одного СВТ, а для нахождения живучести всего объекта информатизации необходимо перемножить вероятности от 1-го до  $k$ -го. Вероятность помехозащищённости объекта КИИ вычисляется с помощью перемножения вероятностей [147, 148]:

$$P_{\text{ПзашОКИИ}} = \prod_{k=1}^K P_{\text{ПзашСВТ}_k} \quad (3.188)$$

Вероятность нанесения ущерба объектов КИИ посредством внутренних электромагнитных излучений и наводок (наведенного сигнала) с учетом (3.187) определяется следующим образом:

$$P_{D_{ВЭМИН}} = \bigcup_{D_{\min}}^{D_{\max}} p_j(\lambda_j). \quad (3.189)$$

*Оценка функциональной устойчивости объектов критической информационной инфраструктуры при воздействии электромагнитных импульсов*

Таким образом, вероятность ОФУ объектов КИИ при воздействии ЭМИ определяется в соответствии с теоремой умножения вероятностей независимых событий [147, 148]:

$$P_{ФУОКИИ} = P_{ВЫЖОКИИ} \cdot P_{ПзащОКИИ}. \quad (3.190)$$

Блок-схема алгоритма оценки функциональной устойчивости объектов КИИ при воздействии ЭМИ представлена на рисунке 3.41.

Данные математические методы моделирования реализованы в виде зарегистрированного в Федеральной службе по интеллектуальной собственности программного продукта «Программа для расчета комплексной защищенности объектов критической информационной инфраструктуры от деструктивных электромагнитных излучений» [149].



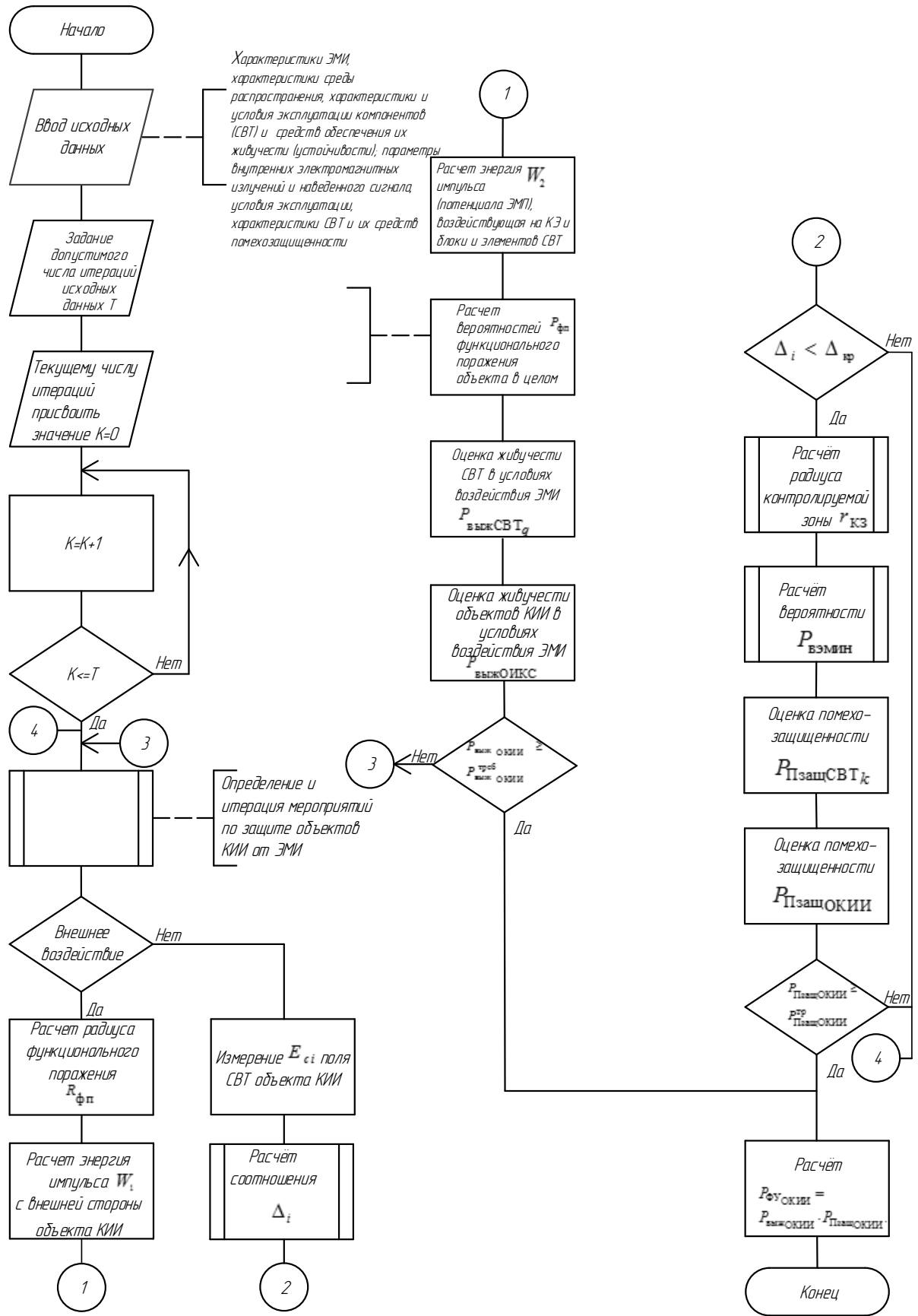


Рисунок 3.41 – Блок-схема алгоритма оценки функциональной устойчивости объектов КИИ при воздействии ЭМИ

**Выводы по главе 3**

Математический метод моделирования функциональной устойчивости объектов КИИ при воздействии ЭМИ разработан как система взаимосвязанных частных математических методов моделирования, что позволит в дальнейшем вырабатывать адекватные предложения по совершенствованию механизмов СОФУ с одновременным управлением неблагоприятными для объектов КИИ событиями на любом из заданных уровней, а также обнаруживать факт несоответствия цели и вскрывать причины низкой эффективности организуемых мероприятий.

Представленные процедуры позволяют получить полную (в рамках построенной модели) картину опасностей возникновения неблагоприятных ситуаций для подконтрольного (анализируемого) объекта КИИ, связанных с его функциональной устойчивостью. Данный итерационный процесс продолжается до тех пор, пока значения рисков неблагоприятных событий для моделируемого объекта превышают предельно допустимые границы.

В данной главе были рассмотрены и представлены подходы к дальнейшему развитию и совершенствованию теории электромагнитного экранирования, как основного и достаточно эффективного способа решения проблемы ОФУ объектов КИИ при воздействии ЭМИ. Методологическая схема, используемая в процессе решения теоретического аспекта работы, позволила изучить предметную область исследования, а также определить тенденцию развития теории и практики разработки экранирующих конструкций, заключающуюся в переходе от совокупности частных моделей (решений) к комплексным способам, включающим концептуальную модель, как системы элементов с заданными на них отношениями и логическими операциями и математическими моделями, отражающие их в аналитической или алгоритмической форме.

Проведенный в главе анализ позволил установить, что наиболее оптимальным способом математического моделирования, экранирующей конструкции, базирующегося на учете потенциала электромагнитного поля, рассматривающий минимизацию функционала вариационной задачи (с учетом метода собственных импедансов) на совокупности функций, каждая из которых определена на своей подобласти с приложением тензорного метода с установле-

нием общих закономерностей исследования сложных систем путем их разделения на дискретные компоненты и применения для моделирования сложных многослойных конструкций, что позволило в конечном итоге создать универсальную среду моделирования, объединяющую теоретико-множественную (дифференциальных уравнений, теории функций и т. д.) и комбинаторную топологию (тензорного метода) в единый инженерный метод анализа и расчета сложных систем с целью создания ФРК и отличающегося от существующих эффектом обратимости, электрофизических свойств радиопоглощающих полимерных композиционных материалов, формирующих слои в многослойной конструкции, а также формы и расположения в ней технологических неоднородностей, что обеспечит достижение необходимого уровня живучести и помехозащищенности объектов КИИ при воздействии ЭМИ.

Но, несмотря на это, основная проблема при таком подходе заложена в большом объеме матриц, которые получаются при дискретизации конечных элементов, а объем оперативной памяти, необходимый для решения трехмерных задач, огромен и достигает нескольких гигабайт. Решение такой задачи возможно с помощью САПР, способных решать задачи программные системы конечно-элементного анализа (*3D* – компьютерное имитационное моделирование) являются *ANSOFT HFSS 11.0* фирмы *ANSYS* и *COMSOLv. 5.4*, результаты решения которых будут рассмотрены в главе 6.

Сформированный математический метод моделирования опирается на наиболее перспективные подходы, описанные во второй главе, производные от которых подразумевают применение аппроксимирующих функций в безразмерных (Гильбертовых) пространствах, а также тензорного представления ЭМП, что позволило получить частотно-селективную структуру, обладающую тензорными свойствами относительно распределения электромагнитных полей, и учесть эффект обратимости электромагнитных экранов.

Разработанный математический метод моделирования ущерба, наносимого объектам КИИ при воздействии ЭМИ, базирующийся на иерархическом ранговом подходе, предусматривает определенную степень адекватности реализованных механизмов ОФУ существующим в данной среде функционирования опасностям относительно объектов КИИ. Представленный в данном методе подход

позволит определить перечень возможных сценариев применения воздействий в виде ЭМИ, степень опасности их реализации, выявить возможные слабые места в СОФУ данных объектов с целью устранения неблагоприятных событий, что позволит анализировать вероятность возникновения последствий (нанесение ущерба) с помощью управления рангами объектов КИИ.

Математический метод моделирования системы обеспечения функциональной устойчивости объектов КИИ при воздействии ЭМИ разработан как система взаимосвязанных частных математических методов, что позволяет оценивать степень опасности воздействия и вырабатывать в дальнейшем адекватные предложения по улучшению системы ОФУ с одновременным управлением рисками неблагоприятных для объектов КИИ событий на любом из заданных уровней и обнаруживать факт несоответствия цели и вскрывать причины низкой эффективности организуемых мероприятий.

**ГЛАВА 4. КОМПЛЕКС ПРОБЛЕМНО-ОРИЕНТИРОВАННЫХ  
ПРОГРАММ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ  
ЭКСПЕРИМЕНТОВ И АЛГОРИТМЫ, РЕАЛИЗУЮЩИЕ  
МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПО  
ОБЕСПЕЧЕНИЮ ЖИВУЧЕСТИ И ПОМЕХОЗАЩИЩЁННОСТИ  
ОБЪЕКТОВ КРИТИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ  
ИНФРАСТРУКТУРЫ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ  
ИМПУЛЬСОВ**

4.1. Обоснование структуры, электрофизических свойств материалов, формы и расположения технологических неоднородностей экранирующих конструкций средств вычислительной техники объектов критической информационной инфраструктуры при воздействии электромагнитных импульсов

При анализе современного состояния теории и практики построения экранирующих конструкций (гл. 2, 3) было указано, что на настоящий момент определяющей тенденцией развития теории и практики разработки экранирующих конструкций является переход от совокупности частных решений к комплексным способам. В связи с этим назрела необходимость использования экранирующих конструкций как системы двойного назначения, которые при определенном технологическом построении смогли бы одновременно обеспечивать живучесть и помехозащищенность объектов КИИ и функционирующих в них компонентов.

Учитывая обратимость электромагнитных экранов, предусматривающую сохранение эффективности экранирования, независимо от того, расположен ли внутри него источник электромагнитного поля или защищаемая область пространства [112, 114–120, 132, 133, 149], применение таких экранов является до-

статочно целесообразным. Данное положение получило теоретическое обоснование и определило, по сути, разработку многослойной экранирующей конструкции.

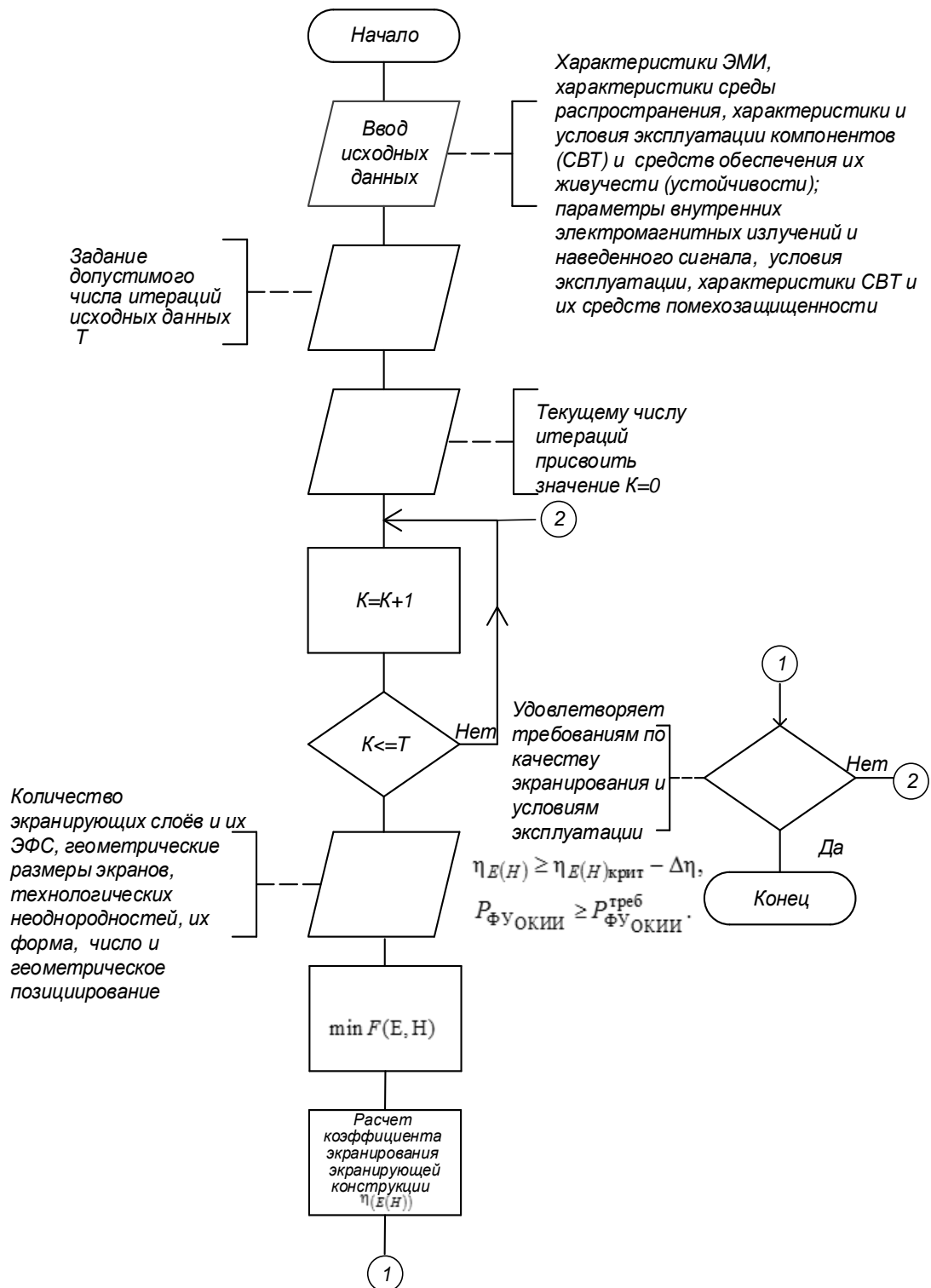


Рисунок 4.1 – Блок-схема алгоритма расчета характеристик многослойной экранирующей конструкции

Наличие математических методов моделирования, позволяющих получить функционал энергии (потенциал) электромагнитного поля, характеристики экранирующей конструкции, обеспечивающей устойчивое функционирование компонентов объектов КИИ при воздействии ЭМИ, позволило провести исследования и разработать конструкторско-технологическое решение по обеспечению функциональной устойчивости объектов, связанное с обоснованием структуры, электрофизических свойств материалов, формы и расположения технологических неоднородностей экранирующих конструкций средств вычислительной техники объектов, обеспечивающих реальное повышение их живучести и помехозащищённости.

В процессе формирования предложений по обоснованию структуры, электрофизических свойств материалов, формы и расположения технологических неоднородностей экранирующих конструкций СВТ объектов КИИ была разработана блок-схема алгоритма расчета экранирующих конструкций, которая представлена на рисунке 4.1 [112, 149, 150].

Для достижения большего значения коэффициента экранирования, обеспечивающего необходимый уровень функциональной устойчивости, необходимо применение дополнительных мер, связанных с изменением формы технологических неоднородностей.

На рисунке 4.2 представлен вариант многослойного экранирования СВТ по принципу *полимер-металл-полимер* с технологическими неоднородностями в экране, выполненными в виде запердельных волноводов в форме правильных шестиугольных призм [112, 132–134, 149].

Задача повышения коэффициента экранирования решается тем, что в конструкции, содержащей три последовательно расположенных экранирующих слоя, каждый из которых содержит ячейки, представляющие собой ЗПВ, причем соответствующие ячейки каждого слоя являются продолжением ячеек предыдущего слоя, а сами слои, соответственно, выполнены как «*полимер–металл–полимер*». Запердельные волноводы выполнены в виде полых прямых призм с сечением в форме правильных шестиугольников, при этом в каждом слое указанные волноводы расположены в шахматном порядке и параллельно друг другу.

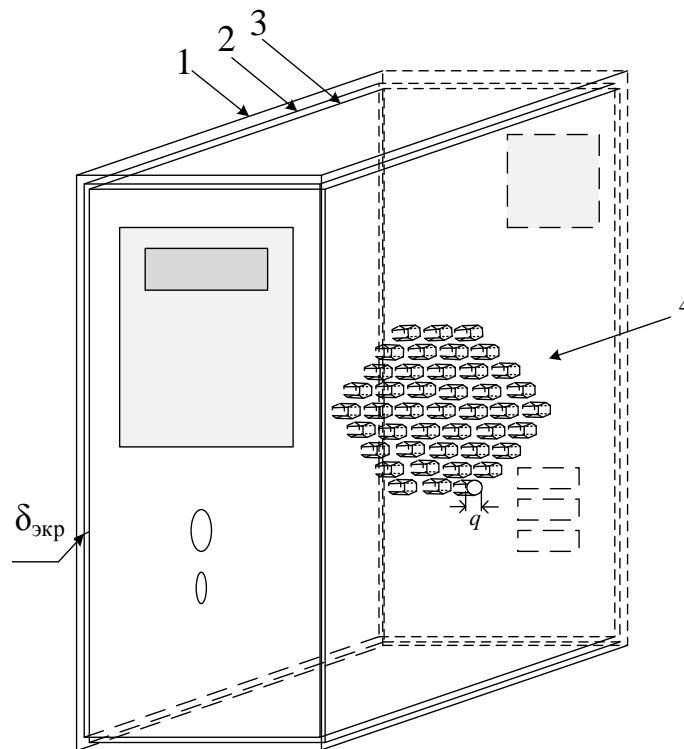


Рисунок 4.2 – Многослойная экранирующая конструкция СВТ с технологическими неоднородностями в экране, выполненными в виде запердельных волноводов в форме правильных шестиугольных призм, расположенных в шахматном порядке

1, 2, 3 – первый, второй и третий слои устройства; 4 – запердельные волноводы;  $q$  – диаметр окружности, описанной около сечения запердельного волновода в форме правильного шестиугольника;  $\delta_{\text{экр}}$  – толщина устройства.

Перечисленная совокупность существенных признаков обеспечивает возможность повышения коэффициента экранирования электромагнитного экрана за счет изменения формы ячеек и их расположения в шахматном порядке в многослойной экранирующей конструкции. Повышение коэффициента экранирования при данном способе построения экранирующей конструкции объясняется следующим образом. На рисунке 4.3 представлен процесс отражения и преломления электромагнитной волны, проходящей через устройство, где 1, 2, 3 – соответственно первый, второй и третий слои устройства; 4 – запердельные волноводы;  $\delta_1$ ,  $\delta_2$ ,  $\delta_3$  – толщина соответствующего слоя устройства;  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_3$ ,  $I_4$  – соответственно точки на границах раздела сред «воздух–полимер, полимер–металл, ме-



талл–полимер, полимер–воздух»;  $P_1$  – падающая плоская волна;  $P_2, P_3, P_4, P_5$  – волны, соответственно претерпевающие преломление в средах «полимер, металл, полимер, воздух»;  $P_{отр1}, P_{отр2}, P_{отр3}, P_{отр4}$  – волны, соответственно отраженные в средах «воздух, полимер, металл, полимер»;  $E_1, E_2, E_3, E_4, E_5$  – электрические напряженности электромагнитного поля соответствующие различным средам: «воздух–полимер–металл–полимер–воздух»;  $E_{12}, E_{23}, E_{34}, E_{45}$  – электрические напряженности электромагнитного поля отраженных волн в соответствующих средах: «воздух–полимер–металл–полимер–воздух»;  $H_1, H_2, H_3, H_4, H_5$  – магнитные напряженности электромагнитного поля, соответствующие различным средам: «воздух–полимер–металл–полимер–воздух»;  $H_{12}, H_{23}, H_{34}, H_{45}$  – магнитные напряженности электромагнитного поля отраженных волн в соответствующих средах: «воздух–полимер–металл–полимер–воздух».

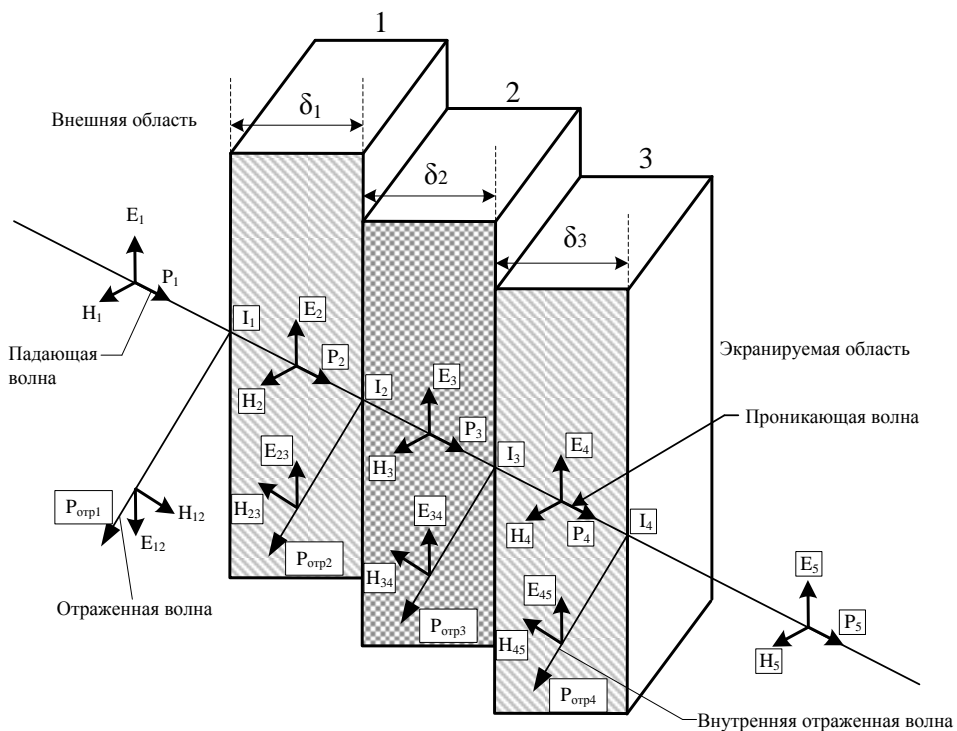


Рисунок 4.3 – Процесс отражения и преломления электромагнитной волны, проходящей через экранирующее устройство

На рисунке 4.4 представлено сечение устройства плоскостью по направлению  $A-A$ , где 1, 2, 3 – соответственно первый, второй и третий слои устройства, выполненные из материалов «полимер–металл–полимер»; 4, 5, 6 – запредельные

волноводы в виде полых прямых призм с сечением в форме правильных шестиугольников, расположенные в каждом слое в шахматном порядке и параллельно друг другу, причем ячейки каждого слоя являются продолжением ячеек предыдущего слоя; 7 – стыки при напылении с внешней и внутренней стороны металлического слоя для связи между слоями.

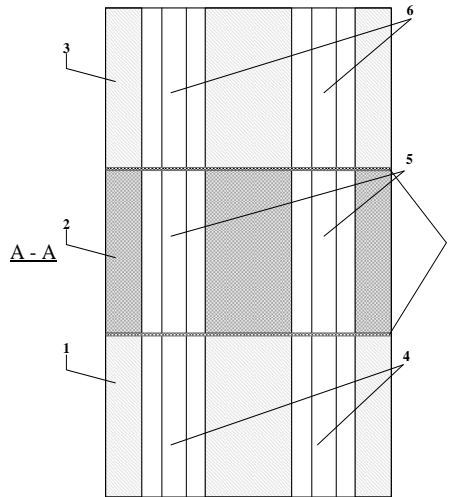


Рисунок 4.4 – Сечение устройства плоскостью по направлению А-А

В процессе падения плоской электромагнитной волны на слой 1 устройства со стороны свободного пространства экранирование в многослойной конструкции происходит благодаря затуханию за счет отражения, поглощения и многократных переотражений электромагнитной волны от поверхностей слоев 1, 2 и 3 устройства.

При этом общий коэффициент экранирования определяется следующей формулой:

$$\eta_{\Sigma} [\text{дБ}] = \eta_{\text{отр}} + \eta_{\text{погл}} + \eta_{\text{мотор}}, \quad (4.2)$$

где  $\eta_{\text{отр}}$  – коэффициент затухания за счет отражения;  $\eta_{\text{погл}}$  – коэффициент затухания за счет поглощения;  $\eta_{\text{мотор}}$  – коэффициент затухания за счет многократных переотражений.

Между запердельными волноводами 4, 5, 6 (рис. 4.4, 4.5) в экранирующей конструкции существует взаимное влияние, приводящее к увеличению полного

сопротивления всего экрана, что влечет увеличение коэффициента экранирования всей конструкции.

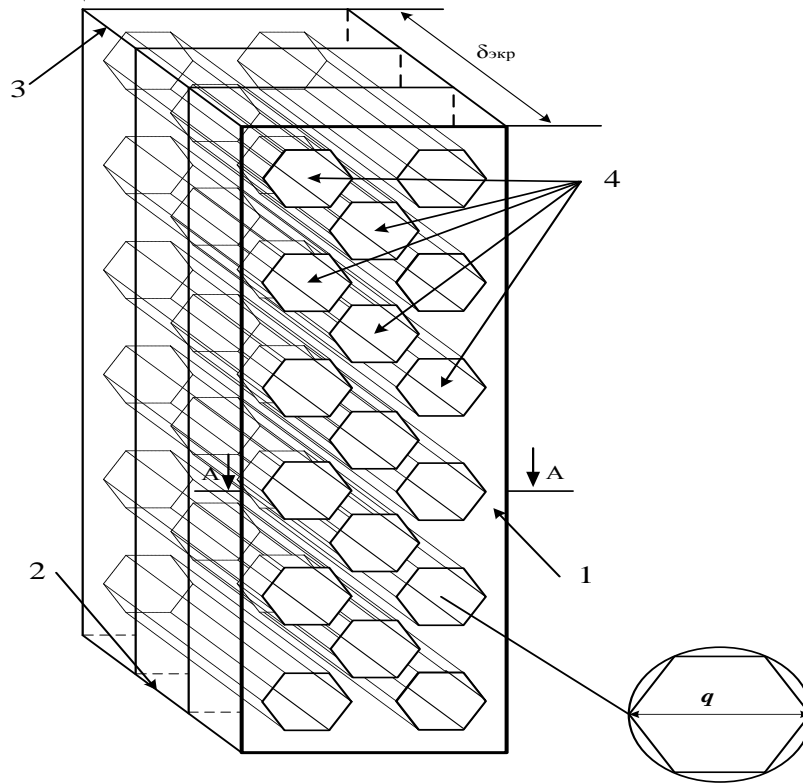


Рисунок 4.5 – Фрагмент стенки устройства

У падающей плоской волны  $P_1$  векторы электрического  $E_1$  и магнитного  $H_1$  полей параллельны плоскости слоя. В точке  $I_1$ , находящейся на границе сред воздух–полимер, волна  $P_1$  частично отразится (волна  $P_{\text{отр1}}$ ) и частично преломится (волна  $P_2$ ). Распространяясь в первом слое, преломленная волна  $P_2$  затухает по экспоненциальному закону, и к моменту достижения следующей границы раздела сред типа «полимер–металл» напряженности обоих полей будут в  $e^{\delta_1/\delta}$  раз меньше, чем в точке на поверхности конструкции ( $I_1$ ), где  $\delta$  – эквивалентная глубина проникновения. Волна  $P_1$ , попадая в запердельные волноводы 4 в виде полых прямых призм с сечением в форме правильных шестиугольников, сильно затухает на критических частотах  $f_{\text{кр}}^{\text{min}}$ , лежащих ниже известного предела [131, 132, 139, 142, 145 – 147, 150].

При прохождении волны  $P_2$  из первого слоя конструкции точка  $I_2$ , снова произойдет преломление (волна  $P_3$ ) и отражение (волна  $P_{отр2}$ ) от границы сред «полимер–металл». Преломленная волна  $P_3$  пройдет во второй металлизированный слой устройства, а отраженная  $P_{отр2}$  будет затухать, и в точке на внешней поверхности этого слоя 2 напряженности полей будут в  $e^{2\delta_1/\delta}$  раз меньше, чем на входе в устройство. Преломленная волна  $P_3$ , распространяясь во втором металлизированном слое 2, попадает в запердельные волноводы 4 (рис. 4.5) в виде полых прямых призм с сечением в форме правильных шестиугольников, также затухает по экспоненциальному закону, и при достижении следующей границы раздела сред «металл–полимер» в точке  $I_3$  напряженности обеих полей будут в  $e^{\delta_2/\delta}$  раз меньше, чем в точке  $I_4$ .

На выходе волны  $P_3$  из слоя 2, точка  $I_3$ , снова произойдет преломление (волна  $P_4$ ) и отражение (волна  $P_{отр3}$ ) от границы сред «металл–полимер» (рис.4.3). Преломленная волна  $P_4$  войдет в третий слой 3, попадая в запердельные волноводы 6 в виде полых прямых призм с сечением в форме правильных шестиугольников, затухает на критических частотах  $f_{кр}^{mn}$ , лежащих ниже известного предела, и в значительно меньшей степени затухает на частотах, лежащих выше данного предела. Отраженная  $P_{отр3}$  будет затухать, и в точке на внешней поверхности этого слоя 3 из полимера напряженности полей будут в  $e^{2\delta_2/\delta}$  раз меньше, чем на входе в этот слой. Преломленная волна  $P_4$  также затухает по экспоненциальному закону и к моменту достижения следующей, последней границы раздела сред типа «полимер–воздух», точка  $I_4$  (рис. 4.5), напряженности обеих полей будут в  $e^{\delta_3/\delta}$  раз меньше, чем в точке  $I_4$ . На выходе волны  $P_4$  из третьего слоя экрана, точка  $I_4$ , снова произойдет преломление (волна  $P_5$ ) и отражение (волна  $P_{отр4}$ ) от границы сред «полимер–воздух». Отраженная волна  $P_{отр4}$  будет затухать и в точке на внешней поверхности этого последнего слоя напряженно-

сти полей будут в  $e^{\frac{2\delta_3}{\delta}}$  раз меньше, чем на входе в этот слой полимера. Всё это время в устройстве будут происходить отражения волн от границ раздела сред до их полного затухания в теле устройства. В экранируемое пространство будут проникать преломленные волны  $P_4$ . Их суммарное воздействие определяет

напряженности полей  $E_5$  и  $H_5$  в этом пространстве. При этом все перечисленные процессы сопровождаются потерями энергии волны.

С целью получения максимального коэффициента экранирования запредельные волноводы 4, 5, 6 (рис. 4.5) многослойной экранирующей конструкции выполнены в виде полых прямых призм с сечением в форме правильных шестиугольников, расположенных в шахматном порядке и параллельно друг другу, причем запредельные волноводы каждого слоя являются продолжением запредельных волноводов предыдущего слоя. Это обосновывается тем, что при их определенном расположении соотношении между размерами запредельных волноводов и их соотношением с размерами экранирующей конструкции и длиной волны  $\lambda$  электромагнитного поля возможность его проникновения внутрь устройства практически исключена.

Коэффициент экранирования такой экранирующей конструкции определяется полученным в главе 3 выражениями (3.86) и (3.87).

В рамках разработанных в работе программ и изобретений [112, 132-134, 149] был произведен расчет по определению коэффициента экранирования  $\eta_{(E(H))}$  заявленной конструкции в соответствии с выражением (3.130) и полученного минимума функционала энергии (потенциал), выражение (3.85), учитывая конструктивные особенности при следующих исходных данных:

- частота электромагнитных излучений  $f$  от 0,8 ГГц до 10 ГГц;
- постоянная нарастания электромагнитного излучения  $\alpha = 4 \cdot 10^6 \text{ с}^{-1}$  и постоянная спада электромагнитного излучения  $\beta = 5 \cdot 10^8 \text{ с}^{-1}$ ;
- аппроксимирующий множитель  $A_M = 1,707$ ;
- геометрические размеры:
  - $h=0,35$  м.;
  - $L=0,4$  м.,  $d=0,2$  м.;
  - $\delta_{\text{экр}} = 0,006$  м – толщина металлического слоя экрана;
  - $\delta_{1,3} = 0,0048$  м толщина РППКМ;
  - $q = 0,006$  м – диаметр описанной окружности около правильного шестиугольника;
- количество волноводов  $N = 675$ ;

– значение магнитная постоянной  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м и электрической постоянной  $\epsilon_0 = 8,8542 \cdot 10^{-12}$  Ф/м.

Электрофизические свойства (ЭФС) трехкомпонентного гибридного радиопоглощающего полимерного композита *NEOGEL 8323*, используемый для нанесения на разрабатываемую конструкцию, представлены в Таблице 4.1.

Таблица 4.1– Электрофизические свойства трехкомпонентного гибридного радиопоглощающего полимерного композита *NEOGEL 8323*

Наименование композиционного материала	Толщина покрытия, мм	Частотный диапазон, ГГц	Диэлектрическая проницаемость $\epsilon$ / магнитная проницаемость $\mu$	Удельное сопротивление $\sigma$ , Ом·см
<i>NEOGEL 8373</i>	0,4689	0,1–10	2,8/4	$10^{11}$

Применение ЗПВ в форме полых призм с сечением в форме правильных шестиугольников в качестве технологических неоднородностей, расположенных в шахматном порядке и параллельно друг другу, когда запердельные волноводы каждого слоя являются продолжением запердельных волноводов предыдущего слоя, позволяет использовать предлагаемую экранирующую конструкцию в качестве экранирующей конструкции СВТ для ОФУ объектов КИИ при воздействии ЭМИ.

4.2. Описание эксперимента и результаты оценки живучести (стойкости) средств вычислительной техники объектов критической информационной инфраструктуры при воздействии мощными электромагнитными импульсами СВЧ-диапазона

Эксперимент проводился в соответствии с ГОСТ РВ 20.34.258–98 КСОТТ, 20.34.251–98 КСОТТ и [144, 151]. На рисунке 4.6 изображено схематическое

представление эксперимента по оценке живучести СВТ при воздействии мощными ЭМИ СВЧ-диапазона.



1. Источник ЭМИ – имитатор электромагнитных полей СВЧ диапазона (0,8 ГГц–10 ГГц) типа У 0.8/15-3000. 4. Измеритель уровня электромагнитных излучений типа ПЗ-41. 4. Осциллограф вычислительный универсальный типа *TETRONIX TDS-2022B*. 4. Регистратор аналого-цифровой СРГ7 с полосой пропускания 5 ГГц. 4. Аппаратный комплекс измерения поля АКИП-4113/2, имеющий время нарастания переходной характеристики 45 пс, длительность переходной характеристики 4,4 нс, погрешность коэффициента преобразования 3,4 %. 4. Радиочастотная безэховая камера из состава государственного специального эталона ГЭТ 148-93 единиц максимальных значений напряженностей импульсных электрического и магнитного полей (ГСЭ). 5. Измерительный преобразователь ИППЛ-М.

Рисунок 4.6 – Схематическое представление эксперимента по оценке живучести и помехозащищённости компонентов (СВТ) объектов КИИ в условиях воздействия мощными ЭМИ СВЧ-диапазона и проявления внутренних электромагнитных излучений и наводок соответствии с ГОСТ РВ 20.34.258–98 КСОТТ и ГОСТ РВ 20.34.251–98 КСОТТ, проведенного в лаборатории «Динамики сооружений» «23 ГМПИ – филиала АО «31 ГПИСС»

Натурный эксперимент в соответствии с его схематичным представлением проводился на экспериментальной площадке «Испытательного центра электромагнитных и механических воздействий «23 ГМПИ – филиала АО «31 ГПИСС» (г. Санкт-Петербург). В Приложении В представлены «Аттестат аккредитации «31 ГПИСС» на соответствия требованиям ГОСТ ИСО/МЭК 17025–2009 в качестве Испытательной лаборатории (центра)» и «Свидетельство об аттестации

№ 715 на соответствие требованиям к технической компетенции и независимости, предъявляемым в руководящем документе РД 319.04.70-08». В рамках подготовки натурального эксперимента было проведено имитационное 3D-компьютерное моделирование эксперимента по оценке воздействия мощных ЭМИ с частотой 5 ГГц и анализ распределения полей данного излучения во внутреннем объеме экранирующей конструкции при воздействии мощными ЭМИ и внутренних электромагнитных излучений в программных системах конечно-элементного анализа (ПСКЭА) *COMSOL Multiphysics 5.4 (COMSOL v. 5.4)* и *ANSYS HFSS 11.0* [152–158]. На рисунке 4.7 представлена смоделированная в среде *COMSOL v. 5.4* экранирующая конструкция с внешним ЭМП в виде идеально-поглощающей области с использованием конечно-элементного анализа.

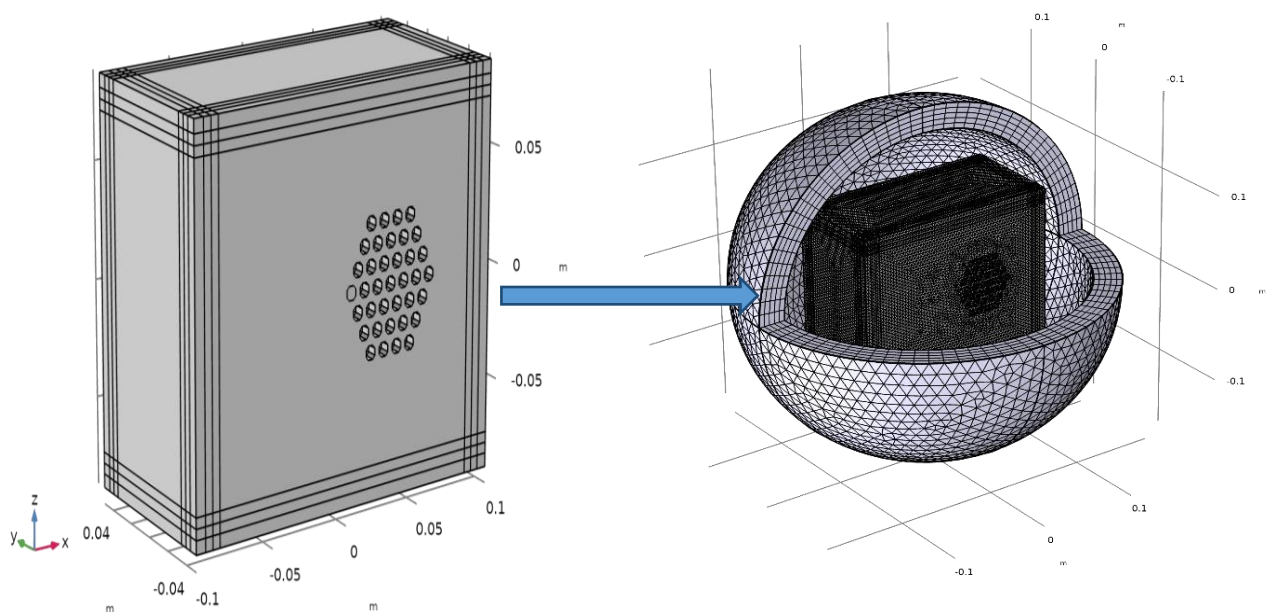


Рисунок 4.7 – 3D- моделирование многослойной экранирующей конструкции в ПСКЭА *COMSOL v. 5.4* с представлением внешнего ЭМП в виде идеально-поглощающей области

Рисунок 4.8 представляет распределение составляющих ЭМП ЭМИ во внешнем пространстве и внутри экранирующей конструкции при однослойном экранировании. Как видно из рисунка, уровень проникающих в экранирующий объем составляющих ЭМП ЭМИ максимален. Распределение составляющих ЭМП ЭМИ во внешнем пространстве и внутреннем объеме многослойной экра-



нирующей конструкции СВТ при воздействии мощными ЭМИ с частотой 5 ГГц в координатах  $x$ - $y$ - $z$  электрической напряженности в координатах  $x$ - $y$ - $z$  представлено на рисунках 4.9 и 4.10, соответственно. Анализ рисунков показывает, что уровень составляющих ЭМП ЭМИ, проникающих в экранирующий объем при воздействии ЭМИ, минимален и не приводит к функциональным отказам элементов СВТ.

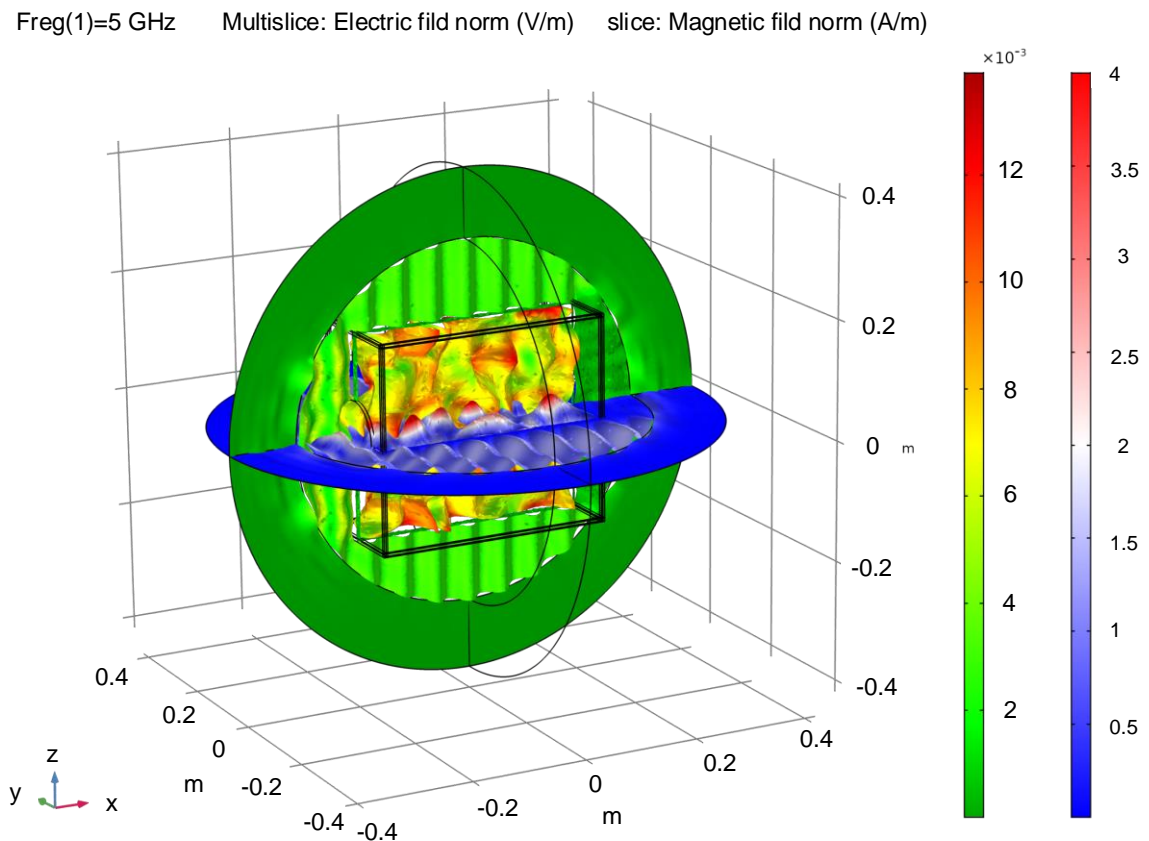


Рисунок 4.8 – Распределение составляющих ЭМП ЭМИ во внешнем пространстве и внутри экранирующей конструкции при однослойном экранировании

На рисунке 4.11 представлен график распределения электрической напряженности ЭМП ЭМИ во внешнем пространстве и внутри смоделированной многослойной экранирующей конструкции (МСЭК) с учетом геометрических размеров экрана, принятых при моделировании (при ограничении расчетной области) ЭФС слоев экрана и характеристик воздействующего ЭМИ.

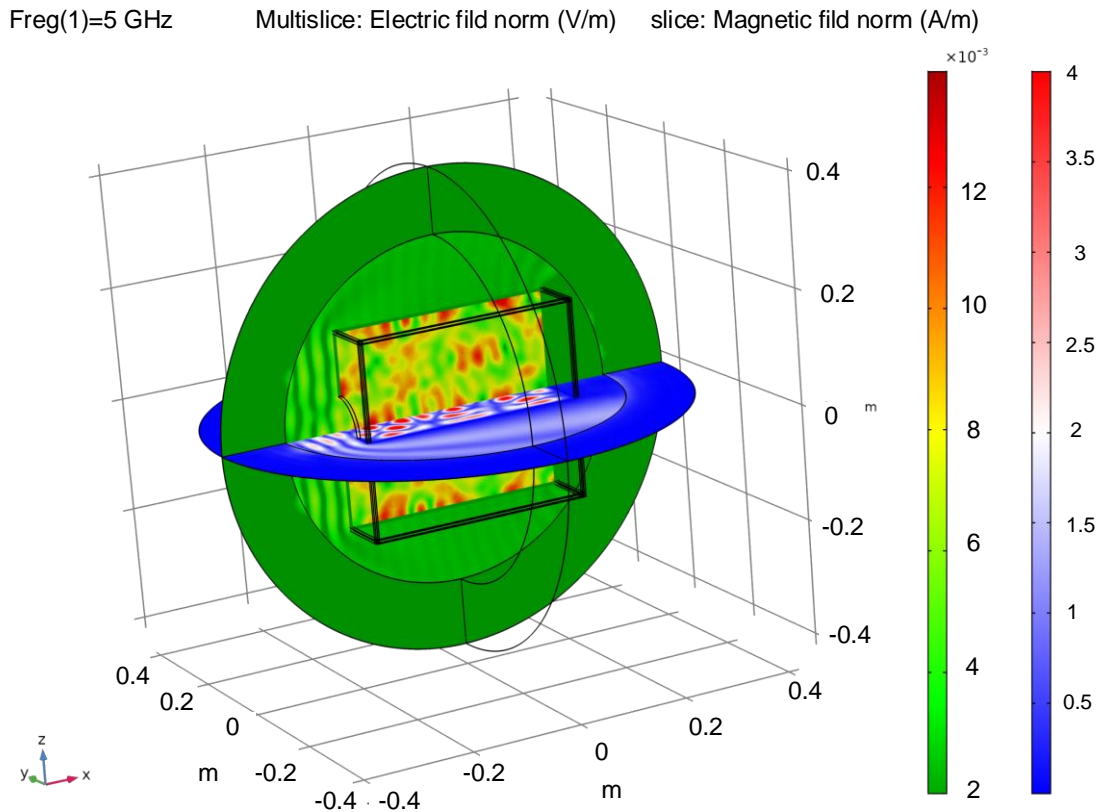


Рисунок 4.9 – Распределение электрической и магнитной напряженности ЭМП ЭМИ во внешнем пространстве и внутреннем объеме МСЭК СВТ при воздействии мощными ЭМИ с частотой 5 ГГц в координатах  $x$ - $y$ - $z$

В соответствии с технической документацией при проведении экспериментальных исследований использовались следующие средства воздействия и измерений (рис. 4.12):

– источник электромагнитного излучения – имитатор электромагнитных полей СВЧ диапазона типа У 0.8/15-3000 (в дальнейшем именуемый «имитатор»), предназначенный для испытания на восприимчивость изделий к воздействию потока СВЧ излучения (сертификат и паспорт в Приложении В). Имитатор может использоваться для проведения испытаний оборудования на соответствие нормативным документам в соответствии с её техническими характеристиками. Технические характеристики имитатора У 0.8/15-3000 представлены в таблице 4.2.

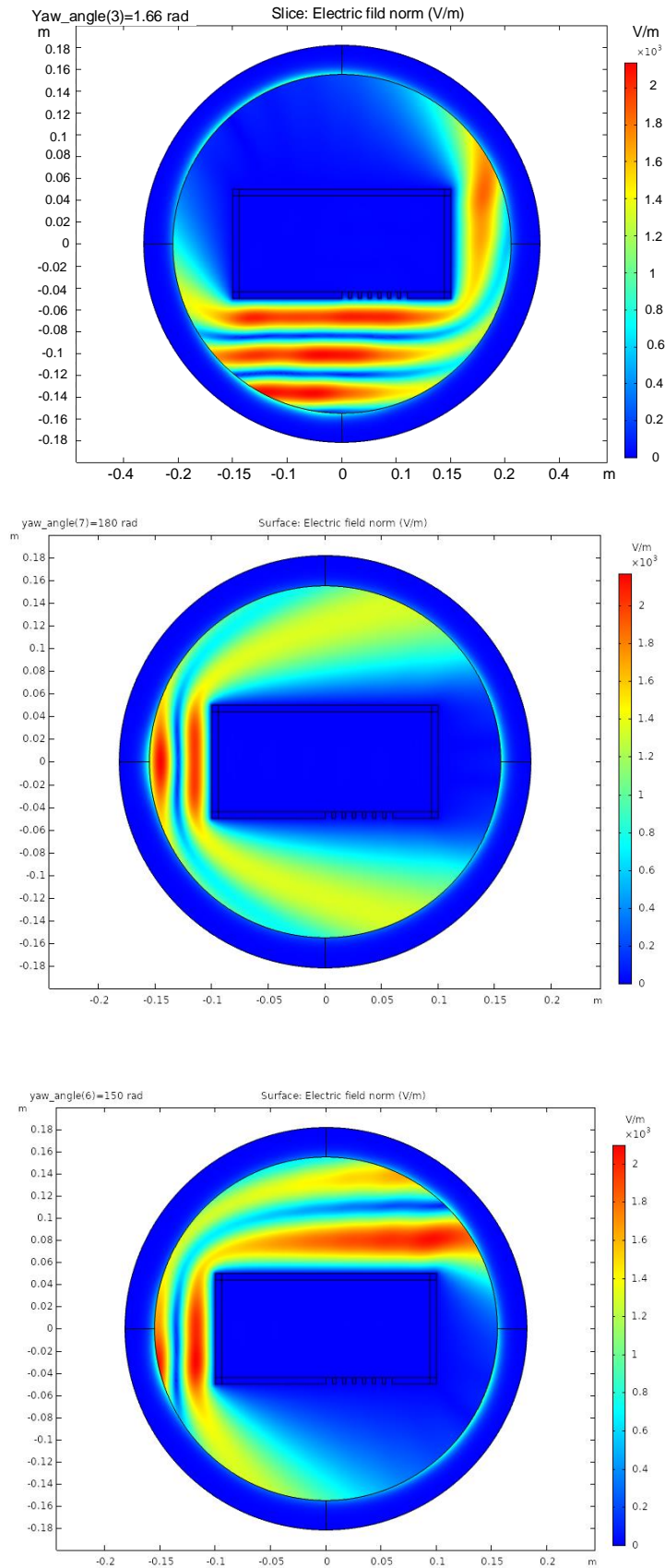


Рисунок 4.10 – Распределение электрической напряженности ЭМП ЭМИ во внешнем пространстве и внутреннем объеме МСЭК СВТ при воздействии мощными ЭМИ с частотой 5 ГГц в координатах  $x$ - $y$

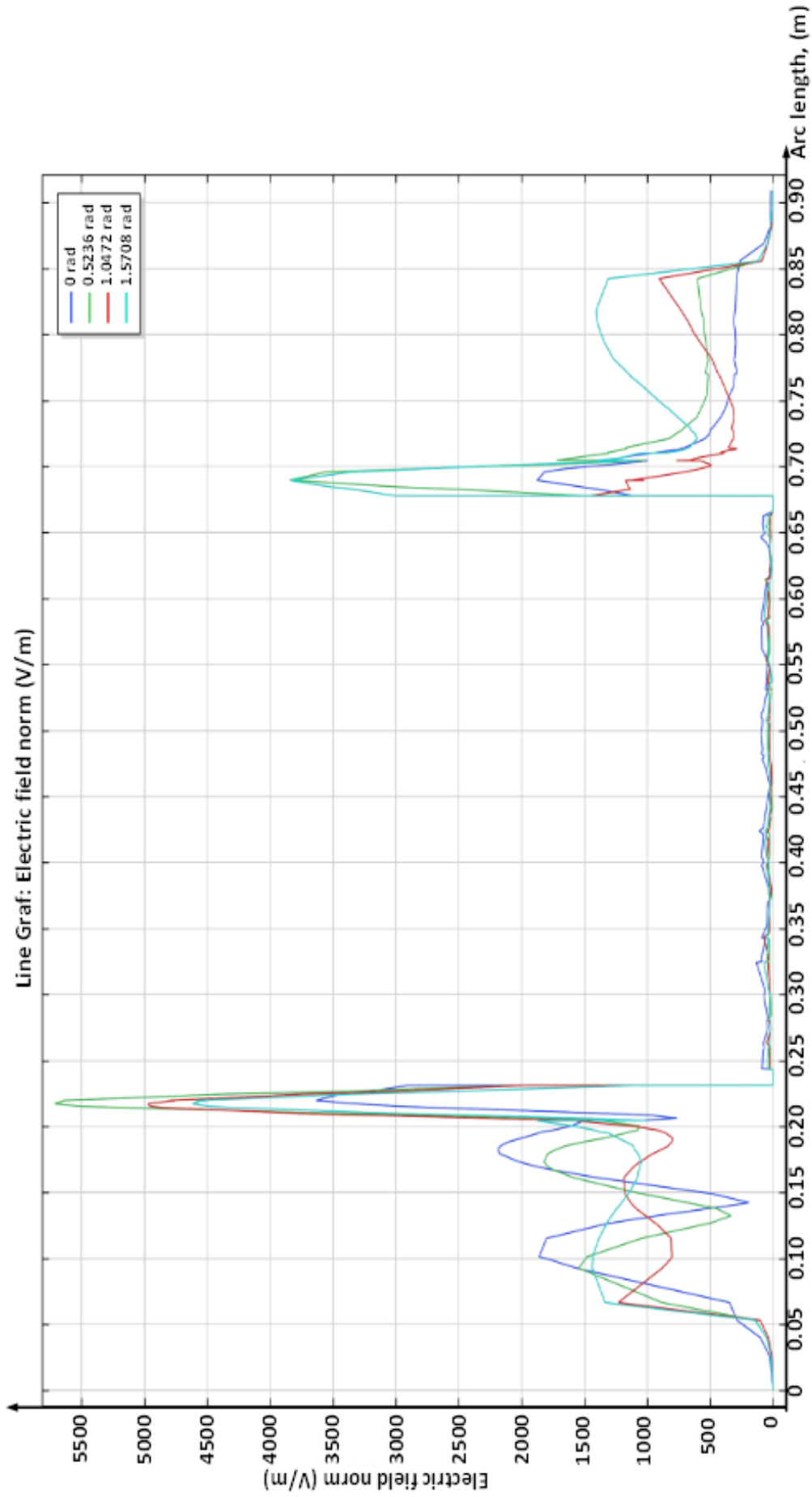


Рисунок 4.11 – График распределения электрической напряженности ЭМП ЭМИ во внешнем пространстве и внутри смоделированной многослойной экранирующей конструкции с учетом геометрических размеров экрана, принятых при моделировании (при ограничении расчетной области) ЭФС слоев экрана и характеристик воздействующего ЭМИ



а



б

Рисунок 4.12 – Установка для проведения натурального эксперимента на технологическом испытательном лабораторном стенде «23 ГМПИ – филиала 31 ГПИСС» для проверки оборудования на стойкость к воздействию электромагнитных полей на основе имитатора электромагнитных полей СВЧ диапазона У 0.8/15 – 3000 (с частотой воздействия  $f = 1$  ГГц)

а – натуральный вид макета до момента включения имитатора У 0.8/15 – 3000;

б – натуральный вид макета в боевом использовании имитатора У 0.8/15 – 3000.

– измеритель уровня ЭМИ типа ПЗ-41, предназначенный для обнаружения и контроля биологически опасных уровней электромагнитных излучений напряженности, плотности потока энергии (ППЭ) и экспозиции для обеспечения выполнения требований об электромагнитной безопасности и электромагнитной совместимости, действующих в странах Европейского Союза и Российской Федерации (технические характеристики ПЗ-41 представлены в таблице 4.3).

При проведении исследований применялось следующее оборудование:

– осциллограф вычислительный универсальный типа *TETRONIXT DS-2022B*;

Таблица 4.2 – Технические характеристики имитатора У 0.8/15-3000

№ п/п	Наименование характеристики	Значение характеристики
1	Плотность потока излучения на расстоянии 1 м от среза рупорной антенны, Вт/м <sup>2</sup> , в диапазоне частот 0,8 – 10 ГГц	75 – 1100
2	Частота посылок импульсов излучения, Гц	30 ÷ 600
3	Длительность импульсов излучения, мкс	1 ÷ 2,5

Окончание табл. 4.2

4	Напряжение питания, В	220
5	Частота, Гц	50
6	Максимальная потребляемая мощность имитатора, Вт	2000
7	Габаритные размеры имитатора, мм	800×450×1500

Таблица 4.3 – Диапазон частот и пределы измерения измерителя ПЗ-41 в зависимости от использования типа антенны-преобразователя (АП)

Тип антенны преобразователя (АП)	Рабочий диапазон частот, МГц	Пределы измерения		Плотность потока энергии (ППЭ) (мкВт/см <sup>2</sup> )
		Электрическая составляющая, $E$ (В/м)	Магнитная составляющая, $H$ (А/м)	
АП-1 (ППЭ)	300-40000	1-615	–	0,26-100000
АП-2 (ППЭ)	300-560 5600-40000	6-1940 3-1060	–	10-1000000 2,5-300000
АП-3 (Е)	0,01-0,03 0,03-300	2,5-800 0,5-550	–	1,6-170000 0,066-80240
АП-4(Е)	0,01-0,03 0,03-300	15-1500 10-1500	–	60-600000 26,5-600000
АП-5(Н)	0,01-0,03 0,03-50	–	0,2-40 0,05-20	–
АП-6(ППЭ)	0,5-2000 2000-5600	2-615 1-300	–	1-100000 0,26-24000

- регистратор аналого-цифровой СРГ7 с полосой пропускания 5 ГГц;
- аппаратный комплекс измерения поля АКИП-4113/2, имеющий время нарастания переходной характеристики 45 пс, длительность переходной характеристики 4,4 нс, погрешность коэффициента преобразования 3,4 %;

радиочастотная безэховая камера из состава государственного специального эталона ГЭТ 148-93 единиц максимальных значений напряженностей импульсных электрического и магнитного полей (ГСЭ);

- измерительный преобразователь ИППЛ–М, имеющий время нарастания переходной характеристики – 120 пс, длительность переходной характеристики – 144 нс, погрешность коэффициента преобразования 7,3 %.

Имитатор У 0.8/15-3000 функционально включает следующие основные блоки:

- блок питания и управления (БПУ);
- три сменных излучателя.

Конструктивно все элементы БПУ размещены в металлической стойке. Сверху на эту стойку крепится один из трёх излучателей. Каждый из излучателей состоит из рупорной антенны и магнетрона, закреплённых на основании, которое крепится к стойке. Накал для каждого из трёх магнетронов подводится отдельным высоковольтным кабелем с разъёмом (XS1). Включение и выключение генерации осуществляется с помощью переносного пульта, который подключен к стойке кабелем длиной 5 м.

При воздействии электромагнитными излучениями на испытуемое СВТ (ЭВМ Intel Celeron E3200) без разработанной экранирующей конструкции наблюдались восстанавливаемые отказы – сбой операционной системы из-за отказа аппаратной части (оперативной памяти), о чём свидетельствует «синий» экран монитора, подключенного в ЭВМ (рис. 4.13). Осциллограмма нарастания электромагнитного поля электромагнитного импульса, полученная с помощью осциллографа *TETRONIXT DS-2022B*, представлена на рисунке 4.14.

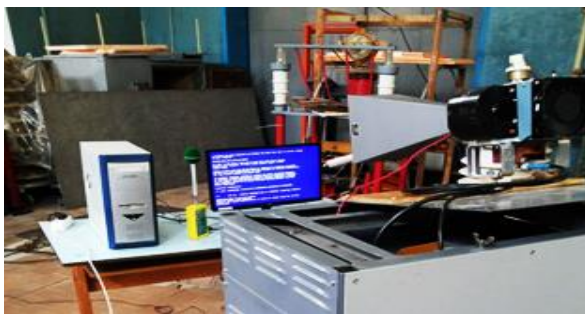


Рисунок 4.13 – Функциональный отказ СВТ при воздействии электромагнитными излучениями имитатора У 0.8/15 – 3000

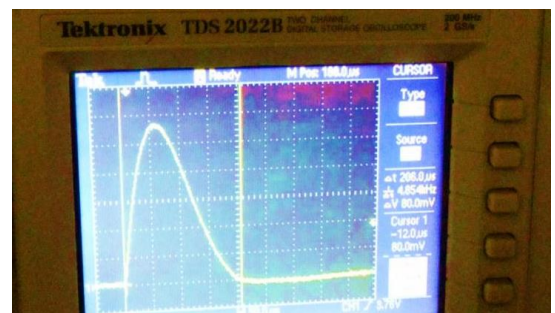


Рисунок 4.14 – Осциллограмма нарастания электромагнитного поля электромагнитного импульса, полученные с помощью осциллографа *TETRONIXT DS-2022B*

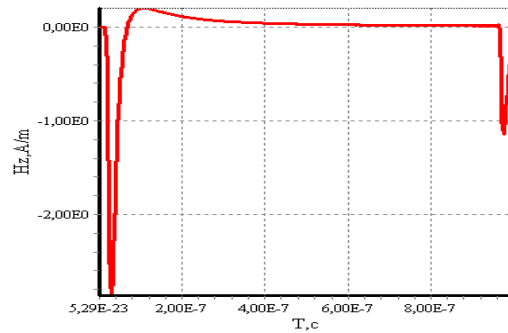
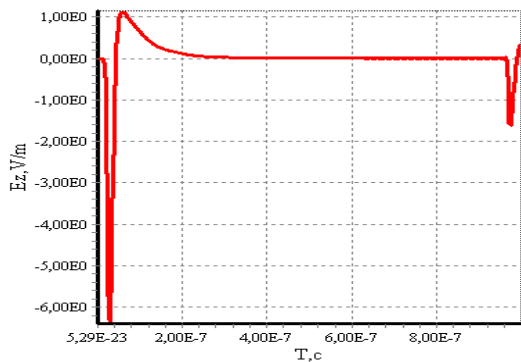
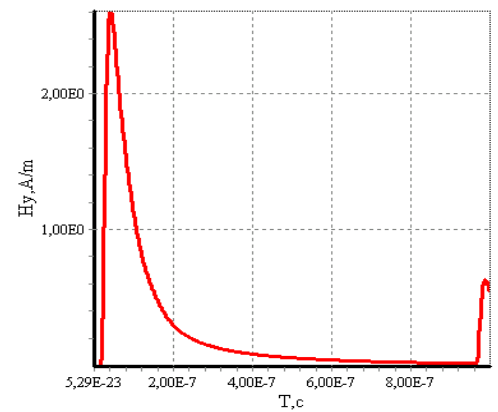
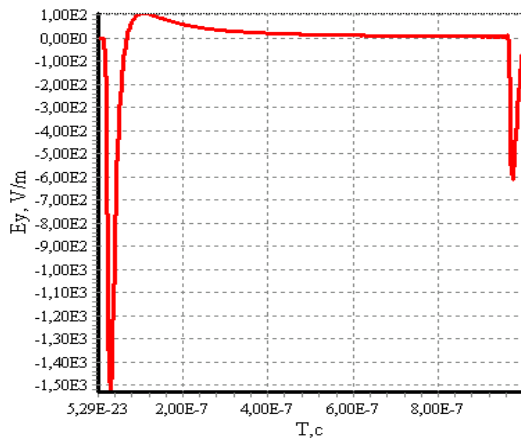
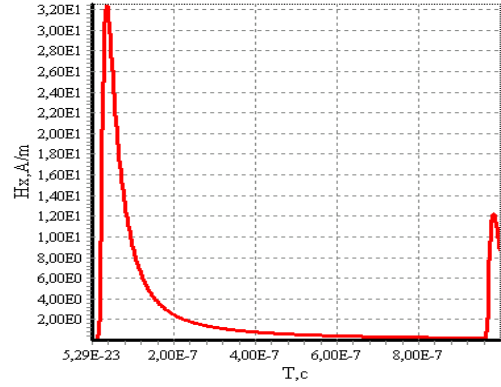
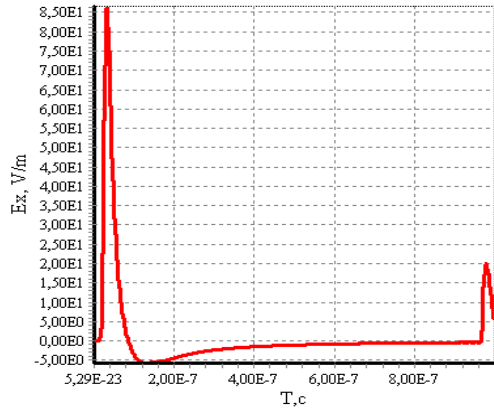


Рисунок 4.15 – Компоненты электрического поля во внутреннем объеме однослойной экранирующей конструкции с плоскими технологическими неоднородностями

Рисунок 4.16 – Компоненты магнитного поля во внутреннем объеме однослойной экранирующей конструкции с плоскими технологическими неоднородностям

На рисунках 4.15 и 4.16 соответственно представлены компоненты электрического и магнитного поля воздействующего ЭМИ во внутреннем объеме од-



нослойной экранирующей конструкции с плоскими технологическими неоднородностями, полученные в результате моделирования в программной системе *ANSYS HFSS 11.0*. В виду того, что однослойные экранирующие конструкции с технологическими неоднородностями не обеспечивают требуемую эффективность экранирования, а также в связи с обоснованием математического метода моделирования экранирующей конструкции возникает необходимость применения многослойных экранов с чередующимися полимерными и металлическими слоями с технологическими неоднородностями, объединенные в сотовые решетки.

При объединении плоских технологических неоднородностей в сотовые решетки коэффициент экранирования экранирующей конструкции возрастает примерно в два раза.

Компоненты ЭМП во внутреннем объеме многослойной экранирующей конструкции с плоскими технологическими неоднородностями представлены на рисунках 4.17 и 4.18 соответственно.

При усовершенствовании технологических неоднородностей многослойной экранирующей конструкции и представлении их в виде полых прямых призм с сечением в форме правильных шестиугольников, объединенных в сотовые решетки, мы получим значительное уменьшение напряженностей компонент поля ЭМИ до уровней, не приводящих к функциональным и катастрофическим отказам компонент СВТ. Результаты моделирования описанной выше экранирующей конструкции в системе *ANSYS HFSS v.11.0* (графики электрической и магнитной напряжённостей экранирующей конструкции) представлены на рисунках 4.19 и 4.20 соответственно. Согласно представленным графикам уровень полей, проникающих в экранирующие конструкции, минимален.

Результаты прогнозной оценки (рис. 4.21, рис. 4.22) показывают, что без применения разработанной экранирующей конструкции СВТ объектов при воздействии мощного ЭМИ выходят из строя гарантированно, а при её применении вероятность их выживания составляет 0,99 и более (рис.4.23, рис. 4.24).

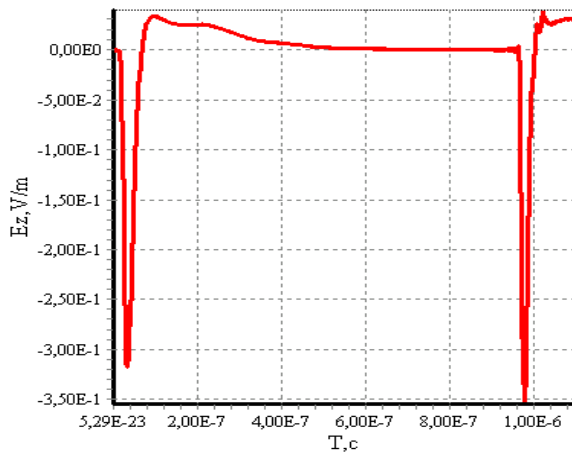
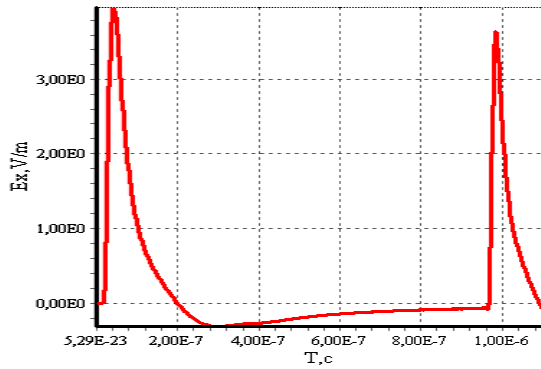


Рисунок 4.17 – Компоненты электрического поля во внутреннем объеме многослойной экранирующей конструкции с плоскими технологическими неоднородностями

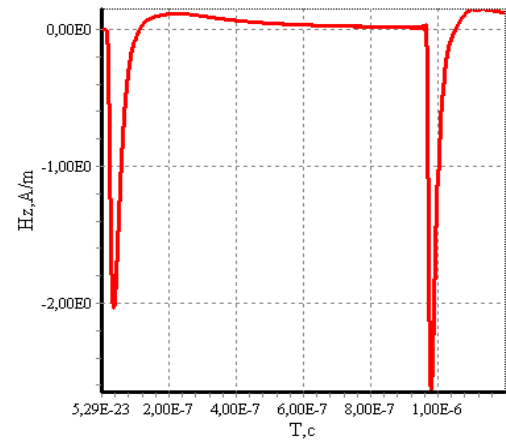
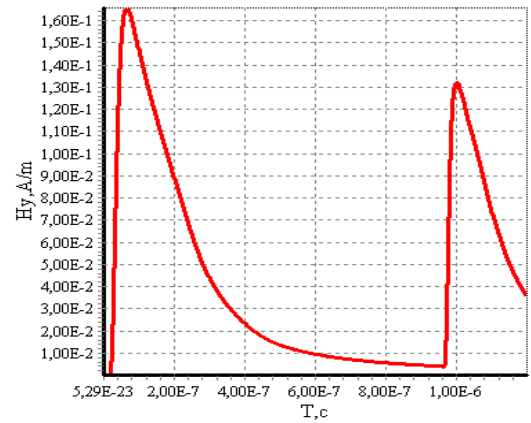
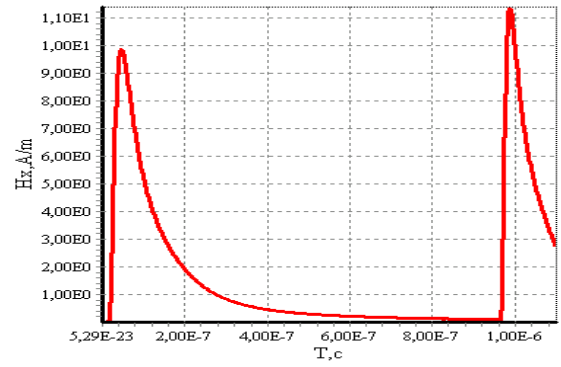


Рисунок 4.18 – Компоненты магнитного поля во внутреннем объеме многослойной экранирующей конструкции с плоскими технологическими неоднородностями

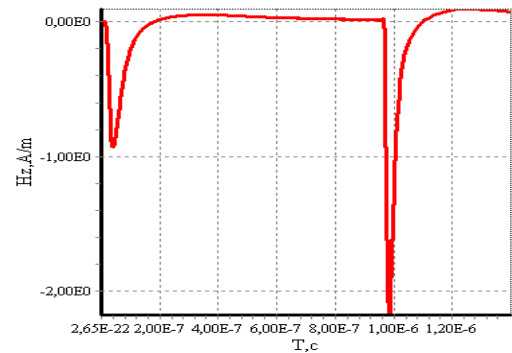
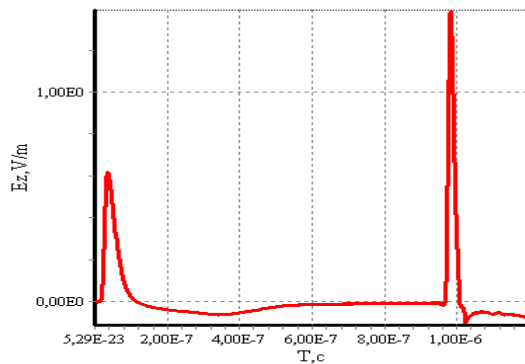
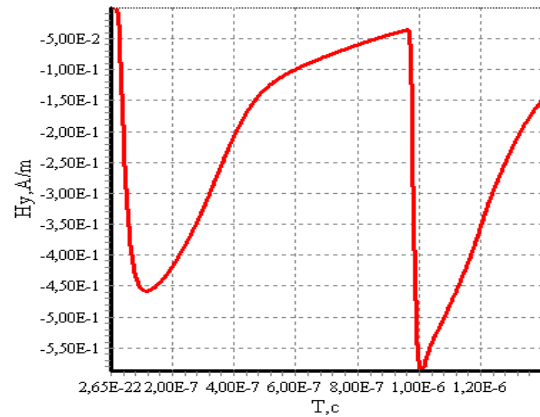
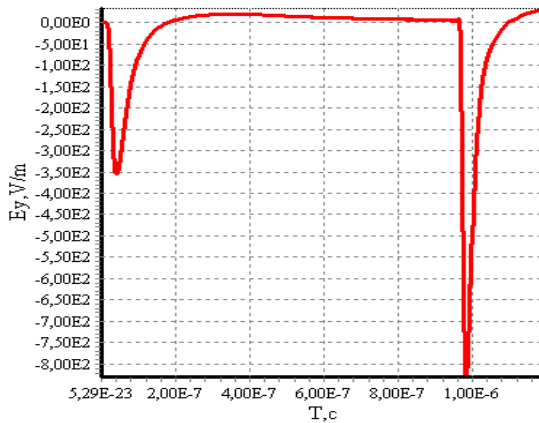
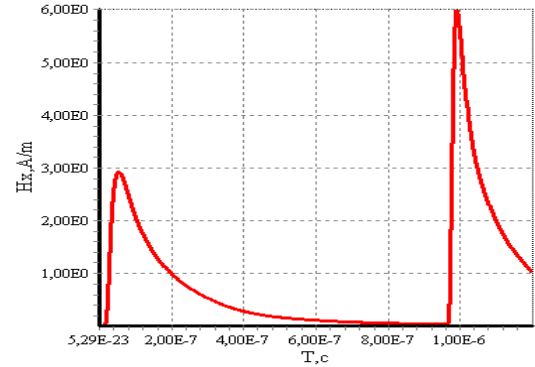
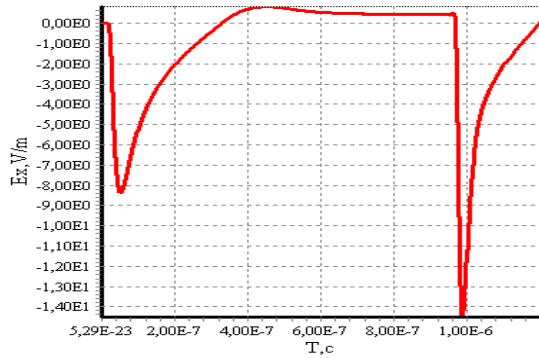


Рисунок 4.19 – Компоненты электрического поля экранирующей конструкции с ячейками в виде полых прямых призм с сечением в форме правильных шестиугольников в диапазоне измерения до 5 ГГц

Рисунок 4.20 – Компоненты магнитного поля экранирующей конструкции с ячейками в виде полых прямых призм с сечением в форме правильных шестиугольников в диапазоне измерения до 5 ГГц

Согласно полученным результатам исследований применение неоднородного многослойного экрана позволяет значительно повысить степень функциональной устойчивости СВТ и объектов КИИ в целом при воздействии ЭМИ.

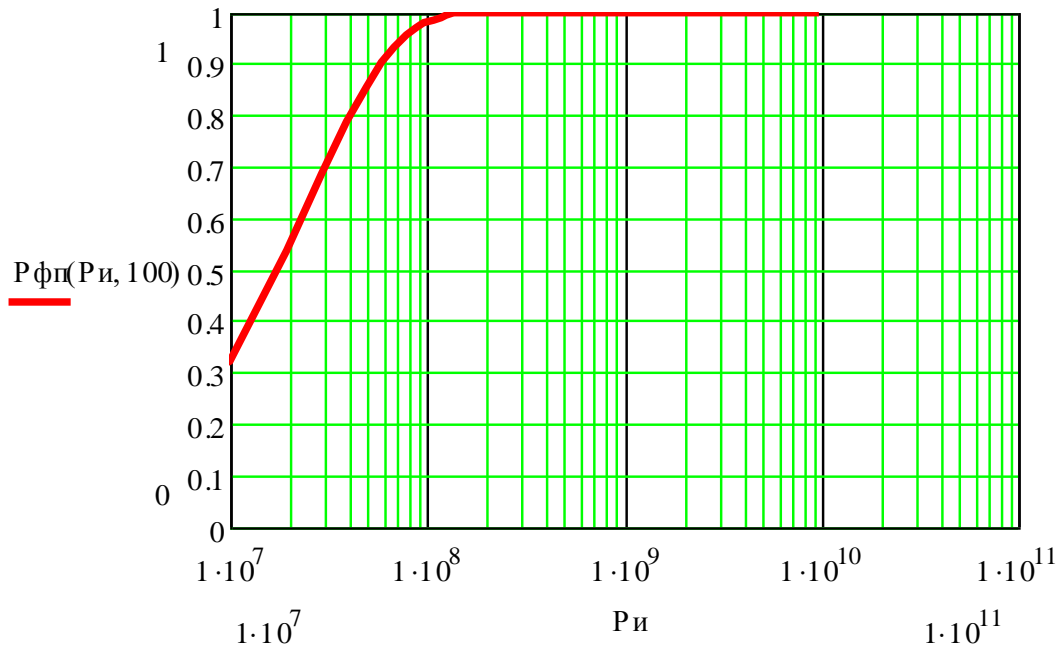


Рисунок 4.21 – Зависимость вероятности функционального поражения от мощности воздействующего ЭМИ без применения многослойной экранирующей конструкции

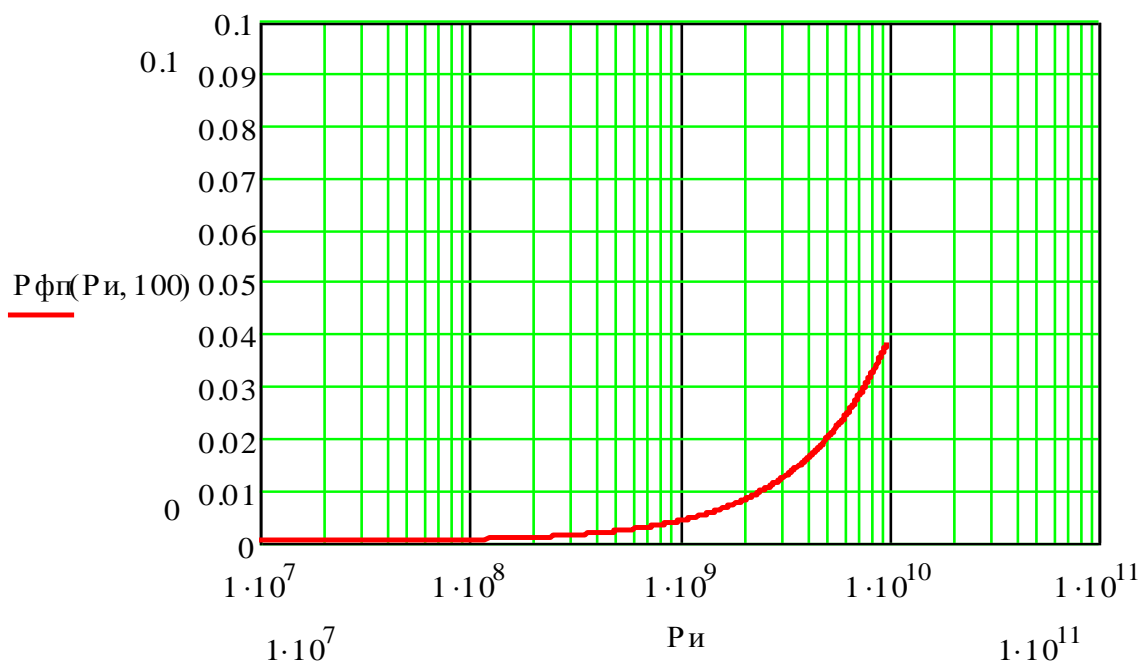


Рисунок 4.22 – Зависимость вероятности функционального поражения от мощности воздействующего ЭМИ с применением неоднородной многослойной экранирующей конструкции

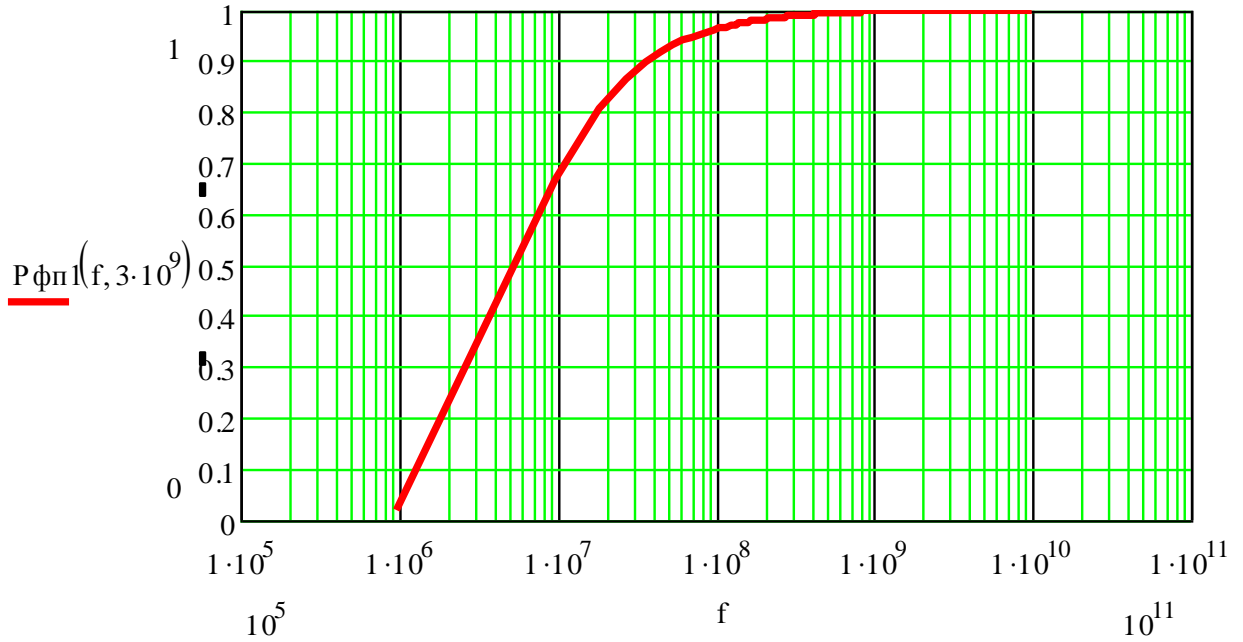


Рисунок 4.23 – Зависимость вероятности функционального поражения от частоты воздействующего ЭМИ без применения разработанной многослойной экранирующей конструкции

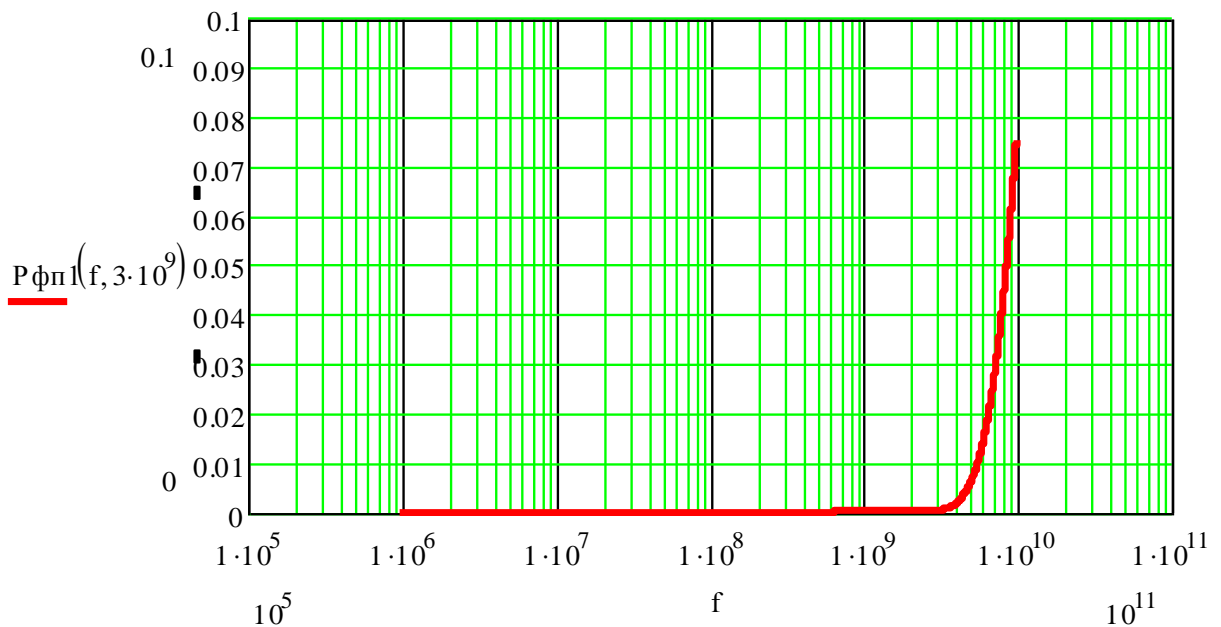


Рисунок 4.24 – Зависимость вероятности функционального поражения от частоты воздействующего ЭМИ с применением разработанной многослойной экранирующей конструкции

#### 4.3. Описание эксперимента по оценке уровня внутренних электромагнитных излучений и наводок средств вычислительной техники объектов критической информационной инфраструктуры при воздействии электромагнитных импульсов

Натурные испытания (эксперимент) по оценке уровня внутренних электромагнитных излучений и наводок средств вычислительной техники проводились в соответствии с программой испытаний СВТ (*ЭВМ Intel Celeron E3200*) на экспериментальной площадке «Испытательного центра электромагнитных и механических воздействий «23 ГМПИ – филиала АО «31 ГПИСС» с использованием анализатора спектра *GSP-7830* (с антенной биконической измерительной НБА-02). Испытуемое и измерительное оборудование находилось в экранируемом помещении, разработанном и сооруженном специалистами «Испытательного центра...», в соответствии с требованиями [144, 151]. Внешний вид экспериментального макета представлен на рисунке 4.25.



Рисунок 4.25 – Внешний вид экспериментального макета по оценке уровня внутренних электромагнитных излучений и наводок средств вычислительной техники

Анализатор спектра *GSP-7830* (далее – анализатор) предназначен для измерения спектральных характеристик сигналов в диапазоне частот от 9 кГц до 3,0 ГГц, а также для контроля и настройки в лабораторных условиях различных типов оборудования в отраслях теле- и радиовещания, связи и телекоммуникаций. В анализаторе измеренный сигнал кодируется с помощью АЦП и подвергается

ется процедуре цифровой обработки с последующим получением цифровой спектрограммы, которую можно сохранить в памяти прибора, осуществляя различные курсорные и автоматические измерения. Технические характеристики анализатора *GSP-7830* подробно изложены в [159].

Измерительная биконическая антенна типа НБА-02 предназначена для измерения напряженности синусоидальных, шумовых и импульсных электрических полей радиопомех в лабораторных помещениях, экранированных камерах и на открытых площадках и используется в комплекте с измерительными приемниками и анализаторами спектра любого типа в задачах обеспечения электромагнитной совместимости РЭС, а также для применения в качестве излучателя при измерении параметров электромагнитной восприимчивости различных электронных устройств [159].

Антенна имеет встроенный усилитель, конструктивно объединенный с устройством согласования. Сигнал с биконического симметричного вибратора передается в коаксиальный тракт, имеющий волновое сопротивление 50 Ом, подключаемый к измерительному приемному устройству. Питание антенны осуществляется от аккумуляторной батареи, размещенной в ее ручке.

В результате различных условий проведения эксперимента были получены значения уровней СПМ внутренних электромагнитных излучений и наводок, которые представлены на рисунках 4.26 и 4.27, соответственно [254–260]. Технические характеристики антенны НБА-02 представлены в таблице 4.4 [160].

Таблица 4.4 – Технические характеристики антенна биконической измерительной НБА-02

№ п/п	Наименование параметра	Значение
1	Рабочий диапазон частот, МГц	0,009 – 2500
2	Диапазон измерений коэффициента калибровки, дБ/м	14 - 56
3	Пределы допускаемой абсолютной погрешности коэффициента калибровки, дБ	±2,0
4	Коэффициент стоячей волны (КСВН)	±2,0
5	Наибольшая измеряемая напряженность электрического поля	140 дБ (мкВ/м)
6	Напряжение питания постоянного тока, В	6

7	Время непрерывной работы при полностью заряженном аккумуляторе, ч	$\geq 10$
8	Тип выходного ВЧ- соединителя	розетка N-типа
Рабочие условия эксплуатации		
9	Температура окружающего воздуха, °С	+15 ... +25
10	Атмосферное давление, кПа	84 – 106
11	Относительная влажность окружающего воздуха, %	30 – 80

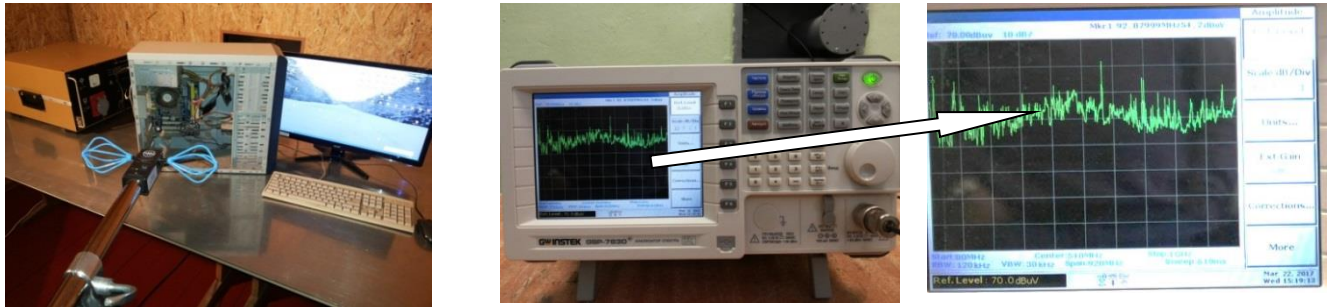


Рисунок 4.26 – Условия и спектрограмма измерения уровня СПМ внутренних электромагнитных излучений и наводок при отсутствии экранирующей конструкции СВТ (расстояние от исследуемого СВТ до антенны  $d = 1$  м, высота подъема измерительной антенны  $h = 1$  м)



Рисунок 4.27 – Условия и спектрограмма измерения уровня СПМ внутренних электромагнитных излучений и наводок с спроектированной экранирующей конструкцией СВТ (тестовое расстояние от исследуемого СВТ до измерительной антенны  $d = 1$  м, высота подъема измерительной антенны  $h = 1$  м)

Примеры распределения составляющих поля внутренних электромагнитных излучений и наводок СВТ в трехмерной области, полученного в программной системе конечно-элементного анализа *ANSYS HFSS 11.0*, с учётом нахождения источника поля внутри спроектированной экранирующей конструкции, представлены на рисунке 4.28 [161–165].



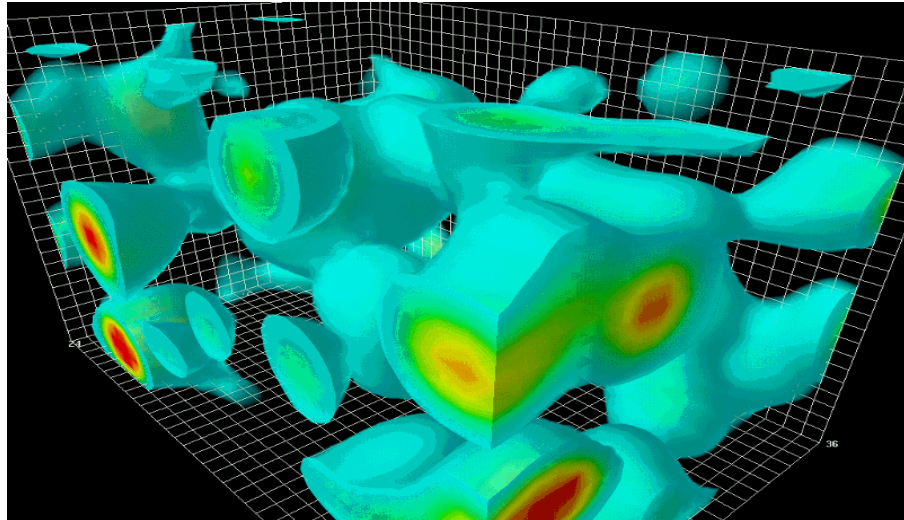


Рисунок 4.28 – Распределение составляющих электромагнитного поля внутренних электромагнитных излучений и наводок исследуемого объекта в трехмерной области с помощью МКЭ в системе конечно-элементного анализа *ANSYS HFSS 11.0*

График, отображающий распределение коэффициента экранирования многослойной экранирующей конструкции, выполненной по технологии *полимер-металл-полимер* с технологическими неоднородностями в виде полых прямых призм с сечением в форме правильных шестиугольников, объединенных в сотовые решетки с учетом геометрических размеров экрана, принятых при моделировании (при ограничении расчетной области) ЭФС слоев экрана и характеристик воздействующего ЭМИ, представлен на рисунке 4.29. Коэффициент экранирования с учётом допустимой погрешности в диапазоне измерения до 10 ГГц составляет примерно  $\eta_{(E(H))} \approx 120$  дБ. Это предопределяет её практическое применение в качестве основной конструкции. Результаты эксперимента показывают, что моделирование многослойного электромагнитного экрана, проведенного в программной системе конечно-элементного анализа *ANSYS HFSS 11.0*, обеспечивают ослабление более чем на 120 дБ электромагнитных полей СВЧ-диапазона, воздействующих на средства ЭВТ, обрабатывающих специальную информацию, с погрешностью не более 14 % от экспериментальных данных, полученных в рамках «Испытаний ЭВМ на соответствие требованиям п. 4.3, а

ГОСТ РВ 20.39.308-98» (протокол № 11/15-2017 от 24.04.2017 г.), что обеспечивает выполнение критериальных требований, предъявляемых к системе ОФУ.

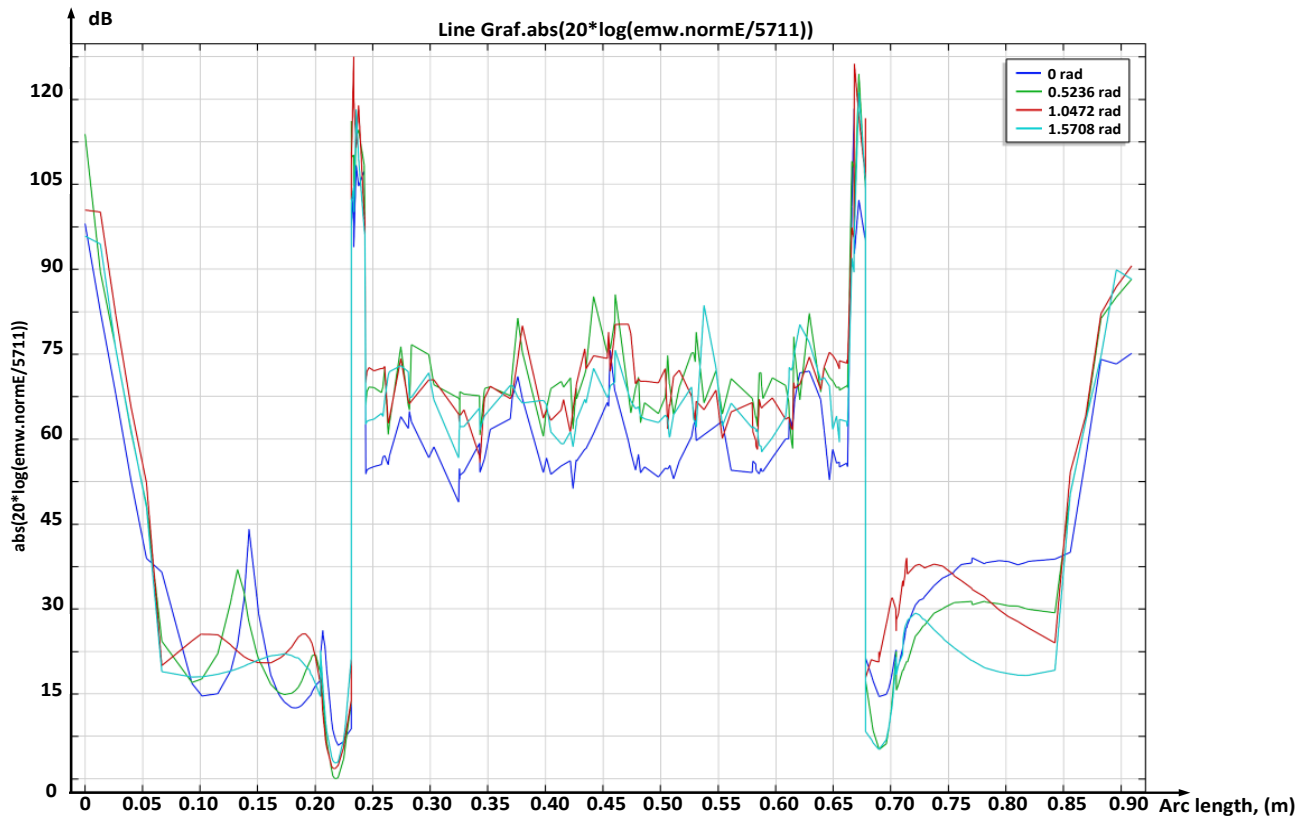


Рисунок 4.29 – График, отображающий распределение коэффициента экранирования многослойной экранирующей конструкции, выполненной по технологии *полимер-металл-полимер* с технологическими неоднородностями в виде полых прямых призм с сечением в форме правильных шестиугольников, объединенных в сотовые решетки с учетом геометрических размеров экрана, принятых при моделировании (при ограничении расчетной области) ЭФС слоев экрана и характеристик воздействующего ЭМИ

При применении разработанной экранирующей конструкции функциональных и катастрофических отказов СВТ не наблюдалось. Установлено, что повышение уровня помехозащищённости СВТ и объектов КИИ происходит при внедрении предлагаемой экранирующей конструкции с учетом их обратимости, предусматривающей сохранение эффективности экранирования независимо от того, расположен ли внутри него источник поля или внутренняя область про-

странства. При этом вероятность возникновения внутренних электромагнитных излучений и наводок уменьшается до уровня, составляющего примерно  $P_{\text{вЭМИН}} = 0,09$  (рис.4.30).

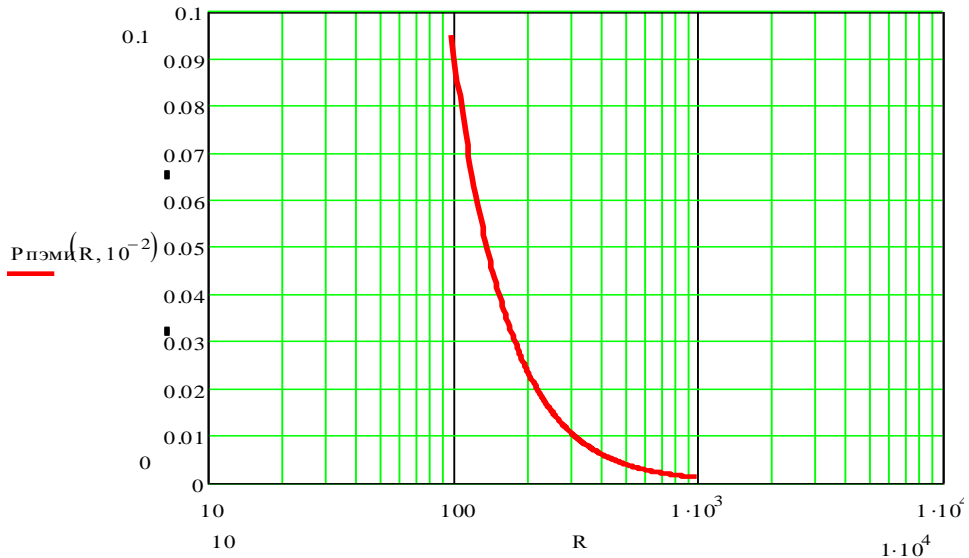


Рисунок 4.30 – Графики изменения вероятности регистрации внутренних электромагнитных излучений и наводок в зависимости от расстояния размещения анализаторов спектра и напряженности сигнальной составляющей поля при применении многослойной экранирующей конструкции

На рисунке 4.31 представлена структура программного комплекса, реализующего разработанные алгоритмы в рамках математических методов моделирования, а на рисунке 4.32 внешний вид программы для ЭВМ «Программа для расчета комплексной защищенности объектов критической информационной инфраструктуры от деструктивных электромагнитных излучений» с произведёнными расчетами.

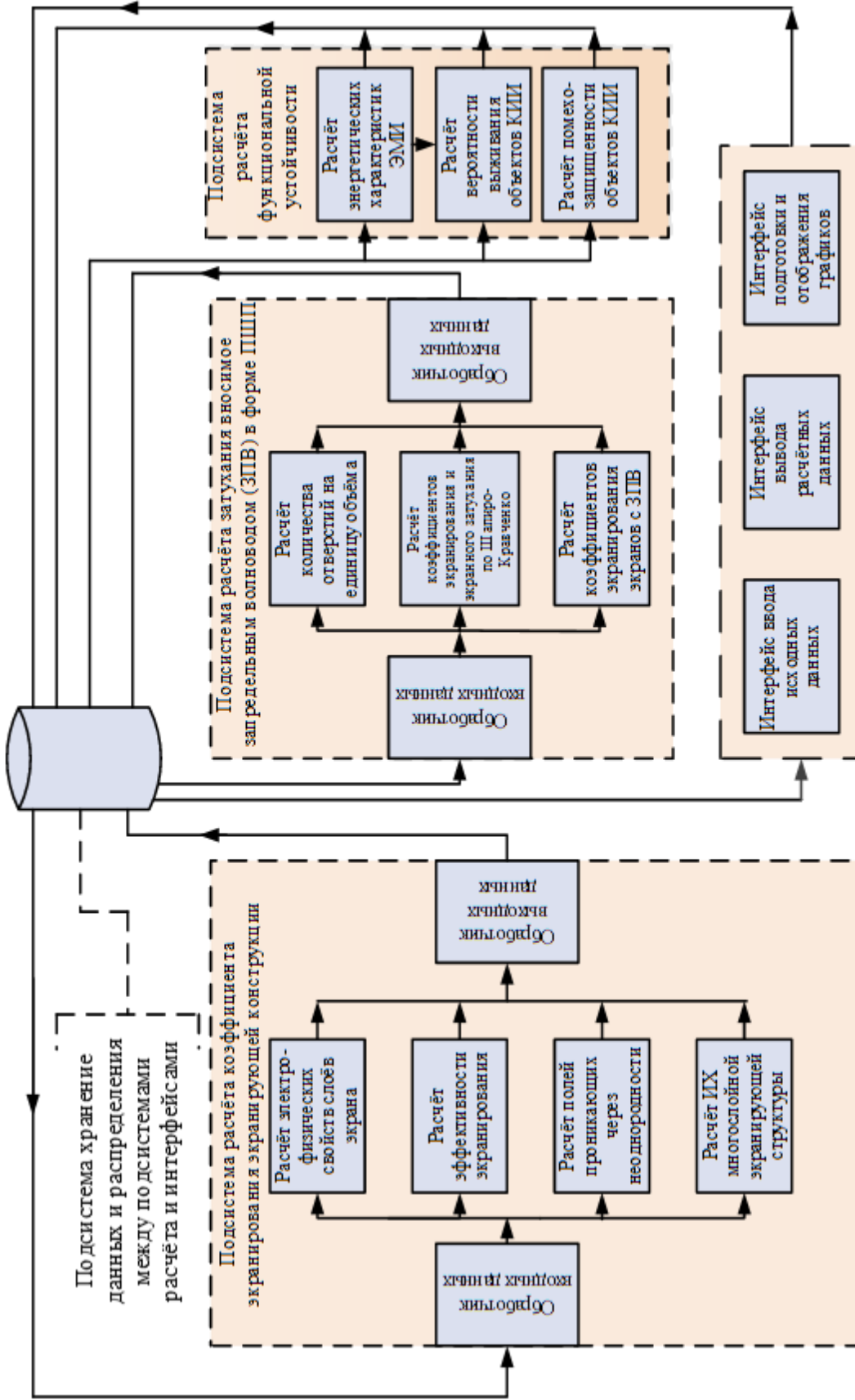


Рисунок 4.31 – Структура программного комплекса, реализующего разработанные алгоритмы в рамках математических методов моделирования

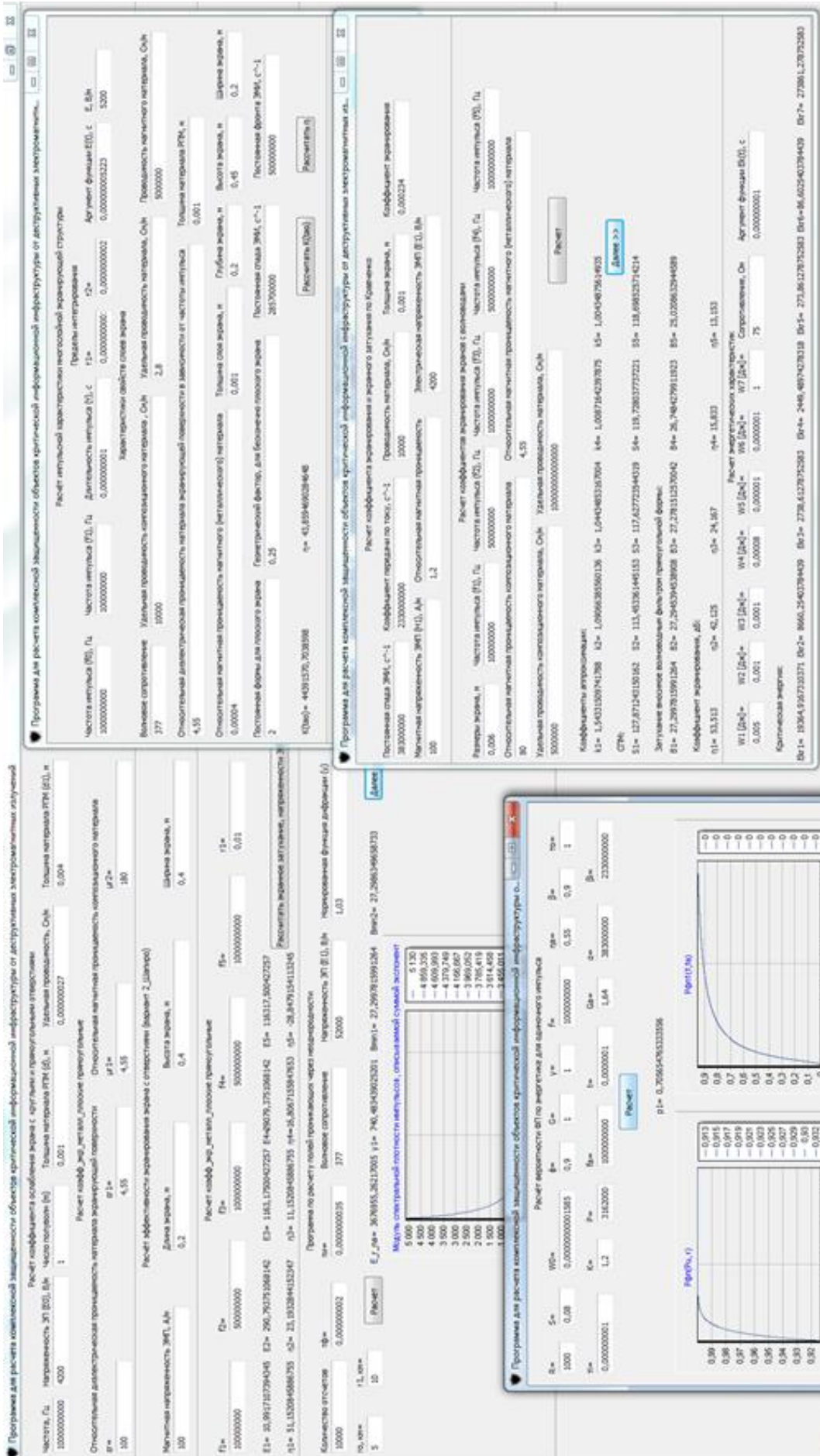


Рисунок 4.32 – Внешний вид программы для ЭВМ

«Программа для расчета комплексной защищенности объектов критической информационной инфраструктуры от деструктивных электромагнитных излучений» с произведенными расчетами

## Выводы по главе 4

Наличие разработанных элементов теории электромагнитного экранирования, а также математического метода моделирования экранирующей конструкции, обеспечивающей устойчивое функционирование объектов КИИ при воздействии ЭМИ, позволило разработать конструктивно-технологическое решение, позволяющее, впоследствии, повысить уровень функциональной устойчивости объектов КИИ в условиях воздействия ЭМИ.

Разработан программный комплекс, позволяющий производить расчет живучести и помехозащищённости объектов в условиях воздействия ЭМИ на основании имеющихся данных в соответствии с результатами математического моделирования экранирующей конструкции.

В результате проведенных экспериментов по оценке живучести и помехозащищённости объектов в условиях воздействия ЭМИ подтверждены результаты математического моделирования экранирующей конструкции с учетом многослойности её структуры и формы технологических неоднородностей, верифицированные в ПСКЭА в *COMSOL Multiphysics* и *ANSYS HFSS 11.0*. Они показывают, что смоделированные экранирующие конструкции обеспечивают ослабление на 120 дБ воздействующих на СВТ электромагнитных полей СВЧ-диапазона от 0,8 до 10 ГГц, с погрешностью не более 14 % от экспериментальных данных, полученных в рамках «Испытаний ЭВМ на соответствие требованиям п. 4.3, а ГОСТ РВ 20.39.308-98» (протокол № 11/15-2017 от 24.04.2017 г.).

Результаты прогнозной оценки (рис. 4.21 – 4.24) показывают, что без применения разработанной экранирующей конструкции СВТ объектов при воздействии мощного ЭМИ выходят из строя гарантированно, а при её применении вероятность их выживания составляет 0,99 и более (4.30), что подтверждает значительное повышение степени функциональной устойчивости СВТ и объектов КИИ в целом при воздействии ЭМИ.

## **ГЛАВА 5. ЧИСЛЕННЫЙ МЕТОД ОПТИМИЗАЦИИ ЭКОНОМИЧЕСКИХ ЗАТРАТ, ПОЗВОЛЯЮЩИЙ ПОЛУЧАТЬ ЗНАЧИТЕЛЬНЫЙ ЭКОНОМИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ В РАМКАХ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ОБЪЕКТОВ КРИТИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ В УСЛОВИЯХ ВОЗДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ИМПУЛЬСОВ**

5.1. Теоретическое обоснование выбора технологии разработки системы обеспечения функциональной устойчивости объектов критической информационной инфраструктуры при воздействии электромагнитных импульсов

Проблему обеспечения функциональной устойчивости объектов КИИ в условиях воздействия ЭМИ, как было указано выше, необходимо рассматривать как комплекс мероприятий, содержащий совокупность средств и методов, обеспечивающих предотвращение функционального и катастрофического поражения СВТ объектов в условиях воздействия мощными ЭМИ СВЧ.

Построение СОФУ представляет собой итерационную последовательность: *постановка задач – проработка вариантов их осуществления – принятие решения*. В этой связи возникает необходимость комплексного решения данной задачи. Структурная оптимизация СОФУ будет заключаться в формировании такой системы, которая определит основные функциональные механизмы, необходимые для обеспечения экстремального значения показателя оптимальности системы при выделенных финансовых средствах  $C_{\max}$  на ее создание.

Для реализации концепции ОФУ предлагается использовать технологию *ITOSS (Intellectual Technology of Optimization and Stabilization of Systems* – интеллектуальная технология оптимизации и стабилизации систем), предполагающую

разработку и применение принципиально новых подходов к техническим решениям с учетом того, что в условиях функционирования разрозненные неравновесные компоненты системы либо конкурируют между собой, либо образуют новые соединения, стабилизирующие друг друга. Стабилизирующие подсистемы, в свою очередь, ориентированы на принципиально новые функции, возникающие из множества случайно возможных, и приводят, по сути, к нарушению базовых принципов функционирования компонентов системы, связанных с последовательным стремлением к новизне. В результате этого формируется новая стабильная структура системы, более рационально использующая существующие технологии функционирования с одновременным поиском комбинаций из существующих технологий и достижения предельного или максимального эффекта их применения. В условиях ограниченных ресурсов, при высоких требованиях к параметрам СОФУ, это становится достаточно актуальным и приводит к снижению экономических издержек на её создание [166 – 174].

В процессе решения проблемы оптимизации и стабилизации СОФУ объектов необходимо более рационально использовать существующие технологии с одновременным поиском их комбинаций и последующим нахождением их оптимальной траектории для целью достижения предельного (максимального) эффекта их применения. С помощью эволюционного выбора необходимо провести отбор наиболее эффективных технологий, которые в совокупности будут способствовать созданию СОФУ и находящегося в них СВТ с получением экономического эффекта от их применения.

Процесс получения необходимой технологии представляется в виде графа, приведенного на рисунке 5.1. Предположим, что в наличии имеются исходные технологии ОФУ –  $A$ ,  $B$ ,  $C$  и для получения оптимальной технологии необходимо либо разработать свою, либо приобрести на рынке недостающие современные технологии  $D$ ,  $G$  и затем вложить финансовые средства для адаптации и согласования множества исходных технологий на рассматриваемом объекте [75, 167–176].

При реализации схемы (рис. 5.2) каждому ребру графа необходимо придать вес – стоимость соответствующей технологии, а петле – вес стоимости внедрения (адаптации) на соответствующем объекте.



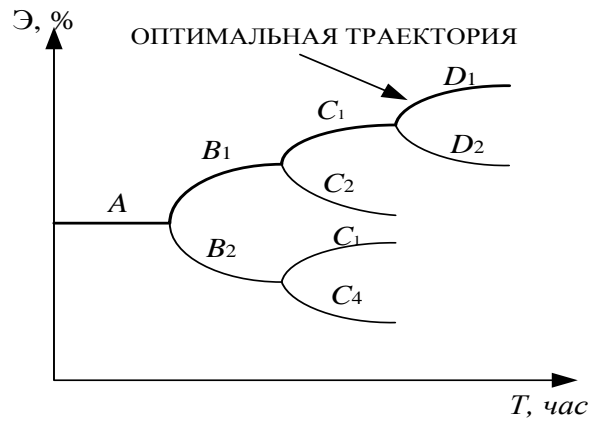


Рисунок 5.1 – Процесс выбора оптимальной траектории формирования технологии обеспечения функциональной устойчивости объектов КИИ

На графе полученную в итоге технологию обозначим  $E$  и, в соответствии с теорией множеств, она может быть определена следующим образом [167 – 174, 176]:

$$E = A \cup B \cup C \cup D \cup G. \quad (5.1)$$

Для развития этой технологии необходимы дополнительные финансовые инвестиции, поэтому в результате от  $E$  осуществляется переход к технологии  $H$ , которая в общем случае может включать как приобретение, так и разработку новых технологий.

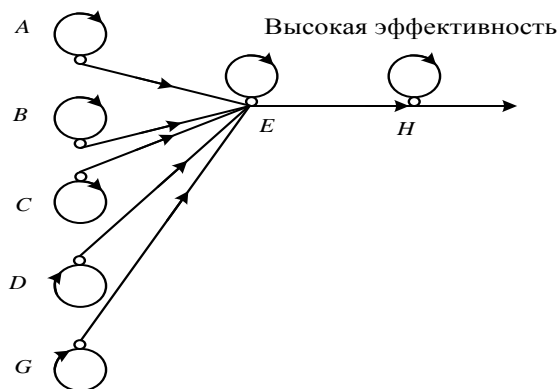


Рисунок 5.2 – Граф, характеризующий развитие новых технологий

С этой целью необходимо проводить периодический мониторинг разрабатываемой технологии для выявления ее подкомпонентов, применимых в других системах аналогичного назначения.

*Этапы разработки технологии по созданию СОФУ объектов КИИ при воздействии ЭМИ*

Процесс формирования нужной технологии создания СОФУ объектов КИИ характеризуется набором определенных свойств. Каждое свойство создается по мере прохождения звеном определенного цикла технологического процесса и может проявиться лишь на завершающих этапах. При этом каждое звено технологической цепи оказывает влияние на качественные характеристики параметра, что может быть оценено методом планирования эксперимента. В конечной точке *Z* (рис. 5.3) должна быть создана технология, использование которой позволит получить с определенной вероятностью СОФУ, удовлетворяющую требованиям по живучести и помехозащищённости объектов при воздействии ЭМИ.

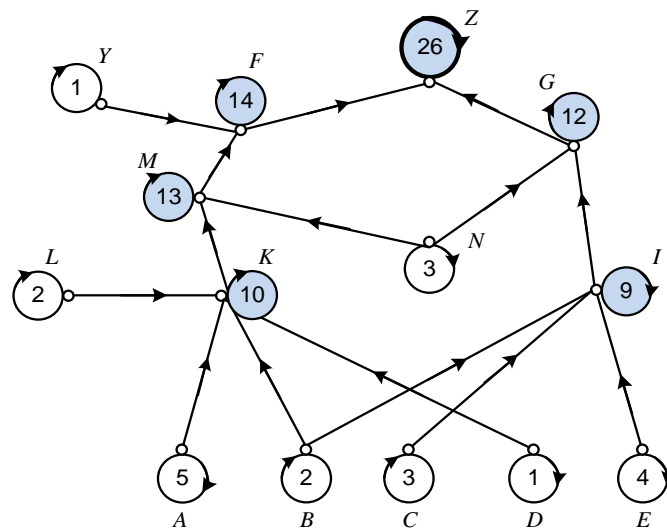


Рисунок 5.3 – Граф создания новой технологии

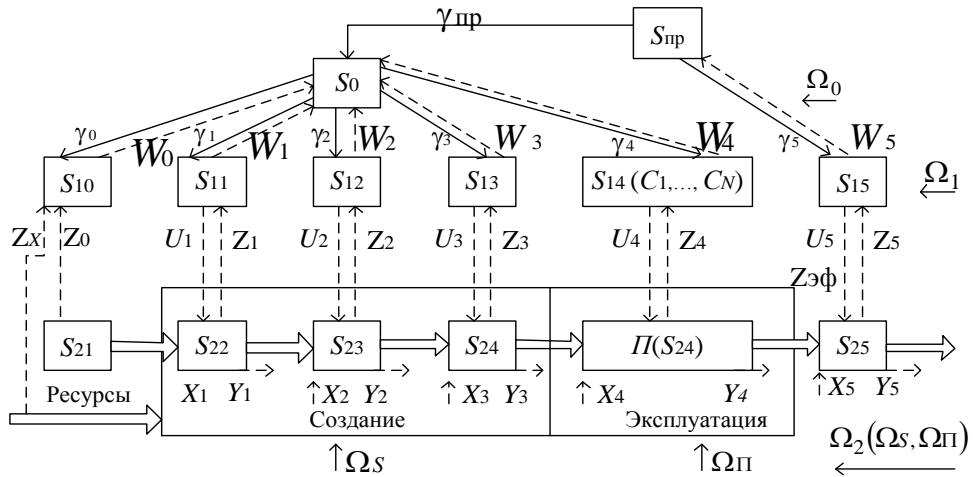
В рамках озвученной задачи необходим набор различных «технологий», которые в конечном итоге позволят спроектировать оптимальную технологию по ОФУ. Свойства первичных «технологий» *A, B, C, D* переносятся в конечное множество, причем несмотря на разные пути разработки, в конечном продукте присутствуют общие технологии *B* и *N*, другие связаны между собой более сложным образом. Каждому ребру присваивают «вес» – стоимость «технологии».

С данными «технологиями» возможно проведение следующих операций: *объединение, пересечение, дополнение и включение одного множества в другое* и т. д.:  $(A, B, D \rightarrow K \rightarrow M \rightarrow F \rightarrow Z)$  и  $(E, B, C \rightarrow I \rightarrow G \rightarrow Z)$ , при этом приобретаются множества технологий: в первом случае –  $L, N$  и  $Y$ , во втором –  $N$ , и разрабатываются технологии в вершинах  $K, M, F$  и  $Z$  – в первом случае;  $I, G, Z$  – во втором. Таких соотношений в общем случае может быть получено  $n$ , а обоснованность выбора пути разработки *требуемой технологии* определяется, прежде всего, экономичностью: из  $n$  путей должен быть выбран  $n_j$ , имеющий наименьшую стоимость при условии, что параметры изделия или *требуемой технологии* одинаковы. Таким образом, необходимо выбрать компромиссное решение, чтобы наилучшим образом удовлетворять критериям: научно-технический уровень качества, надежность и стоимость, риск, конкурентоспособность и т. д. [75, 167].

На рисунке 5.4 представлена трехуровневая схема учёта наследуемости свойств при математическом описании создания *требуемой технологии* [75, 167, 177]. На первом этапе на основании информации от нижестоящих систем (задача  $X_0$ ) с целью достижения определенного уровня качества принимается решение о «наследственности» технологий и их экономичности для построения нужной нам технологии (задача  $X$ ). Система второго уровня имеет свои задачи, составляющие множество  $x_i \in X (i = 1...5)$ .

Применение такой системы обеспечивает учет наследственности при эволюционном развитии «технологий», включая проведение инноваций, и позволяет развивать базовые «технологии» ОФУ объектов при воздействии ЭМИ, снижая экономические издержки при её создании, что в конечном итоге приведет к повышению эффективности предлагаемой системы.

В рамках реализации технологии *ITOSS* разработана «Программа для реализации интеллектуальной технологии оптимизации и стабилизации систем на основе Алгоритма Дейкстры «*ITOSS*»», внешний вид интерфейса которого представлен на рисунке 5.5 [167, 176, 178].



$y_i \in Y (i = 1...5)$  – координирующие связи связь от процессов;

– информационная обратная связь от процессов;  $w_i \in W (i = 1...5)$   $z_i \in Z (i = 1...5)$

– информация от систем второго уровня

Рисунок 5.4 – Учет наследуемости свойств при математическом описании создания требуемой технологии

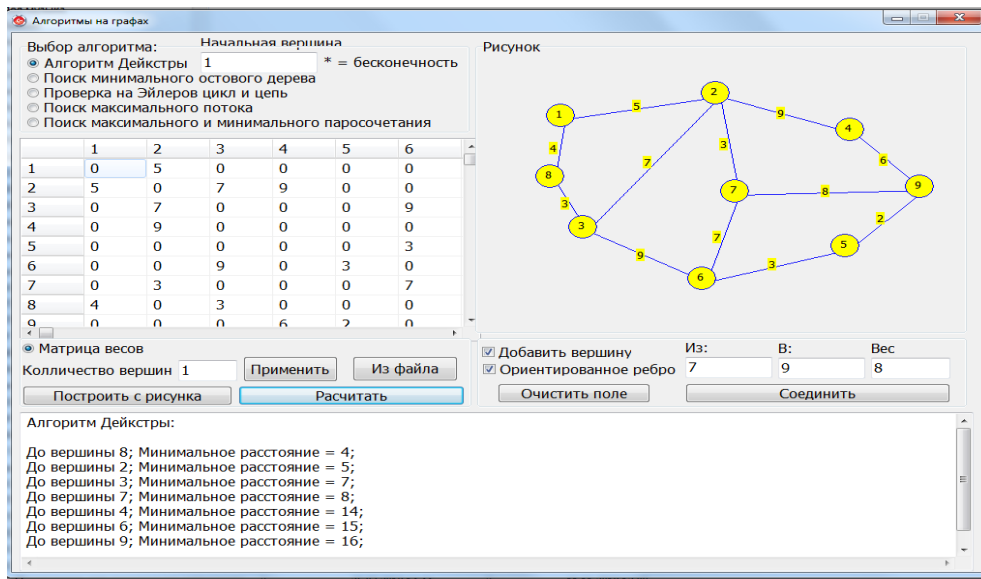


Рисунок 5.5 – Внешний вид интерфейса «Программа для реализации интеллектуальной технологии оптимизации и стабилизации систем на основе Алгоритма Дейкстры «ITOSS»».

5.2. Обоснование выбора оптимального варианта создания системы обеспечения функциональной устойчивости объектов критической информационной инфраструктуры систем с целью максимального предотвращения ущерба при воздействии электромагнитных импульсов

Как было указано выше, качество функционирования СОФУ во многом предопределяется выбором вариантов (методов и способов), исходя из наличия финансовых (бюджетных) средств, выделяемых для проведения данного рода мероприятий, что предусматривает выбор наилучшей структуры системы и оптимального состава технических средств в указанной структуре, необходимых для достижения избранной цели.

Сформулируем подход к решению задачи оптимизации варианта СОФУ по *абсолютному критерию выбора* (АКВ), применение которого позволяет путем сравнения нормированных значений соответствующих показателей качества (ПК) для последовательности бинарных отношений анализируемых вариантов выбирать из них такие, для которых длины составляющих множества показателей качества оказались минимальными [75, 78, 176, 177]: *каждый вариант из числа принятых к рассмотрению множества возможных методов и способов создания СОФУ  $M_{\bar{B}}$  определяется некоторой областью  $\bar{B}$  (совокупности параметров и показателей) при многостадийном выборе (МСВ):*

$$\begin{aligned} \bar{K} &\subset \bar{B}; \\ \bar{I} &\subset \bar{B}, \end{aligned} \quad (5.2)$$

и обеспечиваются наилучшими значениями из множеств  $\bar{K}$  и  $\bar{I}$ , где  $\bar{K} = \{K_1, K_2, \dots, K_p\}$  – *множество параметров СОФУ* (стоимость, массогабаритные параметры и т. д.);  $\bar{I} = \{I_1, I_2, \dots, I_q\}$  – *множество показателей качества СОФУ* (степень подавления поля мощного ЭМИ СВЧ и ВЭМИН, коэффициент готовности подсистемы). Выбор значений множества  $\bar{K}$  из совокупности  $\bar{B}$  при

$(\bar{K} \subset \bar{B})$  определяет возможный вариант из множества  $M_{\bar{B}}$  мероприятий по ОФУ объектов КИИ при воздействии ЭМИ (рис. 5.6).

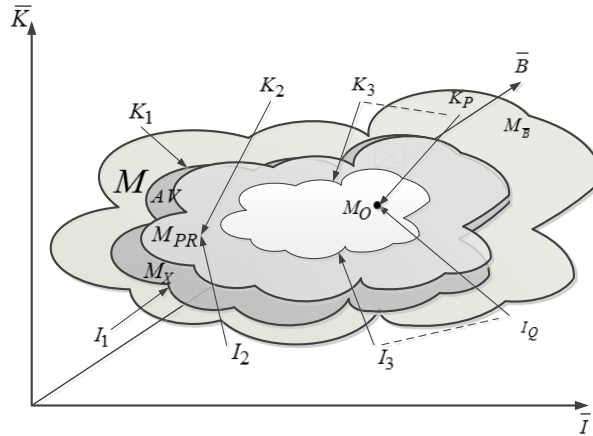


Рисунок 5.6 – Процедура выбора предпочтительных вариантов  $M_{PR}$  построения СОФУ объектов от излучений на основе АПК и отсева худших вариантов  $M_X$

В множество  $M_{\bar{B}}$  входит подмножество оптимальных вариантов  $M_O \in M_{\bar{B}}$  при строгом упорядочении показателей качества СОФУ  $\bar{I}$ . Однако, для выбора  $M_O$  потребуются компромиссные варианты  $M_{PR} \in M_{AV}$ , где  $M_{AV}$  – множество допустимых вариантов построения СОФУ, выбранный с учетом абсолютного критерия выбора (АПВ) [179, 180]. Указанная процедура многовариантная и многопараметрическая, что требует, в свою очередь, применения метода информационного поиска  $M_{AV}$  на основе матриц соответствий  $M_Q^P = |m_{QP}|$ , в которой строки соответствуют параметрам СОФУ, а столбцы – требуемым значениям показателей качества [75, 179]:

$$M_Q^P = \begin{vmatrix} P/Q & K_1 & K_2 & \dots & K_P \\ I_1 & m_{11} & m_{12} & \dots & m_{1P} \\ I_2 & m_{21} & m_{22} & \dots & m_{2P} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ I_Q & m_{Q1} & m_{Q2} & \dots & m_{QP} \end{vmatrix} \quad (5.3)$$

где

$$m_{QP} = \begin{cases} 1, & \text{если } \bar{K} \subset \bar{B}; \\ 0 & \text{— в противном случае.} \end{cases} \quad (5.4)$$

Допустимые варианты получаются путём умножения столбцов матрицы  $M_Q^P$ :

$$M_{AV} = X_{M_Q^1}^1 \wedge X_{M_Q^2}^2 \wedge \dots \wedge X_{M_Q^P}^P, \quad (5.5)$$

где  $X_{M_Q^1}^1, X_{M_Q^2}^2, \dots, X_{M_Q^P}^P$  — множества вариантов, которым в столбцах матрицы соответствуют единичные значения.

В связи с этим задача выбора оптимального варианта организации СОФУ объектов от излучений принимает вид:

$$\bar{I}(\bar{K})_{\bar{I} \subset \bar{B}} \xrightarrow{\min} T_{opt}, \quad (5.6)$$

где  $T_{opt}$  — оператор, реализующий принцип оптимальности (минимизации финансовых средств на построение СОФУ).

С учетом изложенного задача оптимизации (5.16) формулируется так: необходимо найти такую область изменения параметров  $\{K_1, K_2, \dots, K_P\}$ , чтобы она являлась подобластью совокупности  $\bar{B}$ , и каждый из элементов множества  $\bar{K}$  этой подобласти был бы оптимальным по АКП, т. е. в области  $\bar{B}$  не должно существовать какого-либо другого множества  $\bar{K}^* = \{K_1^*, K_2^*, \dots, K_P^*\}$ , такого, что  $\bar{I}(\bar{K}) \leq \bar{I}(\bar{K}^*)$ , и хотя бы одно неравенство должно быть строгим [179].

Подход к оптимизации такой системы посредством перебора всех ее вариантов в условиях жестких временных ограничений нереализуем из-за большой размерности задачи, снижение которой при разработке мероприятий по обеспечению функциональной устойчивости, как правило, обеспечивается некоторой эвристикой. Исходя из интуитивных соображений, постулируются показатели

отдельных уровней либо фиксируется конечный образ системы, а эффективность рассчитывается по критерию минимума привлекаемых сил и средств. При этом процедура оценки либо теряет смысл, так как упускается главная цель – соответствие мероприятий по ОФУ объектов замыслу их функционирования, либо оценка становится нечувствительной и неконструктивной, так как не дает информации о способах и путях достижения цели на уровнях оптимизации системы, находящихся ниже постулируемого, что в свою очередь нарушает УКП.

Показателями оптимальности СЗ с учетом ее функционального назначения является уровень надежности, обеспечиваемый СЗ объектов в условиях деструктивных излучений, и критерий эффективности – требуемой вероятности решения задачи функциональной устойчивости объектов в фиксированный интервал времени. Система выполняет функцию полного или частичного предотвращения воздействия на объект. Основной характеристикой СОФУ является вероятность предотвращения ущерба  $P_{D_{\text{спред}}}$ , наносимого объекту КИИ в указанных условиях [185–187].

Обозначим общий предотвращенный СОФУ ущерб через  $\bar{D}_C$ , а предотвращенный ущерб за счет реализаций мероприятий по ОФУ –  $\bar{D}_{RS}$ . Сформулируем в общем виде задачу синтеза средств СОФУ объектов КИИ при воздействии ЭМИ: *необходимо выбрать такой вариант построения СОФУ объектов КИИ, который обеспечивает минимизацию наносимого ущерба  $D_C$  в условиях воздействия электромагнитных импульсов при минимальных финансовых затратах  $Exp$  на ее создание. Задача минимизации ущерба  $D_C$  заменяется эквивалентной ей задачей максимального предотвращения ущерба  $\bar{D}_C$  при воздействии ЭМИ при допустимых затратах, выделяемых на создание СОФУ  $Exp_{\text{adm}}$  при фиксированном векторе распределения средств поражения  $\vec{Df}$ . Предотвращенный ущерб в общем виде определяется следующей зависимостью [75]:*

$$\bar{D}_C = F(p_{D_{ij}}; D_C; P_{D_{\text{спред}}}). \quad (5.7)$$



А предотвращенный ущерб за счет реализации мероприятий по ОФУ – зависимость:

$$\overline{D}_{RS} = F(p_{D_{ij}}; D_C; P_{D_C\text{-пред}}) \rightarrow \max. \quad (5.8)$$

Exp<sub>adm</sub> → min

Ущерб  $D_C$  может определяться в абсолютных единицах: экономических потерях при катастрофических отказах элементов объектов (СВТ), временных затратах и объеме уничтоженной или «испорченной» информации и т. д.

Практически оценить ущерб весьма затруднительно, особенно на ранних этапах проектирования СЗИ, поэтому целесообразно вместо *абсолютного ущерба* использовать *относительный ущерб*, представляющий степень опасности электромагнитных излучений для объектов. Степень опасности может быть определена экспертным путем в предположении, что угроза применения деструктивных воздействий по объекту составляют полную группу событий [182]:

$$0 \leq D_C \leq 1; \sum_{\forall ij=1}^n D_{ij} = 1. \quad (5.9)$$

Задача синтеза и построения СОФУ объектов представляет собой нахождение оптимального варианта при поиске равновесия в смешанных стратегиях, применяемых в теории игр [178–181, 183, 184].

Для дальнейшего анализа введем обозначения: *смешанная стратегия*  $P_i$  игрока  $i$  ( $i = 1, \dots, m$ ) в конечной бескоалиционной игре, т. е. полный набор вероятностей применения его чистых стратегий, образующих полную группу событий:

$$P_i = \{p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{i, n_i}\}, \quad \sum_{j=1}^n p_{ij} = 1, \quad p_{ij} \geq 0, \quad j = 1, \dots, n_i. \quad (5.10)$$

Стратегия  $p_i$  будет представлять возможность достижения максимума предотвращенного ущерба  $\overline{D}_{RS_i}$ . Множество смешанных стратегий  $S_i$  игрока

$i$  есть симплекс  $\sum_{m_i}$ , при этом смешанная стратегия  $e_j \in S_i$  игрока  $i$  соответствует его  $j$  чистой стратегии.

Соответственно, *смешанной стратегией*  $Q_j$  игрока  $j$  ( $j = 1, \dots, n$ ) в конечной бескоалиционной игре называется полный набор вероятностей применения его чистых стратегий:

$$q_j = \{q_{j1}, q_{j2}, \dots, q_{jn_i}\}, \quad \sum_{i=1}^n q_{ji} = 1, \quad q_{ji} \geq 0, \quad i = 1, \dots, m_j. \quad (5.11)$$

И так же как в случае с  $p_i$ ,  $q_j$ , она представляет собой возможность достижения минимального расходования допустимых финансовых средств  $Exp_{admj}$ , необходимых для построения СОФУ объектов КИИ. Множество смешанных стратегий  $S_j$  игрока  $j$  есть симплекс  $\sum_{n_j}$ , при этом, смешанная стратегия  $e_j \in S_j$  игрока  $j$  соответствует его  $i$  чистой стратегии.

С учетом «смешанных стратегий» рассмотрим нахождение равновесия в матричной игре, которая задается матрицей  $A$  выигрышей игрока  $i$  размера  $m \times n$ . Применительно к ней стратегия игрока  $i$  обозначается через  $p = (p_1, \dots, p_m)^T$ , а игрока  $j$  – в виде  $q = (q_1, \dots, q_n)^T$ . Единичные векторы  $e_i \in \mathbb{R}_m$  и  $e_j \in \mathbb{R}_n$  – чистые стратегии игроков  $i$  и  $j$ , соответственно.

В смешанной ситуации  $(p, q) \in \sum_m \sum_n$  выигрыш игрока  $i$  определяется по математическому ожиданию его выигрыша:

$$Pr_A(p, q) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n p_i q_j a_{ij} = p^T A q. \quad (5.12)$$

Решением в такой ситуации по *теореме фон Неймана* называют пару смешанных стратегий  $(p^{\text{opt}}, q^{\text{opt}})$ , которая образует седловую точку функции  $\text{Pr}_A(p, q)$ , т. е.:

$$\text{Pr}_A(p, q^{\text{opt}}) \leq E_A(p^{\text{opt}}, q^{\text{opt}}) \leq \text{Pr}_A(p^{\text{opt}}, q), \quad p \in \Sigma_m, \quad q \in \Sigma_n, \quad (5.13)$$

где  $p^{\text{opt}} \in \arg \max_{p \in \Sigma_m} \min_{1 \leq j \leq n} E_A(p, q)$ ,  $q^{\text{opt}} \in \arg \min_{q \in \Sigma_n} \max_{1 \leq j \leq m} \text{Pr}_A(p, q)$  –

оптимальные смешанные стратегии, как решение матричной игры в смешанных стратегиях.

Записи в неравенстве (5.13) по *теореме Нэша* [184] означают, что игрок  $i$  не может увеличить свой выигрыш, переходя от стратегии  $p^{\text{opt}}$  к любой другой своей стратегии, а правые неравенства означают, что игрок  $j$  не может уменьшить свой проигрыш, переходя от стратегии  $q^{\text{opt}}$  к любой другой своей стратегии. Следовательно, седловые точки функции  $E_A(p, q)$  – представляют собой ситуации равновесия в смешанных стратегиях, а число  $v(A) = \max_{p \in \Sigma_m} \min_{1 \leq j \leq n} E_A(p, q) = \min_{q \in \Sigma_n} \max_{1 \leq j \leq m} E_A(p, q)$  – цена матричной игры.

А в соответствии с *теоремой фон Неймана* справедливы следующие равенства:

$$\max_{p \in \Sigma_m} \min_{q \in \Sigma_n} p^T A q = \max_{p \in \Sigma_m} \min_{1 \leq j \leq n} p^T A e_j; \quad (5.14)$$

$$\min_{q \in \Sigma_n} \max_{p \in \Sigma_m} p^T A q = \min_{1 \leq j \leq n} \max_{p \in \Sigma_m} e_j^T A q, \quad (5.15)$$

это говорит о том, что максимум и минимум линейной функции на многограннике достигается в его вершине, а вершинами симплексов  $\Sigma_m$  и  $\Sigma_n$  являются единичные векторы. Из этого следует, что игрок  $i$  найдет свою оптимальную стратегию, решая задачу:

$$\max \{f(p) : p \in \Sigma_m\}, \quad (5.16)$$

а игрок  $j$ , соответственно, решая задачу:

$$\min \{g(q): q \in \Sigma_n \}, \quad (5.17)$$

где  $f(p) = \min_{1 \leq j \leq n} p^T A e_j$  – кусочно-линейная вогнутая функция выигрыша игрока

$i$  при  $p \in \Sigma_m \rightarrow \mathbf{R}$ ;  $g(q) = \max_{1 \leq j \leq m} e_i^T A q$  – кусочно-линейная выпуклая функ-

ция проигрыша игрока  $j$ , при  $q \in \Sigma_n \rightarrow \mathbf{R}$ .

Решение матричной игры в смешанных стратегиях сводится к решению пары двойственных задач линейного программирования [183, 184]: задача (5.26) эквивалентна задаче, в которой в подграфике функции  $f(p)$  ищется точка  $(p^{\text{opt}}, v^{\text{opt}})$  с координатой  $v^{\text{opt}} = f(p^{\text{opt}})$ , а задача (5.27) эквивалентна задаче, в которой в надграфике функции  $g(q)$  ищется точка  $(v^{\text{opt}}, q^{\text{opt}})$  с максимальной координатой  $v^{\text{opt}} = g(q^{\text{opt}})$ .

Алгоритм решения матричной игры предусматривает:

1. Вычисление нижней  $\alpha(A)$  и верхней  $\beta(A)$  чистой цены игры. Если  $\alpha(A) = \beta(A)$ , то достигается ситуация равновесия в чистых стратегиях. В противном случае ( $\alpha(A) < \beta(A)$ ) и переходим к поиску ситуации равновесия в смешанных стратегиях.

2. Если  $\alpha(A) \leq 0$ , а в соответствии с [184, лемма 1.1] нижняя цена игры всегда положительна, т. е.  $\alpha(A) > 0$ , то полагаем, что добавлено к матрице  $A$  число  $a$ , такое что  $a = -\alpha(A) + 1$ , в противном случае полагаем  $a = 0$ . Причем матрицы  $A$  и  $A^a$  эквивалентны. Прибавляем  $a$  ко всем элементам матрицы  $A$ . Решаем любую из двойственных задач ЛП:

$$\begin{aligned}
& \sum_{i=1}^m y_i \rightarrow \min, \\
& \sum_{i=1}^m a_{ij} y_i \geq 1, \quad j = 1, \dots, n, \\
& y_i \geq 0, \quad i = 1, \dots, m
\end{aligned} \tag{5.18}$$

или

$$\begin{aligned}
& \sum_{j=1}^n x_j \rightarrow \max, \\
& \sum_{j=1}^n a_{ij} x_j \leq 1, \quad i = 1, \dots, m, \\
& x_j \geq 0, \quad j = 1, \dots, n,
\end{aligned} \tag{5.19}$$

где  $y_i = \frac{p_i}{v}$ ,  $i = 1, \dots, m$ ;  $x_j = \frac{q_j}{v}$ ,  $j = 1, \dots, n$ , так как  $\frac{1}{v} = \sum_{i=1}^m y_i = \sum_{j=1}^n x_j$ , и нахо-

дим их оптимальные решения:  $x^{\text{opt}}$  и  $y^{\text{opt}}$ .

3. Определение  $\bar{v} = \frac{1}{\sum_{j=1}^n x_j^{\text{opt}}} = \frac{1}{\sum_{i=1}^m y_i^{\text{opt}}}$ , цены игры  $v(\mathbf{A}) = \bar{v} - \mathbf{a}$  и опти-

мальных стратегий игроков  $p^{\text{opt}} = \bar{v} y^{\text{opt}}$  и  $q^{\text{opt}} = \bar{v} x^{\text{opt}}$ .

Наиболее сложным вопросом при оценке предотвращенного ущерба является определение вероятности предотвращенного ущерба в условиях воздействия электромагнитных импульсов  $\bar{P}_{D_c \text{пред}}$  при проектировании СОФУ, выражение (5.21).

5.3. Алгоритм расчета экономического эффекта от внедрения конструкторско-технологического решения по обеспечению функциональной устойчивости объектов критической информационной инфраструктуры при воздействии электромагнитных импульсов

Для оценки экономического эффекта от внедрения конструкторско-технологического решения по ОФУ объектов КИИ при воздействии ЭМИ необходимо произвести выбор того или иного варианта их применения, то есть определить:

- показатели основного функционального эффекта, отражающие все их основные свойства при использовании по назначению;
- финансовые затраты для различных вариантов ОФУ объектов КИИ при воздействии ЭМИ.

В качестве объекта КИИ, потенциально подвергающегося воздействию ЭМИ, была выбрана типовая автоматизированная система управления (АСУ), представленная на рисунке 1.4, расположенная в типовом здании, которое проектировалось без учёта возможности воздействия ЭМИ.

Площадь помещения (объекта КИИ), в котором размещаются СВТ, составляет примерно 420 м<sup>4</sup>. Согласно таблице 5.1, стоимость аппаратно-программного комплекса (АПК) АСУ составляет 2 094 330 руб. Ущерб от воздействия ЭМИ, будем в данном случае рассматривать только с учётом ущерба, понесённого от катастрофического и функционального поражения АПК АСУ. При этом суммарный ущерб составит  $D_C(Att_k) = 2\,094\,330$  руб. Для расчета финансовых затрат внедрения конструкторско-технологического решения необходимо ввести квалификационные признаки, соответствующие мероприятиям по ОФУ, которые подразделяются на следующие виды [189–192]:

- внешняя отделка типового здания радиопоглощающими полимерными композиционными материалами, с коэффициентом экранирования, обеспечивающим требуемый уровень функциональной устойчивости объекта при воздействии ЭМИ;
- внутренняя отделка типового здания металлизированными сетками и покрытиями такой же площади;
- установка в здание модульных экранирующих конструкций (МЭК) сварного типа;
- многослойное экранирование корпуса средств ЭВТ.

Таблица 5.1 – Стоимость аппаратно-программного комплекса АСУ

№ п/п	Название	Кол-во	Цена за 1 шт., руб.	Итого, руб.
1	ПЭВМ в ОЛВС + АРМ Интернет HP 3400 Pro MT	6	29 953	179 718
2	ПЭВМ в ЗЛВС HP 7300 EliteMT	10	40 406	404 060
3	Монитор VE258Q компании ASUS	16	10 700	171 200
4	Ноутбук Hewlett-Packard Pavilion dv7-6b54er	5	40 027	200 135
5	ИБП типа UPS 1000VA Smart APC <SUA1000I> USB	19	12 519	237 861
6	Сервер ЛВС 1 – вычислительная станция HP ProLiant DL2 170h G6	1	125 000	125 000
7	Сервер ЛВС 1 – вычислительная станция HP ProLiant DL4 170h G6	2	223 000	446 000
8	Сетевой принтер (HP COLOR LaserJet Enterprise 500 M551dn)	1	32 710	32 710
9	МФУ (HP COLOR LaserJet Pro M275)	15	14 592	218 880
10	Сетевой принтер HP LaserJet 5200TN	1	78 766	78 766
<b>Стоимость аппаратного комплекса</b>				<b>2 094 330</b>

Коэффициент экранирования, достигаемый при внешней отделке типового здания радиопоглощающими полимерными композиционными материалами с учетом материалов, а также установкой в здание МЭК различного типа, составляет  $\eta_{\text{МКАЭЕ}(H)} = 110 - 125$  дБ. Многослойная структура *полимер-металл-полимер*, экранирующая воздействие ЭМИ, обеспечивает коэффициент экранирования  $\eta_{\text{МСЭЕ}(H)} = 108 - 123$  дБ.

Обоснование электрофизических свойств различных слоев экрана с помощью разработанного методического аппарата заключается либо в формировании их при разработке новых материалов, либо в выборе из перечня существующих по критерию «коэффициент экранирования – стоимость».

Фрагмент такой оценки для второго случая представлен в таблице 5.2.

Результаты натурного эксперимента по оценке разрушающего воздействия мощного электромагнитного импульса на однослойные и многослойные структуры представлены на рисунках 5.7 и 5.8.



Рисунок 5.7 – Пробой экранирующего слоя РППКМ при воздействии ЭМИ

$$P_{\text{эми}} = 6 \text{ МВт}, N_A = 30 \text{ м.}$$



Рисунок 5.8 – Результат воздействия ЭМИ по многослойной структуре

$$P_{\text{эми}} = 6 \text{ МВт}, N_A = 30 \text{ м.}$$

Таким образом, применение рассмотренных видов электромагнитного экранирования обеспечивает одинаковый экранирующий эффект.

Произведем расчет экономического эффекта от мероприятий, направленных на ОФУ объектов КИИ в условиях воздействия ЭМИ, в соответствии с предложенной квалификацией.

Таблица 5.2 – Перечень радиопоглощающих композиционных материалов для обоснования ЭФС при разработке многослойной структуры по критерию «коэффициент экранирования–стоимость»

№ п/п	Наименование композиционного материала	Толщина покрытия, мм	Частотный диапазон, ГГц	Диэлектр. проницаемость $\epsilon$	Удельное сопротивление $\sigma$ , Ом·см	Коэф. экр-я, дБ	Цена руб/кг
1	Apyral AM1	0,6100	0,1–10	4,5	$10^{13}$ – $10^{14}$	48	47,5.
2	Aromox 4DW970	0,4170	0,1–10	2,5–3	$10^{15}$ – $10^{16}$	55	90,0.
3	Aromox MCD-W	0,3450	0,1–10	2–2,5	$10^{13}$ – $10^{14}$	35	75,0.
4	Atlac 590	0,3450	0,1–10	5–6	$10^{10}$ – $10^{11}$	58	190,0.
5	Berol 226	0,0540	0,1–10	2,4	$10^{16}$	28	137,0
6	Epikote 1001	0,0950	0,1–10	3,5–4,5	$10^{13}$	55	123,0.
.....							
100	Epikote 816	0,1002	0,1–10	2–2,3	$3 \cdot 10^{18}$	55	125, 0.
101	Epikote 828	0,1020	0,1–10	3,5	$10^{13}$	35	125,0.
102	Luperox K1	0,1022	0,1–10	2,4–2,6	$10^{17}$ – $10^{19}$	58	170,0.
103	Synolite 0564-X1	0,0510	0,1–10	3	$10^{16}$	35	117,0.
.....							
800	Multistar ES-22-6	0,0305	0,1–10	5,7–7	$10^{16}$	28	96,0
801	Трилон Б	0,4546	0,1–10	4–16	$10^{14}$ – $10^{15}$	55	73,0
802	NEOGEL 8373	0,4689	0,1–10	2,8	$10^{11}$	55	96,74



803	ES 22-6-300	0,4256	0,1–10	4,5–4,7	$10^{15}$ – $10^{16}$	36	90,8
-----	-------------	--------	--------	---------	-----------------------	----	------

*Внешняя отделка типового здания стационарного объекта КИИ*

В качестве материала, которым предполагается внешняя отделка здания, рекомендуется материал типа *SISALKRAFT* фирмы *Sisalkraft. Ltd.*

С учетом стоимости материалов (экранирующих металлизированных сеток *AARONIA 2000+*, *SISALKRAFT*), а также расходов, связанных с сопровождением проекта по внутренней или внешней отделке объекта площадью 420 м<sup>2</sup> (составление договора, сметы, проектной документации, монтажные работы и т.д.) по данным фирмы [www.techline-online.ru](http://www.techline-online.ru), составляет 580 000 руб. [189, 190–193].

Установка цельносварных и сборно-разборных МЭК для размещения указанного в таблице 5.1 оборудования по данным, предоставленным фирмой ООО «НТЦ Фарадей» (Санкт-Петербург), составляет 814 000 руб.

Для расчета экономических затрат, связанных с многослойным покрытием корпуса экрана, необходимы данные о стоимости радиопоглощающих полимерных композиционных материалов, которые будут наноситься на корпус средств ЭВТ с внешней и внутренней сторон. В таблице 5.3 представлены данные о стоимости материалов, необходимых для производства РППКМ, предоставленные ООО НПП «Спецоборудование», г. Ижевск. Из таблицы 5.3 видно, что наиболее подходящим для многослойного экранирования материалом с использованием технологии напыления является полимерный композит *NEOGELVE 8393* (Голландия) и матрица *NEOGELNPG 8373-1-0052* со структурой на основе дифракционных решеток Френеля. Площадь корпуса типового средств ЭВТ с учетом всех сторон равна 0,7 м<sup>4</sup>. При нанесении РППКМ с внешней и внутренней сторон корпуса экрана площадь удваивается и составляет 1,4 м<sup>4</sup>. Стоимость многослойного экранирования с учетом стоимости изготовления и нанесения РППКМ на корпус средств ЭВТ составляет 3577 р/м<sup>4</sup>.

Таблица 5.3 – Стоимость материалов, необходимых для производства РППКМ

№	Марка	Основное назначение	Цена,
---	-------	---------------------	-------

п/п			руб / кг
Полимерный композит (армированный пластик)			
1	NEOMOULD 1982-W-1 (Голландия)	Смола для изготовления матриц	192,82
2	NEOGELVE 8393 (Голландия)	Гелькоат для изготовления матриц	337,36
Полимерная связующая матрица			
3	NEOGEL NPG 8373-1-0052 (Голландия)	Гелькоат, предускорен, на основе неопентилгликоля, для нанесения формованием реактопластов, прозрачный	196,74
4	ES 22-6-300 (Словакия)	Стекломат, эмульсия	91,9
5	ES 22-6-450 (Словакия)	Стекломат, эмульсия	90,8
6	APYRAL 60VS1(Германия)	Гидроокись алюминия	93,6
7	APYRAL 40CD (Германия)	Гидроокись алюминия	47,5

В итоге, стоимость мероприятий при многослойном экранировании средств ЭВТ в составе АСУ при воздействии ЭМИ будет находиться в пределах 271 852 руб. Внутренняя отделка здания такой же площади металлизированными сетками и покрытиями с учетом усредненной стоимости в соответствии с данными, представленными «23 ГМПИ – филиале АО «31 ГПИСС», находится в пределах 580 000 руб.

Используя полученные данные, составим платежную матрицу с целью решения оптимизационной задачи в смешанных стратегиях [78, 183 –185,193].

Для уменьшения размерности этой матрицы обозначим цены в платежной матрице следующим образом: 0,58 будет соответствовать 580 000 руб., 0,272 – 271 852 руб., 0,814 – 814 000 руб. и 2,094 – 2 094 330 руб. Обозначим следующие стратегии: стратегии игрока «А» – стратегия «защиты», стратегия игрока «В» – стратегия «нападения». Таким образом, «матричная игра» будет задана платежной матрицей:

Стратегии игрока «А»	Стратегии игрока «В»			
	$B_1$	$B_2$	$B_3$	$B_4$
$A_1$	0,272	0,814	2,094	0,58
$A_2$	0,814	0,272	0,58	2,094
$A_3$	0,58	2,094	0,272	0,814
$A_4$	2,094	0,58	0,814	0,272

Требуется найти решение «матричной игры», а именно:  
– верхнюю, нижнюю и чистую цену игры;

– указать оптимальные стратегии игроков.

**Шаг 1. Определение нижней цены игры –  $\alpha$ .**

Нижняя цена игры  $\alpha$  – это максимальный выигрыш, который мы можем гарантировать себе, в игре против противника, если на протяжении всей игры будем использовать одну и только одну стратегию (такая стратегия называется «чистой») [183–185]. Найдем в каждой строке платежной матрицы *минимальный* элемент и запишем его в дополнительный столбец. Найдем *максимальный* элемент дополнительного столбца, это и будет нижняя цена игры.

	Стратегии игрока «В»				
Стратегии игрока «А»	$B_1$	$B_2$	$B_3$	$B_4$	$\alpha = \min(A_i)$
$A_1$	0,272	0,814	2,094	0,58	0,272
$A_2$	0,814	0,272	0,58	2,094	0,272
$A_3$	0,58	2,094	0,272	0,814	0,272
$A_4$	2,094	0,58	0,814	0,272	0,272

В нижняя цена игры равна:  $\alpha = 0,272$ , и для того чтобы гарантировать выигрыш не хуже чем **0,272**, необходимо придерживаться стратегии  $A_1$

**Шаг 2: Определение верхней цены игры –  $\beta$**

Верхняя цена игры  $\beta$  – это минимальный проигрыш, который может гарантировать себе игрок «В», в игре против своего противника, если на протяжении всей игры он будет использовать одну и только одну стратегию.

Найдем в каждом столбце платежной матрицы *максимальный* элемент и запишем его в дополнительную строку снизу. Затем найдем *минимальный* элемент дополнительной строки (в нашем случае таких элементов 2, они отмечены плюсами), это и будет верхняя цена игры.

	Стратегии игрока «В»				
Стратегии игрока «А»	$B_1$	$B_2$	$B_3$	$B_4$	$\alpha = \min(A_i)$
$A_1$	0,272	0,814	2,094	0,58	0,272
$A_2$	0,814	0,272	0,58	2,094	0,272
$A_3$	0,58	2,094	0,272	0,814	0,272

$A_4$	2,094	0,58	0,814	0,272	0,272
$\beta = \max(B_j)$	2,094	2,094	2,094	2,094	

В итоге, верхняя цена игры  $\beta = 2,094$ , и чтобы гарантировать себе проигрыш не хуже чем 2,094 противник (игрок «B») должен придерживаться одной из стратегий  $B_1, B_2$

**Шаг 4.** Сравнение нижней и верхней цены игры.

В данной задаче  $\alpha \neq \beta$ , и цена игры находится в пределах  $0,272 \leq v \leq 2,094$ , т.е. платежная матрица не содержит седловой точки. Это значит, что игра не имеет решения в чистых минимаксных стратегиях, но она всегда имеет решение в смешанных стратегиях.

*Смешанная стратегия*, это чередуемые случайным образом чистые стратегии, с определенными вероятностями (частотами). Обозначим смешанную стратегию игрока «A»:

$$S_A^* = \begin{vmatrix} A_1 & A_2 & A_3 & A_4 \\ p_1 & p_2 & p_3 & p_4 \end{vmatrix}, \quad (5.20)$$

где  $A_1, A_2, A_3, A_4$  – стратегии игрока «A»;  $p_1 - p_4$  – соответственно вероятности, с которыми эти стратегии применяются, причем  $p_1 + p_2 + p_3 + p_4 = 1$ .

Запишем систему уравнений для игрока «A»:

$$0,272p_1 + 0,814p_2 + 2,094p_3 + 0,58p_4 = v;$$

$$0,814p_1 + 0,272p_2 + 0,58p_3 + 2,094p_4 = v;$$

$$0,58p_1 + 2,094p_2 + 0,272p_3 + 0,814p_4 = v;$$

$$2,094p_1 + 0,58p_2 + 0,814p_3 + 0,272p_4 = v;$$

Аналогично смешанную стратегию игрока «B» будем обозначать:

$$S_B^* = \begin{vmatrix} B_1 & B_2 & B_3 & B_4 \\ q_1 & q_2 & q_3 & q_4 \end{vmatrix} \quad (5.21)$$

где  $B_1, B_2, B_3, B_4$  – стратегии игрока «B», а  $q_1, q_2, q_3, q_4$  – соответственно вероятности, с которыми эти стратегии применяются, причем  $q_1 + q_2 + q_3 + q_4 = 1$ .

Запишем систему уравнений для игрока «В»:

$$0,272q_1 + 0,814q_2 + 0,58q_3 + 2,094q_4 = v;$$

$$0,814q_1 + 0,272q_2 + 2,094q_3 + 0,58q_4 = v;$$

$$2,094q_1 + 0,58q_2 + 0,272q_3 + 0,814q_4 = v;$$

$$0,58q_1 + 2,094q_2 + 0,814q_3 + 0,272q_4 = v.$$

Оптимальная смешанная стратегия для игрока «А» та, которая обеспечивает ему максимальный выигрыш. Соответственно для «В» - минимальный проигрыш. Обозначаются эти стратегии  $S_A^*$  и  $S_B^*$  соответственно. Пара оптимальных стратегий образует решение игры. В общем случае в оптимальную стратегию игрока могут входить не все исходные стратегии, а только некоторые из них. Такие стратегии называются активными стратегиями.

**Шаг 4. Поиск оптимальной стратегии игрока «А».**

Из теории игр известно, что если игрок «А» в своей смешанной стратегии использует не более чем  $N$  активных стратегий, то и оптимальная стратегия игрока «В» состоит не более чем из  $N$  активных стратегий. В нашем случае у обоих игроков одинаковое число стратегий, поэтому можно предположить, что они для обеих сторон, являются активными. Игры такого класса называются полностью усредненными. Из теории игр известно, что если игрок «А» использует свою оптимальную стратегию, а игрок «В» остается в рамках своих активных стратегий, то средний выигрыш остается неизменным и равным цене игры  $v$  независимо от того как игрок «В» использует свои активные стратегии. В нашем случае обе стратегии активные, иначе игра бы имела решение в чистых стратегиях. Поэтому если предположить, что игрок «А» будет пользоваться чистой стратегией  $A_1$ , то средний выигрыш  $v$  составит:

$$k_{11}p_1 + k_{21}p_2 + k_{31}p_3 + k_{41}p_4 = v, \quad (5.22)$$

где:  $k_{ij}$  – элементы платежной матрицы.

Аналогичные уравнения можно составить и для всех остальных стратегий игрока «В», предполагая что он будет пользоваться каждой из них в чистом виде:

$$\begin{aligned}
 k_{12}p_1 + k_{22}p_2 + k_{32}p_3 + k_{42}p_4 &= v; \\
 k_{13}p_1 + k_{23}p_2 + k_{33}p_3 + k_{43}p_4 &= v; \\
 k_{14}p_1 + k_{24}p_2 + k_{34}p_3 + k_{44}p_4 &= v.
 \end{aligned}
 \tag{5.23}$$

С учётом того, что  $p_1 + p_2 + p_3 + p_4 = 1$

В итоге мы имеем 5 уравнений, содержащих 5 неизвестных, если после решения системы из данных уравнений мы получим осмысленные значения вероятностей (в диапазоне от 0 до 1), то предположение о том, что данная задача является полностью усредненной верно, и оптимальная стратегия для «А» будет найдена.

Переносим переменную  $V$  влево от знака равенства и решая данную систему из уравнений методом Брауна-Робинссона, можно сформировать расширенную матрицу:

$$\left| \begin{array}{ccccc}
 0,272 & 0,814 & 0,58 & 2,094 & -1 \\
 0,814 & 0,272 & 2,094 & 0,58 & -1 \\
 2,094 & 0,58 & 0,272 & 0,814 & -1 \\
 0,58 & 2,094 & 0,814 & 0,272 & -1
 \end{array} \right|$$

и затем, применяя ряд итерации, получаем окончательную модифицированную матрицу:

$$\left| \begin{array}{cccccc}
 1 & 2,9926 & 0 & 0 & 0 & 0,9982 \\
 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0,25 \\
 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0,25 \\
 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0,25 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0,94
 \end{array} \right|$$

Вычтем из строки 1 строку 2 умноженную на  $a_{1,2} = 2,9925$ .

Тогда вычитаемая строка:

$$\left| \begin{array}{cccccc} 0 & 2,9926 & 0 & 0 & 0 & 0,74816 \end{array} \right|$$

Снова получаем модифицированную матрицу:

$$\left| \begin{array}{cccccc} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,25 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0,25 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0,25 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0,25 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0,94 \end{array} \right|$$

Из последней матрицы выпишем значения всех найденных переменных, которые составляют  $p_1 = p_2 = p_3 = p_4 = 0,25$ ;  $v = 0,94$ .

Найденные значения вероятностей не противоречат гипотезе о том, что данная задача является полностью усредненной.

**Шаг 5. Поиск оптимальной стратегии игрока «В».**

Рассуждая аналогично относительно игрока «В», можно сказать, что если он использует оптимальную стратегию, а игрок «А» остается в рамках своих активных стратегий, то средний выигрыш остается неизменным и равным цене игры  $v$  независимо от того, как игрок «А» использует свои активные стратегии. Это позволяет составить следующие уравнения:

$$\begin{aligned} k_{11}q_1 + k_{21}q_2 + k_{31}q_3 + k_{41}q_4 &= v; \\ k_{12}q_1 + k_{22}q_2 + k_{32}q_3 + k_{42}q_4 &= v; \\ k_{13}q_1 + k_{23}q_2 + k_{33}q_3 + k_{43}q_4 &= v; \\ k_{14}q_1 + k_{24}q_2 + k_{34}q_3 + k_{44}q_4 &= v. \end{aligned} \tag{5.24}$$

Аналогично стратегии игрока «А», переносим переменную  $V$  влево от знака равенства и решая систему уравнений методом Браун-Робинсона формируем расширенную матрицу:

$$\begin{vmatrix} 0,272 & 0,814 & 2,094 & 0,58 & 0,94 \\ 0,814 & 0,272 & 0,58 & 2,094 & 0,94 \\ 0,58 & 2,094 & 0,272 & 0,814 & 0,94 \\ 2,094 & 0,58 & 0,814 & 0,272 & 0,94 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{vmatrix}$$

и снова применяя ряд итерации, получаем окончательную модифицированную матрицу:

$$\begin{vmatrix} 1 & 2,9926 & 7,6985 & 2,1324 & 3,4559 \\ -0 & 1 & 2,628 & -0,1656 & 0,8656 \\ 0 & 0 & 1 & 0,0708 & 0,2677 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0,25 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 5,55E-17 \end{vmatrix}$$

Из этой матрицы выпишем все найденные переменные  $q_1 = 3,4559$ ,  $q_2 = 0,8656$ ,  $q_3 = 0,2677$ ,  $q_4 = 0,25$ . Все найденные вероятности имеют смысловые значения, то данная задача действительно является полностью усредненной. Таким образом:

– оптимальная стратегия игрока «А»:  $S_A^* = \begin{vmatrix} A_1 & A_2 & A_3 & A_4 \\ 0,25 & 0,25 & 0,25 & 0,25 \end{vmatrix};$

– оптимальная стратегия игрока «В»:  $S_B^* = \begin{vmatrix} B_1 & B_2 & B_3 & B_4 \\ 3,4559 & 0,8656 & 0,2677 & 0,25 \end{vmatrix};$

– нижняя цена игры –  $\alpha = 0,272$ ; верхняя цена игры –  $\beta = 2,094$ ;

– цена игры  $v = 0,94$ .



Полученное решение оптимизационной задачи означает, что для организации СОФУ объектов КИИ при воздействии ЭМИ необходимы финансовые затраты не более 940 000 руб. Дальнейшим шагом будет определение экономической эффективности от внедрения мероприятий по ОФУ объектов КИИ при воздействии ЭМИ. Для этого можно использовать нормативный документ МДС 21-4.2001 «Методика и примеры технико-экономического обоснования противопожарных мероприятий к СНиП 2101-97» [194], позволяющий рассчитать экономическую эффективность внедрения СОФУ практически для любого объекта.

Согласно этому нормативному документу экономическая эффективность мероприятий по ОФУ объектов определяется сопоставлением притоков и оттоков денежных средств, связанных с реализацией принимаемого решения по обеспечению данных мероприятий.

Притоком денежных средств является их получение за счёт предотвращения материальных потерь от электронной атаки, рассчитываемых как ожидаемые материальные потери от воздействия ЭМИ при выполнении проектируемых мероприятий и сравнения их с ожидаемыми материальными потерями при его отсутствии. Оттоком денежных средств являются затраты, связанные с выполнением мероприятия по противодействию деструктивным излучениям.

В соответствии с [194] интегральный экономический эффект (ИЭЭ) рассчитывается по формуле:

$$\mathcal{E}_H = K_{RSK} \times \int_{t=0}^T \left[ (|M_B(t) - M_{II}(t)| - |P_B(t) - P_{II}(t)|) \times \frac{1}{(1 + K_{dc})} - (K_B(t) - K_{II}(t)) \right] dt, \quad (5.25)$$

где  $K_{RSK}$  – коэффициент риска;  $M_B(t)$  и  $M_{II}(t)$  – расчетные материальные потери;  $K_B(t)$  и  $K_{II}(t)$  – капитальные вложения;  $P_B(t)$  и  $P_{II}(t)$  – эксплуатационные расходы на осуществление мероприятий по ОФУ от воздействия излучений в базовом и планируемом вариантах, руб./год, соответственно;  $K_{dc}$  – коэффициент дисконта. На основе представленного алгоритма реализован программный модуль расчета экономического эффекта от внедрения конструкторско-технологического решения по ОФУ объектов КИИ при воздействии ЭМИ.

Выражение (5.25) можно также использовать для расчета ИЭЭ с использованием различных вариантов формирования мероприятий ОФУ объектов КИИ при воздействии ЭМИ.

Данные положения нашли свое отражение в программном модуле «Программа для оценки экономического эффекта «MatrixNesh», на который получено Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ [195]. Внешний вид интерфейса и блок-схема алгоритма и программного модуля представлены на рисунках 5.9 и 5.10, соответственно.

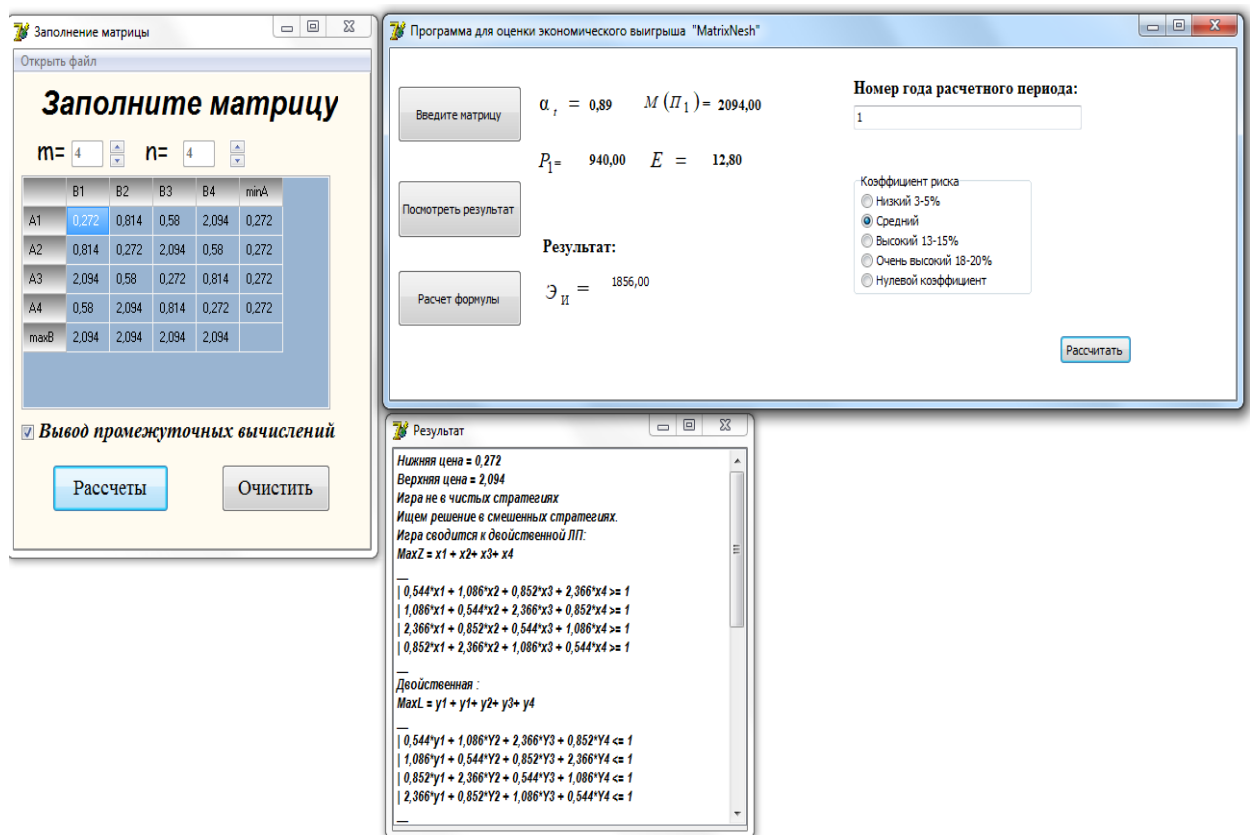


Рисунок 5.10. – Внешний вид интерфейса «Программа для оценки экономического эффекта «MatrixNesh»

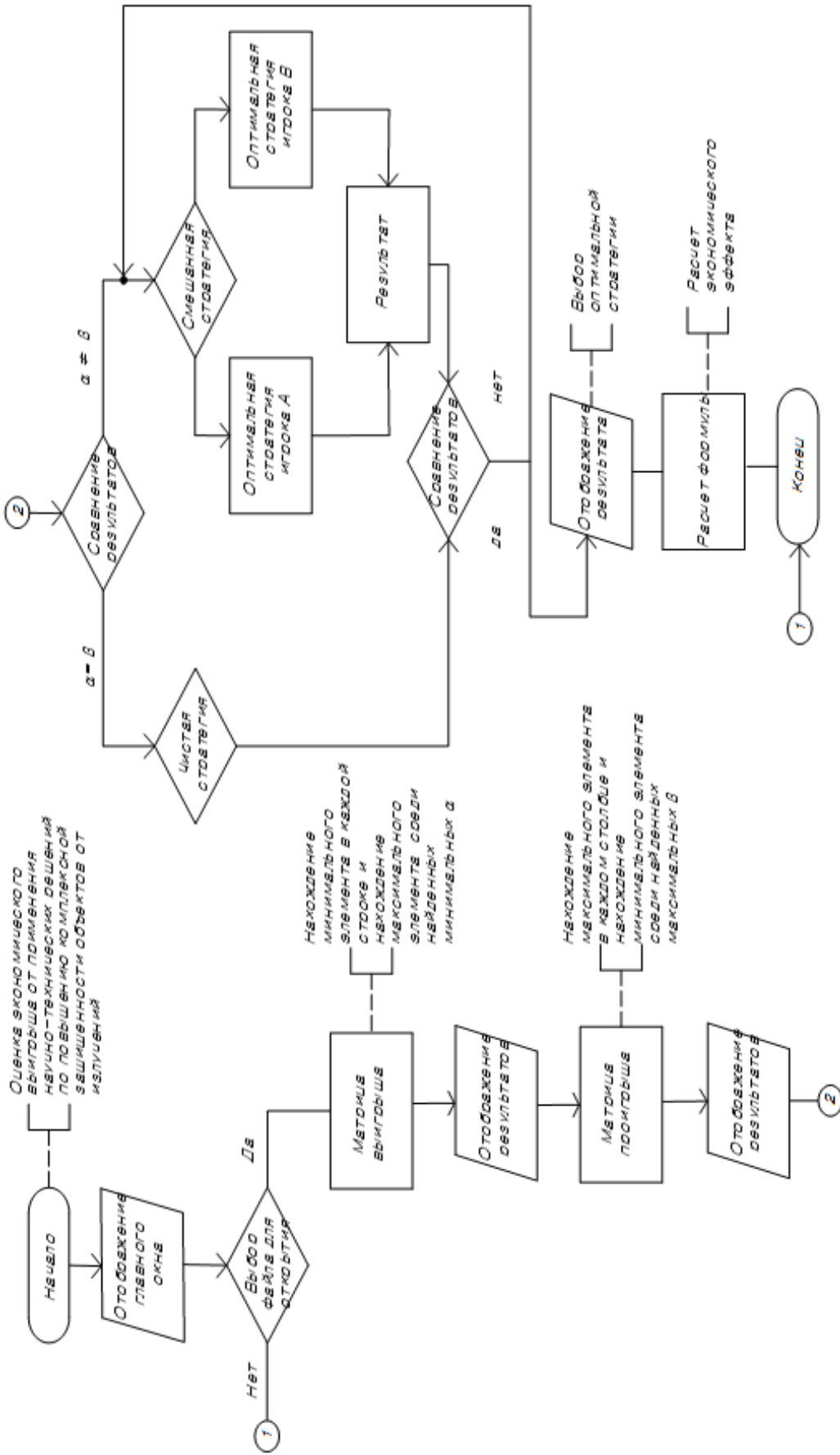


Рисунок 5.10 – Блок-схема алгоритма расчёта экономического эффекта от внедрения конструкторско-технологического решения по обеспечению функциональной устойчивости объектов КИИ при воздействии ЭМИ «Программа для оценки экономического эффекта «MatrixNesh»

График оценки экономического эффекта от внедрения конструктивно-технологического решения представлен на рисунке 5.11.

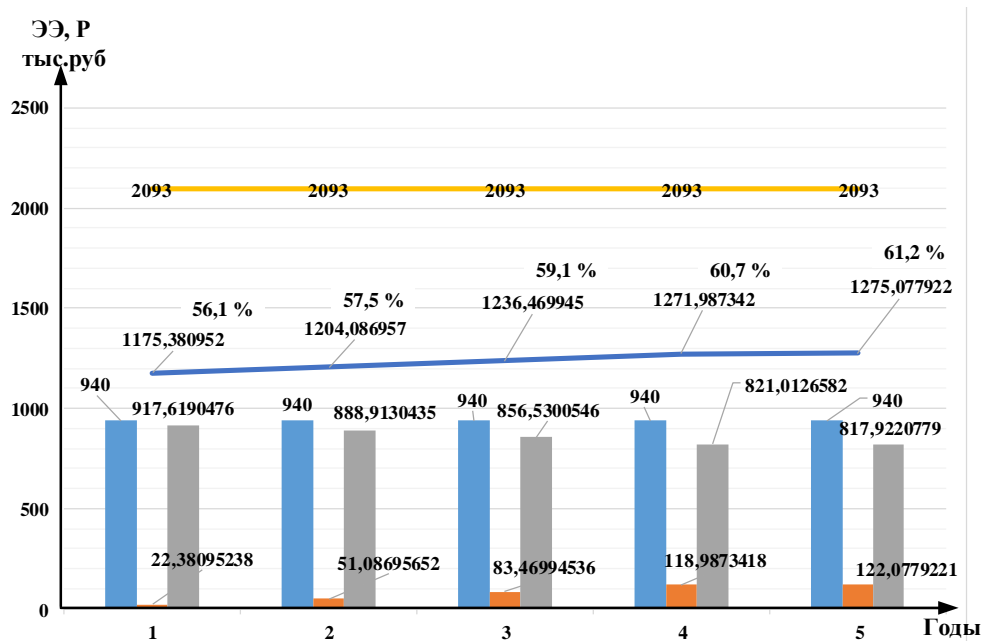


Рисунок 5.11 – График оценки экономического эффекта от внедрения конструктивно-технологического решения

Объединенная структура программных модулей расчета экономического эффекта от внедрения конструкторско-технологического решения по ОФУ объектов КИИ при воздействии ЭМИ и реализации интеллектуальной технологии оптимизации и стабилизации систем на основе Алгоритма Дейкстры «*ITOSS*» представлена на рисунке 5.12.

*Оценка алгоритма на устойчивость, условие сходимости и вычислительную сложность*

Оценка алгоритма на устойчивость и условие сходимости проведена с помощью программы для ЭВМ, исходный код которого представлен в приложении Г. Внешний вид интерфейса программы для проверки на устойчивость и сходимость алгоритма численного метода оптимизации экономических затрат представлен на рисунке 5.13 [198].

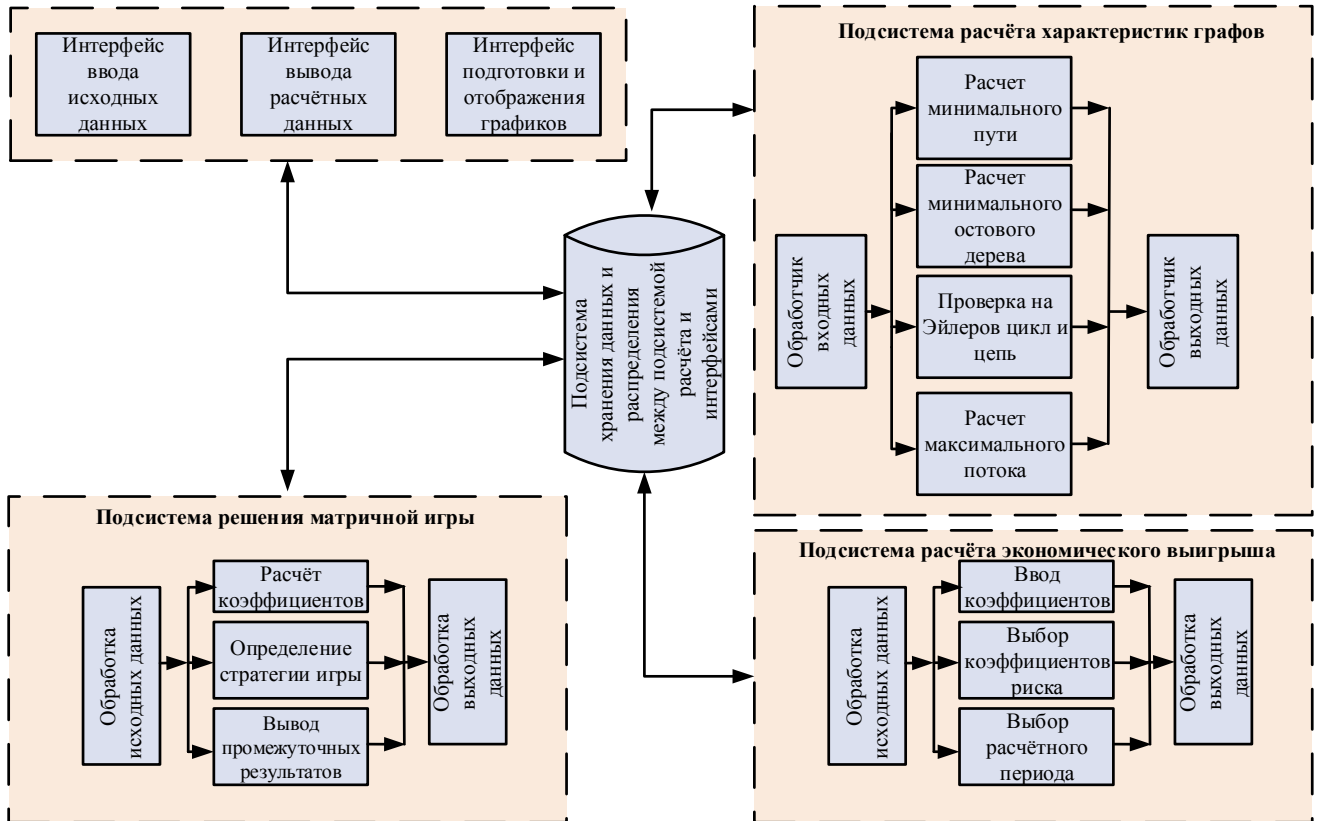


Рисунок 5.12 – Объединенная структура программных модулей расчета экономического эффекта от внедрения конструкторско-технологического решения по обеспечению функциональной устойчивости объектов КИИ при воздействии ЭМИ и реализации интеллектуальной технологии оптимизации и стабилизации систем на основе Алгоритма Дейкстры «*ITOSS*»

### Вычислительная сложность

Оценка вычислительной сложности разработанного численного метода оптимизации экономических затрат определяется Методом Зейделя, для чего по-

требуется  $\frac{m^3}{3} + m^2 - \frac{m}{3}$  умножений и делений:

$$\frac{m^3}{3} + m^2 - \frac{m}{3} = \frac{64}{3} + 16 - \frac{4}{3} = 38,66666(6)$$

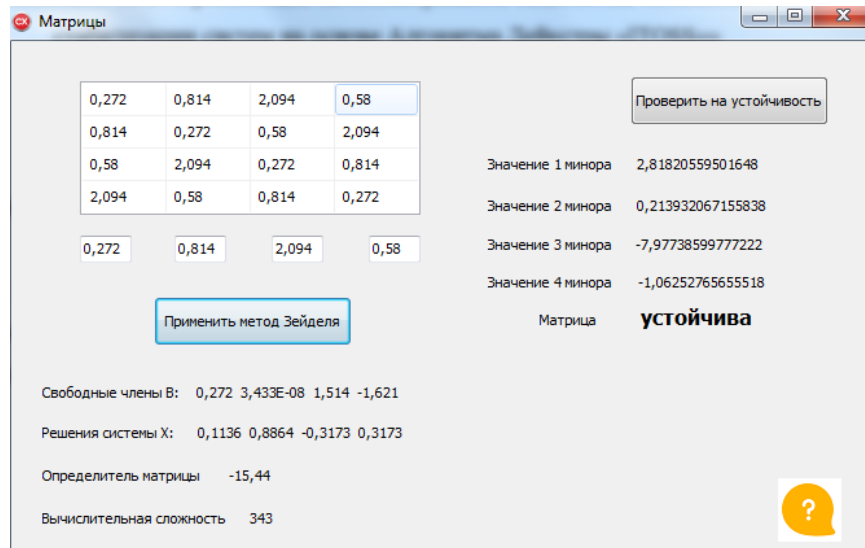
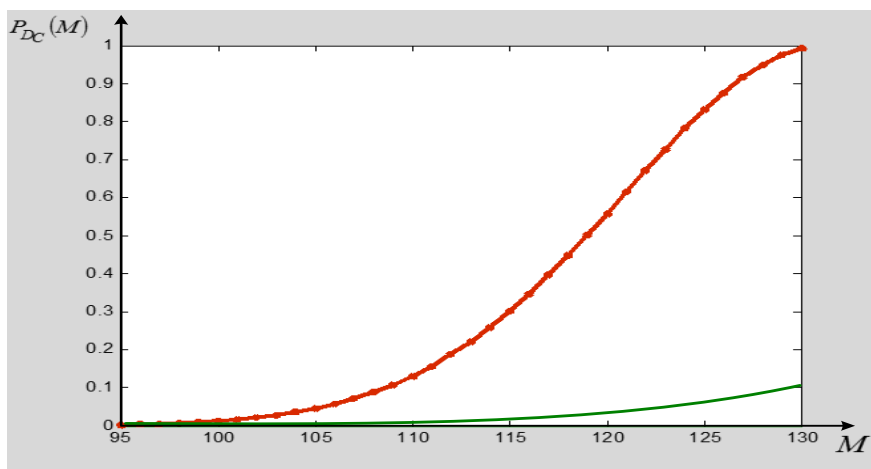


Рисунок 5.13 – Внешний вид интерфейса программы для проверки на устойчивость и сходимость алгоритма численного метода оптимизации экономических затрат

Анализ полученных результатов позволяет утверждать о том, что применение разработанной многослойной экранирующей конструкции приводит к значительному снижению вероятности нанесения ущерба и повышению уровня живучести и помехозащищённости объектов КИИ и функционирующих в них СВТ, о чём свидетельствуют графики распределения вероятностей нанесения ущерба объектам при воздействии ЭМИ, представленные на рисунках 5.14.



— без применения разработанного конструкторского технологического решения (МСЭК)

— с применением разработанного конструкторского технологического решения (МСЭК)

Рисунок 5.14 – Распределение вероятностей нанесения ущерба объектам при воздействии ЭМИ

#### 5.4. Обоснование социально-экономического и хозяйственного значения выполненных исследований в рамках диссертационной работы

Выполненный в диссертации анализ и исследования позволили получить новые решения, согласованные с закономерностями развития систем управления объектами критической информационной инфраструктуры Российской Федерации с комплексным исследованием научных и технических проблем, применяя современные технологии компьютерного имитационного моделирования с целью проверки адекватности разработанной математической модели экранирующей конструкции на основе данных натуральных экспериментов, с возможностью выхода на технологию её производства, что открывает новые возможности для проведения дальнейших исследований в таких направлениях, как применение МКЭ и тензорного анализа с целью совершенствования математической модели экранирующей конструкции, привязки рисков и ущерба к конкретному объекту КИИ. Кроме того, результаты, полученные в данной работе, могут быть использованы в качестве исходных предпосылок для решения важной и актуальной научной проблемы, направленной на разработку теории глобальной устойчивости объектов КИИ при воздействии ЭМИ, что подтверждается актами внедрения, полученными от органов государственной власти, ведущих научных, образовательных учреждений и организаций Российской Федерации, что и послужило основанием для их включения в проект государственной программы вооружения на период 2018-2025 годов.

В акте внедрения АО «НИИ «РУБИН» (г. Санкт-Петербург») указано, что результаты диссертационных исследований, в части, касающейся вопросов разработки научно-методологического аппарата моделирования функциональной устойчивости объектов критической информационной инфраструктуры при воздействии электромагнитных импульсов, использованы при проведении ОКР «Утилита» (Научно-технический отчет инв. 6152, инв. 6154): разработанный комплекс проблемно-ориентированных программ на основе разработанных математических методов моделирования, позволяет обосновать конструктивно-

технологическое решение по построению экранирующей конструкции СВТ, проводить оценку ущерба, живучести и помехозащищённости и в последующем создаёт предпосылки для формирования численного метода оптимизации экономических затрат, предусматривающий максимизацию предотвращаемого ущерба объектов критической информационной инфраструктуры (КИИ) при воздействии электромагнитных импульсов, что обеспечивает значительный экономический эффект от средств, необходимых для формирования системы обеспечения функциональной устойчивости объектов КИИ в условиях данных воздействий.

В акте внедрения АО «31 ГПИСС» указано, что в диссертационной работе решена актуальная научная проблема, направленная на разработку математических моделей адекватного отображения процессов обеспечения функциональной устойчивости объектов критической информационной инфраструктуры (КИИ) при воздействии электромагнитных импульсов (ЭМИ) в условиях изменения электромагнитной обстановки. Проведенные на экспериментальной площадке «Испытательного центра электромагнитных и механических воздействий «23 ГМПИ - филиала АО «31 ГПИСС» натурные испытания (эксперимент) (протокол №11/15-2017 от 22.03.2017) средства ЭВТ (ЭВМ Intel Celeron E3200) показали, что разработанное автором на основе математического моделирования экранирующей конструкции конструктивно-технологическое решение в виде многослойной экранирующей конструкции, выполненной по технологии «полимер-металл-полимер» с технологическими неоднородностями в виде запердельных волноводов в форме полых шестиугольных призм, внедрено при разработке технических решений по обеспечению ослабления воздействующих на телекоммуникационное оборудование (ТКО) объектов КИИ электромагнитных полей СВЧ-диапазона различной природы происхождения и невозможности перехвата радиосигналов в процессе настройки ТКО в технологическом зале специального объекта «720/7».

Результаты математического моделирования экранирующей конструкции, проведенного автором в ПСКЭА *ANSOFT HFSS 11.0*, в рамках разработанного комплекса проблемно-ориентированных программ для проведения вычислительного эксперимента и алгоритмов, реализующих математические методы моделирования по обеспечению живучести и помехозащищённости объектов КИИ



при воздействии ЭМИ обеспечили ослабление электромагнитных полей в диапазоне от 0,8 до 10 ГГц, воздействующих на СВТ, обрабатывающих специальную информацию, с погрешностью 14% от экспериментальных данных, полученных в рамках испытаний ЭВМ на соответствие требованиям п. 5.3 «а» ГОСТ РВ 20.39.308-98 (протокол № 11/15-2017 от 22.03.2017).

Использование предложенной автором конструкции электромагнитного экрана позволило добиться требуемого уровня ослабления излучаемых радиосигналов до 120 дБ за пределами технологического зала, при этом затраты на проектирование были сокращены на 60 чел-час, сэкономлено 0,64 т. металла (сталь горячекатаная - СтЗпс) по сравнению с традиционной конструкцией экрана технологического зала.

Разработанные автором математические методы моделирования прогнозной оценки по обеспечению живучести и помехозащищённости при воздействии излучений различной природы происхождения были использованы при выполнении специальных расчетов, выполненных отделом конструкционной защиты от электромагнитных воздействий при расчетно-аналитическом обосновании проектных решений на реконструкцию специального объекта «3165-А».

В акте внедрения ФГУП «НТЦ «ОРИОН» (г. Москва) указано, что методологическая схема математического моделирования обеспечения функциональной устойчивости объектов КИИ при воздействии ЭМИ использованы при разработке научных материалов НИР «Цемент».

В акте внедрения ООО «Славсервис-Связь» (г. Орёл) указано, что результаты диссертационных исследований в части, касающейся вопросов математического моделирования ущерба, наносимого объектам критической информационной инфраструктуры (КИИ), а также живучести и помехозащищённости данных объектов при воздействии электромагнитных импульсов (ЭМИ) с учетом условий их функционирования использованы в рамках разработки «Методики проведения категорирования объектов критической информационной инфраструктуры и составлении рабочих программ по дополнительному профессиональному образованию по направлению «Обеспечение безопасности критических информационных инфраструктур».

В акте внедрения ФГБОУ «Брянский государственный технический университет» (г. Брянск) указано, что результаты диссертационных исследований, в части касающихся разработки метода оптимизации экономических затрат для оценки экономического эффекта по обеспечению функциональной устойчивости объектов КИИ, предусматривающего максимальное предотвращение ущерба при воздействии ЭМИ используются в учебном процессе кафедры «Системы информационной безопасности» в рамках учебной дисциплины «Системы и сети связи»

Выданные акты внедрения и реализации результатов диссертационного исследования указывают на то, что на основании выполненных исследований и разработанных теоретических положений решена актуальная научная проблема, имеющая важное социально-экономическое и хозяйственное значение, что вносит значительный вклад в развитие страны.

### **Выводы по главе 5**

Теоретически обоснован выбор технологии по разработке ОФУ объектов КИИ при воздействии ЭМИ, произведенного на основе интеллектуальной технологии оптимизации и стабилизации систем (*ITOSS*), предполагающей разработку и применение принципиально новых подходов к техническим решениям с учетом того, что в условиях функционирования разрозненные неравновесные компоненты системы либо конкурируют между собой, либо образуют новые соединения, стабилизирующие друг друга, на основании которой произведено обоснование выбора оптимального варианта создания ОФУ объектов КИИ систем с целью максимального предотвращения ущерба при воздействии ЭМИ, позволяющего минимизировать финансовые затраты на её построение и последующую эксплуатацию как системы так и объектов КИИ, что обеспечивает достижение значительного экономического эффекта. Представленный алгоритм расчета экономического эффекта от внедрения конструкторско-технологического решения по ОФУ объектов КИИ при воздействии ЭМИ, реализован в виде программного модуля.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе решена актуальная научная проблема, определенная возможностью и фактами применения мощных электромагнитных импульсов СВЧ-диапазона по объектам критической информационной инфраструктуры Российской Федерации, в рамках которой разработана методология математического моделирования ОФУ объектов КИИ при воздействии ЭМИ, направленная на разрешение системных противоречий в целях реализации принципов функциональной устойчивости данных объектов с учётом динамики электромагнитной обстановки, базирующуюся на комплексном исследовании проблемы, включающим анализ и синтез структур многофункциональных средств обеспечения устойчивости, отличающуюся интегральной оценкой показателей качества их функционирования на основе критериальных требований, предъявляемым к объектам КИИ в условиях деструктивных воздействий.

Актуальность исследуемой проблемы предопределена возможностью и фактами воздействия электромагнитными импульсами по объектам КИИ, средствам связи и компьютерным сетям для дезорганизации управления правительственных и военных систем, экономической инфраструктурой, транспортной сетью и населением что может приводить к нарушению функционирования СВТ, линейного и сетевого оборудования объектов КИИ в результате разрушения, плавления, выгорания металлизации контактных дорожек конструктивных элементов микроэлектронной компонентной базы СВТ. Это приводит к возникновению в электрических цепях ложных сигналов, срабатываний и сбоев, что в конечном итоге не позволит обеспечить непрерывность предоставления информационных услуг потребителям, катастрофическим последствиям и наступлению коллапса во всех сферах жизнедеятельности общества.

В связи с чем главной задачей ОФУ объектов КИИ при воздействии ЭМИ является определение комплекса организационно-технических мер, применение которых позволит гарантировать высокую степень живучести и помехозащищённости электронных систем.

При анализе существующих методов и способов ОФУ установлено, что экранирование является основным методом ОФУ объектов КИИ при воздействии ЭМИ. Однако в настоящее время этот метод применяется неэффективно из-за недостаточного внедрения МСЭК с обоснованием ЭФС применяемых для этого материалов и покрытий, обоснованием формы технологических неоднородностей и их расположением в экранирующей конструкции для обеспечения режима вентиляции и подачи воздуха.

Учитывая необходимость усовершенствования методов и способов ОФУ с учетом специфики электромагнитных импульсов потребовалась разработка математических методов моделирования экранирующей конструкции, обеспечивающей устойчивое функционирование компонентов объектов КИИ, ущерба, наносимого объектам КИИ при воздействии ЭМИ и системы функциональной устойчивости объектов КИИ при воздействии ЭМИ.

Методологическая схема, используемая в процессе решения теоретического аспекта работы, позволила изучить предметную область исследования, а также определить тенденцию развития теории и практики разработки экранирующих конструкций, заключающуюся в переходе от совокупности частных моделей (решений) к комплексным способам, включающим концептуальную (описательную) модель, как системы элементов с заданными на них отношениями и логическими операциями и математическими моделями, отражающие их в аналитической или алгоритмической форме. Стимулом для совершенствования элементов теории ЭМЭ послужила необходимость теоретического обоснования конструкторских решений по применению технологии двойного назначения, что и отражает развитие идеи комплексности решения проблемы построения экранирующих конструкций и использования новых научно-теоретических подходов к анализу их характеристик, которые при определенном технологическом исполнении обеспечат повышение живучести и помехозащищённости объектов КИИ при воздействии ЭМИ.

Анализ, проведенный в рамках исследования, позволил установить, что с точки зрения вычислительной математики наиболее оптимальным способом математического моделирования, рассматриваемым в работе, позволяющего моделировать экранирующие конструкции, выступает метод конечных элементов, рассматривающий минимизацию функционала (потенциала) вариационной задачи на совокупности функций, каждая из которых определена на своей подобласти с приложением тензорного метода, так как в них прослеживаются определенные межэлементные связи при проведении анализа электродинамических процессов и установлены общие закономерности исследования сложных систем путем их разделения на дискретные компоненты и применения для моделирования сложных многослойных с помощью конечных  $LC$ -ячеек, что позволило в конечном итоге создать универсальную среду моделирования и использовать графо-топологический портрет систем и объединить возможности теоретико-множественной топологии (дифференциальных уравнений, теории функций и т. д.) с возможностями комбинаторной топологии (тензорного метода) в единый инженерный метод анализа и расчета сложных систем.

Но, несмотря на это, основная проблема при таком подходе заложена в большом объеме матриц, которые получаются при дискретизации КЭ, а объем оперативной памяти, необходимый для решения трехмерных задач, как правило, огромен и легко достигает уровня нескольких гигабайт, что возможно только с помощью САПР, способной решать задачи трехмерного моделирования с использованием МКЭ являются программные системы конечно-элементного анализа *COMSOL Multiphysics 5.4* и *ANSOFT HFSS 11.0* фирмы *ANSYS*.

Таким образом, математический метод моделирования экранирующей конструкции, базирующийся на учете функционала энергии (потенциала) электромагнитного поля, отличающийся от существующих эффектом обратимости, электрофизических свойств радиопоглощающих полимерных композиционных материалов, формы и расположения технологических неоднородностей в многослойной конструкции, опирается на наиболее перспективные подходы, производные от которых подразумевают применение аппроксимирующих функций в безразмерных (Гильбертовых) пространствах, а также тензорного представления ЭМП, что позволило получить частотно-селективную структуру, обладающей

тензорными свойствами относительно распределения электромагнитных полей и учета эффекта обратимости электромагнитных экранов, отличающуюся от существующих учетом импедансных свойств электромагнитного поля излучений, многослойности структуры и технологических неоднородностей экранирующей конструкции (п. 1, 3, 5 паспорта научной специальности).

Разработанный математический метод моделирования ущерба, наносимого объектам КИИ при воздействии ЭМИ, базирующийся на иерархическом ранговом подходе, предусматривает определенную степень адекватности реализованных механизмов обеспечения устойчивости существующим в данной среде функционирования рискам, связанным с возможными опасностями относительно объектов КИИ. Данный подход позволил определить перечень возможных сценариев применения воздействий, оценить степень опасности (рисков) их реализации на объекты КИИ в виде ЭМИ, выявить возможные слабые места в СОФУ данных объектов с целью устранения неблагоприятных событий, с последующим определением адекватных воздействию предложений по обеспечению устойчивого функционирования данных объектов, в соответствии с разработанным иерархически ранговым подходом, что позволяет анализировать риск возникновения воздействий с помощью управления рангами объектов КИИ. Представленные процедуры позволяют получить полную (в рамках построенной модели) картину рисков неблагоприятных ситуаций для подконтрольного (анализируемого) объекта КИИ, связанных с его функциональной устойчивостью. Данный итерационный процесс продолжается до тех пор, пока значения рисков неблагоприятных событий для моделируемого объекта превышают предельно допустимые границы (п. 1 паспорта научной специальности).

Математический метод моделирования системы обеспечения функциональной устойчивости объектов КИИ при воздействии ЭМИ разработан как система взаимосвязанных частных методов, что позволяет оценивать степень опасности воздействия и вырабатывать в дальнейшем адекватные предложения по улучшению системы ОФУ с одновременным управлением рисками неблагоприятных для объектов КИИ событий на любом из заданных уровней и обнаруживать факт несоответствия цели и вскрывать причины низкой эффективности организуемых мероприятий (п. 1 паспорта научной специальности).

Далее с учётом наличия разработанных элементов теории электромагнитного экранирования, а также математического метода моделирования экранирующей конструкции, обеспечивающей устойчивое функционирование объектов КИИ при воздействии ЭМИ в главе обоснована структура, электрофизические свойств применяемых материалов, форма, количество и расположение технологических неоднородностей экранирующих конструкций средств вычислительной техники объектов. Разработан программный комплекс, позволяющие (й) производить расчет живучести и помехозащищённости объектов в условиях воздействия ЭМИ на основании имеющихся данных по применяемым экранирующим конструкциям (п. 1, 4 паспорта научной специальности).

В результате проведенных экспериментов по оценке живучести и помехозащищённости объектов в условиях воздействия ЭМИ подтверждены результаты математического моделирования экранирующей конструкции с учетом многослойности её структуры и формы технологических неоднородностей, верифицированные в программной системе конечно-элементного анализа *ANSYSHFSS 11.0*. Они показывают, что смоделированные экранирующие конструкции обеспечивают ослабление на 120 дБ воздействующих на СВТ электромагнитных полей СВЧ-диапазона от 0,8 до 10 ГГц, с погрешностью не более 14 % от экспериментальных данных, полученных в рамках «Испытаний ЭВМ на соответствие требованиям п. 4.3, а ГОСТ РВ 20.39.308-98» (протокол № 11/15-2017 от 24.04.2017 г.; (п. 1, 4 паспорта научной специальности).

В главе 4 теоретически обоснован выбор технологии разработки системы ОФУ объектов критической информационной инфраструктуры при воздействии электромагнитных импульсов, произведенный на основе интеллектуальной технологии оптимизации и стабилизации систем, предполагающей разработку и применение принципиально новых подходов к техническим решениям с учетом того, что в условиях функционирования разрозненные неравновесные компоненты системы либо конкурируют между собой, либо образуют новые соединения, стабилизирующие друг друга, на основании которой в главе 5 было произведено обоснование выбора оптимального варианта создания системы ОФУ объектов критической информационной инфраструктуры систем с целью максимального предотвращения ущерба при воздействии электромагнитных импульсов.

Представлен алгоритм расчета экономического эффекта от внедрения конструкторско-технологического решения по ОФУ объектов КИИ при воздействии ЭМИ, реализованного в виде программного модуля.

Обширность исследуемой предметной области не позволила в достаточной степени проработать все особенности организации и построения СОФУ объектов КИИ при воздействии ЭМИ. Вместе с тем результаты, полученные в диссертационной работе, открывают новые возможности для проведения дальнейших исследований в таких направлениях, как применение метода конечных элементов и тензорного анализа с целью совершенствования математической модели экранирующей конструкции, привязки рисков и ущерба к конкретному объекту КИИ. Кроме того, результаты, полученные в данной работе, могут быть использованы в качестве исходных предпосылок для решения важной и актуальной научной проблемы, направленной на разработку теории глобальной устойчивости объектов КИИ при воздействии ЭМИ.

Проведенный в диссертации анализ и исследования позволили получить новые решения, согласованные с закономерностями развития систем управления объектами критической информационной инфраструктуры Российской Федерации с комплексным исследованием научных и технических проблем, применяя современные технологии компьютерного и имитационного моделирования с целью проверки адекватности разработанной математической модели экранирующей конструкции на основе данных натуральных экспериментов, с возможностью выхода на технологию её производства, что обеспечивает выполнение требований и соответствие пунктам **1, 3, 4, 5, 6** паспорта научной специальности 05.13.18 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

**Перспективы дальнейшей разработки темы.** Наиболее целесообразным представляется разработка гибких методов, которые обеспечивают требуемые показатели живучести и помехозащищённости и теоретически обосновывают конструкторские решения по применению технологии двойного назначения с целью ОФУ объектов КИИ при воздействии деструктивных электромагнитных излучений, что и отражает развитие идеи комплексности решения проблемы построения экранирующих конструкций и использование новых научно-



теоретических подходов к анализу их характеристик. Данный подход, в свою очередь, позволяет реализовать новые возможности по ОФУ объектов КИИ от воздействия излучений различной природы.

Материалы диссертации достаточно полно изложены в 73 научных работах, включая монографию и 23 публикации в периодических научно-технических изданиях из Перечня рецензируемых научных изданий ВАК при Министерстве науки и высшего образования Российской Федерации (6 статей входят в ядро РИНЦ), в которых должны быть опубликованы результаты диссертаций на соискание учёной степени доктора наук, 3 статьи в международной реферативной базе данных SCOPUS; выполнено 6 научно-исследовательских работ; получено 3 Патента на изобретения, 1 Патент на полезную модель и 6 Свидетельств о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Положения, выносимые на защиту апробированы на 21-й научно-технической конференции международного, всероссийского и межведомственного уровней, а также реализованы и внедрены в Управлении вооружения Федерального органа исполнительной власти Российской Федерации (г. Москва), АО НИИ «Рубин» (г. Санкт-Петербург), АО «31 ГПСС» (г. Москва), ООО «Славсервис-Связь» (г. Орёл), ФГУП «НТЦ «ОРИОН» (г. Москва), а также использованы в учебном процессе ФГБОУ ВО «Брянский государственный университет», и подкреплены изобретениями, полезной моделью и программами для ЭВМ.

Результаты, полученные в диссертационной работе, взаимосвязаны с положениями современных теоретических принципов электромагнитного экранирования, ОФУ и согласованы с закономерностями развития систем управления объектами критической информационной инфраструктуры.

Таким образом, в диссертации на основании выполненных исследований решена актуальная научная проблема, имеющая важное политическое, социально-экономическое и хозяйственное значение, с изложением нового научно обоснованного конструктивно-технологического решения, внедрение которого вносит значительный вклад в развитие систем обеспечения устойчивого и безопасного функционирования объектов жизнедеятельности общества и государства.

**СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ**

АРМ	– автоматизированные рабочие места
БПК	– безусловный критерий предпочтения
ВГУ	– вспомогательные граничные условия
ВМС	– военно-морские силы
ГГУ	– главное граничное условие
ГУ	– граничные условия
ГЭМИ	– генератор электромагнитных импульсов
ДСВ	– дискретный сеточный вакуум
ДСМ	– дискретные сеточные методы
ДУ	– дифференциальные уравнения
ИАС	– информационные автоматизированные системы
ИмГУ	– импедансные граничные условия
ИДУ	– интегро-дифференциальные уравнения
ИТКСС	– информационные телекоммуникационные системы и сети
ИМС	– интегральные микросхемы
КИИ	– критическая информационная инфраструктура
КМОП	– комплементарная металл-окисел полупроводник (структура)
КУ	– краевые условия
КЭ	– конструктивные элементы
ЛВС	– локальные вычислительные сети
ЛСФФ	– линейные скалярные функции формы
МКЭ	– метод конечных элементов
ММ	– математическая модель
МНС	– многослойная структура
МСВ	– многостадийный выбор
МСЭК	– многослойная экранирующая конструкция
МСЭ	– Международный совет по электросвязи
ОФУ	– обеспечение функциональной устойчивости

ПК	– показатели качества
ППКЭ	– полупроводниковые конструктивные элементы
ПТС	– программно-технические средства
РППКМ	– радиопоглощающие композиционные материалы
РЭА	– радиоэлектронная аппаратура
РЭК	– радиоэлектронные компоненты
САПР	– система автоматизированного проектирования
СБ РФ	– Совет Безопасности Российской Федерации
СВЧ	– сверхвысокая частота
СЛАУ	– система линейных алгебраических уравнений
СОФУ	– система обеспечения функциональной устойчивости
СУБД	– система управления базами данных
СФФ	– скалярная функция формы
СШП	– сверхширокополосные электромагнитные импульсы
ЭМИ	
СВТ	– средство вычислительной техники
ТДН	– технология двойного назначения
ТКЭ	– треугольные конечные элементы
УПК	– условный критерий предпочтения
ЧСС	– частотно-селективная структура
ЭДС	– электродвижущая сила
ЭК	– экранирующая конструкция
ЭИФ	– эквивалентная интегральная формы
ЭМВ	– электромагнитная волна
ЭМИ	– электромагнитный импульс
ЭМП	– электромагнитное поле
ЭС	– электронные системы
ЭФС	– электрофизические свойства
ADS	– Active Denial System, система активного отбрасывания
CG	– Conjugate gradient

- DOF – The degrees of freedom
- ELFCG – Explosive Lypumped Flux Compression Generators
- EPDMHG – Explosive or Propellant Driven Magneto-Hydrodynamic Generators
- GMRES – Generalized Minimal Residual
- IFFS – Interpolation Functions With Finite Support
- LSFS – Linear scalar functions of the shape
- SFS – Scalar function of the shape

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. **ФЗ** «О безопасности критической информационной инфраструктуры Российской Федерации» № 187-ФЗ от 24.05.2017 г.
2. **Распоряжение Правительства РФ** от 25.08.2005 № 1314-р «Об одобрении Концепции федеральной системы мониторинга критически важных объектов и (или) потенциально опасных объектов инфраструктуры Российской Федерации и опасных грузов» / [Электронный ресурс] // URL:<http://sudact.ru/law/rasporiazhenie-pravitelstva-rf-ot-27082005-n-1314-r/> Дата обращения 15.14.2016 г.
3. **Jacques, S.** Gansler, Hans Binnendijk. INFORMATION ASSURANCE: TRENDS IN VULNERABILITIES, THREATS, AND TECHNOLOGIES.
4. **Слюсар, В. С.** Новое в несмертельных арсеналах. Нетрадиционные средства поражения / В. С. Слюсар// Электроника. Наука. Технология. Бизнес, 2002, № 4. – С. 60–65.
5. **Голиков, В. А.** Назначение, возможности и перспективы применения оружия нелетального действия в современных условиях : монография. В. А. Голиков. – Москва : ОВА ВС РФ. 2004. – 391 с.
6. **Барсуков, В. С.** Каналы силового деструктивного воздействия на компьютерные системы / В. С. Барсуков// Jetinfo, № 2, 2000. – С. 23–40.
7. **Гордиевский, П. А.** Проблемные вопросы постановки и реализации требований по стойкости к электромагнитным полям систем управления и автоматизации / П. А. Гордиевский, С. Н. Сумской, Н. А. Остафийчук, Р. М. Остафийчук // Материалы Всесоюзной научно-технической конференции. Ч.2 – Москва : НТЦ «Информтехника», 1991. Ч.4. – 188 с.
8. **Гордиевский, П. А.** Вопросы обеспечения стойкости радиоэлектронных систем к воздействию электромагнитных излучений естественного и искусственного происхождения / П. А. Гордиевский, С. Н. Сумской, Н. А. Остафийчук, Р. М. Остафийчук // Материалы Всесоюзной научно-технической конференции. Ч.2 – Москва : НТЦ «Информтехника», 1991. – 188 с.

9. **Terrorism** and Security Issues Facing the Water Infrastructure Sector, updated July 28, 2008.

10. **Botnets**, Cybercrime, and Cyberterrorism: Vulnerabilities and Policy Issues for Congress, updated January 29, 2008.

11. **National** Strategy for Combating Terrorism: Background and Issues for Congress, November 1, 2007

12. **Combating** Terrorism: The Challenge of Measuring Effectiveness, updated March 12, 2005.

13. **Terrorist** Capabilities for Cyberattack: Overview and Policy Issues, updated January 22, 2005.

14. **International** Terrorism: Threat, Policy, and Response, updated January 3, 2005.

15. **Terrorism** and National Security: Issues and Trends, updated March 9, 2004.

16. **Removing** Terrorist Sanctuaries: The 9/11 Commission Recommendations and U.S. Policy, updated February 11, 2005.

17. **U.S. Anti-Terror Strategy** and the 9/11 Commission Report, updated February 4, 2005.

18. **Immigration: S** Visas for Criminal and Terrorist Informants, updated January 19, 2005.

19. **The Department** of Defense Rules for Military Commissions: Analysis of Procedural Rules and Comparison with Proposed Legislation and the Uniform Code of Military Justice, updated January 18, 2005.

20. **Terrorist** Attacks and National Emergencies Act Declarations, updated January 7, 2005.

21. **The Supreme** Court 2003 Term: Summary and Analysis of Opinions Related to Detainees in the War on Terrorism, July 12, 2004.

22. **The Department** of State's Patterns of Global Terrorism Report: Trends, State Sponsors, and Related Issues, June 1, 2004.

23. **Terrorist** Identification, Screening, and Tracking Under Homeland Security Presidential Directive 6, April 21, 2004.

24. **Computer** Attack and Cyber Terrorism: Vulnerabilities and Policy Issues for Congress, October 17, 2004.

25. **Risetime Evolution in HEMP E1 Waveforms** –Technology and Standards D.V. Giri Pro-Tech, 11-C Orchard Court, Alamo, CA 94507 Department of ECE, University of New Mexico, Albuquerque, NM and William D. Prather, Air Force Research Laboratory, Kirtland AFB, NM 87117

26. **Куприенко, В. М.** Нетрадиционные виды электромагнитных излучений и их взаимосвязь с проблемой ЭМС технических средств / В. М. Куприенко, Б. К. Бельцев, Р. М. Остафийчук, Н. А. Остафийчук, В. П. Тихомиров. IV Международный симпозиум по электромагнитной совместимости и электромагнитной экологии (ЭМС–2001) : Сб. докл. 19–22 июня 2001 г. – Санкт-Петербург, 2001. – С. 62–65.

27. URL: <http://www.minatom.ru/news/> Дата обращения 09.09.2004.

28. URL: <http://www.newslab.ru/news>. Дата обращения 24.05.2004.

29. URL: <http://www.gazeta.ru/science/news/> Дата обращения 25.09.2004.

30. **Прищепенко, А. Б.** Взрывы и волны. Взрывные источники электромагнитного излучения радиочастотного диапазона / А. Б. Прищепенко. – Москва : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2008. – 208 с. : ил

31. **Ильюшенко, В. Н.** Пикосекундная импульсная техника / Б. И. Авдоченко, В. Ю. Баранов [и др.]; под ред. В. Н. Ильюшенко. – Москва : Энергоатомиздат, 1994. – 368 с.: ил.

32. **Авдеев, В. Б.** Мощные сверхкороткоимпульсные и сверхширокополосные электромагнитные излучения и их помеховое и поражающее воздействие на электронную аппаратуру передачи-приема, обработки и хранения информации [Текст] : монография / В.Б. Авдеев [и др.] ; под ред. В.Г. Герасименко, В.Б. Авдеева, А.В. Бердышева; Государственный научно-исследовательский испытательный институт проблем технической защиты информации Федеральной

службы по техническому и экспортному контролю. – Воронеж : Научная книга, 2008. – 397 с.

33. **Глебович, Г. В.** Исследование объектов с помощью пикосекундных импульсов / А. В. Андрианов[и др.]; под ред. Г. В. Глебовича. – Москва : Радио и связь, 1984. – 256 с. : ил.

34. **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. – Москва : МИЭМ, 2004. – с. 51– 60.

35. **Мырова, Л. О.** Анализ стойкости систем связи к воздействию излучений / Л. О. Мырова, В. Д. Попов, В. И. Верхотуров; под ред. К. И. Кукка. – Москва: «Радио и связь», 1994. – 268 с. : ил.

36. **Марков, Г. Т.** Электродинамика и распространение радиоволн / Г. Т. Марков, Б. М. Петров, Г. П. Грудинская. – Москва : Советское радио, 1979. – 376 с.

37. **Вайнштейн, Л. А.** Электромагнитные волны. – Москва : Радио и связь, 1988. – 440 с.

38. **Гуревич, В.** Проблема электромагнитных воздействий на микропроцессорные устройства релейной защиты. Часть 3 / В. Гуревич // Компоненты и технологии, № 4, 2010. – С. 91-96

39. **Добыкин, В.Д.** Радиоэлектронная борьба. Силовое поражение радиоэлектронных систем / В. Д. Добыкин, А. И. Куприянов, В. Г. Пономарев, Л. Н. Шустов. Под ред. А.И. Куприянова. – Москва : Вузовская книга, 2005. – 468 с.: ил.

40. **Добыкин, В. Д.** Оценка статистических характеристик теплового поражения полупроводниковых приборов / В. Д. Добыкин// Радиотехника, № 10, 2004. – С. 58–65.



41. **Антипин, В. В.** Влияние мощных импульсных микроволновых помех на полупроводниковые приборы и ИМС / В. В. Антипин [и др.] // Зарубежная радиоэлектроника, № 1, 1995. – С. 37–54.

42. **Горячев, В. А.** Характеристики электромагнитных наводок в линиях связи микропроцессоров / В. А. Горячев, С. М. Захаров // Успехи современной радиоэлектроники, № 7, 2004. – С. 4–10.

43. **Влияние** сверхкоротких импульсов электромагнитного излучения на параметры структур металл–диэлектрик–полупроводник / В. А. Терехов, А. Н. Манько, Е. Н. Бормонтов, В. Н. Левченко, С. Ю. Требунских, Е. А. Тутов, Э. П. Домашевская // Физика и техника полупроводников, 2004, Т. 38 – вып. 14.

44. **Экспериментальные** исследования воздействия импульсного СВЧ излучения на материалы / Н. С. Вернигоров, А. П. Саркисян, А. С. Сулакшин, Ю. П. Шаркеев // Журнал «Радиоэлектроника и телекоммуникации». – № 6 (24), 2004.

45. **Кравченко, В. И.** Радиоэлектронные средства и мощные электромагнитные помехи / В. И. Кравченко. – Москва : Радио и связь, 1985. – 256 с.

46. **Двилянский, А. А.** Обоснование критерия функционального поражения ЭВМ / А. А. Двилянский, В. А. Иванов // Телекоммуникации. – № 4. – Москва : Наука и технологии, 2005. – С. 3–8.

47. **Двилянский, А. А.** Методы оценки воздействия и механизмы защиты телекоммуникационных систем от мощных электромагнитных импульсов / А. А. Двилянский, В. А. Иванов // Сборник научных трудов Академии ФСО России. Вып. 20, 2004. – С. 88–94.

48. **Двилянский, А. А.** Критерий и показатели частных критериев функционального поражения. Проблемы совершенствования и развития и информации, предоставляемых государственным органам : материалы IV Всероссийской научной конференции, 10-11 февраля 2005 г. Ч. 2 / под общ. ред. В. М. Щекотихина. – Орёл : Академия ФСО России, 2005. – С. 188–190.

49. **Двилянский, А. А.** Методика оценки порогового значения энергии поражения средств электронно-вычислительной техники при воздействии электромагнитным импульсом / А. А. Двилянский, В. А. Иванов, В. М. Куприенко, П. В. Попов, В. П. Тихомиров // Телекоммуникации. – № 9, 2005. – С. 29–34.

50. **ГОСТ Р 51320-99.** Совместимость технических средств электромагнитная. Радиопомехи промышленные. Методы испытаний технических средств - источников промышленных радиопомех. [Электронный ресурс] URL: [http://snipov.net/c\\_4711\\_snip\\_105475.html](http://snipov.net/c_4711_snip_105475.html). Дата обращения 15.14.2016 г.

51. **Пособие** по оценке электромагнитной совместимости технических систем специальных объектов. ВСП 45-02-01/Мо РФ. – Москва, 2005.

52. **Горбунова, А.А.** Модель электромагнитных излучений проводных интерфейсов передачи данных средств вычислительной техники / А.А. Горбунова, М.А. Коновалюк, А.Б. Баев, Ю. В. Кузнецов // Специальная техника. – № 5, 2014. – С. 26–34.

53. **Хорев, А. А.** Оценка возможности обнаружения побочных электромагнитных излучений видеосистемы компьютера // Доклады ТУСУРа, № 2 (32), июнь 2014. – С. 207 – 214.

54. **Определение** границ ближней и дальней зоны при измерениях ПЭМИ / П. С. Вихлянцев, В. В. Петров, М. В. Симонов, А. А. Андриенко // Конфидент, № 4-5, 2004. – С. 36–39.

55. **Харченко, В. С.** Оценка и обеспечение живучести информационно вычислительных и управляющих систем технических комплексов критического использования / В. С. Харченко // Зарубежная радиоэлектроника, № 1, 1994. – С. 64–79.

56. **Довбыш, В. Н.** Электромагнитная безопасность элементов энергетических систем: Монография / В.Н. Довбыш, М.Ю. Маслов, Ю.М. Сподобаев. – Самара : Содружество, 2009. – 198с.

57. **Квалификационные** требования КТ-160D. Условия эксплуатации и окружающей среды для бортового авиационного оборудования (Внешние воз-

действующие факторы – ВВФ). Требования, нормы и методы испытаний. Environmental conditions and test procedures for airborne equipment. QR-160D.

58. **Двилянский, А. А.** Методика обеспечения устойчивости элементов сетей связи в чрезвычайных ситуациях / А.А. Двилянский, В.А. Иванов, Е.В. Гречишников, О.В. Поминчук, А.С. Белов // Телекоммуникации. – № 2, 2009. – С. 31–35.

59. **Двилянский, А.А.** и др. Технология двойного назначения для защиты критически важных объектов информатизации от кибертеррористических атак // Проблемы развития технологических систем государственной охраны, специальной связи и специального информационного обеспечения: Седьмая научно-практическая конференция (Орёл, 3–4 марта 2011 г.) : сборник материалов. В 10 ч. Ч. 4. – Орёл : Академия ФСО России, 2011. – С. 179-181

60. **Двилянский, А.А.** Защита электронных систем критически важных государственных объектов от воздействия электронного импульса / А. А. Двилянский, В. А. Иванов, А. Н. Конищев // Научно-практический межотраслевой журнал «Интеграл». Вып. № 4.– Москва : Стратим, 2004.– С. 58–59.

61. **Двилянский, А.А.** Обоснование необходимости защиты локальной вычислительной сети от воздействий электромагнитных импульсов ультракороткой длительности с различными спектральными характеристиками / А. А. Двилянский, В. А. Иванов // Сборник научных трудов Академии Спецсвязи России, № 16, 2004. – С.114–119.

62. **Двилянский, А. А.** Защита электронных средств вычислительной техники от электромагнитного импульса / А. А. Двилянский, В. А. Иванов // Сборник трудов II международной научно–практической конференции «Исследование, разработка и применение высоких технологий в промышленности». Т.5. Высокие технологии, фундаментальные и прикладные исследования, образование. – Санкт-Петербург : СПбПУ. 2004. – С. 172–174.

63. **Пожарский, В. Н.** Разработка моделей и методов управления безопасностью критически важных объектов топливно-энергетического комплекса / В. Н. Пожарский, В. В. Лесных, Е. А. Иванов // Материалы II международной науч-

ной конференции по проблемам безопасности и противодействия терроризму. Московский государственный университет, 2004. – Москва : МЦНМО, 2005. – С.628–635.

64. **Радько, Н. М.** Риск-модели информационно-телекоммуникационных систем при реализации угроз удаленного и непосредственного доступа / Н. М. Радько, И. О. Скобелев. – Москва: РадиоСофт, 2010. – 232 с.

65. **Новиков, А.М.** Методология / А.М. Новиков, Д.А. Новиков. – Москва: СИНТЕГ. – 668 с.

66. **Пономарев, А.Б.** Методология научных исследований: учеб. пособие / А.Б. Пономарев, Э.А. Пикулева. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2014. – 186 с.

67. **Баженов, Л. Б.** Строение и функции естественнонаучной теории. – Москва : Наука, 1978. – 230 с.

68. **Андреев, Г. И.** Основы научной работы и методология диссертационного исследования / Г.И. Андреев, В.В. Барвиненко, В.С. Верба. – Москва : ФиС, 2014. – 296 с.

69. **Крон, Г.** Исследование сложных систем по частям (диакоптика) / Г. Крон; пер. с англ., Москва : Наука, 1974. – 544 с.

70. **Бусленко, Н. П.** Моделирование сложных систем / Н. П. Бусленко. – Москва : Наука, 1978. – 399 с.

71. **Веников, В. А.,** Теория подобия и моделирования / В. А. Веников, В. Г. Веников. – Москва : Высшая школа, 1984. – 361 с.

72. **Кочкаров, А. А.** Обеспечение стойкости сложных систем. Структурные аспекты / А. А. Кочкаров, Г.Г. Малинецкий // ИПМ им. М. В. Келдыша РАН Москва, 2005

73. **Электромагнитная совместимость** в будущих оборонительных системах. Технический отчет 59 ИТО. Исследовательская и технологическая организация: BP 25,7 RUENACELLE, F-92201 NEUILLY-SUR-SEINE CEDEX, FRANCE.–RTO/NATO, 2004.

74. **Завгородний, В.И.** комплексная защита информации в компьютерных системах / В.И. Завгородний. – Москва : Лигос; ПБОЮЛ Н.АП, Егоров, 2001. – 264 с : ил.

75. **Двилянский, А. А.** Методология оценки комплексной защищенности объектов инфокоммуникационных систем от воздействия деструктивных электромагнитных излучений : монография / А. А. Двилянский, В.А. Иванов. – Орёл: Академия ФСО России, 2018. – 235 с.

76. **Полонский, Н. Б.** Конструирование электромагнитных экранов для радиоэлектронной аппаратуры / Н. Б. Полонский. – Москва : Советское радио, 1979. – 216 с.

77. **Ильинский, А.С.** Математические модели электродинамики / А. С. Ильинский, В. В. Кравцов, А. Г. Свешников. – Москва : Высшая школа, 1991. – 224 с.

78. **Shemakhin, A. Yu.** Mathematical modelling of RF plasmaflow at low pressure in with electrodynamics/ A. Yu. Shemakhin, Zheltukhin V.S. // The International Conference «The Physics of Low Temperature Plasma» (PLTP-2017)/

79. **Крон, Г.** Тензорный анализ сетей: Пер. с англ. / Г. Крон. Под ред. Л, Т. Кузина, П. Г. Кузнецова. – Москва : Сов. радио, 1978. – 720 с.

80. **Ерёмин, Ю. А.** Метод дискретных источников в задачах электромагнитной дифракции / Ю.А. Ерёмин, А.Г. Свешников. – Москва : Издательство МГУ, 1992. – 182 с.

81. **Войтович, Н. Н.** Обобщенный метод собственных колебаний в теории дифракции : монография / Н. Н. Войтович, Б.З. Кацеленбаум, Сивов А.Н. с дополнением А.Н. Аграновича. – Москва: Главная редакция физико-математической литературы, Изд-во «Наука», 1975. – 416

82. **Банков, С. Е.** Электродинамика и техника СВЧ для пользователей САПР / С. Е. Банков, А. А. Курушин. – Москва : Солон-Пресс. 2008. – 276 с.

83. **Рояк, М.Э.** Сеточные методы решения краевых задач математической физики: Учеб. пособие / М. Э. Рояк, Ю. Г. Соловейчик, Э. П. Шурина. – Новосибирск : НГТУ, 1998. – 120 с.

84. **Russer, P.** The Transmission Line Matrix. The Institute for High-Frequency Engineering, Technische Universit at Munchen, Arcisstrasse 21, D-80333 Munich, Germany. 2004

85. **Иванов, С. А.** Метод импедансного аналога электромагнитного пространства для решения начально-краевых задач электродинамики / С. А. Иванов, Б. В. Сестрорецкий, А. Н. Боголюбов // Вычислительные методы и программирование. 2008. Т.9. – С. 274-304.

86. **Двилянский, А.А.** Выбор и обоснование математического аппарата для моделирования электромагнитных экранов, обеспечивающих защиту от ЭМИ и наводок / А. А. Двилянский, И. В. Иванов // «Вопросы радиоэлектроники», Серия «Системы и средства отображения и информации и управления специальной техникой. Электронная вычислительная техника», ОАО «Центральный научно-исследовательский институт «Электроника», г. Москва. № 1, серия РЛТ, 2013, январь, вып. 1, С. 139-154

87. **Двилянский, А.А.** Обоснование подхода к постановке задачи на разработку математического метода моделирования параметров экранирующей конструкции, обеспечивающей функциональную устойчивость компонентов объектов критической информационной инфраструктуры при воздействии электромагнитных импульсов / А. А. Двилянский, Ю.В. Моисеев // Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении: Брянский государственный технический университет. – № 1 (07), 2020. – С. 17–25

88. **Программа** трансформации уравнений Максвелла в уравнения Кирхгофа на основе тензорного представления электромагнитного поля «KronTensor» // Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2019666919 Рос. Федерация; заявители и патентообладатели Двилянский А.А., Вареница М.А., Кацай Е.А., Двилянская А.А; заявка № 2019664564.

Дата поступления – 15.11.2019. Дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ **15.12.2019**.

89.**Charles Tak**, Ming Choi, B.S. Adaptive Finite Element Analysis of Unbounded Electromagnetic Wave Problems. A thesis submitted to the Faculty of Graduate Studies and Research in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy Computational Analysis and Design Laboratory Department of Electrical Engineering, McGill University Montreal, Quebec, Canada. October, 1994. – 157 s.

90.**Шайдуров, В. В.** Многосеточные методы конечных элементов / В. В. Шайдуров. – Москва : Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1989. – 288 с.

91.**Сильвестер, П.** Метод конечных элементов для радиоинженеров и инженеров-электриков / П. Сильвестер, Р. Феррари. Пер. с англ. – Москва : Мир, 1984. – 229 с.: ил.

92.**Сегерлинд, Л.** Применение метода конечных элементов / Л. Сегерлинд. – Москва : Мир, 1979, – 392 с.

93.**Митчелл, Э., Уэйт, Р.** Метод конечных элементов для уравнений с частными производными / Э. Митчелл, Р. Уэйт. Пер. с англ. В. Е. Кондрашова и В. Шаф. Курякина. Под ред. Н. Н. Яненко. – Москва: Мир, 1981. – 216 с.

94. **Бабенко, К. И.** Основы численного анализа / К. И. Бабенко – Москва : Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит. 1974. – 744 с.

95. **Норри, Д.** Введение в метод конечных элементов / Д. Норри, Ж. де Фриз. Пер. с англ. – Москва: Мир, 1981. – 304 с., ил.

96.**Стренг, Г.** Теория метода конечных элементов / Г. Стренг, Дж. Фикс. Пер. с англ. – Москва : Мир, 1975. – 452 с.

97.**Шапиро, Д. Н.** Основы теории электромагнитного экранирования / Д. Н. Шапиро.– Ленинград : Энергия, 1975.– 112 с.

98.**Дональд, Уайт Р.Ж.** Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств и непреднамеренные помехи: Пер. с англ. Вып. 2: Внутрисистемные

помехи и методы их уменьшения / Р. Ж. Уайт Дональд.– Москва : Советское радио, 1978. – 272 с.

99. **Аполлонский, С. М.** Расчёт электромагнитных экранирующих оболочек / С. М. Аполлонский.– Ленинград : Энергоиздат, 1984. –156 с.

100. **Рогинский, В. Ю.** Экранирование в радиоустройствах / В.Ю. Рогинский / В. Ю.Рогинский.–Ленинград : Энергия, 1970. – 112 с.

101. **Чернушенко, А. М.** Конструкции СВЧ устройств и экранов / А. М. Чернушенко. – Москва : Радио и связь, 1984. – 349 с.

102. **Звездина, М.Ю.** Понятие обобщенного импеданса в задачах дифракции на многослойных цилиндрических структурах / М. Ю. Звездина, О. С. Лабунько, Е. Д. Безуглов, С. Н. Забелкин // III Всероссийская конференция «Радиолокация и радиосвязь» – ИРЭ РАН, 26-30 октября 2009 г. – 530 с.

103. **Митра, Р.** Аналитические методы теории волноводов / Р. Митра, С. Ли. – Москва : Мир, 1975. – 327 с.

104. **Штагер, Е.А.** Рассеяние радиоволн на телах сложной формы / Е. А. Штагер.– Москва : Радио и связь, 1984. – 184 с., ил.

105. **Исимару, А.** Распространение и рассеяние волн в случайно- неоднородных средах, т. 2 / А. Исимару. – Москва : Мир, 1981. – 322 с.

106. **Скобликов, А.Ю.** Результаты моделирования процесса проникновения электрического поля внутрь структурно-неоднородного электромагнитного экрана / А. Ю. Скобликов// Электроника и электромеханика, 2011. – № 4. – С.66-71.

107. **Двилянский, А.А.** Модель поверхности, экранирующей воздействие электромагнитного импульса на средства инфокоммуникации / А. А. Двилянский, В. М. Куприенко, И. В. Иванов // Информационные системы и технологии. – Орел: ФГБОУ ВПО «Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс». Номер: 4-2, 2005. – С. 263-274.

108. **Двилянский, А. А.** Модель структуры экрана для повышения защищенности средств электронно-вычислительной техники в условиях воздействия



электромагнитным импульсом / А. А. Двилянский, В. А. Иванов, И. С. Константинов, В. М. Куприенко, М. А. Сонькин // Вестник компьютерных и информационных технологий. Выпуск № 1. – Москва : Машиностроение, 2008. – С. 41–51.

109. **Двилянский А. А.** Математический метод моделирования, позволяющий получать параметры экранирующей конструкции, обеспечивающей функциональную устойчивость компонентов объектов критической информационной инфраструктуры при воздействии электромагнитных импульсов / А. А. Двилянский // Промышленные АСУ и контроллеры : Научтехлитиздат. – № 1, 2020. – С. 18–25.

110. **Двилянский, А. А.** Применение геометрической теории дифракции для расчёта экранирующего объёма в целях защиты электронного средства вычислительной техники при воздействии электромагнитного импульса / А. А. Двилянский, В. А. Иванов // Вестник компьютерных и информационных технологий. – № 8, 2004. – С. 42-45.

111. **Беспярых, Ю.И.** Электромагнитные свойства полимерных гибридных композитов / Ю. И. Беспярых, Н. Е. Казанцева // Радиотехника и электроника. № 2, 2008, том 53, С. 162–164

112. **Пирумов, В.С.** Новые радиопоглощающие материалы и покрытия / В. С. Пирумов, А. Г. Алексеев, Б. В. Айзикович // Успехи современной радиоэлектроники. – № 2, 2000. – С.60–68.

113. **Берлин, А.А.** Современные полимерные композиционные материалы / А. А. Берлин // Соровский образовательный журнал. – МГУ им. Ломоносова М.В. № 1, 1994. – С. 57-65;

114. **Михайловский, Л.К.** Радиопоглощающие бестоковые среды, материалы и покрытия (электромагнитные свойства и практическое применение) / Л. К. Михайловский // Успехи современной радиоэлектроники. – № 9, 2000. – С. 21-27

115. **Кириленко, А.А.** Резонансные свойства перфорированного экрана с двумя запердельными круглыми отверстиями различного диаметра в периодиче-

ской ячейке / А. А. Кириленко, А. О. Перов, С. Л. Сенкевич // Радиофизика и радиоастрономия. Т.14. – №1, 2009, – С. 45-57

116. **Hafner, Ch.**, Smajic, J., Agio M. Numerical Methods for the Electrodynamic Analysis of Nanostructures. American Scientific Publishers, 2010

117. **Двилянский, А.А.** Решение задачи нахождения распределения трехмерного волнового вектора в технологических неоднородностях электромагнитных защитных экранов электронных средств автоматизированных систем управления SCADA / А. А. Двилянский, В. А. Иванов // Промышленные АСУ и контроллеры: Научтехлитиздат. – № 3, 2015.– С. 19–24.

118. **Емелин, Б. Ф.** Основы техники СВЧ / Б. Ф. Емелин, Б.М. Машковец. – Санкт-Петербург : Военная академия связи, 1974. – стр. 32–35

119. **Кураев, А. А.** Поля в продольно-периодических волноводах с учетом потерь в металлических стенках / А. А. Кураев, А. К. Сеницын, С. И. Яроменок // Доклады БГУИР январь – март 2008, № 1.

120. **Clayton, R.** Paul, Arthur, E. Feather. Computation of the Line Inductance and Capacitance Matrices from the Generalized Capacitance Matrix. IEEE Transaction on Electromagnetic Compatibility, Vol. EMC-18, No.4, 1975.

121. **Грибовский, А. В.** Аномальное прохождение электромагнитных волн через прямоугольные запердельные отверстия в идеально проводящем экране конечной толщины / А.В. Грибовский// Радиофизика и радиоастрономия, 2009, т. 14, №3, – С. 287-294.

122. **Зенкевич, О. С.** Метод конечных элементов в технике / О. С. Зенкевич. Перевод с английского Б.Е. Победри. – Москва : МИР, 1975. – 421с.

123. **Reiter, A. M.** Determining the dimension of fractals generated by Pascal's triangle / Mathematics Department, Rice University, PO Box 1892, Houston, TX 77251. – 112–120 p.

124. **Ashley, M. R.**, Determining the dimension of fractals generated by pascal's triangle, Mathematics Department, Rice University, PO Box 1892, Houston, TX 77251 (*Submitted May 1991*)

125. **Давидович, М. В.** Метод конечных элементов в пространственно-временной области для нестационарной электродинамики / М. В. Давидович // Журнал технической физики, 2006, том 76, вып. 1. – с. 13–23

126. **Двилянский, А.А.** Обоснование фрактальности конечных элементов при решении сложных электродинамических задач и проектировании защитных электромагнитных экранов / А. А. Двилянский // Промышленные АСУ и контроллеры : Научтехлитиздат. – № 6, 2014. – С. 13-18

127. **Петров А. Е.** Тензорная методология в теории систем. – Москва : Радио и связь, 1985. – 152 с., ил.

128. **Фейман, Р.** Феймановские лекции по физике. Вып. 6 кн. 4. Электродинамика / Р. Фейман, Р. Лейтон, М. Сейндс. – Москва : Мир, 1975. – 347 с.

129. **Программа** для расчета эквивалентного функционала энергии (потенциала) электромагнитного поля на основе его тензорного представления и метода конечных элементов «EnergyPotential» // Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2020613350 Рос. Федерация; заявители и патентообладатели Двилянский А.А., Власихин М.А., Шестов А.А; заявка № 20206612174. Дата поступления – 25.02.2020. Дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ 13.03.2020.

130. **Акбашев Б.Б.** Эффективность экранирования терминалов при наличии щелей в их корпусе. Электромагнитная совместимость, проектирование и технология электронных средств / Б.Б. Акбашев, П.В. Степанов. – Москва : МИЭМ, 2004. – С. 9–12.

131. **Устройство** защиты средств электронно-вычислительной техники от электромагнитных излучений // Патент на изобретение RU № 2541225 С2 Рос. Федерация; МПК *H01Q 17/00* (2004.1), *H05K 9/00* (2004.1) заявитель и патентообладатель Академия ФСО России – № 2013129163; заявл. 25.04.2013 г.; Дата начала отсчета срока действия патента: 25.04.2013 г. опубл. 10.04.2015 . Бюл. № 4. – 10 с.

132. **Устройство** защиты от электромагнитного импульса // Патент на полезную модель № 100338 Рос.Федерация; заявитель и патентообладатель Академия ФСО России – № 20101128775; заявл. 14.05.2010; опубл. 20.09.2010 Бюл. № 14. – 12 с.

133. **Устройство** защиты средств электронно-вычислительной техники объектов информатизации от побочного электромагнитного излучения // Патент на изобретение № 2445736 Рос.Федерация; заявитель и патентообладатель Академия ФСО России – № 20101128774; заявл. 14.05.2010; опубл. 20.04.2012 Бюл. № 8. – 21 с.

134. **Климовский, А. А.** Объекты критически важных инфраструктур: анализ защищенности и риски успешной реализации компьютерных атак : Материалы Второй Международной научной конференции по проблемам безопасности и противодействия терроризму / А. А. Климовский, Ф. М. Большаков, Ф. М. Пучков. Московский государственный университет, 2004. – Москва : МЦНМО, 2005. – С. 317–335

135. **Двилянский, А.А.** Обеспечение безопасности инфотелекоммуникационных объектов при воздействии электромагнитного импульса. Материалы Второй международной научной конференции по проблемам безопасности и противодействия терроризму / В.А. Иванов, Е.В. Гречишников, А.А. Двилянский, Московский государственный университет, 2004. – Москва : МЦНМО, 2005. – 664 с.

136. **Двилянский, А. А.** Методология оценки комплексной защищенности объектов инфокоммуникационных систем от воздействия деструктивных электромагнитных излучений (электронных кибератак) / А. А. Двилянский, В. А. Иванов// Промышленные АСУ и контроллеры : Научтехлитиздат. – № 2, 2015. – С. 31–49.

137. **Двилянский, А. А.** Анализ тенденций, учитываемых при формировании стратегий защиты инфокоммуникационных систем от кибертеррористических угроз / А. А. Двилянский// Актуальные проблемы развития технологиче-

ских систем государственной охраны, специальной связи и специального информационного обеспечения : VIII Всероссийская межведомственная научная конференция : материалы и доклады (Орёл, 13-14 февраля 2013 г.). В 10 ч. Ч. 7 / под общ. ред. В. В. Мизерова. – Орёл : Академия ФСО России, 2014. – 168 с. С. 164-168.

138. **Теренин, А. А.** Проектирование экономически эффективной системы информационной безопасности / А. А. Теренин // Защита информации. INSIDE. – № 5, 2005. – С. 2–11.

139. **Dvilyanskiy A.** Evaluation of damage to objects of critical information infrastructure under the influence of destructive electromagnetic radiation based on hierarchical rank approach / Alexey A Dvilyanskiy, Mikhail Yu Rytov. The International Workshop «Advanced Technologies in Material Science, Mechanical and Automation Engineering» (MIP: Engineering-2019) V. 537 in April 4-6, 2019 in Krasnoyarsk, Russia.

140. **Двилянский, А.А.** Методы оптимизации системы защиты объекта информатизации от воздействия электромагнитного импульса / А.А. Двилянский, В.А. Иванов // Известия Тульского Государственного университета. Серия «Технологическая системотехника». Вып. 9. – Тула : ТулГУ, 2004. – С. 20–25.

141. **Устинов, Г. Н.** Концептуальные вопросы обеспечения информационной безопасности ВСС России / Г. Н. Устинов, Р. М. Алгулиев // Технологии и средства связи. 1999. – № 4.

142. **Слюсар, В. С.** Генераторы супермощных электромагнитных импульсов в информационных войнах / В. С. Слюсар // Электроника. Наука. Технология. Бизнес, 2002, № 5. – С. 60–65.

143. **Двилянский А. А.** Перспективные решения задачи защиты средств электронно-вычислительной техники в условиях воздействия электромагнитного импульса / Двилянский А. А. // Вестник СОНИИР. – №2 (16), 2005. – С. 58–61.

144. **ГОСТ Р 51318.14.1.4-2008.** Совместимость технических средств электромагнитная. Требования к аппаратуре для измерения параметров радиопомех и

помехоустойчивости и методы измерений. Ч.1–4. Аппаратура для измерения параметров радиопомех и помехоустойчивости. Устройства для измерения излучаемых радиопомех и испытаний на устойчивость к излучаемым радиопомехам.

145. **Железняк, В. К.** Защита информации от утечки по техническим каналам: учебное пособие / В. К. Железняк; ГУАП. – Санкт-Петербург, 2004. – 188 с. : ил.

146. **Двилянский, А. А.** Обоснование и расчёт применения средств защиты в общем комплексе построения интегрированной системы защиты от несанкционированного доступа к информационным ресурсам / А. А. Двилянский // Межвузовский сборник научных трудов № 5. Том 1 // Краснодарский военный институт имени генерал армии Штеменко С. М. – Краснодар, 2004

147. **Бронштейн, И.Н.** Справочник по математике для инженеров и учащихся вузов. – 13-е изд., исправленное. / И.Н. Бронштейн, К.А. Семендяев. – Москва : Наука, Гл. ред. физ-мат. лит., 1984. – 544 с.

148. **Корн, Г., Корн, Т.** Справочник по математике. Для научных работников и инженеров / Г. Корн, Т. Корн. – Москва : 1974. – 832 с.: ил.

149. **Программа** для расчета комплексной защищенности объектов критической информационной инфраструктуры от деструктивных электромагнитных излучений // Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2019616627 Рос. Федерация; заявители и патентообладатели Двилянский А.А., Власихин М.А., Шестов А.А., Гурков Н.М. – 2019617589; заявл. 29.05.2019. Дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ **15.04.2019.**

150. **Островский, О.С.** Защитные экраны и поглотители электромагнитных волн / О. С. Островский, Е. Н. Одаренко, А. А. Шматько // ФИП PSE, том 1, № 2, Харьковский национальный университет им. В.Н. Каразина, 2004. – С. 161-174.

151. **ГОСТ Р 50414 – 94.** Совместимость технических средств электромагнитная. Оборудование для испытаний. Камеры экранированные. Классы, основные параметры, технические требования и методы испытаний, ГОСТ 51275 –

2004. Защита информации. Объект информатизации. Факторы, воздействующие на информацию. Общие положения.

152. **Струтинский, М. Н.** Компьютерные технологии в электродинамических задачах / М. Н. Струтинский// Термоэлектричество № 4, 2009 ISSN 1726-7694.

153. **Банков, С. Е.** Расчет антенн и СВЧ структур с помощью HFSSAnsoft / С. Е. Банков, А. А. Курушин. – Москва, ЗАО «НПП «РОДНИК», 2009. – 256 с.

154. **Drexler, P., Fiala P.** Methods for High Power EM Pulse Measurement. Dept. of Theoretical and Experimental Electrical Engineering, Brno University of Technology, Kolejní 2906/4, 612 00 Brno, Czech Republic.

155. **Banks, H.T., Gabriella, A. Pinter.** High Frequency Pulse Propagation in Nonlinear Dielectric Materials. Center for Research in Scientific Computation North Carolina State University Raleigh. Department of Mathematical Sciences University of Wisconsin, Milwaukee, 2003

156. **Christian, H., Jasmin S., Mario A.,** Numerical Methods for the Electrodynamic Analysis of Nanostructures.

157. **HAROLD STANISLAW, NATASHA TODOROV.** Calculation of signal detection theory measures, Behavior Research Methods, Instruments, & Computers 1999, 31 (1), 137-149

158. [Электронный ресурс] URL: <https://www.comsol.ru/> Особенности постобработки и визуализации в COMSOL Multiphysics. Руководство COMSOL

159. [Электронный ресурс] URL: <https://prist.ru/produces/pdf/gsp-7830.pdf>. Дата обращения 24.04.2017 г.

160. [Электронный ресурс] URL: <https://www.priborelektro.ru/product/price/antenny-izmeritelnye-2/5365.html>. Дата обращения 24.04.2017 г.

161. **Старостенко, В. В.** Поле в ближней зоне микросхемы при воздействии на неё электромагнитной волной в волноводе / В. В. Старостенко, С. В.

Малишевский, Е. П. Таран, Г. И. Чурюмов // Письма в ЖТФ. 2004. Т. 29. Вып.1. С. 62 – 68.

162. **Дьяконов, В.П.** MATLAB 4.5 SP1/7 + Simulink 5/4. Основы применения. Серия «Библиотека профессионала» / В. П. Дьяконов.– Москва : СОЛОН-Пресс, 2005. – 800 с.: ил

163. **Ferreira, A.J.M.** MATLAB Codes for Finite Solids and Structures Universidade do Porto Portugal Element Analysis.

164. **Jack, Chessa,** Programing the Finite Element Method with Matlab.

165. **Сизиков, В.С.** Устойчивые методы обработки результатов измерений. Учебное пособие / В. С. Сизиков.– Санкт-Петербург : «СпецЛит», 1999. – 240 с.

166. **Полежаев, А. П.** Оптимизация объектовой системы защиты информации об изделиях двойного назначения / А. П. Полежаев, В. И. Василец// Специальная техника, № 5. – Москва: Электрозавод, 1994. – С. 1–5.

167. **Гудков, А.Г.** Взаимодействие технологических инноваций технологической наследственности в процессе эволюционного развития технологий / А. Г. Гудков, В. В. Попов // Научные технологии. – № 9, 2011. – С. 61–69.

168. **Хакен, Г.** Синергетика / Г. Хакен. Пер. с англ. В. И. Емельянова ; под ред. Климантовича Ю. Л. и Овцова С. М. – Москва : Мир, 1980. – 404 с.

169. **Двилянский, А. А.** Синергетический подход к построению системы защиты объектов инфокоммуникационных систем от электронных атак / А. А. Двилянский, В. А. Иванов // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика : Научтехлитиздат. – № 6, 2015.– С.7–14.

170. **Двилянский А.А.** Оптимизация системы защиты информации объектов инфокоммуникационных систем от кибертеррористических угроз / А. А. Двилянский, В. А. Иванов // Информационные системы и технологии. Информационная безопасность и защита информации. – Орёл : Государственный университет – учебно-науч. производ. комплекс, № 3 (77) май-июнь.2014. – С. 118–124.

171. **Двилянский, А. А.** Характеристика объектов инфокоммуникационных систем как критически важных сегментов информационной инфраструкту-



ры Российской Федерации // Актуальные направления развития систем охраны и информации для нужд государственного управления : IX Всероссийская межведомственная научная конференция : материалы и доклады (Орёл, 11–12 февраля 2015 года). В 12 ч. Ч. 11 / А. А. Двилянский ; под общ. ред. В. В. Мизерова. – Орел : Академия ФСО России, 2015. – С. 39–44.

172. **Двилянский, А. А.** Синтез систем обнаружения аномального состояния в условиях недостаточной информации для формирования признакового пространства / А. А. Двилянский, В. Б. Ивкин, А. А. Селин // Промышленные АСУ и контроллеры : Научтехлитиздат. – № 7, 2015. – С. 13–17

173. **Dvilyanskiy A.** Substantiation of the choice of the optimal variant of measures for organizing and ensuring the protection of critical information infrastructure facilities when exposed to destructive electromagnetic radiation based on ITOSS technology / A. A. Dvilyanskiy, V.T. Eremenko, V.I. Averchenkov, A.V. Averchenkov, F.Y. Lozbinev., M.Y. Rytov // Blue Eyes Intelligence Engineering & Sciences. Volume-8 Issue-6S3, April 2019, ISSN: 2278-3075 (Online), S.618-624.

174. **Двилянский А. А.** Системотехнический синтез системы защиты объектов инфокоммуникационных систем от электронных кибератак на основе синергетического подхода / А. А. Двилянский, А.А. Двилянская : под общ. ред. В. В. Мизерова // Актуальные направления развития систем охраны и информации для нужд органов государственной власти Российской Федерации: X Всероссийская межведомственная научная конференция: материалы и доклады (Орел, 7–8 февраля 2017 года). В 11 ч. Ч. 10 / – Орел : Академия ФСО России, 2015. – С. 138–141.

175. **Перегудов. Ф. И.** Введение в системный анализ: Учеб.пособие для вузов / Ф. И. Перегудов, Тарасенко Ф. П. – Москва : Высшая школа, 1989. – 367 с. : 4 ил.

176. **Еременко В.Т.** Направления и проблемы интеграции автоматизированных систем управления для предприятий с непрерывным технологическим

циклом. / В.Т. Еременко, Д.С. Мишин, Т.М. Парамохина, А.В. Еременко, С.В. Еременко // Информационные системы и технологии. – № 4.– 2014. – С. 51–58

177. **Дорошенко, В. А.** Метод многокритериального выбора вариантов на основе генетического алгоритма / В. А. Дорошенко, Л. В. Друк, М. С. Усачев // Вестник МГУЛ – Лесной вестник, № 3 (86) – Москва: ФГБОУ ВПО МГУЛ, 2014. – С. 160–164.

178. **Программа** для реализации интеллектуальной технологии оптимизации и стабилизации систем на основе Алгоритма Дейкстры «ITOSS» // Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2019666920 Рос. Федерация; заявители и патентообладатели Двилянский А.А., Трофименков С.А., Кудров Б.Б., Никандров М.Д., Двилянская А.А.; заявл. 13.05.2019. Дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ **15.12.2019**.

179. **Льюинг, Л.** Идентификация систем. Теория для пользователя / Л. Льюинг: пер. с англ. под ред. Я.З. Цыпкина. – Москва : Наука. гл. ред. физ.-мат. лит., 1991. – 432 с.

180. **Жерненко, А.С.** Многокритериальный выбор оптимальных проектных решений в телекоммуникациях. Учебное пособие / А. С. Жерненко, В. В. Маракулин. – Санкт-Петербург : Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, 2010. – 60 с.

181. **Двилянский, А. А.** Мероприятия по защите ЭВМ и локальных вычислительных сетей от электромагнитного импульса / А. А. Двилянский, В. А. Иванов // Сборник научных трудов «Актуальные проблемы информационного обеспечения деятельности ОВД». МВД России Орловский юридический институт. – Орёл, 2004. – С. 110–114.

182. **Двилянский А. А.** Математический метод моделирования ущерба, наносимого объектам критической информационной инфраструктуры при воздействии деструктивных электромагнитных излучений / А. А. Двилянский // Промышленные АСУ и контроллеры: Научтехлитиздат. – № 8, 2019. – С. 45–51.

183. **Писарук, Н. Н.** Введение в теорию игр / Н. Н. Писарук. – Минск : БГУ, 2015. – 256 с.
184. **Nash, J.** Equilibrium points in n-person games. Proceedings of the National Academy of Science 36 (1950) 48–49.
185. **Верещагин, Н. К.** Начала теории множеств / Н. К. Верещагин, А. Шень – Москва : МЦНМО, 2014.
186. **Васильев, В.** Информационная безопасность критически важных объектов // PC Week Review: ИТ-безопасность, 18.09.2013 / [Электронный ресурс] URL: <https://www.pcweek.ru/security/article/detail.php?ID=155219> /Дата обращения 10.14.2016 г.
187. **Dvilyanskiy A.** Away to ensure the reliability of information portals of regional executive authorities / Rytov M.Y., V. T. Eremenko, A. A. Dvilyanskiy, A. P. Gorlov, O. V. Tretyakov, M. L. Gulak // Blue Eyes Intelligence Engineering & Sciences. Volume-8 Issue-6S3, April 2019, ISSN: 2278-3075 (Online), S.614-615.
188. **Dvilyanskiy A.** Problem-solving methods of reliability optimization of regional structures of socio-economic systems / Mishin D.S, Eremenko V.T, Lobanova V.A, Rytov M.Y, Dvilyanskiy A.A, Tretyakov O.V. // Blue Eyes Intelligence Engineering & Sciences. Volume-8 Issue-6S3, April 2019, ISSN: 2278-3075 (Online), S.624-629.
188. **Двилянский А. А.** Модель состояний мобильного абонентского устройства в помещениях с разными требованиями по защищенности / А. А. Двилянский, В. В. Комашинский, Д. О. Маркин // Промышленные АСУ и контроллеры : Научтехлитиздат. – № 10, 2014. – С. 40–51
189. **Харкер, Д.** Интеллектуальные здания. Проектирование и эксплуатация информационной структуры / Д. Харкер, П. Бэкон, Дж. Снайдер [и др.] – Москва: Сети МП, 1994. – 386 с.
190. **Руководство** по обследованию специальных фортификационных сооружений. ВСП 36–06–2000 МО РФ. – Москва. 2000.

191. **Пособие** по восстановлению комплексной защиты эксплуатируемых и реконструируемых специальных фортификационных сооружений от воздействия электромагнитного импульса современного оружия. НИЦ 26 ЦНИИ МО РФ. Отчёт о НИР. – Санкт-Петербург, 2001.

192. **Двилянский, А. А.** Защита автоматизированных систем управления от воздействия электромагнитного импульса методом многоконтурного архитектурного экранирования / А. А. Двилянский, В. А. Иванов, А. Н. Конищев // Вестник СНИИР. – №3 (17), 2005. – С. 58–61.

193. **Двилянский А. А.** Численный метод оптимизации экономических затрат в рамках обеспечения функциональной устойчивости объектов критической информационной инфраструктуры в условиях воздействия электромагнитных импульсов / А. А. Двилянский // Промышленные АСУ и контроллеры : Научтехлитиздат. – № 9, 2019. – С. 54–59.

194. **МДС 21-4.2001** «Методика и примеры технико-экономического обоснования противопожарных мероприятий к СНиП 2101-97».

195. **Программа** для оценки экономического эффекта «MatrixNesh» // Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2019616627 Рос. Федерация; заявители и патентообладатели Двилянский А.А., Модин А.А., Дубровин К.А., Кузьмин Н.С. – № 2019615291; заявл. 14.05.2019. Дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ **25.05.2019**.

196. **Кормен, Томас Х.,** Лейзерсон, Чарльз И., Ривест, Рональд Л., Штайн, Клиффорд. В24 Алгоритмы: построение и анализ, 2-е издание. : Пер. с англ. – М. : Издательский дом "Вильямс", 2005. – 1296 с. : ил.

197. **Программа** для проверки сходимости, устойчивости и вычислительной сложности алгоритма «MatrixCSC» // Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2020615361 Рос. Федерация; заявители и патентообладатели Двилянский А.А., Игнатушин В.Г., Лебедев Д.С., Двилянская А.А.; заявка № 2020613929. Дата поступления – 03.04.2020. Дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ 21.05.2020.

**Зависимость теплопроводности электронных элементов  
средств вычислительной техники от энергии поражения электромаг-  
нитного импульса**

Нарушения работоспособности полупроводниковых электронных приборов (ППКЭ) СЭВТ из-за электромагнитных эффектов можно оценить, если известны явления, протекающие в ППКЭ, ИМС и цепях аппаратуры, в результате действия ЭМИ, основные виды нарушений, возникающих в изделиях, зависимости этих нарушений от амплитудно-временных и спектральных характеристик ЭМИ.

В реальных условиях работы ППКЭ в составе СЭВТ на них могут воздействовать непосредственно электромагнитные поля, трансформированные по форме и ослабленные экранами объекта или блоков аппаратуры, и импульсные электрические напряжения и токи, наводимые полем ЭМИ на схемных соединениях и в самих изделиях. В связи с этим стойкость конструктивных элементов к ЭМИ в целом определяется двумя показателями: стойкостью к воздействию электрических и магнитных полей и стойкостью к прикладываемым импульсным напряжениям (импульсная электрическая прочность). Под импульсной электрической прочностью понимается способность изделий и материалов выполнять свои функции и сохранять параметры в пределах норм, установленных в нормативно-технической документации, в процессе или после воздействия импульсного напряжения заданной формы и длительности.

Импульсная электрическая стойкость является основной характеристикой, определяющей предел работоспособности ППКЭ в целом при воздействии наведенных импульсных токов и напряжений, вызванных ЭМИ. При этом основной причиной отказа ППКЭ и ИМС является вторичный тепловой пробой, который наблюдается во всех типах полупроводниковых приборов и элементов, наиболее критичных к воздействию импульсных токов и напряжений. В наибольшей степени этот эффект проявляется в быстродействующих интегральных микросхемах [1-3].

При воздействии импульсных напряжений на изделия может быть потеря работоспособности из-за пробоя изоляционных материалов. Изменение свойств диэлектриков в результате пробоя необратимо и приводит к полному отказу изделий. Процесс пробоя диэлектриков носит электронный характер и развивается за время от  $10^{-9}$  до  $10^{-6}$  с.

Лавинный и туннельный пробой вызывается неограниченным возрастанием тока между электродами полупроводникового элемента при ударной ионизации и лавинном умножении носителей заряда в результате действия электрического поля большой напряжённости и, как следствие, рост концентрации носителей заряда становится лавинным [4], что приводит к резкому возрастанию обратного тока перехода, который может превысить допустимое значение.

После воздействия импульса перенапряжения, если электрический пробой не перешел в тепловой, значение обратного тока возвращается к первоначальному (допробойному).

Лавинный пробой характеризуется напряжением лавинного пробоя  $U_{\text{Лпроб}}$ . Значение  $U_{\text{Лпроб}}$  зависит от формы  $p-n$ - перехода и определяется следующим выражением [4, 5]:

$$U_{\text{Лпроб}} = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 E_{\text{Лпроб}}^2 \cdot N^{-0,75} \cdot d_0}{2q}, \quad (\text{A1})$$

где  $\varepsilon$  – диэлектрическая проницаемость;  $\varepsilon_0$  – диэлектрическая постоянная;  $E_{\text{Лпроб}}$  – критическая напряжённость электрического поля, приводящая к лавинному пробую;  $N$  – концентрация примеси;  $d_0$  – толщина диэлектрика;  $q$  – заряд электрона. Из выражения (1) для диэлектрика из  $\text{SiO}_2$  рассчитывается  $E_{\text{Лпроб}}$  [4,5]:

$$E_{\text{Лпроб}} = \sqrt{\frac{U_{\text{Лпроб}} \cdot 2q}{\varepsilon\varepsilon_0 \cdot N^{-0,75} \cdot d_0}} \approx 10^5 \text{ В/см}, \quad (\text{A2})$$

Величина напряжения туннельного пробоя определяется из выражения [4,5]:

$$U_{\text{Тпроб}} = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 E_{\text{Тпроб}}^2 \cdot \left(\frac{1}{N_a} + \frac{1}{N_d}\right)}{2q} - \varphi_T, \quad (\text{A3})$$

где  $\varphi_T$  – тепловой потенциал;  $E_{\text{Тпроб}}$  – критическая напряжённость электрического поля, приводящая к туннельному пробую;  $N_a$ ,  $N_d$  – концентрация акцепторов и доноров. Из выражения (3) для диэлектрика из  $\text{SiO}_2$  рассчитывается  $E_{\text{Тпроб}}$ :

$$E_{\text{Тпроб}} = \sqrt{\frac{U_{\text{Тпроб}} \cdot 2q}{\varepsilon\varepsilon_0 \cdot \left(\frac{1}{N_a} + \frac{1}{N_d}\right)} + \varphi_T} \approx 1,4 \cdot 10^5 \text{ В/см}. \quad (\text{A4})$$

Напряжение пробоя подзатворного диэлектрика определяется по формуле [4,5]:

$$U_{\text{ПЗпроб}} = \frac{E_{\text{ПЗпроб}}}{d_0}, \quad (\text{A5})$$

где  $E_{\text{ПЗпроб}}$  – критическая напряжённость электрического поля, приводящая к пробую подзатворного диэлектрика;  $d_0$  – толщина диэлектрика. Из выражения (A5) для диэлектрика из  $\text{SiO}_2$  рассчитывается  $E_{\text{ПЗпроб}}$  [4,5]:

$$E_{\text{ПЗпроб}} = \frac{U_{\text{ПЗпроб}}}{d_0} \approx 6 \times 10^6 \text{ В/см}. \quad (\text{A6})$$

При возникновении вторичных эффектов происходит тепловой вторичный пробой (ТВП) полупроводниковых элементов и «электрическое блокирование». Основной причиной, приводящей к повреждению полупроводниковых элементов при ТВП, является выделение значительной тепловой мощности в активных объемах за короткий промежуток времени (1...10 мкс). Для оценки энергии повреждения элемента при тепловом вторичном пробое  $W_{\text{ТВП}}$  используется выражение, полученное из уравнения теплопроводности, справедливое для импульса прямоугольной формы [4]:

$$W_{\text{ТВП}} = \left( \rho \cdot V \cdot C \cdot T_{\text{кр}} + \left( S \cdot \sqrt{\rho \cdot V \cdot C \cdot K \cdot t_3} + a_y \cdot K \cdot t_3 \right) \right) \cdot T_0, \quad (\text{A7})$$

где  $V, S$  – эквивалентный объем и площадь тепловыведения;  $a_y$  – эквивалентный радиус тепловыведения;  $\rho$  – плотность;  $C$  – теплоёмкость;  $K$  – теплопроводность;  $T_{\text{кр}}$  – критическая температура теплового пробоя;  $T_0$  – рабочая температура;  $t_3$  – время задержки наступления пробоя.

#### Справка:

1. **Антипин В. В.**, и др. Влияние мощных импульсных микроволновых помех на полупроводниковые приборы и ИМС // Зарубежная радиоэлектроника, № 1, 1995. – С. 37–54.
2. **Горячев, В. А.**, Захаров С. М. Характеристики электромагнитных наводок в линиях связи микропроцессоров. // Успехи современной радиоэлектроники, № 7, 2004. – С.4–10.
3. **Добыкин, В. Д.** Оценка статистических характеристик теплового поражения полупроводниковых приборов. // Радиотехника, № 10, 2004. – С. 58-65.
4. **Кравченко, В. И.** Радиоэлектронные средства и мощные электромагнитные помехи – М. : Радио и связь, 1985. – 256 с.
5. **Двилянский, А. А.**, Иванов В. А. Обоснование критерия функционального поражения ЭВМ. // Телекоммуникации, 2005, № 4. – С. 3–8.



## Аттестат и свидетельство аккредитации

**РОСАККРЕДИТАЦИЯ** **ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА ПО АККРЕДИТАЦИИ** № 0000554

**АТТЕСТАТ АККРЕДИТАЦИИ**

№ РОСС RU.0001.21A967 выдан 29 октября 2014 г.  
номер аттестата аккредитации и дата выдачи

Настоящий аттестат выдан Открытому акционерному обществу "31 Государственный проектный институт специального строительства"  
наименование и ИНН (СНИЛС) заявителя  
 ИНН 7704730704

119121 г. Москва, Смоленский б-р, д. 19, стр. 1  
место нахождения (место жительства) заявителя

и удостоверяет, что Испытательный центр электромагнитных и механических воздействий Открытого акционерного общества "31 Государственный проектный институт специального строительства" (23 Государственного морского проектного института филиала ОАО "31 Государственный проектный институт специального строительства)  
наименование  
 адрес места (мест) государственной аккредитации  
191167, г. Санкт-Петербург, ул. Атаманская, д. 6

соответствует требованиям ГОСТ ИСО/МЭК 17025-2009  
 аккредитован(о) в качестве Испытательной лаборатории (центра)  
 в соответствии с областью аккредитации, область аккредитации определена в приложении к настоящему аттестату и является неотъемлемой частью аттестата.

Дата внесения сведений в реестр аккредитованных лиц 11 сентября 2014 г.

М.П.

Руководитель (заместитель Руководителя)  
 Федеральной службы по аккредитации

*М.А. Якутова*  
подпись  
 М.А. Якутова  
заместитель руководителя

Ваше обращение 100-8187081, www.rsa.gov.ru, г. Москва, Б. Пискаревский пр., 10/10-10/10 ФГУП Росаккредитация, г. Москва, Б. Пискаревский пр., 10/10-10/10 ФГУП Росаккредитация, г. Москва, 2014 г.



## Акты внедрения



**МИНИСТЕРСТВО ОБОРОНЫ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**  
**ВОЕННО-СТРОИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС**  
 Акционерное общество  
**31 ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ПРОЕКТНЫЙ ИНСТИТУТ**  
**СПЕЦИАЛЬНОГО СТРОИТЕЛЬСТВА**  
 (АО «31 ГПИСС»)



Смоленский бульвар, дом 19, строение 1, Москва, 119121  
 Тел. (499) 241-58-23, факс (499) 241-26-65; E-mail: info@31gpiss.ru  
 ОКПО 07795572; ОГРН 1097746425370; ИНН/КПП 7704730704/770401001

**УТВЕРЖДАЮ**  
 Директор «23 ГМПИ –  
 филиала АО «31 ГПИСС»  
 доктор технических наук, профессор

  
 В.А. Булат  
 (по доверенности от 01.04.2019 г.)

«17» декабря 2019 г.

**АКТ****о внедрении результатов диссертационных исследований****ДВИЛЯНСКОГО Алексея Аркадьевича**

Научно-техническая комиссия в составе: председателя – заместителя директора «23 ГМПИ – филиала АО «31 ГПИСС» по научной работе Лесникова Е.В., членов: начальника отдела конструкционной защиты от электромагнитных воздействий Куприенко В.М., главного специалиста Виноградова В.В. составила настоящий акт о внедрении результатов диссертационной работы Двилянско́го Алексе́я Аркадьевича, направленной на решение актуальной научной проблемы, направленной на разработку математических моделей адекватного отображения процессов обеспечения функциональной устойчивости объектов критической информационной инфраструктуры (КИИ) при воздействии электромагнитных импульсов (ЭМИ) в условиях изменения электромагнитной обстановки.

Комиссия подтверждает, что проведенные на экспериментальной площадке «Испытательного центра электромагнитных и механических воздействий «23 ГМПИ – филиала АО «31 ГПИСС» натурные испытания (эксперимент) (протокол №11/15-2017 от 22.03.2017) средства ЭВТ (ЭВМ Intel Celeron E3200) показали, что разработанное автором на основе математического моделирования параметров экранирующей конструкции конструктивно-технологическое решение в виде многослойной экранирующей конструкции, выполненной по технологии «полимер-металл-полимер» с технологическими неоднородностями в виде запредельных волноводов в форме полых шестиугольных призм, **внедрено** при разработке технических решений по обеспечению ослабления воздействующих на телекоммуникационное оборудование (ТКО) объектов КИИ электромагнитных полей СВЧ-диапазона различной природы происхождения и невозможности перехвата радиосигналов в процессе настройки ТКО в технологическом зале специального объекта «720/7».

Результаты математического моделирования параметров экранирующей конструкции, проведенного автором в программной системе конечно-элементного анализа *ANSYS HFSS 11.0*, в рамках разработанных комплексов проблемно-ориентированных программ для проведения вычислительного эксперимента и алгоритмов, реализующих математические методы моделирования по обеспечению живучести и помехозащищённости объектов КИИ при воздействии ЭМИ обеспечили ослабление электромагнитных полей в диапазоне от 0,8 до 10 ГГц, воздействующих на СВТ, обрабатывающих специальную информацию, с погрешностью 14% от экспериментальных данных, полученных в рамках испытаний ЭВМ на соответствие требованиям п. 5.3 «а» ГОСТ РВ 20.39.308-98 (протокол № 11/15-2017 от 22.03.2017).

Использование предложенной автором конструкции электромагнитного экрана позволило добиться требуемого уровня ослабления излучаемых радиосигналов до 120 дБ за пределами технологического зала, при этом затраты на проектирование были сокращены на 60 чел-час, сэкономлено 0,64 т. металла (сталь горячекатаная – Ст3пс) по сравнению с традиционной конструкцией экрана технологического зала.

Разработанные автором математические методы моделирования прогнозной оценки по обеспечению живучести и помехозащищённости при воздействии излучений различной природы происхождения были использованы при выполнении специальных расчетов, выполненных отделом конструкционной защиты от

электромагнитных воздействий при расчетно-аналитическом обосновании проектных решений на реконструкцию специального объекта «3165-А».

Акт внедрения результатов диссертационного исследования рассмотрен и одобрен 19 ноября 2019 г. на заседании отдела конструкционной защиты от электромагнитных воздействий «23 ГМПИ - филиала АО «31 ГПИСС» (протокол №15/1-19 от 19.11.2019).

Председатель комиссии: кандидат технических наук  
доцент

Е.В. Лесников

Члены комиссии: доктор технических наук  
доцент

В.М. Куприенко

доктор технических наук  
доцент  
академик РАЕН

В.В. Виноградов



**МИНИСТЕРСТВО ОБОРОНЫ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**  
**ВОЕННО-СТРОИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС**  
 Акционерное общество  
**31 ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ПРОЕКТНЫЙ ИНСТИТУТ**  
**СПЕЦИАЛЬНОГО СТРОИТЕЛЬСТВА**  
 (АО «31 ГПИСС»)



Смоленский бульвар, дом 19, строение 1, Москва, 119121  
 Тел. (499) 241-58-23, факс (499) 241-26-65; E-mail: info@31gpiss.ru  
 ОКПО 07795572; ОГРН 1097746425370; ИНН/КПП 7704730704/770401001

### ДОВЕРЕННОСТЬ

Город Москва

первое апреля две тысячи девятнадцатого года

Настоящей доверенностью акционерное общество «31 Государственный проектный институт специального строительства» (юридический адрес: г. Москва, Смоленский бульвар, дом 19, строение 1, ИНН 7704730704, ОГРН 1097746425370) (далее - Общество), в лице Генерального директора **Климова Александра Михайловича**, действующего на основании Устава, уполномочивает

директора «23 Государственный морской проектный институт - филиал акционерного общества «31 Государственный проектный институт специального строительства» **Булата Владимира Арнольдовича**, паспорт гражданина РФ 40 01 № 783855, выдан 58 отделом милиции Выборгского района Санкт-Петербурга 30.10.2001 года, зарегистрированного по месту жительства: г. Санкт-Петербург, ул. Композиторов, дом 1, корпус 1, квартира 352,

совершать от имени Общества следующие действия:

- представлять интересы Общества в Высшей аттестационной комиссии при Министерстве науки и высшего образования Российской Федерации (далее-ВАК при Минобрнауки России);
- давать согласие выступать ведущей организацией по диссертационным работам, подписывать отзывы на диссертации и авторефераты, представлять необходимые открытые сведения в ВАК при Минобрнауки России и выполнять иные действия, связанные с данным поручением.

Настоящая доверенность выдана сроком по тридцать первое декабря две тысячи девятнадцатого года без права передоверия.

Подпись **Булата Владимира Арнольдовича** \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_ удостоверяю.

**Генеральный директор акционерного общества**  
**«31 Государственный проектный институт специального строительства»**

А.М. Климов





АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО

“НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
“РУБИН”

а/я 359, Кангемировская, д. 5, Санкт-Петербург, 197342, тел.: (812)670-89-89, факс: (812)596-35-81, e-mail: inforubin@rubin-spb.ru  
ИНН/КПП 7802776390/780201001, ОГРН 1127847043720, ОКПО 07542394

№ K-1567 от 18.12.2019

УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор

С.С. Степанов

«18» декабря 2019 г.



## АКТ

об использовании результатов диссертационных исследований  
Двилянского Алексея Аркадьевича, выполненных на специальную тему

Научно-техническая комиссия в составе: председателя – начальника научно-исследовательского отдела Смирнова К.А., членов: ведущего научного сотрудника Буренина А.Н., старшего научного сотрудника Винниченко А.В., составила настоящий акт о том, что результаты диссертационных исследований Двилянского А.А., в части, касающейся вопросов разработки научно-методологического аппарата моделирования функциональной устойчивости объектов критической информационной инфраструктуры при воздействии электромагнитных импульсов, использованы при проведении ОКР «Утилита» (Научно-технический отчет инв. 6152, инв. 6154).

Комиссия считает, что предложенный автором комплекс проблемно-ориентированных программ на основе разработанных математических методов моделирования, позволяет обосновать конструктивно-технологическое решение по построению экранирующей конструкции СВТ, проводить оценку ущерба, живучести и помехозащищенности, и в последующем создаёт предпосылки для формирования численного метода оптимизации экономических затрат, предусматривающий максимизацию предотвращаемого ущерба объектов критической информационной инфраструктуры (КИИ) при воздействии электромагнитных импульсов, что обеспечивает значительный экономический эффект от средств, необходимых для формирования системы обеспечения функциональной устойчивости объектов КИИ в условиях данных воздействий.

Председатель комиссии: кандидат технических наук  
\_\_\_\_\_ К.А. Смирнов

Члены комиссии доктор технических наук, доцент  
\_\_\_\_\_ А.Н. Буренин  
кандидат военных наук, старший научный сотрудник  
\_\_\_\_\_ А.В. Винниченко

Первый проректор ФГБОУ  
«Брянский государственный  
технический университет»

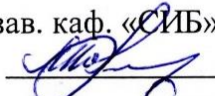
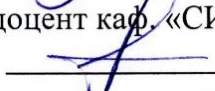
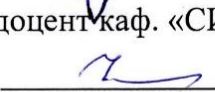
В.А. Шкаберин

« 23 » декабря 2019 г.

АКТ

об использовании результатов диссертационных исследований  
Двилянского Алексея Аркадьевича

Научно-техническая комиссия в составе: председателя – зав. каф. «СИБ» Рытов М.Ю., членов: доцента каф. «СИБ» Гулака А.Л., доцента каф. «СИБ» Горлова А.П. составила настоящий акт о том, что результаты диссертационных исследований, проведенных Двилянским А.А., в части, касающейся разработки метода оптимизации экономических затрат для оценки экономического эффекта по обеспечению функциональной устойчивости объектов КИИ, предусматривающего максимизацию предотвращаемого ущерба при воздействии ЭМИ, используются в учебном процессе кафедры «Системы информационной безопасности» ФГБОУ «Брянский государственный технический университет» в рамках учебной дисциплины «Системы и сети связи».

Председатель комиссии:	зав. каф. «СИБ» 	М.Ю. Рытов
Члены комиссии	доцент каф. «СИБ» 	М.Л. Гулак
	доцент каф. «СИБ» 	А.П. Горлов





Общество с ограниченной ответственностью «Славсервис-Связь»  
(ООО «Славсервис-Связь»)

Наугорское шоссе, д. 5, г. Орёл, 302020  
Тел./факс (4862) 43-22-08, E-mail: sss@slavservis.ru  
ОКПО 49703345, ОГРН 1025700829197, ИНН 5753024987, КПП 575301001

«\_\_» марта 2020 г.

№ \_\_\_\_\_

г. Орёл

УТВЕРЖДАЮ  
Директор ООО «Славсервис-Связь»,  
кандидат социологических наук



Е.В. Тучков

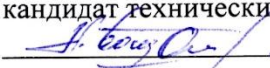
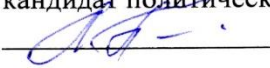
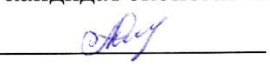
«\_\_» марта 2020 г.

АКТ

об использовании результатов диссертационных исследований  
Двилянского Алексея Аркадьевича

Научно-техническая комиссия в составе: председателя – начальника Учебного центра дополнительного профессионального образования кандидата технических наук доцента Богданова Н.Г. и членов: аналитика-методиста ЦЗИ кандидата политических наук доцента Проскураковой Л.Г., заместителя начальника ОТЗКИ кандидата экономических наук Грядуновой А.В. составила настоящий акт о том, что результаты диссертационных исследований, проведенных Двилянским А.А., в части, касающейся вопросов математического моделирования ущерба, наносимого объектам критической информационной инфраструктуры (КИИ), а также живучести и помехозащищенности данных объектов при воздействии электромагнитных импульсов (ЭМИ) с учетом условий их функционирования использованы в ООО «Славсервис-Связь» в рамках разработки «Методики проведения категорирования объектов критической информационной инфраструктуры».

Настоящим документом также подтверждается использование практических рекомендаций, предложенных автором, при составлении рабочих программ по дополнительному профессиональному образованию по направлению «Обеспечение безопасности критических информационных инфраструктур».

Председатель комиссии:	кандидат технических наук доцент 	Н.Г. Богданов
Члены комиссии	кандидат политических наук доцент 	Л.Г. Проскуракова
	кандидат экономических наук 	А.В. Грядунова

Окончание прил. В



«УТВЕРЖДАЮ»  
Директор ФГУП «НТЦ «ОРИОН»

Маркин А.В.




«2» апреля 2021 года

**АКТ**

о внедрении результатов диссертационной работы  
ДВИЛЯНСКОГО Алексея Аркадьевича, выполненной на тему:  
«Методология математического моделирования обеспечения  
функциональной устойчивости объектов критической информационной  
инфраструктуры при воздействии электромагнитных импульсов» и  
представляемой на соискание ученой степени доктора технических наук

Комиссия в составе председателя – начальника научно-организационного отдела доктора технических наук доцента Коньшева М.Ю. и членов: главного специалиста научно-организационного отдела доктора военных наук профессора Иванова В.А. и старшего научного сотрудника научно-организационного отдела кандидата физико-математических наук Романца А.В, составила настоящий акт о внедрении результатов диссертационной работы Двилянско А. А.

Комиссия подтверждает, что положения диссертационной работы Двилянско А.А. использованы при разработке материалов НИР «Цемент».

Председатель комиссии:	доктор технических наук доцент		Коньшев М.Ю.
Члены комиссии:	доктор военных наук профессор		Иванов В.А.
	кандидат физико- математических наук		Романец А. В.

Листинг (исходный код) программы для проверки на устойчивость и сходимость алгоритма численного метода оптимизации экономических затрат

Unit4.cpp

```
// -----

#include <vcl.h>
#pragma hdrstop

#include "Unit4.h"
// -----
#pragma package(smart_init)
#pragma resource "*.dfm"
TForm4 *Form4;

// -----
__fastcall TForm4::TForm4(TComponent* Owner) : TForm(Owner) {
}
const int n = 4;
float dano[n][n], a[n][n], mass[n][n];
double b[n];
float k(0), max(0), tempx(0), opr(1);
int index(0), high;

// -----
void __fastcall TForm4::FormCreate(TObject *Sender) {
    for (int h = 0; h < 4; h++)
        StringGrid1->Cells[h][h] = 0.272;
    StringGrid1->Cells[0][1] = 0.814;
    StringGrid1->Cells[0][2] = 0.58;
    StringGrid1->Cells[1][2] = 2.094;
    StringGrid1->Cells[0][3] = 2.094;
```

```

StringGrid1->Cells[1][3] = 0.58;
StringGrid1->Cells[2][3] = 0.814;
StringGrid1->Cells[1][0] = 0.814;
StringGrid1->Cells[2][0] = 2.094;
StringGrid1->Cells[3][0] = 0.58;
StringGrid1->Cells[2][1] = 0.58;
StringGrid1->Cells[3][1] = 2.094;
StringGrid1->Cells[3][2] = 0.814;
}
// -----

```

```

void __fastcall TForm4::Image1Click(TObject *Sender) {

```

ShowMessage("В данной программной реализации представлены следующие функции: \n1) Левая кнопка выполняет расчет сходимости матрицы с помощью метода Зейделя, а также определяет его вычислительную сложность;\n2) Правая кнопка определяет устойчивость матрицы, которая по правилу определения знаков миноров на главной диагонали.");

```

}
// -----

```

```

void __fastcall TForm4::Button1Click(TObject *Sender) {
if(Edit1->Text.IsEmpty() || Edit2->Text.IsEmpty() || Edit3->Text.IsEmpty() || Edit4->Text.IsEmpty() ){

```

```

ShowMessage("Введите все параметры b!");

```

```

}
else{
float x[n] = {0, 0, 0, 0};
float tempper[n + 1] = {0, 0, 0, 0, 0};
b[0]=Edit1->Text.ToDouble();
b[1]=Edit2->Text.ToDouble();
b[2]=Edit3->Text.ToDouble();
b[3]=Edit4->Text.ToDouble();
Label4->Caption = "";
Label5->Caption = "";
}
}

```

```

Label6->Caption = "";
Label8->Caption = "";
opr = 1;
for (int r = 0; r < 4; r++) {
    for (int t = 0; t < 4; t++) {
        dano[r][t] = StrToFloat(StringGrid1->Cells[t][r]);
        a[r][t] = dano[r][t];
    }
}
for (int i = 0; i < n - 1; i++) { // цикл для i-ых элементов строки
    for (int j = 1 + i; j < n; j++) { // цикл для j-ой строки
        k = a[j][i] / a[i][i];
        // -----
        if (a[i][i] == 0) {
            max = a[i + 1][i];
            index = i;
            for (int m = i + 2; m < n; m++) {
                if (max < a[m][i]) {
                    max = a[m][i];
                    index = m;
                }
            }
        }
        if (index != 0) { // перестановка
            for (int per = 0; per < n + 1; per++) {
                if (per == n) {
                    tempper[per] = b[index];
                    b[index] = b[i];
                    b[i] = tempper[per];
                }
                tempper[per] = a[index][per];
                a[index][per] = a[i][per];
                a[i][per] = a[index][per];
            }
        }
    }
}

```

```

        index = 0;
        for (int per = 0; per < n + 1; i++) {
            tempper[per] = 0;
        }
    }

    // вычитание строк прямой ход-----
    for (int p = 0; p < n; p++) {
        a[j][p] = a[j][p] - k * a[i][p];
        if (abs(a[j][p]) < 0.0001)
            a[j][p] = 0;
    }
    b[j] = b[j] - k * b[i];
}
high = 4 * i - 1;    }

// -----
// ВЫВОДб
for (int j = 0; j < n; j++) {
    Label4->Caption = Label4->Caption + FloatToStrF(b[j],ffGeneral,4,2) + "
";
}

// поиск x обратный ход

for (inti = n - 1; i>= 0; i--) { // i-строка f предел вычитания
    for (intj = 0; j<n; j++) { // j-вычитание строки
        tempx += x[j] * a[i][j];
    }
    x[i] = (b[i] - tempx) / a[i][i];
    tempx = 0;
}
// ВЫВОД x
for (int j = 0; j < n; j++) {

```

```

Label5->Caption = Label5->Caption + FloatToStrF(x[j],ffGeneral,4,2) + " ";
}

// определитель
for (int i = 0; i < n; i++) {
    opr *= a[i][i];
}
Label6->Caption = FloatToStrF(opr,ffGeneral,4,2);
Label8->Caption = high * high * high;
}
}
// -----
void __fastcall TForm4::Button2Click(TObject *Sender) {
    for (int i = 0; i < 4; i++) {
        for (int j = 0; j < 4; j++) {
            mass[i][j] = StrToFloat(StringGrid1->Cells[j][i]);
        }
    }
    float e[n];
    e[0] = mass[1][1] * mass[2][2] * mass[3][3] +
mass[1][2] * mass[2][3] * mass[3][1] + mass[2][1] * mass[3][2] * mass[1]
    [3] - mass[1][3] * mass[2][2] * mass[3][1] -
mass[3][2] * mass[2][3] * mass[3][1] -
    mass[2][1] * mass[1][2] * mass[3][3];
    e[1] = mass[1][0] * mass[2][2] * mass[3][3] +
    mass[1][2] * mass[2][3] * mass[3][0] + mass[2][0] * mass[3][2] * mass[1]
    [3] - mass[1][3] * mass[2][2] * mass[3][0] -
    mass[3][2] * mass[2][3] * mass[1][0] -
    mass[1][2] * mass[2][0] * mass[3][3];
    e[2] = mass[1][0] * mass[2][1] * mass[3][3] +
    mass[1][1] * mass[2][3] * mass[3][0] + mass[2][0] * mass[3][1] * mass[1]
    [3] - mass[1][3] * mass[2][1] * mass[3][0] -
    mass[2][3] * mass[3][1] * mass[1][0] -
    mass[2][0] * mass[1][1] * mass[3][3];
}

```

```

e[3] = mass[1][0] * mass[2][1] * mass[3][2] +
      mass[1][1] * mass[2][2] * mass[3][0] + mass[2][0] * mass[3][1] * mass[1]
      [2] - mass[1][2] * mass[2][1] * mass[3][0] -
      mass[3][1] * mass[2][2] * mass[1][0] -
      mass[2][0] * mass[1][1] * mass[3][2];
Label15->Caption = e[0];
Label16->Caption = e[1];
Label17->Caption = e[2];
Label18->Caption = e[3];
if (e[0]*e[1]*e[2]*e[3] > 0)
    Label14->Caption = "устойчива";
else
    Label14->Caption = "неустойчива";
}
// -----
Unit4.h
//-----
#ifndef Unit4H
#define Unit4H
//-----
#include <System.Classes.hpp>
#include <Vcl.Controls.hpp>
#include <Vcl.StdCtrls.hpp>
#include <Vcl.Forms.hpp>
#include <Vcl.Grids.hpp>
#include <Vcl.ExtCtrls.hpp>
#include <Vcl.Imaging.pngimage.hpp>
//-----
class TForm4 : public TForm
{
__published:// IDE-managed Components
TStringGrid *StringGrid1;
    TImage *Image1;
    TLabel *Label1;

```



```

TButton *Button1;
    TLabel *Label2;
    TLabel *Label3;
    TLabel *Label4;
    TLabel *Label5;
    TLabel *Label6;
    TLabel *Label7;
    TLabel *Label8;
TButton *Button2;
TLabel *Label9;
TLabel *Label10;
TLabel *Label11;
TLabel *Label12;
TLabel *Label13;
TLabel *Label14;
TLabel *Label15;
TLabel *Label16;
TLabel *Label17;
TLabel *Label18;
TEdit *Edit1;
TEdit *Edit2;
TEdit *Edit3;
TEdit *Edit4;
void __fastcall FormCreate(TObject *Sender);
void __fastcall Image1Click(TObject *Sender);
void __fastcall Button1Click(TObject *Sender);
void __fastcall Button2Click(TObject *Sender);
private:    // User declarations
public:    // User declarations
fastcall TForm4(TComponent* Owner);
};
//-----
extern PACKAGE TForm4 *Form4;
//-----
#endif

```