

Открытое акционерное общество
«Научно-исследовательский институт «Аргон»

На правах рукописи

Михайлов Виктор Алексеевич

РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ И МОДЕЛЕЙ АНАЛИЗА И ОЦЕНКИ
УСТОЙЧИВОГО ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ БОРТОВЫХ ЦИФРОВЫХ
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ КОМПЛЕКСОВ В УСЛОВИЯХ ПРЕДНАМЕРЕННОГО
ВОЗДЕЙСТВИЯ СВЕРХКОРОТКИХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ

Специальность 05.12.13 – Системы, сети и устройства телекоммуникаций

Диссертация на соискание ученой степени
доктора технических наук

Научный консультант:
доктор технических наук,
профессор
А.В.Царегородцев

Москва 2014

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	7
ГЛАВА 1 Современное состояние проблемы оценки устойчивого функционирования бортовых цифровых вычислительных комплексов в условиях преднамеренного воздействия мощных электромагнитных излучений.....	27
1.1 Анализ нормативных документов по обеспечению устойчивости инфокоммуникационных систем к воздействию СК ЭМИ в России и за рубежом	27
1.2 Особенности воздействия СК ЭМИ на элементы и узлы БЦВК.....	41
1.3 Обзор существующих методов анализа и оценки деструктивного воздействия СК ЭМИ на элементы и узлы БЦВК.....	49
1.3.1 Расчетные методы	49
1.3.2 Экспериментальные методы	68
1.3.3. Расчетно-экспериментальные методы.....	69
1.4 Анализ методов и средств обеспечения устойчивости БЦВК к деструктивному воздействию мощных СК ЭМИ.....	71
1.5 Выводы по главе и выбор направления исследований.....	74
ГЛАВА 2 Методы интеллектуального анализа данных в задачах оценки устойчивости БЦВК к деструктивному воздействию СК ЭМИ.....	78
2.1 Структура интеллектуальной системы анализа устойчивости БЦВК к деструктивному воздействию ЭМИ.....	78
2.2 Интеллектуальные методы решения задач оценки устойчивости элементов и узлов БЦВК к деструктивному действию СК ЭМИ.....	83
2.3 Нейросетевые методы обнаружения деструктивных ЭМВ.....	90
2.4 Гибридные средства обнаружения деструктивных ЭМВ на элементы и узлы БЦВК.....	100
2.4.1 Эволюционно-генетический подход.....	101
2.4.2 Нейросетевые экспертные системы в задачах обнаружения деструктивных ЭМВ.....	114
2.4.3 Нейро-нечеткие методы для обнаружения деструктивных ЭМВ.....	118
2.5 Выводы по главе.....	122
ГЛАВА 3 Модели взаимодействия мощных импульсных электромагнитных полей с элементами БЦВК.....	124

3.1 Структура и характеристики современных БЦВК.....	126
3.2 Организация систем информационного обмена и требования к стойкости каналов передачи данных современных БЦВК.....	138
3.3 Математическая модель воздействия СК ЭМИ на каналы передачи данных и управления БЦВК.....	150
3.3.1 Особенности построения высокоскоростных бортовых сетей на основе технологии Gigabit Ethernet.....	151
3.3.2 Анализ воздействия деструктивных ЭМИ на каналы передачи данных БЦВК на основе технологии Gigabit Ethernet.....	154
3.3.3 Математическая модель потерь кадров в сетях Gigabit Ethernet при воздействии СК ЭМИ.....	158
3.4 Математическая модель взаимодействия СК ЭМИ с универсальными вычислителями контура управления БЦВК.....	163
3.4.1 Исследование воздействия сверхкоротких электромагнитных импульсов на универсальные вычислители БЦВМ.....	163
3.4.2 Математическая модель взаимодействия электромагнитного поля с микропроцессорными устройствами БЦВМ.....	166
3.4.3 Эффективность поражающего действия СК ЭМИ на печатные платы управляющих устройств БЦВК.....	175
3.5 Методика оценки воздействия СКИ ЭМИ на типовые микропроцессорные устройства контура управления БЦВК.....	177
3.6 Выводы по главе.....	179
ГЛАВА 4 Критериально-математический аппарат построения интеллектуальной системы анализа и оценки устойчивости БЦВК к деструктивному воздействию ЭМИ.....	181
4.1 Базовые принципы построения интеллектуальной системы анализа и оценки устойчивости БЦВК к деструктивному воздействию ЭМИ	181
4.2 Основные этапы построения интеллектуальной системы с использованием адаптивных средств для обнаружения деструктивных ЭМП на элементы и узлы БЦВК.....	185
4.2.1 Иерархия уровней системы обнаружения деструктивных ЭМВ.....	188
4.2.2 Организация иерархии уровней системы обнаружения деструктивных	

ЭМВ.....	191
4.3 Разработка показателей стойкости элементов и узлов БЦВК к деструктивному воздействию ЭМИ.....	197
4.3.1 Требования к элементам БЦВК.....	197
4.3.2 Анализ эффектов, возникающих в БЦВК при деструктивном воздействии СК ЭМИ.....	201
4.3.3 Критерии оценки уязвимости БЦВК от воздействия деструктивных СК ЭМИ.....	207
4.4 Методика оценки стойкости БЦВК к деструктивному воздействию ЭМИ	214
4.5 Сценарии работы СОДЭМВ по обнаружению воздействия на БЦВК деструктивных СК ЭМИ.....	221
4.5.1 Сервис маршрутизации.....	225
4.6 Выводы по главе.....	239
ГЛАВА 5 Аппаратно-программная реализация интеллектуальной системы анализа и оценки устойчивости БЦВК к деструктивному воздействию ЭМИ	242
5.1 Модель интеллектуальной системы анализа устойчивости элементов и узлов БЦВК к деструктивному воздействию СК ЭМИ.....	242
5.1.1 Модель системы обнаружения деструктивных ЭМВ.....	242
5.1.2 Модель потока ЭМВ.....	245
5.2 Аппаратно-программная реализация интеллектуальной системы анализа и оценки устойчивости БЦВК к деструктивному воздействию ЭМИ....	250
5.2.1 Нейросетевая реализация интеллектуальной системы анализа и оценки устойчивости БЦВК к деструктивному воздействию ЭМИ.....	251
5.2.2 Организация многофункциональной памяти.....	260
5.2.3 Оценка эффективности реализации процессов интеллектуальной системы анализа и оценки устойчивости БЦВК к деструктивному воздействию СК ЭМИ.....	261
5.3 Структурные решения нейросетевой реализации ИСАУ БЦВК.....	263
5.3.1 Командные пулы уровня формального нейрона.....	269
5.3.2 Командные пулы уровня слоя формальных нейронов.....	274
5.4 Аппаратно-программные средства интеллектуальной системы обеспечения устойчивости БЦВК к деструктивному воздействию ЭМИ.....	281

5.5 Программная реализация режимов ИСАУ БЦВК при воздействии деструктивных СК ЭМИ.....	288
5.6 Выводы по главе.....	291
ГЛАВА 6 Экспериментальные исследования воздействия преднамеренных сверхкоротких электромагнитных излучений на элементы и узлы БЦВК...	294
6.1. Научно-методическое обеспечение проведения экспериментальных исследований на воздействие преднамеренных сверхкоротких электромагнитных излучений на элементы и узлы БЦВК.....	294
6.1.1. Выбор и обоснование объектов и условий для проведения экспериментальных исследований на воздействие СК ЭМИ.....	294
6.1.2 Выбор и обоснование экспериментальной базы для проведения экспериментальных исследований на воздействие СКИ ЭМП.....	296
6.1.3.Программа и методики проведения экспериментальных исследований устойчивости БЦВК к воздействию мощных СКИ ЭМП.....	298
6.1.4 Обоснование требований предъявляемых к образцу, методам и средствам его испытаний на воздействие СКИ ЭМИ.....	304
6.2 Экспериментальные исследования воздействия СКИ ЭМИ на элементы и узлы БЦВК.....	306
6.2.1 Критерии оценки устойчивости БЦВК при воздействии СКИ ЭМИ...	306
6.2.2 Результаты исследований устойчивости различных БЦВМ в условиях воздействия СКИ ЭМИ.....	308
6.2.3 Результаты исследований стойкости каналов передачи данных и управления БЦВК в условиях воздействия СКИ ЭМП.....	320
6.3 Методы обеспечения устойчивости бортовых вычислительных комплексов в условиях воздействия электромагнитных полей.....	325
6.3.1 Обобщенные рекомендации для защиты БЦВК.....	325
6.3.2. Практические рекомендации по результатам экспериментальных исследований БЦВК	328
6.3.3 Требования, предъявляемые к средствам защиты от СК ЭМИ.....	330

6.4 Модельные эксперименты по оценке эффективности функционирования ИСАУ БЦВК к деструктивному воздействию ЭМИ.....	333
6.5 Выводы по главе	344
Заключение.....	348
Список сокращений и условных обозначений	358
Список литературы.....	360

ВЕДЕНИЕ

Актуальность проблемы. В последнее десятилетие необходимость обеспечения защищенности элементов и узлов инфокоммуникационных систем от мощных электромагнитных излучений (ЭМИ) становится обязательным условием при проектировании многих объектов. Такое требование диктуют новейшие достижения в области генерации сверхмощных широкополосных электромагнитных полей (СШП ЭМП), а также имеющие место быть во многих сложных технических системах значительные по протяженности распределенные кабельные сети.

Кроме того, под влиянием развития элементной базы микроэлектроники все процессы в информационных системах смещаются в сторону увеличения быстродействия. Причем повышение быстродействия инфокоммуникационных систем сегодня происходит с временами переключения единицы и доли наносекунд, что позволяет существенно увеличивать объем информации, обрабатываемой в единицу времени. Особенно высокие требования по быстродействию предъявляются к системам, работающим в реальном масштабе времени. В таких системах значение оценки отношение стоимость/быстродействие с повышением быстродействия при неизменной стоимости постоянно снижается.

При этом надо иметь в виду, что компоненты любой сложной системы распределены в пространстве и связь между ними физически осуществляется при помощи сетевых соединений, реализованных в виде структурированных кабельных систем (СКС) (коаксиальный кабель, витая пара, оптоволокно и т.п.). Всё это выставляет определенные требования, как к электронному оборудованию, так и к информационной инфраструктуре, которые следует рассматривать как единое целое, и нарушение информационной целостности в одном звене приведет к нарушению работы всей системы. К тому же, технология, обеспечивающая высокие скорости обработки информации, обладает повышенной чувствительностью к наведенным напряжениям и токам, вызванным электромагнитными полями от различных источников естественного и искусственного происхождения, включая преднамеренные силовые электромагнитные воздействия [35].

Особенно это относится к современным бортовым цифровым вычислительным комплексам, функционирующим в условиях преднамеренного воздействия сверхкоротких электромагнитных излучений, которые занимают особое место в системах управления и контроля подвижными объектами, и все в большей степени оснащаются электронными элементами, чувствительными к электромагнитным воздействиям. В связи с чем, сегодня особо остро стоит задача по защите бортовых цифровых вычислительных комплексов (БЦВК) от воздействия сверхкороткоимпульсного электромагнитного излучения (СКИ ЭМИ). Кроме того, имеется устойчивая тенденция всё большего использования в современных бортовых цифровых вычислительных комплексах микропроцессорных устройств с временами срабатывания единицы и доли наносекунд и значительного уменьшения уровней и длительности сигналов для передачи информации, а также появление более мощных стационарных и мобильных излучателей, формирующих периодические и однократные сверхкороткие электромагнитные импульсы и обладающие принципиально новыми качествами, отсутствующими у традиционных источников ЭМИ: соразмерностью длительности воздействующих импульсов с длительностью информационных сигналов.

Это приводит к тому, что уровень наведенных помех от ЭМИ становится сопоставим с уровнем информационных сигналов и, как следствие, возрастает вероятность разрушения обрабатываемой информации циркулирующей в БЦВК, что подтверждается результатами экспериментальных исследований. [2, 69, 91, 98-99, 179, 186].

Также установлено, что эти источники способны оказывать воздействия на БЦВК и его элементы, приводящие к частичному нарушению целостности и полной потери передаваемого информационного сигнала, а в некоторых случаях к нарушению функционирования элементов и узлов БЦВК. При этом важной особенностью данного воздействия является часто не физическое разрушение элементной базы вычислительных комплексов и физических каналов связи, а искажение обрабатываемой информации.

В то же время существующие системы защиты БЦВК в условиях воздейст-

вия ЭМИ являются, как правило, малоэффективными, а в ряде случаев неприемлемыми как с технической, так и с экономической стороны, что существенно повышает важность решения проблемы по поиску новых методов обеспечения устойчивого функционирования бортовых систем управления.

Особую актуальность данная проблема приобретает еще и в связи с принятием нового поколения национальных и международных стандартов по электромагнитным явлениям и разработкой новых типов источников электромагнитной энергии, которые характеризуются более высокими значениями ЭМП и более короткими временными характеристиками, лежащими в наносекундной и субнаносекундной областях. Новые параметры воздействующих электромагнитных полей существенно отличаются от действующих ранее как по амплитудным, так и по временным характеристикам. Увеличены в 2-3 раза амплитуды напряженности полей с длительностью фронта до нескольких долей наносекунд. Кроме того, невозможность учета всех факторов, влияющих на поражающее действие ЭМИ, сложность современного бортового оборудования затрудняют получение достоверной информации о степени поражения и механизмах поражения [3, 6, 38-41, 149-152].

Также в настоящее время Международная электротехническая комиссия (МЭК), являющаяся законодателем в области создания стандартов по электротехнике и электронике во всём мире, уделяет огромное внимание решению проблемы стандартизации, касающейся воздействия переходных электромагнитных явлений большой энергии. В серию международных стандартов МЭК 61000 (в России комплекс стандартов «Мороз»), регламентирующих мероприятия по обеспечению устойчивости аппаратуры к воздействию ЭМИ, включен МЭК 61000-2-13, 2005 "Электромагнитная совместимость. Сверхширокополосный электромагнитный импульс", определяющий форму и спектральный состав СШП ЭМИ.

Решение проблемы обеспечения стойкости БЦВК к воздействию мощных импульсных электромагнитных полей представляет собой сложный многоэтапный процесс. Особенностью заданий на разработку БЦВК является наличие одновременно различных по спектру действующих ЭМИ, что требует анализа и оцен-

ки воздействия ЭМИ на отдельные элементы и узлы, а в конечном итоге на весь бортовой комплекс в целом.

Деструктивное воздействие ЭМИ на бортовые вычислительные комплексы может быть обусловлено как непосредственным воздействием импульсных электромагнитных полей на элементы бортового комплекса, так и наведенными в соединительных линиях и цепях токами и напряжениями. Чувствительность элементов и узлов БЦВК к воздействию ЭМИ зависит от целого ряда факторов, в частности, положения относительно направления векторов электрического и магнитного полей, геометрических размеров электрических цепей и контуров, их конфигурации, взаимных связей, номиналов электрических нагрузок, величин емкостных и индуктивных связей с элементами конструкций системы и окружающей средой, качества экранирования и т.д.

При этом, следует иметь в виду, что даже для тех элементов и узлов БЦВК, корпуса которых могут выполнять роль электромагнитных экранов, электромагнитные импульсы будут оказывать деструктивное воздействие через соединительные линии и разъемы. Таким образом, все виды проводящих систем, имеющих в бортовом комплексе, играют роль коллекторов опасной энергии ЭМИ. Наведенные в проводниках токи и напряжения могут привести либо к электрическому пробое (изоляции кабеля), либо к повреждению подключенных к проводникам устройств, если в них имеются чувствительные к перенапряжению элементы. Наведенные импульсы могут разрушить и нарушить работу элементов БЦВК почти одновременно в ряде мест [82, 84, 130].

Особую опасность для элементов и узлов БЦВК, кроме наличия возможных протяженных проводящих систем, представляют также сравнительно низкая электрическая прочность элементов и, напротив, высокая чувствительность к электрическим помехам. Отдельно следует отметить, что актуальность данной работы определяется созданием в России Системы национальных стандартов по защите информации от преднамеренного электромагнитного воздействия в целях выявления, противодействия и минимизации последствий воздействия ЭМИ. В частности, появление проектов и вновь разработанных национальных стандартов, рег-

ламентирующих обеспечение устойчивости радиоэлектронной аппаратуры (РЭА), в первую очередь, военного и специального назначения, к воздействию СШП ЭМИ, в которых впервые выдвинуты требования по стойкости к воздействиям мощных электромагнитных импульсов техногенного происхождения. А также принятие в России стандарта, регламентирующего требования по стойкости РЭА к СШП ЭМИ - с июля 2008 г. введен ГОСТ Р 52863-2007 «Защита информации. Автоматизированные системы в защищенном исполнении. Испытания на устойчивость к намеренным силовым электромагнитным воздействиям. Общие требования».

Кроме того, данная работа согласуется и с требованиями рекомендаций НТС ВПК от 23 марта 2007 г. № ВПК (НТС)-8прс по завершению создания в рамках комплексной программы развития АСУ ВС РФ на период до 2015 г. защищенных от электромагнитных воздействий средств автоматизированных систем военного назначения (АСВН).

И, наконец, глобализация мирового сообщества, интернационализация рынков, вступление России в ВТО – выдвигают дополнительные требования, и в этих условиях особую роль начинают играть стандарты, на соответствие которым проводится обязательная сертификация технических средств. Обязательное соответствие их требованиям является неотъемлемым фактором создания конкурентоспособной продукции, поэтому методология проектирования, инсталляции, эксплуатации радиоэлектронного оборудования должна адаптироваться под эти изменения, ориентируясь на безусловное выполнение требований стандартов при минимальных временных и материальных затратах, включая и требования к намеренным силовым электромагнитным воздействиям.

Проведенный анализ позволил выделить следующие направления исследований по данной проблеме в нашей стране и за рубежом:

- разработка методов расчета параметров электромагнитного поля (ЭМП);
- исследование воздействия электромагнитного импульса на БЦВК с учетом условий эксплуатации и конструктивных особенностей объекта применения;

- разработка специальных методов оценки воздействия электромагнитного импульса на БЦВК и установление перечня параметров, определяющих поражающее действие ЭМИ;

- разработка системных методов и средств обеспечения устойчивости БЦВК к заданным воздействиям излучения.

Значительный опыт теоретического решения вопросов взаимодействия электромагнитных полей с конструкциями электронных средств накоплен в области ЭМС. Методы и технические решения, эффективно применяемые для обеспечения ЭМС, могут быть частично использованы для снижения уязвимости БЦВК в условиях воздействия ЭМИ [59, 122, 124]. По мере роста быстродействия БЦВК, требования к электрическим параметрам систем и помехозащищённости устройств ужесточались, что заставляло проводить более детальный анализ, основанный на более совершенных математических моделях.

На сегодняшний день несколькими научными школами, возглавляемыми российскими (Ю.В. Парфеновым, Н.В. Балюком, Ю. Сахаровым, Т.Р. Газизовым, М. И. Жуковским, С.А. Сухоруковым) и зарубежными (W. Radasky, C. Baum, D. Nitsch, I. Kohlberg, D. Giri, F. Tesche, H. Garbe, F. Sabath, M. Ianoz) специалистами, проведено значительное количество исследований, подтверждающих, что с помощью генераторов сверхкоротких электромагнитных импульсов (СК ЭМИ), инжектирующих тем или иным способом импульсы напряжения в физическую среду передачи информации, можно воздействовать на обмен данными по сети между оконечными пользователями. При этом существующими средствами диагностики факт такого воздействия может не определиться, так как сетевое соединение при этом не разрушается.

Анализ литературных источников показывает, что вопросам защиты инфокоммуникационных систем уделялось и уделяется значительное внимание. Широко известны работы российских специалистов Барсукова В.С., Петрова В.А., Петракова А.В., Ярочкина В.И., Батурина Ю.М., Жодзинского А.М., Герасименко В.А., Мироничева С.Ю., Сюнтюренко О.В., Степанова П.В., Царегородцева А.В. и др. Практические рекомендации по защите средств вычислительной техники даны

в материалах Гостехкомиссии, а также в стандарте TEMPEST и др. Но, как правило, приведенные материалы носят характер частных технических решений. Это не позволяет разрабатывать опережающие технические решения на серьезном теоретическом фундаменте.

Определенные успехи были достигнуты в решении задач анализа стойкости различных систем, создании методов измерений и экспериментальной проверки методик расчета, наведенных ЭМИ токов и напряжений в кабельных линиях, экранах и антеннах. Большой вклад в решение этой проблемы внесли советские и российские ученые: Кечиев Л.Н., Соколов А.А., Мырова Л.О., Сахаров К.Ю., Степанов П.В., Михеев О.В., Туркин В.А., Комягин С.И., Крохалев Д.И., Царегородцев А.В., а также научные коллективы ФГУ 12 ЦНИИ МО, ОАО «МНИРТИ», ФГУП «ВНИИОФИ», МИЭМ, ОАО «АРГОН», ОИВТ РАН, ФГУП «ЦентрИнформ», НИИПП, НИИИТ, ГНИИИ ПТЗИ.

Среди сотрудников НИИ «АРГОН», внесших свой неоценимый вклад в создание отечественных БЦВК, известные в стране и за рубежом специалисты в области вычислительной техники: Еремин А.Т., Карасик В.М., Китович В.В., Кондрашев А.Ф., Крутовских С.А., Ларионов А.М., Левшин В.И., Монахов Г.Д., Пржиляковский В.В., Смирнов Р.В., Соловьев А.А., Терещенко М.А., Черкесов В.Г., Штейнберг В.И., Шпиев В.А. и др.

В то же время, оценка стойкости структурно-сложных иерархических систем, какими являются, в частности, бортовые вычислительные комплексы представляют пока малоисследованную научную проблему. Систематизация и обобщение этих результатов, которые бы определили методологию обеспечения и оценки стойкости бортовых вычислительных управляющих комплексов к воздействию мощных электромагнитных полей с учетом требований международных стандартов, прогноза параметров воздействия, средств защиты до сих пор не проведены.

Наряду со значительными достижениями в области обеспечения стойкости отдельных элементов и узлов бортовых комплексов существующие методы оценки воздействия сверхкороткого импульсного электромагнитного поля (СКИ ЭМП)

не позволяют проводить достоверную оценку воздействия ЭМИ на БЦВК в целом [5, 9, 11-13, 25, 46, 78-79]. Это в значительной мере обусловлено структурной сложностью и иерархичностью бортового комплекса, и определяется целым рядом факторов, связанных как с непосредственным воздействием импульсных электромагнитных полей на элементы бортового комплекса, так и наводками токов и напряжений в коммуникационных каналах, что требует разработки современных и эффективных методов оценки воздействия ЭМИ на БЦВК. При этом, следует отметить, что в связи с насыщенностью БЦВК аппаратурой со сложными электрическими цепями, оценка их стойкости в условиях воздействия СШП ЭМИ в большей части была получена только экспериментальным путем с использованием излучателей СШП ЭМИ. Но наличие научно-обоснованных математических моделей является непременным условием достоверной оценки уязвимости БЦВК при деструктивном электромагнитном воздействии. Отдельные подходы в области разработки методов, алгоритмов и программ, обеспечивающих выполнение соответствующих требований при проектировании БЦВК представлены в работах Князева А.Д., Кечиева Л.Н., Петрова Б.В., Отта Г., Уайта Дж., Пауля К., Барнса Дж. Однако, эти подходы опять же носят частный характер, имеют ограниченную область применения, и не позволяют получить достоверную оценку предполагаемого воздействия. В связи с этим требуется анализ и систематизация имеющихся расчетно-экспериментальных данных и на этой основе развитие и совершенствование методов обеспечения устойчивости БЦВК к деструктивному воздействию сверхкоротких электромагнитных излучений.

С учетом изложенного можно заключить, что в настоящее время сверхкороткоимпульсные электромагнитные воздействия являются новой серьезной угрозой для бортовых комплексов подвижных объектов, и в современных условиях проблема воздействия этих электромагнитных импульсов на такой класс систем управления становится одной из ключевых.

Все это требует пересмотра традиционных подходов к обеспечению и оценке стойкости бортовых вычислительных управляющих комплексов к воздействию мощных электромагнитных полей с учетом требований международных стандар-

тов и прогноза параметров воздействия в рамках новой методологии, позволяющей не только оценивать уровень устойчивости бортовых цифровых вычислительных комплексов к деструктивному воздействию СК ЭМИ, но и обеспечивать требуемый уровень их устойчивости путем реализации перспективных эффективных мер, таких как реконфигурация бортового комплекса и т.п.

При этом следует учитывать, что отличительной чертой воздействия СК ЭМИ на современные БЦВК является не физическое разрушение элементной базы бортового комплекса, а нарушение целостности информации, передаваемой по каналам связи и обрабатываемой бортовыми вычислительными машинами. Для идентификации воздействия ЭМИ на элементы и узлы БЦВК очень важно определить факт начала воздействия электромагнитного импульса, чтобы система автоматически могла предпринять своевременные меры по предотвращению процессов искажения циркулирующей в бортовой сети информации. Так, при обнаружении начала воздействия ЭМИ на элементы и узлы БЦВК появляется возможность еще до момента искажения или уничтожения информации, передаваемой по каналам связи и обрабатываемой бортовыми вычислительными машинами, в автоматическом режиме своевременно выдать команды управления о приостановке работы бортового оборудования, что позволяет свести к минимуму количество отказов и сбоев в работе или вовсе их исключить, существенно сократить временные затраты на восстановление работы отдельных подсистем БЦВК после возникновения сбоев и, как следствие, повысить качество функционирования бортового комплекса в целом.

Таким образом, анализ методов и средств оценки воздействия ЭМИ на структурно-сложные иерархические системы, какими являются бортовые вычислительные комплексы, показал, что для достоверной оценки устойчивости их к воздействию СК ЭМИ требуется разработка новой методологии, позволяющей проводить интеллектуальный анализ и оценку параметров искажений информационного потока в системе для предотвращения деструктивного действия СК ЭМИ на БЦВК и его элементы.

Следовательно, проблема разработки и совершенствования методов оценки воздействия преднамеренных СКИ ЭМИ на БЦВК, а также разработка системных методов обеспечения их стойкости к электромагнитным воздействиям, является в настоящее время особенно актуальной, решение которой естественным образом вписывается в современные тенденции развития науки и техники и позволит обеспечить снижение деструктивного влияния СК ЭМИ и тем самым повысить эффективность функционирования существующих и вновь разрабатываемых перспективных бортовых цифровых вычислительных комплексов.

Данная работа призвана восполнить отмеченный пробел, так как посвящена решению научной проблемы, имеющей важное значение для экономики страны, а именно, разработке научно-методологических основ обеспечения и оценки стойкости бортовых вычислительных управляющих комплексов к воздействию мощных электромагнитных полей с учетом требований международных стандартов и прогноза параметров воздействия, и их интеграции в рамках единого комплекса интеллектуальных методов анализа и оценки устойчивости БЦВК к деструктивному воздействию перспективных и опасных сверхкоротких электромагнитных излучений.

Таким образом, актуальность поставленной проблемы определяется:

- дальнейшим совершенствованием генераторов сверхширокополосных электромагнитных импульсов и появлением перспективных типов источников электромагнитной энергии, которые характеризуются более высокими значениями электромагнитных полей и более короткими временными характеристиками, лежащими в наносекундной и субнаносекундной областях, являющихся одним из главных видов электромагнитных средств поражения XXI века и представляющих наибольшую опасность для информационной инфраструктуры структурно-сложных иерархических систем [3, 6, 36, 131];

- принятием нового поколения национальных и международных стандартов по электромагнитным явлениям и отсутствием систематизированных требований к методам и средствам защиты современных структурно-сложных систем, учитывающих характер и особенности деструктивного воздействия СК ЭМИ [3, 6, 38,

149];

- слабой теоретической и экспериментальной изученностью воздействия наносекундных электромагнитных полей на элементы и узлы бортовых вычислительных комплексов;

- отсутствием эффективных методов и расчетных моделей оценки воздействия полей ЭМИ на элементы и узлы БЦВК, с возможностью их интеграции в рамках единого комплекса, позволяющего проводить интеллектуальный анализ и оценку параметров искажений информационного потока в системе для предотвращения деструктивного действия ЭМИ на БЦВК;

- отсутствием эффективных методов обеспечения стойкости бортовых систем управления к деструктивному воздействию перспективных и опасных сверхкоротких электромагнитных излучений и эффективных механизмов, обеспечивающих возможность идентификации и исправления периодических искажений в потоке обрабатываемой информации БЦВК в реальном режиме времени.

Цель работы. Обеспечение устойчивости функционирования БЦВК в условиях воздействия СК ЭМИ, на основе разработки новых эффективных методов и расчетных моделей оценки воздействия полей ЭМИ на элементы и узлы БЦВК позволяющих проводить интеллектуальный анализ параметров искажений информационного потока в системе для предотвращения деструктивного воздействия ЭМИ на БЦВК, включая минимизации временных затрат на восстановление комплекса после сбоев

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- 1) анализ состояния проблемы обеспечения устойчивого функционирования структурно-сложных иерархических систем в условиях воздействия преднамеренных импульсных электромагнитных излучений;

- 2) обобщение существующих методов и моделей оценки устойчивости РЭА к воздействию СК ЭМИ и исследование особенностей воздействия СК ЭМИ на элементы и узлы бортовых вычислительных комплексов;

3) разработка адаптивных моделей взаимодействия мощных электромагнитных импульсов с элементами БЦВК для интеллектуального анализа и оценки устойчивости их к деструктивному воздействию СК ЭМИ;

4) разработка модели оценки воздействия СК ЭМИ на элементы и узлы БЦВК, отражающая возможные варианты реализации таких воздействий с учетом их места воздействия, временных, частотных и энергетических характеристик;

5) разработка модели интеллектуальной системы анализа устойчивости элементов и узлов БЦВК к деструктивному воздействию СК ЭМИ;

6) разработка методов интеллектуального анализа и оценки устойчивости бортового вычислительного комплекса к воздействию СК ЭМИ;

7) разработка методов защиты БЦВК от воздействия СКИ ЭМИ на основе своевременного обнаружения фактов искажений информационного потока;

8) разработка научно-методического обеспечения проведения экспериментальных исследований бортовых вычислительных комплексов на воздействие преднамеренных сверхкоротких электромагнитных излучений;

9) проведение экспериментальных исследований устойчивости ряда БЦВМ к воздействию сверхкоротких импульсных ЭМП и анализ полученных результатов исследований;

10) разработка единого методологического комплекса системного решения проблемы обеспечения эффективного функционирования БЦВК, позволяющего проводить интеллектуальный анализ и оценку параметров искажений информационного потока в бортовом вычислительном комплексе для предотвращения деструктивного действия ЭМИ.

Объект исследования. Объектами исследования в работе выбраны типовые БЦВК, разработанные в НИИ «Аргон», их элементы, как общего, так и специального назначения.

Выбранные объекты являются наиболее перспективными для использования в авиационных и космических комплексах при решении задач управления и контроля на подвижных объектах.

Предмет исследования. Методы и модели анализа и оценки устойчивости функционирования БЦВК к преднамеренному воздействию СК ЭМИ.

Методологические и теоретические основы исследования. Методы исследования базируются на применении основных результатов теории больших систем, системного анализа, нейронных сетей, теории информации, теории вероятностей и теории случайных процессов, теории электромагнитизма и методов математической статистики. Активно использовались методы имитационного (в средах MATLAB Neural Network, MATLAB Simulink), полунатурного и натурального моделирования.

Научная новизна исследования.

Получены следующие основные новые научные результаты:

1. На основе проведенного аналитического обзора исследований по теме диссертации, показана необходимость пересмотра традиционных подходов к обеспечению работоспособности структурно-сложных систем при воздействии на их элементы СК ЭМИ и сформулированы предпосылки к разработке принципиально новых расчетных моделей анализа и оценки воздействия полей ЭМИ на структурно-сложные системы с возможностью их интеграции в рамках единого методологического комплекса, позволяющего проводить достоверную оценку устойчивости такого класса систем к воздействию СК ЭМИ на основе интеллектуальных методов анализа и оценки параметров искажений информационного потока в системе для предотвращения деструктивного действия СК ЭМИ.

2. Сформулированы базовые принципы построения интеллектуальной системы анализа и оценки устойчивости (ИСАУ) БЦВК на основе адаптивной многоуровневой системы обнаружения деструктивных электромагнитных воздействий (СОДЭМВ) на элементы и узлы БЦВК, являющейся ядром интеллектуальной системы. При этом нижний уровень решает проблемы оперативной идентификации ЭМВ, а верхний - накопления опыта по обнаружению последствий деструктивных ЭМВ на БЦВК путем использования датчиков ЭМВ, распределенных по структуре ИСАУ.

3. Предложена модель интеллектуальной системы анализа и оценки устойчивости БЦВК к деструктивному воздействию СК ЭМИ, учитывающая возможные варианты реализации таких воздействий с учетом их места воздействия, временных, частотных и энергетических характеристик.

4. Разработаны адаптивные модели взаимодействия мощных электромагнитных импульсов с элементами БЦВК для интеллектуального анализа и оценки устойчивости их к деструктивному воздействию СК ЭМИ, в том числе:

- модель воздействия СК ЭМИ на микропроцессорные управляющие устройства БЦВК, учитывающая возможные варианты реализации таких воздействий с учетом их амплитуды, фронта импульса и энергии;

- модель воздействия СК ЭМИ на каналы передачи данных (на основе технологий Fast и Gigabit Ethernet) современных БЦВК при воздействии периодических импульсных помех, учитывающая длину кадра и межкадрового интервала, с целью своевременного обнаружения фактов искажений информационного потока;

5. Разработаны методы интеллектуального анализа данных в задачах оценки устойчивости БЦВК к деструктивному воздействию СК ЭМИ на основе использования интеллектуальных механизмов нейронных сетей, нечеткой логики и гибридных, в частности, нейро-нечетких систем, а также генетических алгоритмов и эволюционных процессов наследования, развития, адаптации и отбора, обеспечивающих возможность идентификации и исправления периодических искажений в потоке обрабатываемой информации в адаптивной многоуровневой системы обнаружения деструктивных электромагнитных воздействий на элементы и узлы БЦВК в реальном режиме времени.

6. Разработана система показателей и комплекс методов защиты БЦВК от воздействия СК ЭМИ на основе своевременного обнаружения фактов искажений информационного потока, позволяющий, в том числе, оптимизировать соотношение «стоимость/эффективность» защиты за счет размещения на иерархических уровнях ИСАУ только необходимых датчиков ЭМВ и оценивать устойчивость БЦВК к деструктивному воздействию ЭМИ через величины относительного

ущерба и интегральные показатели активности распределенных по структуре ИСАУ датчиков ЭМВ.

7. Разработано научно-методическое обеспечение проведения экспериментальных исследований на воздействие преднамеренных сверхкоротких электромагнитных излучений на элементы и узлы БЦВК, позволяющее формировать программу проведения испытаний и критерии оценки стойкости бортовых вычислительных комплексов с учетом требований к метрологическим, эксплуатационным и конструктивным характеристикам излучателей.

8. Разработана новая методология, направленная на решение проблемы обеспечения устойчивости функционирования бортовых вычислительных управляющих комплексов в условиях воздействия сверхкоротких электромагнитных импульсов, позволяющая проводить интеллектуальный анализ и оценку параметров искажений информационного потока в системе для предотвращения деструктивного действия ЭМИ на БЦВК, включая минимизацию временных затрат на восстановление БЦВК после сбоев вызванных этими воздействиями.

Основные положения, выносимые на защиту:

1) Новые базовые принципы построения интеллектуальной системы анализа и оценки устойчивости БЦВК на основе адаптивной многоуровневой системы обнаружения деструктивных ЭМВ на элементы и узлы БЦВК.

2) Модель интеллектуальной системы анализа и оценки устойчивости БЦВК к деструктивному воздействию СК ЭМИ, позволяющая обеспечить возможность идентификации и исправления периодических искажений в потоке обрабатываемой информации в реальном масштабе времени.

3) Комплекс моделей взаимодействия мощных электромагнитных импульсов с элементами БЦВК для интеллектуального анализа и оценки устойчивости их к деструктивному воздействию СК ЭМИ, учитывающие возможные варианты реализации таких воздействий с учетом их амплитуды, фронта импульса и энергии, а также длин кадра и межкадрового интервала, с целью своевременного обнаружения фактов искажений информационного потока.

4) Методы интеллектуального анализа параметров искажений информационного потока в системе с учетом априорного опыта экспертов и возможности извлечения любых знаний с целью повышения достоверности оценки устойчивости БЦВК к деструктивному воздействию СК ЭМИ.

5) Методы защиты БЦВК от воздействия СКИ ЭМИ на основе своевременного обнаружения фактов искажений информационного потока, позволяющие повысить устойчивость БЦВК и оптимизировать соотношение «стоимость/эффективность» защиты.

6) Методики проведения экспериментальных исследований БЦВК на воздействие преднамеренных СК ЭМИ, позволяющее формировать критерии оценки стойкости бортовых вычислительных комплексов с учетом требований к метрологическим, эксплуатационным и конструктивным характеристикам излучателей.

7) Новая методология, направленная на решение проблемы обеспечения устойчивого функционирования бортовых вычислительных управляющих комплексов в условиях воздействия СК ЭМИ, позволяющая предотвращать деструктивное воздействие ЭМИ, включая минимизацию временных затрат на восстановление системы после сбоев.

Материалы, представленные в диссертации, характеризуются общей направленностью разработок. Они содержат совокупность новых научных обобщений и отвечают задачам современного развития теории и практики в области обеспечения эффективного функционирования современных и перспективных бортовых вычислительных комплексов в условиях воздействия сверхкоротких импульсных электромагнитных помех.

Практическая значимость.

Практическими результатами диссертационной работы являются:

1. Комплекс методик проектирования интеллектуальной системы анализа и оценки устойчивости БЦВК к деструктивному воздействию ЭМИ.

2. Комплекс моделей взаимодействия СК ЭМИ с элементами БЦВК интегрированных в адаптивную многоуровневую систему обнаружения деструктивных электромагнитных воздействий на элементы и узлы БЦВК.

3. Комплекс методик по оценке воздействия ЭМИ на кабельные линии и элементы современных бортовых вычислительных комплексов.

4. Требования к аппаратно-программным комплексам, обеспечивающим реализацию алгоритмов работы современных сетевых устройств БЦВК по передаче и обработке потоков цифровых информационных сигналов в соответствии с современными телекоммуникационными протоколами сетевого обмена.

5. Системные методы защиты бортовых вычислительных комплексов от СКИ ЭМИ с использованием структурно-функциональных и алгоритмических подходов к построению системы защиты от воздействия импульсного ЭМИ и рекомендации по совершенствованию методов и средств защиты БЦВК от воздействия СК ЭМИ.

6. Комплекс методик проведения экспериментальных исследований на воздействие преднамеренных сверхкоротких электромагнитных излучений на элементы и узлы БЦВК, позволяющий формировать программу проведения испытаний и критерии оценки стойкости бортовых вычислительных комплексов с учетом требований к метрологическим, эксплуатационным и конструктивным характеристикам излучателей.

7. Обобщенная методика тестирования каналов передачи данных (на основе технологий Fast и Gigabit Ethernet) современных БЦВК в условиях воздействия СК ЭМИ.

8. Новые результаты экспериментальных исследований воздействия импульсных электромагнитных полей на БЦВК, позволяющие определять пороговые уровни и режимы воздействия излучателей СК ЭМИ на бортовую кабельную сеть и БЦВК.

9. Практические рекомендации по защите БЦВК от СКИ ЭМИ, позволяющие обеспечить стойкость бортового вычислительного комплекса в сложной электромагнитной обстановке.

10. Методические разработки на базе основных результатов диссертационной работы, предназначенных для инженерной практики и совершенствовании учебного процесса в вузах.

Достоверность полученных автором научных и практических результатов определяется математическими доказательствами сформулированных положений, расчетами и примерами, подтверждающими их эффективность, и сопряжением с существующими методами, а также:

- обоснованностью выбора исходных данных, основных допущений и ограничений при постановке частных задач исследования и принятых в процессе математического моделирования;

- удовлетворительным согласованием результатов с данными, полученными другими авторами для частных случаев и опубликованными в научно-технической литературе;

- соответствием расчетов с результатами экспериментальных исследований, проведенных лично автором;

- апробацией результатов исследований автора на международных, всероссийских и ведомственных научно-технических конференциях.

Реализация и внедрение результатов работы.

1. Основные теоретические и практические результаты диссертации реализованы в ОАО «НИИ «Аргон» при непосредственном участии автора в разработке ряда унифицированных БЦВМ, информационно-управляющих систем авиационных объектов в НИОКР «Конверт», «Фореитор» и «Окно», 2009 г.; вычислительной системы телекоммуникационных спутников серии «Ямал», 2010 г.; средств комплексирования бортовой системы управления космических аппаратов; разработке промышленной технологии создания унифицированного отказоустойчивого вычислителя для комплекса бортового оборудования в ОКР «Кластер», 2012 г.; разработке технологии создания специального, отказоустойчивого, высокопроизводительного, модифицируемого бортового вычислительного комплекса специального назначения со встроенной гигабитной волоконно-оптической средой передачи информации для авиационных и мобильных объектов автоматизации и управления в ОКР «Волопас», 2013 г.

2. Разработанные методики, программы, технические решения использовались при формировании технических заданий на создание БЦВМ нового поколения.

ния. Использование результатов данной работы позволило повысить показатели устойчивости БЦВМ к воздействию перспективных СК ЭМИ.

3. Разработанные технические решения по защите от импульсных ЭМИ использовались в ОАО «МНИРТИ» при создании помехозащищенных спутниковых станций радиосвязи в ОКР «Метеор».

4. Результаты диссертационной работы находят широкое применение в учебном процессе в МИЭМ НИУ ВШЭ и МИРЭА. На их основе для подготовки студентов и магистров на кафедре «Радиоэлектроника и телекоммуникации» существенно переработаны учебные курсы «Основы проектирования РЭА», «Сверхширокополосные импульсные электромагнитные воздействия на РЭС».

Научные результаты работы использованы для написания учебных пособий, методических указаний для студентов направления 210200.

Имеются 4 Акта о внедрения полученных автором результатов.

Апробация результатов исследования.

Работа в целом и отдельные ее результаты докладывались и обсуждались на: 10-ой Российской НТК «Электромагнитная совместимость технических средств и биологических объектов», г. С-Петербург, 2008 г.; НТК студентов, аспирантов и молодых специалистов МИЭМ, Москва, 2008 г.; 6-й Международной конференции «Информационные и телекоммуникационные технологии в интеллектуальных системах», Греция, 2-6 июня 2008 г; научно-практической конференции ИНФО-2008 «Инновации в условиях развития информационно-коммуникационных технологий», 1-10 октября, 2008г., Сочи; 8-м и 9-м Международных симпозиумах по электромагнитной совместимости и электромагнитной экологии, СПб, 2009, 2011 гг.; Международной НТК «Энергосистема и активные адаптивные электрические сети: проектирование, эксплуатация, образование», Москва, 21-25 ноября 2011 г; 8-й международной научно-технической конференции «Информационные технологии в науке, технике и образовании», Абхазия, 17-29 сентября 2012 г.; 6-й Всероссийской НТК «Радиолокация и радиосвязь», Москва, 19-22 ноября, 2012 г.; Международная конференция IREM2013 Access Data Collection: {88682AA2-B816-4B9A-AAE4-F418ECC88666} «Излучение и рассеяние электромагнитных волн» ИРЭМВ-2013»,

Дивноморское, Геленджикский район, 23 июня-28 июня 2013 г.; научно-технических семинарах МИЭМ, МИРЭА с 2009 г. по 2012 г. и т.д.

Публикации. Научные и практические результаты работы отражены в 61 опубликованных работах, в том числе 29 статьях в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК РФ для публикации результатов кандидатских и докторских диссертаций. Получено 2 патента по теме диссертации: № 2132598 от 20.08.98 г., № 2138931 от 09.10.98 г., подана заявка на изобретение № 2014105854 от 18.02.2014 г.

Таким образом, на основе проведенных исследований в области создания помехоустойчивых телекоммуникационных систем, в частности, бортовых вычислительных комплексов, осуществлено обобщение и решение научно-технической проблемы, имеющей важное хозяйственное значение, позволяющая обеспечить повышение помехоустойчивости и эффективное функционирование бортовых цифровых вычислительных комплексов в условиях деструктивных электромагнитных воздействий.

Личный вклад автора. Основные результаты теоретических и экспериментальных исследований получены автором самостоятельно и соответствуют пунктам 3, 11 и 12 паспорта специальности 05.12.13 – Системы, сети и устройства телекоммуникаций. В работах, опубликованных в соавторстве, соискателю принадлежит основная роль при постановке и решении задач, а также обобщении полученных результатов.

Структура и объем работы.

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения и изложена на 390 страницах машинописного текста, содержит 23 таблицы, 91 рисунков и приложения с документами, подтверждающими внедрение основных результатов работы. Список литературы включает 276 наименований.

ГЛАВА 1 СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ ОЦЕНКИ УСТОЙЧИВОГО ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ БОРТОВЫХ ЦИФРОВЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ КОМПЛЕКСОВ В УСЛОВИЯХ ПРЕДНАМЕРЕННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ МОЩНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ

1.1 Анализ нормативных документов по обеспечению устойчивости инфокоммуникационных систем к воздействию СК ЭМИ в России и за рубежом

Лучшие практики по разработке и эксплуатации современных технических средств связи и систем управления показывают, что на сегодняшний день одной из самых сложных проблем является обеспечение их устойчивой работы в условиях воздействия мощных электромагнитных излучений (ЭМИ) природного и техногенного происхождения [3, 59, 76, 149-152, 177, 187, 197-199]. Как правило, выделяют следующие главные источники ЭМИ: грозовые разряды, мощные радиопередающие средства (РПС) и радиолокационные станции (РЛС), высоковольтные линии электропередач (ВЛЭП), контактная сеть железных дорог (КСЖД), ЭМИ ядерного взрыва и т.д.

При исследовании такого уникального физического явления, как ядерный взрыв (ЯВ) были обнаружены особые, свойственные только этому явлению процессы, обладающие также поражающими факторами: электромагнитный импульс радиочастотного диапазона, рентгеновское излучение и обширные ионизированные области. Результаты исследований ЯВ показали, что ЭМИ ЯВ обладает выраженной спецификой воздействия на технические средства и объекты во всех окружающих средах: в воздушной среде, на поверхности земли, в грунте, и является самым мощным искусственным источником электромагнитного излучения [6, 8, 38, 147, 150-152, 201].

Однако в 1963 году был принят Международный мораторий на проведение ядерных испытаний в трех средах, поэтому для продолжения исследований электромагнитных процессов, возникающих при ЯВ и оказывающих деструктивное воздействие на технические системы и объекты, потребовалось со-

оружие имитаторов ЭМИ ЯВ, имитирующих отдельные факторы воздействия ядерного взрыва, что, в свою очередь, привело к формированию нового научного направления по силовому электромагнитному воздействию на радиоэлектронную аппаратуру. В ходе создания новых видов ядерного оружия изменялись и параметры ЭМИ, возникающих при ЯВ. Существенно сокращалась длительность воспроизводимых ЭМИ. К началу 90-х годов был освоен диапазон длительностей порядка наносекунд. Это приводило к расширению спектра ЭМИ в область высоких частот и усиливало воздействие. Кроме того, результаты исследований показали, что повторяющиеся ЭМИ подобной длительности обладают рядом свойств, позволяющих использовать их для решения задач деструктивного воздействия на РЭА.

В связи с чем, в последние годы на этой базе стали активно продвигаться исследования по созданию оружия на основе применения ЭМИ с повышенным выходом электромагнитных излучений (ЭМИ-оружия). Поэтому параметры ЭМИ в течение 80-90-х г. неоднократно видоизменялись, и в настоящее время они существенно отличаются от ранее известных параметров и стандартизованы в сторону ужесточения. В связи с этим, т.е. постоянным совершенствованием ядерных боеприпасов, уточнением физики процессов меняются и параметры воздействующих факторов, что приводит к необходимости развития математических моделей взаимодействия, методов расчета воздействия ЭМИ на РЭА, а также совершенствование методов обеспечения стойкости. Из-за ограничения испытания ядерного оружия в последнее десятилетие выполнение этих требований в основном обеспечивалось разработкой максимально строгих физических и математических моделей процессов, сопровождающих развитие ядерного взрыва.

В связи с этим, исследование действия современного электромагнитного оружия, разрабатываемого в настоящее время в США, России и других ядерных странах, основаны на принципах излучения сверхкороткого электромагнитного импульса (ЭМИ) большой мощности, способного вывести из строя радиоэлектронную аппаратуру (РЭА), в первую очередь

цифровую, путем разрушения полупроводниковых приборов, полностью или частично нарушив их нормальную работу. При этом, было установлено, что особенно ярко эти свойства проявляются при уменьшении длительности ЭМИ до значений порядка десятков-сотен пикосекунд, когда их спектральный состав лежит в интервале от сотен МГц до единиц ГГц. Отсюда появился новый раздел прикладной электродинамики, оперирующий с подобными импульсами – электродинамика коротких сверхширокополосных импульсов или как принято называть в настоящее время - сверхкороткие электромагнит-ные импульсы (СК ЭМИ).

Такие импульсы обладают новыми качествами, отсутствующими у излучений традиционных источников преднамеренных помех - сверхширокополосностью и большой импульсной амплитудой. Спектральная плотность их распределена в интервале от сотен МГц до единиц ГГц. Отличительной особенностью данного типа излучения является также соизмеримость длительности воздействующих импульсов с длительностью рабочих импульсов, при обработке цифровой информации. Поэтому при воздействии СК ЭМИ на компьютеры и цифровые устройства в их цепях наводятся сигналы, аналогичные рабочим, что приводит к нарушению работы цифровых систем. Поэтому одной из возможных областей применения таких излучателей является дистанционное поражение электронных компонентов РЭА, в частности цифровых устройств. Сегодня они составляют основную часть используемых элементов в РЭА и работают на все более высоких частотах и более низких напряжениях при большой плотности элементов и, таким образом, становятся намного, более восприимчивы к импульсным СК ЭМИ. Кроме того, необходимо учитывать, что на современном этапе отмечается резкое увеличение доли программного обеспечения по сравнению с аппаратными средствами при одновременном увеличении быстродействия компонентов РЭА; переход от систем PDH к системам синхронной цифровой иерархии (SDH) и к применению широкополосных систем B-ISDN и ATM.

Таким образом, можно заключить, что работы по созданию источников мощных ЭМИ ведутся в следующих направлениях:

- создание источников электромагнитного излучения со сверхшироким спектром в диапазоне от 0,1 до 10 ГГц. Эта техника достигла высокого уровня совершенства на базе генераторов искровыми и полупроводниковыми ключевыми элементами, описанных, например, в [183-185, 187, 194, 196]. ЭМИ этого типа наводят импульсы большой амплитуды на кабели питания, ввода – вывода информации, телефонные линии связи, которые проникают к элементам цифровых устройств. Недостатком ЭМИ со спектром ниже 100 МГц является необходимость создания передающей антенны большой длины. В противном случае эффективность излучения ЭМИ резко падает;

- создание узкополосных сверхвысокочастотных ЭМИ, которые более эффективны как в части проникновения в аппаратуру не только путем наводок на кабельные линии, но и через отверстия, щели, стыки и экраны в аппаратуре.

Кроме того, повышение излучаемой мощности в заданном направлении легко обеспечивается СВЧ антеннами с высоким усилением.

Открытое обсуждение проблемы преднамеренных электромагнитных воздействий (ЭМВ) началось на конференции Американо-Европейского союза (АЕС) 1996 г. с пленарной лекции профессора В. Лоборева [35, 249]. В феврале 1997 г. на Цюрихском симпозиуме по электромагнитной совместимости Международный союз радиоинженеров URSI образовал специальный подкомитет с целью изучения проблемы электромагнитного терроризма под руководством Х. Уипфа. В феврале 1998 г. состоялись парламентские слушания в конгрессе США. С этого момента исследования в США и ряде европейских стран (в первую очередь, в Германии и Швеции) получили резкое ускорение.

Важным событием стала резолюция Совета URSI по преступной деятельности с помощью электромагнитных средств [270]. В 2000 г. «Угроза электромагнитного терроризма» впервые стала отдельным разделом в списке тем Вроцлавского симпозиума по ЭМС 2000 г.

В 2001 г. состоялась первая отдельная секция с рецензируемыми статьями Цюрихского симпозиума по ЭМС [263]. Затем доклады, связанные с поражающим действием (ПД) ЭМВ, стали появляться на каждом симпозиуме по ЭМС и на некоторых других конференциях. Из отечественных публикаций следует отметить раздел по ПД ЭМВ «Технологии защиты систем безопасности от электромагнитного терроризма» в книге [4, 7, 76, 77]. Первая, целиком посвященная этой проблеме, коллективная монография [203] появилась в России. Наконец, на Цюрихском симпозиуме по ЭМС 2007 г. в Мюнхене впервые состоялся вводный курс по ПД ЭМВ (Tutorial on Intentional IEMI) [218]. Этот факт ярко свидетельствует о том, что накопилось уже довольно много научных исследований по этой проблеме, что-бы можно было знакомить с ее основами, и что необходимо знакомить с этой проблемой широкий круг специалистов. В течение последующих пят-надцати лет была испытана огромная номенклатура объектов, начиная с вооружения и военной техники и заканчивая банкоматами, кассовыми аппаратами и т.п.

Позже появились книги из серии «Библиотека ЭМС» [10, 59], которые рассматривают специфику мощных электромагнитных воздействий на аппаратуру и средства телекоммуникации, а также справочник «Оружие мира» [184], в котором описаны основные типы электромагнитного оружия.

В России ежеквартально издается журнал «Технологии ЭМС», который освещает отечественные исследования по проблеме электромагнитных воздействий.

Ежегодно проводятся международные конференции и симпозиумы по данной проблеме. Основные из них: AMEREM/EUROEM, EMC (USA), EMC Asia, EMC Europe. В течение года проводятся рабочие встречи, организуемые идеологом данного направления Radasky W.A и его соратниками и объединяющие специалистов из разных стран по проблеме защиты от преднамеренных электромагнитных воздействий. Наиболее активными участниками являются США, Германия, Швеция, Япония, Китай и такие ученые, как W. Radasky, C. Baum, D. Nitsch, I. Kohlberg, D. Giri, F. Tesche, H. Garbe, F. Sabath, M. Ianoz и др.

В России раз в два года проводится Международный симпозиум по электромагнитной совместимости и электромагнитной экологии в Санкт-Петербургском государственном электротехническом университете «ЛЭТИ» им.В.И. Ульянова (Ленина). Ввиду большого количества докладов по исследованиям ПД ЭМВ в 2009 г. в ходе очередного симпозиума была сформирована секция по электромагнитной безопасности. Инициаторами создания секции выступили Н.Б. Сафронов и Л.Н. Кечиев.

Потенциальную значимость вопроса оценки уязвимости информационных систем показывает и разработка комплекса стандартов, регламентирующих требования и порядок проведения испытаний систем обработки информации, выполненных в защищённом исполнении, к действию СКИ ЭМИ. Работа по разработке комплекса стандартов ведется кооперацией организаций представляющих промышленность, Госстандарт, ФСБ, ФСТЭК.

Как уже отмечалось, URSI инициировал, а Международная электротехническая комиссия (МЭК) организовала активную работу по созданию ряда новых стандартов, связанных с ПД ЭМВ. Эта работа идет по обычной схеме координации МЭК и ее подкомитетов с другими организациями (рисунок 1.1 [35]).

Стоит отметить, что в 1999 г. при МЭК был создан технический подкомитет ТК77С, занимающийся исключительно вопросами стандартизации в области преднамеренных мощных электромагнитных воздействий и защиты от них [17]. Доклады по состоянию работ по стандартизации в области ПД ЭМВ регулярно делают на симпозиумах по ЭМС Мануэль Уик и Уильям Радаски, председатель ТК77С в МЭК. В настоящий момент основное внимание стандартов ТК77С смещено в сторону защиты от ЭМИ высокой мощности (High Power Electromagnetic — НРЕМ). Разработаны 19 документов: 14 международных стандартов и 5 технических докладов МЭК, в которых изложены обзор данного вида ЭМИ, методология измерений, параметры нагружения при испытаниях [228, 262]. За последнее время дополнительно разработаны стандарты (таблица 1.1) по методам защиты распределенных систем электронной ин-

фраструктуры от ПД ЭМВ и методам оценки устойчивости систем к НРЕМ воздействиям [230-232].

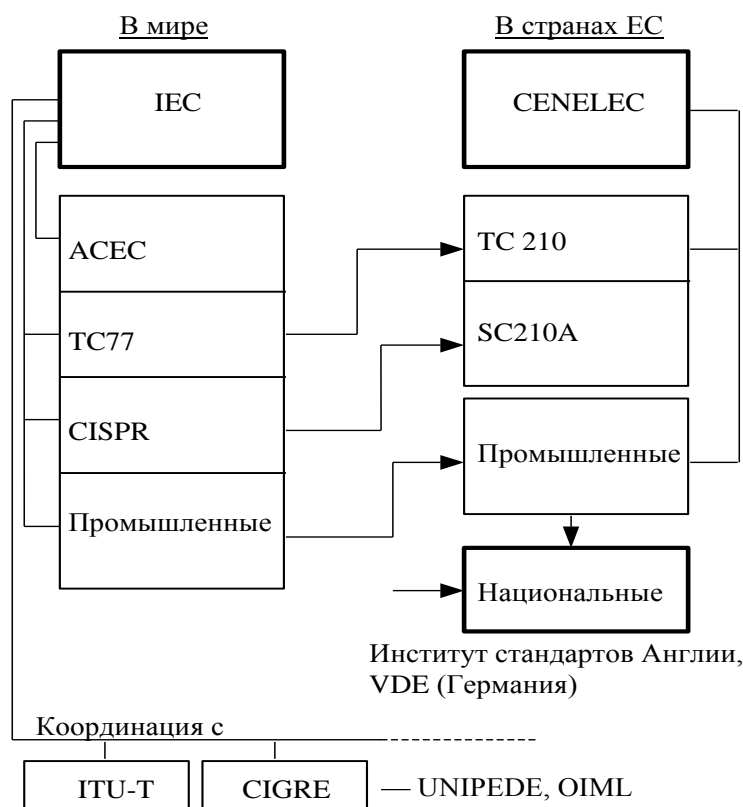


Рисунок 1.1 - Организация международной деятельности
в области стандартов по ЭМС

Т а б л и ц а 1.1 - Стандарты МЭК

IEC/TR 61000-4-35:2009	Электромагнитная совместимость. Части 4–35. Методы испытаний и измерений. Краткое руководство по устройствам, моделирующим НРЕМ.
IEC/TS 61000-5-8:2009	Электромагнитная совместимость. Части 5–8. Руководства по монтажу и подавлению помех. Методы защиты от НЕМР для распределенной инфраструктуры.
IEC/TS 61000-5-9:2009	Электромагнитная совместимость. Части 5–9. Руководства по монтажу и подавлению помех. Оценки магнитной восприимчивости на уровне системы для НЕМР и НРЕМ.
ГОСТ Р 51318.20-2012	Совместимость технических средств электромагнитная. Приемники звукового и телевизионного вещания и связанное с ними оборудование. Характеристики помехоустойчивости. Нормы и методы измерений
ГОСТ Р 51318.25-2012	Совместимость технических средств электромагнитная. Транспортные средства, моторные лодки и устройства с двигателями внутреннего сгорания. Характеристики индустри-

	альных радиопомех. Нормы и методы измерений для защиты радиоприемных устройств, размещенных на подвижных средствах
ГОСТ Р 55266-2012	Совместимость технических средств электромагнитная. Оборудование сетей связи. Требования и методы испытаний
ГОСТ 30804.4.11-2013	Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость к провалам, кратковременным прерываниям и изменениям напряжения электропитания. Требования и методы испытаний
ГОСТ 30804.4.7-2013	Совместимость технических средств электромагнитная общее руководство по средствам измерений и измерениям гармоник и интергармоник для систем электроснабжения и подключаемых к ним технических средств
ГОСТ 32134.1-2013	Совместимость технических средств электромагнитная. Технические средства радиосвязи. Общие технические требования и методы испытаний
ГОСТ CISPR 16-1-4-2013	Совместимость технических средств электромагнитная. Требования к аппаратуре для измерения параметров промышленных радиопомех и помехоустойчивости и методы измерений. Часть 1-4. Аппаратура для измерения радиопомех и помехоустойчивости. Антенны и испытательные площадки для измерения излучаемых помех

В 2005 г МСЭ-Т (исследовательская комиссия № 15 (SG15)) были начаты обсуждения рекомендаций, связанных с исследованием влияния ПД ЭМВ на телекоммуникационную аппаратуру.

Одной из последних является Рекомендация МСЭ-Т ИК 5 К.81 “НРЕМ immunity guide for telecommunication systems”, посвященная испытаниям на устойчивость телекоммуникационной аппаратуры и центров обработки данных к ПД ЭМВ [273, 275], а также проект стандарта IEEE P1642 [233], в котором приводятся практические методы защиты компьютерных систем от ПД ЭМВ.

Опираясь на международный опыт создания стандартов, направленных на защиту от электромагнитной угрозы, в России ведется работа по созданию системы национальных стандартов в области защиты информации от преднамеренных электромагнитных воздействий.

При ФСТЭК РФ сформирован технический комитет по стандартизации «Защита информации» (ТК 362). Этим комитетом разрабатывается целевая система стандартов по защите от ПД ЭМВ [17, 65, 190- 193].

В 2007 г. данная угроза включена в состав ГОСТ Р 50922-2007, содержащий термины, определения и перечень факторов, воздействующих на информацию. В этом же году разработан ГОСТ Р 52863-2007 «Защита информации. Автоматизированные системы в защищенном исполнении. Испытания на устойчивость к преднамеренным силовым электромагнитным воздействиям. Общие требования». Этот ГОСТ устанавливает:

- требования устойчивости к ПД ЭМВ;
- степени жесткости испытаний;
- методы испытаний.

В начале 2010 г. принят ГОСТ Р 51317.1.5-2009 «Совместимость технических средств электромагнитная. Воздействия электромагнитные большой мощности на системы гражданского назначения. Основные положения». Стандарт дает общее введение в данную область деятельности, термины и определения, а также содержит сведения об электромагнитных воздействиях большой мощности, их влиянии на системы гражданского назначения и методах защиты систем от электромагнитных воздействий большой мощности.

На сегодня разработаны стандарты, находящиеся на стадии утверждения:

- ГОСТ Р «Защита информации. Автоматизированные системы в защищенном исполнении. Средства защиты от преднамеренных силовых электромагнитных воздействий. Общие требования».

- ГОСТ Р «Защита информации. Автоматизированные системы в защищенном исполнении. Средства обнаружения преднамеренных силовых электромагнитных воздействий. Общие требования».

Стандарты по безопасности ИТ, принятые в 2012-13 г.

ГОСТ Р ИСО/МЭК
15408-1-2012

Информационная технология. Методы и средства обеспечения безопасности. Критерии оценки безопасности информационных технологий. Часть 1. Вве-

	дение и общая модель
ГОСТ Р ИСО/МЭК 18045-2013	Информационная технология. Методы и средства обеспечения безопасности. Методология оценки безопасности информационных технологий
ГОСТ Р ИСО/МЭК 15408-3-2013	Информационная технология. Методы и средства обеспечения безопасности. Критерии оценки безопасности информационных технологий. Часть 3. Компоненты доверия к безопасности
ГОСТ Р ИСО/МЭК 15408-2-2013	Информационная технология. Методы и средства обеспечения безопасности. Критерии оценки безопасности информационных технологий. Часть 2. Функциональные компоненты безопасности

В стандартах по средствам обнаружения и защиты дана их классификация и определены предъявляемые к ним требования.

Стандарт по организации и содержанию работ по защите от ПД ЭМВ разработан с учетом:

- применения научно обоснованного системного подхода к обеспечению защиты, предусматривающего рациональное сочетание ее различных структурных компонент: защиты помещения, средств обеспечения (электропитания, заземления, коммуникации), повышения устойчивости к ПД ЭМВ самих средств информатизации, применения средств обнаружения и защиты, организационных мер. Защита строится адекватно проектной угрозе;
- интеграции системы защиты от ПД ЭМВ в комплексную систему безопасности объекта путем ее дополнения и функционального расширения;
- реализации этапов проведения работ при создании системы защиты и при эксплуатации АСЗИ в защищенном исполнении.

Планируемое в 2014 г. введение стандартов в действие в совокупности с ГОСТ Р 52863-2007 позволит образовать основу нормативной базы, которая станет одной из основополагающих компонент отечественной системы организационно-технических мероприятий по защите информации от данной угрозы. Последующее развитие и конкретизация нормативной базы должны производиться уже преимущественно на ведомственном уровне.

Дальнейшими направлениями деятельности по данной тематике являются:

1. Разработка ГОСТ по организации и проведению контроля защищенности автоматизированных систем в защищенном исполнении (АСЗИ) от ПД ЭМВ.

2. Развитие и конкретизация положений стандартов в нормативных документах ведомств/отраслей с учетом их специфики. Такими документами должны стать: модель угроз; специальные требования и рекомендации, строительные нормы и правила; типовые методики испытаний; инструкции по эксплуатации. Неотъемлемой составной частью процесса защиты АСЗИ от ПД ЭМВ является проведение контроля защищенности объектов информатизации от данной угрозы. Он должен осуществляться на федеральном, ведомственном и объектовом уровнях и связан с выполнением определенных целевых процедур, проводимых уполномоченными органами и должностными лицами. Очевидно, что первоочередными требованиями, предъявляемыми к контролю защищенности АСЗИ, выступают его объективность и независимость. Для этого необходимо создание соответствующей организационно-технической системы, построение и функционирование которой требует нормативного обеспечения в виде ГОСТ. Его разработка в ближайшее время должна в основном завершить формирование нормативной базы по защите АС от ПД ЭМВ, в частности, Проект нормативного документа «Специальные требования и рекомендации по технической защите информации от преднамеренных деструктивных электромагнитных и электрических воздействий».

Таким образом, создаваемая система национальных стандартов по защите информации от преднамеренных электромагнитных воздействий открывает широкие перспективы для практического решения вопросов повышения безопасности информации и объектов информатизации в РФ.

Понятие «сверхширокополосный» впервые было официально введено в 1990 г. Комиссия Управления перспективных военных НИОКР Минобороны США (DAPRA) для разделения радиотехнических систем по занимаемой ими полосе частот ввела общее определение относительной полосы частот

$$\eta = \frac{(f_h - f_l)}{(f_h + f_l)}, \quad (1.1)$$

где f_h и f_l – верхняя и нижняя границы спектральной полосы по уровню –10 дБ (–10 дБ соответствует уровню 0,7).

В соответствии с этим определением системы или сигналы, имеющие $\eta \leq 0,01$, отнесены к узкополосным; $0,01 < \eta \leq 0,25$ – к широкополосным; $0,25 < \eta \leq 1$ – к сверхширокополосным (СШП – UWB). Это определение в настоящее время широко используется в отечественной и зарубежной литературе.

Данное определение было скорректировано Федеральной комиссией связи (FCC) США в 2000 г. По определению FCC, к СШП относятся все системы со спектральной полосой не менее 1,5 ГГц, а также устройства, у которых ширина спектральной полосы по уровню –10 дБ составляет, по крайней мере, 25 % от значения центральной частоты.

В стандарте МЭК 61000-2-13 [149] для классификации сигналов вводится процентная ширина спектра (percent bandwidth)

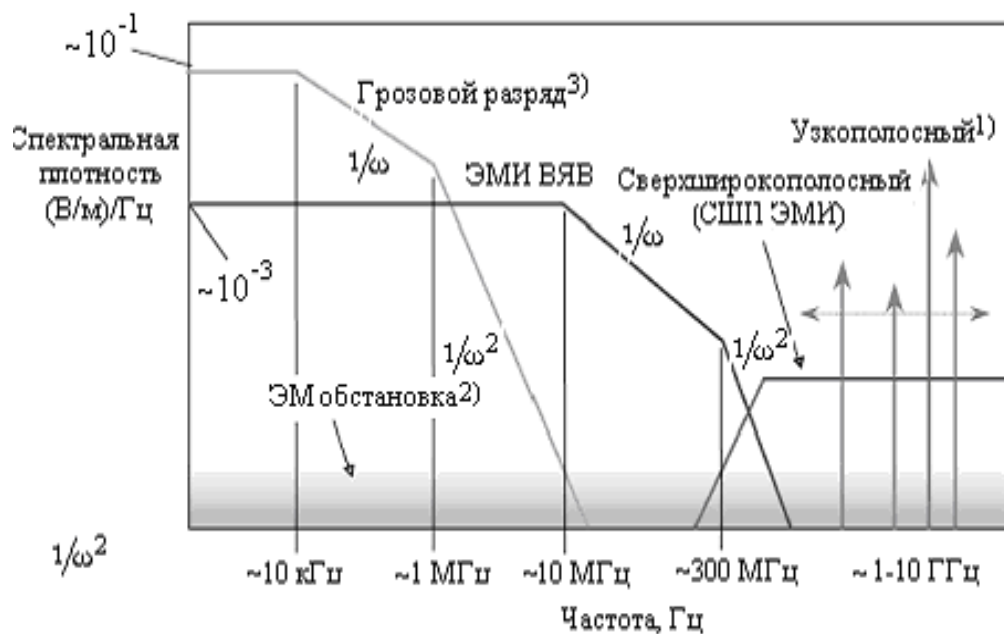
$$\text{pbw} = 2 \frac{(f_h - f_l)}{(f_h + f_l)}. \quad (1.2)$$

Стандарт определяет следующие типы электромагнитных сигналов в зависимости от процентной ширины спектра:

- узкополосный сигнал (narrowband signal) – $\text{pbw} < 1 \%$ (например, радиосигнал с амплитудной модуляцией (АМ));
- сигнал со средней шириной спектра (moderate bandwidth signal) – $1 \% < \text{pbw} < 25 \%$ (например, телевизионный сигнал);
- сверхширокополосный сигнал (ultrawideband (UWB) signal) – $\text{pbw} > 25 \%$.

Энергетический спектр СШП-ЭМИ.

На рисунке 1.2 представлены характеристики различных типов электромагнитного излучения: грозовой разряд; ЭМИ высотного ЯВ; сверхширокополосный ЭМИ; узкополосный ЭМИ.



- 1) Узкополосные сигналы в диапазоне частот от 0,2 до 5 ГГц
 2) Не обязательно ВЭМ
 3) Значение спектральных компонентов > 10 МГц зависит от направления

Рисунок 1.2 - Различные типы электромагнитной обстановки

Частотный диапазон от сотен мегагерц до гигагерц включает в себя помехи искусственного неядерного происхождения. Это как раз сфера, на которую распространяется упомянутый выше стандарт МЭК 61000-2-13. В нем рассматриваются мощные электромагнитные воздействия (НРЕМ – High power electromagnetic). Более определенно: к НРЕМ относятся электромагнитные излучения искусственного происхождения с пиковым электрическим 100 В/м (что соответствует плотности потока энергии 26,5 Вт/м²) в частотном диапазоне от сотен мегагерц до нескольких гигагерц. Выбор такого частотного диапазона связан с тем, что достаточно интенсивные сигналы в диапазоне от 200 МГц до 5 ГГц вызывают повреждения во многих системах, а также с возможностями современных излучателей. Данный стандарт рассматривает СШП как часть НРЕМ, куда входят также другие виды воздействий в том же частотном диапазоне, например узкополосные излучения (НРМ – High power microwave).

Таким образом, согласно стандарту МЭК 61000-2-13 под СШП ЭМИ понимаются импульсные электромагнитные поля искусственного неядерного проис-

хождения с параметрами: $pbw > 25 \%$; амплитуда электрического поля - 100 В/м и более; частотный диапазон от сотен МГц до нескольких ГГц [130].

Важно учесть, что на расстоянии R от источника мощность ЭМИ зависит от технологии создания аппаратуры и совершенности конструкции антенны. Разработанные в настоящее время излучатели СШП ЭМИ создают поля напряженностью до 100 кВ/м.

Анализ источников электромагнитных излучений [47, 79, 82, 93, 191-193, 197, 264] показал:

1. Источниками электромагнитных помех естественного происхождения являются: молнии, геомагнитные бури, электростатические разряды. Анализ существующих материалов показывает, что в этой области в основном проработаны физика воздействия, методы оценки и соответствующие методы защиты.

2. Источниками электромагнитных помех искусственного происхождения являются: ЭМИ высотного ядерного взрыва, излучения РЛС и РПС, промышленные помехи ЛЭП, КСЖД, высоковольтные установки ЭМИ ЯВ, генераторы сверхширокополосного и микроволнового излучения, технические средства намеренного силового воздействия. Анализ их показал, что:

- излучения РЛС и РПС, промышленные помехи ЛЭП, КСЖД также в основном проработаны физика воздействия, методы оценки и соответствующие методы защиты;

- ЭМИ высотного ядерного взрыва, высоковольтные установки ЭМИ ЯВ, генераторы сверхширокополосного и микроволнового излучения, технические средства намеренного силового воздействия постоянно совершенствуются с учетом современных достижений науки, техники и современных требований по электромагнитной безопасности.

ЭМИ ВЯВ имеет крутой фронт (единицы наносекунд) большие размеры зон воздействия полей на поверхности Земли и в воздухе (сотни – тысячи километров), наводит большие амплитуды импульсов напряжения и тока в технических системах (сотни киловольт на метр). Экспериментальные данные натуральных взрывов свидетельствуют о выходе из строя систем связи и энерго-

снабжения на расстояниях от 100 до 2000 км от эпицентра взрыва.

Основные сведения по параметрам ЭМИ ВЯВ изложены в стандарте МЭК 61000-2-9, по токам и напряжениям в МЭК 61000-2-10.

3. Методы оценки устойчивости информационных систем и требования к средствам защиты их от существующих генераторов СШП ЭМИ и перспективных разработок должны разрабатываться, исходя из следующих параметров ЭМП:

- напряженность электрического поля в диапазоне от 1 до 200 кВ/м;
- длительность фронта импульса – от 100 до 500 пс;
- длительность импульса – от сотен пикосекунд до единиц наносекунд;
- частота повторения импульсов – от 0,1 до 1000 Гц.

4. Микроволновое излучение - электромагнитное излучение наносекундной и микросекундной длительности в узкой полосе частот, расположенной между 500 МГц – 10 ГГц. Пиковая мощность в антенне от 10 кВт до 20 ГВт, энергия на выходе генератора от 100 Дж до 20 кДж, напряженность электрического поля от 1 кВ/м до 100 кВ/м, частота повторения импульсов до 1 кГц, несущая частота от 1 до 15 ГГц.

5. Параметры электромагнитных факторов являются основой для разработки методов расчета воздействия, стандартов, методов и средств воспроизведения, испытаний и защиты.

6. Проблема защиты информационных систем и объектов от действия мощных электромагнитных помех фундаментальна, актуальна, сложна и многогранна. Базируется с одной стороны на фундаментальных исследованиях физики явления, механизмов взаимодействия полей с объектами, а с другой стороны на имеющихся возможностях методов воспроизведения, испытаний и существующих средств защиты.

1.2 Особенности воздействия СК ЭМИ на элементы и узлы БЦВК

Как отмечалось выше, важной особенностью СК ЭМИ является потен-

циальная эффективность их воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. Широкополосность и высокая частота повторения СК ЭМИ делают этот вид электромагнитного воздействия значительно опаснее воздействия электромагнитного импульса ядерного взрыва.

Особенностью СК ЭМИ является их малая длительность (от десятков - сотен пикосекунд до единиц наносекунд для первых полупериодов импульсов по уровню 0,5 от амплитуды), соизмеримая с длительностью рабочих сигналов электронной аппаратуры и сетей передачи данных структурно-сложных систем. Основная спектральная плотность находится в полосе частот от сотен мегагерц до единиц гигагерц [225, 149]. Высокая скважность обеспечивает большие значения импульсных напряженностей при низких уровнях средней мощности (< 1 Дж) и энергопотребления источника. В лабораторных генераторах СК ЭМИ на выходе генератора формируются периодически повторяющиеся видеоимпульсы положительной или отрицательной полярности (рисунок 1.3а) [272, 273].

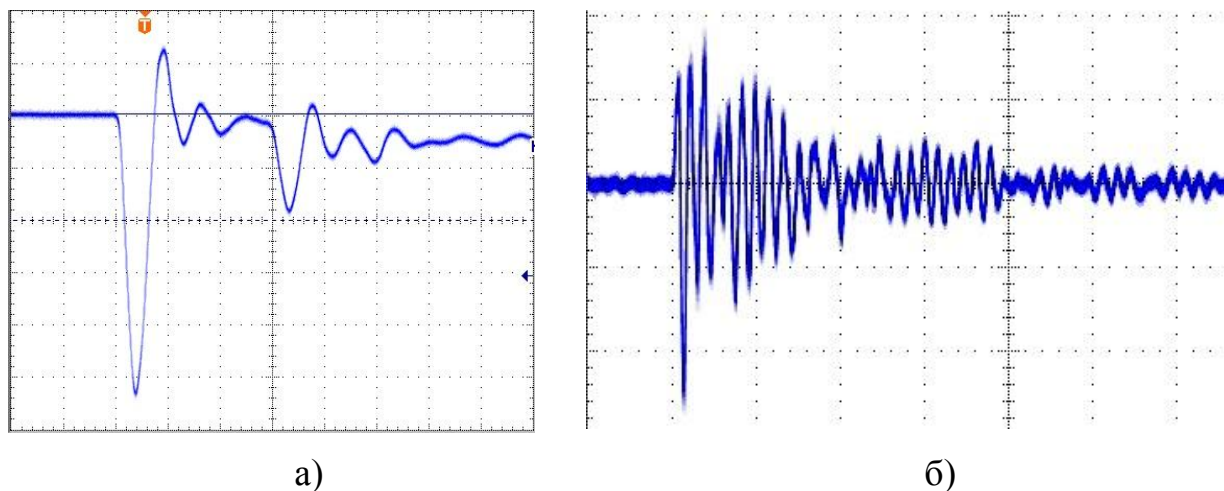


Рисунок 1.3 - а) Типовая форма импульса на выходе генератора.

б) Форма импульса на нагрузке сетевого интерфейса при емкостной инжекции

Физической средой передачи структурно-сложных систем, как правило, является витая пара, представляющая собой систему с распределенными параметрами: емкостью и индуктивностью. В результате переходных процессов, происходящих при инжекции СК ЭМИ в кабель (витую пару категории 5,) сформированный на выходе генератора импульс приобретает форму затухающей си-

нусоиды при измерении на нагрузке сетевого интерфейса. Это объясняется тем, что кабель представляет собой колебательный контур с характерными емкостью и индуктивностью. Вследствие этого на вход сетевого интерфейса поступает импульс большей длительности, модулированный различными частотами. На рисунке 1.3а показана исходная форма импульса на выходе генератора, а на рисунке 1.3б форма импульсной помехи на нагрузке сетевого интерфейса при емкостном способе инъекции.

Анализ современных бортовых цифровых вычислительных комплексов показал, что БЦВК характеризуются следующими особенностями:

1. БЦВК имеют минимальные массогабаритные характеристики.
2. Наблюдается неуклонная тенденция повышения показателей надежности и качества отдельных элементов и узлов БЦВК. Например, для современной аппаратуры геостационарных искусственных спутников Земли срок службы должен составлять 15-17 лет.
3. БЦВК характеризуются сложными алгоритмами функционирования.
4. БЦВК подвергаются широкому спектру воздействия дестабилизирующих факторов. В общем случае БЦВК должны функционировать в условиях воздействия на них, динамически изменяемых в зависимости от траектории движения или явлений окружающей среды; электрических, магнитных, электромагнитных полей; непрерывного и импульсного ионизирующего излучения (ИИ); широкого спектра механических и климатических воздействий.
5. В состав бортовых систем входят как цифровые устройства (устройства автоматики, телеметрии, цифровой обработки сигналов и т.п.), так и аналоговые и гибридные устройства (устройства электропитания, приемо-передающие устройства, устройства навигации, усилительные и измерительные устройства и др.), которые работают в широком интервале частот (от единиц Гц до ГГц), напряжений (от десятых долей вольт до киловольт) и токов (от мА до сотен ампер).
6. В конструкторско-технологическом плане БЦВК имеют широкий спектр реализаций, которые базируются на различных принципах конструирования: носхемном; функционально-блочном; функционально-модульном; функциональ-

но-узловом. В связи с жесткими требованиями к массогабаритным характеристикам, а также наличием различных типов устройств в БЦВК широко применяются последние достижения интегральных и гибридно-интегральных технологий, которые, в свою очередь, способствуют ускорению освоения технических достижений в области создания перспективных радиотехнических средств.

7. Широкий спектр дестабилизирующих факторов и высокие требования к надежности приводят к необходимости использовать специальные схемные, конструкторские и технологические решения, связанные с обеспечением электрических, электромагнитных, тепловых, аэродинамических, надежностьных и других характеристик БЦВК.

Обеспечение устойчивости БЦВК к электромагнитным излучениям на схемотехническом уровне осуществляется за счет: гальванической развязки по цепям питания и заземления; устранения сквозных токов в полупроводниковых приборах; включения в силовые кабельные цепи питания газовых разрядников и специальных фильтров; введения для отдельных элементов специальных схем защиты от перегрузок по току и напряжению и т.д.

8. Реализация БЦВК с минимальными массогабаритными характеристиками в совокупности с достижениями микроминиатюризации приводит к тесной взаимосвязи физических процессов (электрических, электромагнитных, аэродинамических, тепловых, механических, радиационных и т.д.), протекающих в схемах и конструкциях БЦВК.

9. С точки зрения оценки воздействия на элементы и узлы БЦВК ЭМИ могут быть разбиты на отдельные составляющие. Это обусловлено следующими причинами:

- ограниченными возможностями существующих методов оценки воздействия ЭМИ на БЦВК в целом;
- различием требований к БЦВК по защищенности от воздействия ЭМИ;
- отсутствием в подавляющем большинстве случаев гальванической связи между всеми элементами БЦВК.

10. В общем случае воздействующими факторами на элементы и узлы БЦВК при воздействии ЭМИ являются:

- электромагнитные поля, воздействующие на элементы и узлы БЦВК;
- электромагнитные поля, проникающие через экранированные поверхности узлов и подсистем БЦВК;
- ЭМП, заносимые импульсными токами с силовых кабельных коммуникаций внутрь экранированных подсистем БЦВК;
- импульсные напряжения и токи, наводимые в цепях «жила-экран» кабелей и воздействующие на изоляцию оборудования и аппаратуры, имеющих гальваническую связь с силовыми кабельными коммуникациями;
- импульсные напряжения и токи, наводимые в межстоечных кабелях ЭМП, проникающими через неоднородности экранов.

Таким образом, воздействия СК ЭМИ могут осуществляться по следующим каналам: электромагнитным полем; по линиям связи; по цепям питания; металлоконструкциям; заземлению.

11. Технологическое оборудование БЦВК, как правило, выполняется на микросхемах, имеющих в общем случае достаточно низкую устойчивость к воздействию импульсных токов и напряжений, а в совокупности с межстоечными соединительными линиями критична к воздействующим ЭМИ.

Импульсные напряжения, возникающие во внутренних сетях технологических потребителей, в большинстве случаев не представляет опасности для самих кабельных линий и электрооборудования, но могут представлять опасность для технологических потребителей (выпрямительные устройства, стабилизаторы и т.п.) или снижать их помехоустойчивость. По этой причине эти эффекты должны быть также количественно и качественно учтены для каждой конкретной системы.

12. С точки зрения путей воздействия ЭМИ на БЦВК ее подсистемы можно разделить на две группы:

- неэкранированные исполнительные или измерительные элементы и кабельные системы;

- экранированные узлы.

13. В результате воздействия ЭМИ на элементы БЦВК могут иметь место следующие повреждения и отказы:

- нарушение функционирования отдельных подсистем или всей системы в целом в результате ложных срабатываний импульсных схем во входных и выходных цепях блоков аппаратуры;

- выход из строя пультов, щитов из-за пробоя изоляции входных или выходных элементов этих блоков;

- выход из строя источников питания БЦВК в результате пробоя изоляции трансформаторов во входных цепях блоков питания, что приводит к отказу аппаратуры автоматики, связанных с данным блоком питания;

- полная потеря работоспособности отдельных подсистем БЦВК в результате пробоя изоляции и выхода из строя кабелей [84, 130].

В отдельных случаях разрушение в результате перегрузки по току защитных разрядников, установленных во входных цепях оборудования, приводит к нарушению работы БЦВК. В зависимости от уровня воздействия полей ЭМИ в БЦВК могут возникать как сочетания типовых отказов элементов, так и все типовые отказы одновременно.

Кроме того, при воздействии ЭМИ на современные БЦВК, как показывают экспериментальные исследования, наблюдаются не только физическое разрушение элементной базы бортового комплекса, а еще и нарушение целостности информации, передаваемой по каналам связи и обрабатываемой бортовыми вычислительными машинами.

Одна из особенностей распространения периодически повторяющихся импульсных помех, создаваемых в кабеле (витой паре) в результате воздействия ЭМИ, заключается в том, что, несмотря на симметричность витых пар, часть помех проникает в цепи сетевого адаптера и БЦВМ через шину взаимодействия. Как известно, в идеально симметричной витой паре помехи, наведенные в проводах пары, взаимно уничтожаются. При воздействии внешней гармонической электромагнитной помехи такого подавления вполне достаточно. При воздейст-

вии СК ЭМИ при общей невысокой энергетике имеет место высокая амплитуда помехового импульса, в результате чего некая результирующая помеха остается и проникает далее [228].

Ввиду того, что среди работ [23, 25, 26, 61, 82-85, 137, 169, 197] отечественных специалистов достаточно широко освещен вопрос пересчета воздействующих СК ЭМИ в токи и напряжения, создаваемые в линиях связи, в диссертационной работе автор рассматривает параметры периодически повторяющихся импульсных помех непосредственно на нагрузке сетевого интерфейса.

Обзор работ в предыдущих разделах и предварительные исследования [60-62] показали, что при воздействии СК ЭМИ на кабель (витую пару) с использованием емкостной или индуктивной связи достигается наибольшее количество деструктивных эффектов по уничтожению, искажению и блокированию информации, передаваемой по бортовой кабельной сети.

Воздействия по цепям электропитания маловероятны, что объясняется сложной схемой воздействия и необходимостью учета множества факторов работы активного сетевого оборудования, таких как применение защитных фильтров питания, защита в блоке питания активного сетевого оборудования, уровни срабатывания «интеллектуальной» защиты оборудования, критические уровни работы элементной базы устройства [189, 215, 219, 220, 250, 252, 259, 265].

Воздействию на физическую среду Ethernet, как правило, используемую в бортовых вычислительных комплексах, сверхкоротких электромагнитных импульсов до настоящего времени практически не уделялось должного внимания, в связи с чем, в работе этим вопросы уделено особое внимание.

Механизм формирования ошибок при передаче данных основан на том, что модель ISO/OSI описывающая взаимодействие систем в сети состоит из семи уровней. Технология Ethernet работает на первых двух уровнях этой модели: физическом и канальном. Среда передачи и параметры сигнала определяются физическим уровнем. На канальном уровне непрерывные передаваемые последовательности байтов образуют кадры. Передача информации осуществляется при помощи кадров. Сложность

технологии заключается в том, что существует несколько типов кадров, которые имеют разную структуру, поэтому кадр каждого типа должен иметь определенный метод обработки для корректного приема.

Распространяясь по витой паре, кадр Ethernet может подвергнуться влиянию внутренних и внешних факторов, которые способны изменить первоначальный вид кадра. Ошибки Ethernet заключаются в повреждении кадра или его некорректности, вследствие которой кадр не может быть правильно обработан принимающей стороной. Все они имеют разные причины возникновения, вызванные неисправностями аппаратной части или программного обеспечения, однако признаком наличия ошибки является повреждение одного или нескольких битов кадра или несоответствие формы и структуры кадра международным стандартам IEEE.

В современном коммутируемом Ethernet коллизии сведены к минимуму, поскольку конкуренция на доступ к среде отсутствует, а максимальная доля ошибок в современных поколениях Ethernet, работающих на скорости 1 и 10 Гбит/с, приходится на преамбулу [88].

Сети Ethernet, особенно сети последних поколений, построенные с использованием витой пары в качестве физической среды передачи, чувствительны к внешним электромагнитным помехам, которые оказывают существенное влияние на передачу сигнала и приводят к возникновению ряда неисправностей бортовой кабельной системы [60]. Так, при воздействии СК ЭМИ на линию связи по кабелю распространяются периодически повторяющиеся импульсные помехи, которые по амплитуде больше или равны полезному электрическому сигналу Ethernet и приводят к искажению исходной последовательности символов.

Также стоит упомянуть тот факт, что существуют некоторые предельные параметры устойчивости функционирования сетей Ethernet, которые индивидуальны для каждого производителя сетевого оборудования. При воздействии СК ЭМИ на кабельную линию бортовой сети и достижении этих параметров происходит разрушение сетевого соединения между конечными потребителями. В связи с этим окончательные значения параметров, при которых происходит

разрушение сетевого соединения, возможно установить только экспериментальным путем.

Таким образом, особый интерес в проводимом исследовании представляют такие пороговые значения параметров наведенных токов и напряжений, возникающих в результате воздействия ЭМИ, при которых в сети Ethernet начинают возникать ошибки в кадрах при передаче данных по сети; ошибки, при которых передача данных невозможна, но еще отсутствует разрушение сетевого соединения и ошибки, при которых происходит разрушение сетевого соединения.

На сегодняшний день общие рекомендации для устранения в бортовых сетях неисправностей заключаются в том, что при обнаружении ошибки необходимо собрать информацию по существующей неисправности и локализовать ее до минимально возможного устройства или сегмента бортовой сети. После этого локализованная часть сети, содержащая ошибку, изолируется, а ошибка исправляется.

Таким образом, БЦВК, как объект проектирования, представляет собой структурно-сложную как в схемотехническом, конструктивном, в плане надежности систему, подвергающуюся широкому спектру воздействий дестабилизирующих факторов. При этом, в такой системе протекает сразу несколько взаимосвязанных физических процессов (электрических, тепловых, электромагнитных и т.д.), характер протекания которых, в свою очередь, в значительной степени определяют основные показатели их технического уровня.

1.3 Обзор существующих методов анализа и оценки деструктивного воздействия СК ЭМИ на элементы и узлы БЦВК

1.3.1 Расчетные методы

Обзор публикаций [25, 26, 46, 79, 109, 123, 127 - 129, 142, 143, 206], показывает, что исследуемая проблема мало изучена ввиду ряда факторов. Во-первых, исследованием данной проблемы занимается узкий круг специалистов, которые недостаточно взаимодействуют между собой (возможно, это вы-

звано закрытостью значительной части проводимых исследований). Во-вторых, большая часть работ в этой области посвящена исследованиям влияния ПД ЭМВ непосредственно на телекоммуникационную аппаратуру, а воздействие на линии передачи данных как отдельная проблема не рассматривается. В-третьих, в России и за рубежом уделяют большое внимание постановке натуральных испытаний и получению видимых эффектов, при этом авторы не стремятся проникнуть в физические и информационные механизмы формирования этих явлений. Наблюдается стремление к количественным результатам, но не к качественному пониманию сути процессов.

Проведенные отечественные и зарубежные оценки и экспериментальные исследования воздействия ЭМИ на бортовые системы управления (БСУ) показали, что уровни наводимых напряжений в элементах системы и кабельных линиях могут превышать значения их импульсной прочности, либо напряжения ложного срабатывания. Величины наводок зависят от целого ряда факторов, таких как конструктивные особенности объектов и материал экранов, глубина посадки, длина кабелей, условия заземления и т.д. Необходимость защиты указанных систем особенно возрастает в случае использования в своем составе микропроцессоров и микросхем, которые особенно чувствительны к полям ЭМИ. Это обстоятельство требует проведения комплекса исследований по оценке поражающего действия ЭМИ на данные системы и разработки моделей и сценариев ЭМИ воздействий на элементы и узлы БЦВК. Однако, здесь возникает ряд проблем, которые не получили своего решения и по настоящее время [5, 9, 78].

В ряде теоретических работ при решении дифракционных задач сделаны попытки привести их к интегральным уравнениям. Так сформулировано точное интегральное уравнение, связывающее векторный потенциал на поверхности цилиндра с током при любом способе возбуждения колебаний, однако и здесь решение может быть получено для тел простейших форм [12]. В ряде научных работ приведены данные по развитию методов решения электродинамических задач в строгой постановке. Однако приведенные в них данные относятся в основ-

ном к дифференциальным полям приемных и передающих антенн. Оценки токов, наводимых в элементах антенн, приведены для гармонически изменяющихся однородных полей.

Широкое распространение для практических расчетов токов и напряжений, наводимых ЭМИ в кабельных линиях, получили методы, использующие теорию цепей с распределенными параметрами - метод линий передачи. Строго говоря, данный метод базируется на решении систем телеграфных уравнений и физически обоснован для линий с обратным проводом. В линиях, где обратный провод отсутствует или его положение установить затруднительно, как это имеет место в случае полевого воздействия на кабельные линии, применение этого метода требует осторожного подхода, так как при этом возникает неопределенность в выборе эквивалентных параметров линии и источников распределенной ЭДС, входящих в телеграфные уравнения. Аналитические выражения удельных продольных сопротивлений R , индуктивности L , поперечных проводимости G и емкости C для любой заданной системы достаточно точно могут быть рассчитаны только на основе применения теории электромагнитного поля.

При решении системы телеграфных уравнений используются различные методы. В качестве одного из методов решения системы телеграфных уравнений применяется метод цепочечных схем замещения с сосредоточенными параметрами. Данный метод позволяет решить задачу, учитывающую изменение по длине кабеля проводимости внешней среды и электрофизические характеристики самого кабеля, а также учесть подключение различных типов защитных устройств и заземлителей по трассе. Основным недостатком данного метода являются большие затраты времени счета с ростом числа ячеек.

Наибольшее распространение при решении систем телеграфных уравнений, описывающих взаимодействие кабельных линий с полями ЭМИ, получили численные методы и частотные методы, основанные на применении математического аппарата прямого и обратного преобразования Фурье.

Численные методы решения телеграфных уравнений позволяют учитывать изменения параметров линии по длине распространения волны, параметры заземлителей и защитных устройств, в том числе с нелинейными характеристиками. При этих способах решения исходные данные параметров воздействующих полей могут быть заданы в любом виде (аналитически, в виде таблиц).

Область применения численных методов ограничивается тем, что при таком подходе электрофизические характеристики кабелей (ЭФХ) (R , L , C , G , Z_{CB}) принимаются независимыми от частоты, что может привести к некоторым погрешностям в расчетах для времен, характерных действию ЭМИ.

В ряде литературных источников были использованы комбинированные методы. Расчеты наводок проводились в два этапа. На первом этапе временным методом рассчитывался ток в металлопокрове кабеля, а затем с помощью интеграла свертки (с учетом частотной зависимости передаточной функции металлопокрова) определяется напряженность электрического поля на внутренней стенке металлопокрова. Токи и напряжения в цепи «жила-металлопокров» определялись численными методами во временной области. Данный подход позволяет учесть частотную зависимость сопротивления связи металлопокрова и использовать преимущества численных методов расчета. Однако следует заметить, что при этом зависимость первичных параметров кабелей от частоты (кроме Z_{CB}) не учитывается.

Использование математического аппарата преобразования Фурье позволяет учесть зависимости первичных и вторичных параметров кабелей от частоты, что наиболее важно при расчетах воздействия электромагнитных полей на кабельные коммуникации. Недостатком указанных методов является необходимость задания временных форм воздействующих полей в аналитическом виде. В случаях же табличного задания исходных данных по воздействующим полям, прямое преобразование Фурье необходимо проводить численными методами, что приведет к существенному усложнению программ расчета и увеличению времени счета.

Таким образом, в настоящее время разработаны и применяются методы оценок, позволяющие рассчитывать токи и напряжения, наводимые электромагнитными излучениями в микро и миллисекундном временном диапазоне в кабельных линиях с учетом целого ряда влияющих факторов (нелинейности характеристик защитных устройств, разветвленности кабельных линий, частотной зависимости электрических характеристик кабелей и т.п.). Однако в связи с появлением в последнее время новых не стандартных источников, таких как СКИ ЭМИ, особую актуальность приобрели вопросы, связанные с защитой бортовых систем от поражающих наносекундных ЭМИ перспективных генераторов, характеризующихся большими амплитудными значениями напряженностей электромагнитных полей при малых длительностях.

Кроме того, все рассмотренные методы при определении параметров линии основываются на поперечной квазистационарности электрического поля, т.е. не учитывается скорость распространения волны между проводом и внешней средой. В этом случае получение характеристик наводимых токов и напряжений в линии в наносекундном диапазоне обоснованы недостаточно. Все эти обстоятельства привели к необходимости разработки новых и уточнения существующих расчетных моделей оценки воздействия полей ЭМИ на элементы и узлы БЦВК.

Рассмотрим подробно область применения каждого из существующих подходов.

Современные бортовые системы управления представляют собой сложные устройства, содержащие в своем составе высокоинтегрированные элементы, работающие при малых уровнях сигналов. Это делает их уязвимыми к воздействию мощных электромагнитных излучений и обуславливает необходимость проведения исследований, направленных на обеспечение помехоустойчивости радиоэлектронной аппаратуры и ее компонентов.

Бесспорно, наиболее достоверным путем оценки стойкости БСУ к воздействию электромагнитных полей являются экспериментальные исследования. Однако необходимые меры радиоэлектронной защиты должны быть

предусмотрены уже на этапах проектирования и разработки радиоэлектронной аппаратуры и ее компонентов. Для этого на данных этапах проводятся расчеты с использованием математических моделей взаимодействия ЭМП с элементами БСУ.

Каждый метод может быть использован для решения определенного класса задач. Так, методы геометрической и физической оптики могут быть использованы при расчете отклика больших антенн (например, радиоастрономических радаров) или поля вблизи больших рассеивающих объектов. Полученные результаты могут служить исходными данными при решении другой части задачи другим методом (в частности, FDTD).

Квазистатическое приближение (анализ на основе схем с сосредоточенными параметрами) и теория длинных линий могут применяться для расчета воздействия на конкретные устройства, при условии, что поперечные размеры линий передачи и размеры устройств малы. При этом должны быть заданы токи и напряжения на входах устройств и граничные условия для линий передачи.

Методы конечных элементов (МКЭ) эффективны для моделирования объектов, содержащих проводники и диэлектрики произвольной формы. Они могут использоваться при расчете воздействия на такие элементы БЦВК как интегральные схемы. Однако при решении МКЭ 3-мерных задач имеются проблемы с моделированием незамкнутых геометрий.

Метод моментов нашел широкое применение в антенном анализе и при решении задач об электромагнитном рассеянии. Он особенно эффективен при моделировании проволочных антенн или проволок, прикрепленных к большим проводящим поверхностям. Недостатком является невозможность моделирования неоднородной среды и сложных объектов из различных материалов.

Методы FDTD и TLM [49], в которых расчет проводится непосредственно во временной области, незаменимы для неоднородных, нелинейных и частотно-зависимых объектов или среды. Оба метода позволяют осуществлять параллельные вычисления на ЭВМ. К преимуществам метода FDTD относятся также сравнительная простота расчетных соотношений и задания исходных данных.

Основным из недостатков обоих методов является то, что объемные задачи, где имеются сложные мелкие детали, требуют больших вычислительных затрат. Однако этот недостаток компенсируется быстрым развитием вычислительной техники.

Особенности расчетных моделей оценки воздействия СК ЭМИ на РЭА

Проведённые экспериментальные исследования воздействия СК ЭМИ на электронные компоненты цифровых устройств показали, что для достоверной оценки их реальной стойкости необходимо проведение исследований и испытаний в условиях их реального расположения в аппаратуре.

Решение задачи оценки воздействия СК ЭМИ на РЭА методами математического моделирования на сегодня не представляется возможным ввиду отсутствия соответствующего методического аппарата. При этом анализ численных методов решения таких задач показывает невозможность получения достоверных расчетных результатов существующими методами в связи с тем, что:

а) временные параметры СК ЭМИ (длительность фронта импульса - τ_{ϕ} , длительность импульса - $\tau_{0,5}$) существенно короче, чем аналогичные параметры ЭМИ ЯВ. В связи с этим возникает проблема применимости телеграфных уравнений, ранее используемых при анализе ЭМИ ЯВ, так как:

- существующая модель не учитывает собственное излучение кабеля, весьма существенное на частотах более 10 МГц (спектральный состав СК ЭМИ включает частоты до 10 ГГц);

- при выводе телеграфных уравнений предполагается, что ток в проводнике обладает цилиндрической симметрией, это допущение может быть неверным для высоких частот, входящих в состав частотного спектра СК ЭМИ;

б) для определения частотно-зависимых электрофизических характеристик кабельных линий используются различные приближенные методы (приближения Карсона, Зунде и др.), применимость которых на этих частотах строго не обоснована;

в) при рассмотрении воздействия ЭМИ на кабельные линии с неоднородными экранами (сетчатыми) вводилось упрощение, и экраны рассматривались как сплошные. Это допущение корректно пока длина волны воздействующего ЭМИ много больше поперечных размеров неоднородностей (щелей) экрана. Однако в частотном спектре СК ЭМИ есть частоты с длинами волн соизмеримыми с поперечными размерами неоднородностей некоторых типов экранов [12, 13, 82, 129].

При выборе расчетных оценок учитывалось следующее:

- основной величиной, определяющей характер взаимодействия СК ЭМИ с облучаемыми объектами, является фронт импульса τ . Если характерный размер объекта $L \leq c\tau$, где c – скорость распространения электромагнитной волны, то математическая модель должна учитывать эффект запаздывания в возбуждении различных участков объекта, т.е. рассматривать его как распределенную систему. Так как при $\tau = 100$ пс получаем $c\tau = 3$ см, то отсюда следует, что в этом случае практически все радиотехнические устройства, не говоря уже о подключенных к ним антеннах и линиях связи, должны рассматриваться как распределенные системы;

- простейшими моделями для расчета нестационарных процессов являются линейный вибратор и двухпроводная линия. Именно эти модели могут быть выбраны для проведения математического моделирования. Моделирование проводится во временной области для произвольной зависимости ЭМИ от времени, включая ступенчатую форму, что позволяет фактически определить переходные характеристики модельных объектов по отношению к любой их точке. Это позволяет рассчитать наведенный сигнал на входе подключенных к радиотехническому устройству и двухпроводных линий связи. Для расчета токов, наведенных на поверхности объемных корпусов и экранов РЭА можно использовать стандартные численные методы. Но все это требует экспериментального подтверждения;

- основными приемниками энергии СК ЭМИ внутри современной РЭА являются полосковые линии печатных плат и электронные компоненты.

Нестационарный подход с учетом суммарного воздействия электрического и магнитного полей падающего СК ЭМИ оправдан и в этом случае. На международных конференциях по электромагнитной совместимости этой проблеме уделяется большое внимание. Однако, как правило, задачи решаются в частотной области;

- проблема проникновения СК ЭМИ внутрь корпусов и экранов РЭА. Очевидно, что полностью герметичный экран любой реальной толщины практически непроницаем для СК ЭМИ. Если принять нижнюю границу спектра СК ЭМИ в 40 МГц, то соответствующий скин-слой для меди составит 0,01 мм. Однако, в реальной РЭА и корпусах их объектов всегда имеются разъемы, отверстия и щели, что на практике не позволяет провести достоверную оценку экранирующих свойств таких устройств.

Таким образом, существующие расчетные модели позволяют провести в лучшем случае только ориентировочные оценки.

Оценка влияния СК ЭМИ на сети передачи данных

Исходя из материалов исследований влияния СК ЭМИ на линии связи сетей передачи данных, доступных автору можно выделить 3 методических подхода, в которых:

- предлагается математический аппарат или имитационная модель, позволяющая описать процессы, происходящие в сети при воздействии СК ЭМИ;
- проводятся эксперименты и приводятся их результаты;
- предлагается математический аппарат или имитационная модель, подтвержденные результатами экспериментов, т.е. используется комплексный подход.

Первый методический подход.

За рубежом идеологом этого направления исследований является известный американский ученый Ira Kohlberg. Обзор его публикаций за последние 10 лет [214, 238-246, 248, 258, 261] свидетельствует о развитии и совершенствовании расчетных методов для оценки уязвимости сетей передачи информации и ключе-

вых систем информационной инфраструктуры структурно-сложных объектов. В большинстве рассмотренных статей показано, что наибольшую опасность представляют преднамеренные электромагнитные воздействия, амплитудно-временные характеристики которых аналогичны характеристикам рабочих сигналов современных электронных систем. Наиболее значимая информация представлена в [241], где I.Kohlberg предложил новый теоретический подход к оценке восприимчивости автоматизированных систем реального времени к преднамеренным электромагнитным воздействиям. Предложенная автором математическая модель позволяет установить критерии отказа информационной системы в зависимости от параметров электромагнитного воздействия. Согласно предложенным соотношениям, критерии отказа зависят от вероятности битовых ошибок, ошибок по блокам и временной задержки. В статье не проводится расчет для конкретной реализации сети передачи данных, а дан лишь общий подход для исследования устойчивости автоматизированных систем реального времени к ПД ЭМВ.

В работе [211] рассмотрено влияние электромагнитной помехи на элементы цифровых схем с использованием имитационного SPACE-моделирования. ПД ЭМВ моделируется как шум в виде периодически повторяющихся импульсов, который накладывается на полезные цифровые сигналы. Установлено, что для уменьшения количества ошибок по битам в цифровых схемах необходимо, чтобы частота следования помехи и цифрового сигнала были отличны друг от друга. Также отмечено, что наиболее опасная частота следования помехи, при которой наблюдается наибольшее количество битовых ошибок в КМОП-инверторе и 4-битовом сумматоре, составляет 500 кГц, а амплитуды не более 2,5 В.

Среди отечественных публикаций, в которой рассмотрены вопросы прогнозирования устойчивости сетей передачи данных при ПД ЭМВ на основе моделирования, можно отметить статью [36]. Полученные результаты моделирования показывают: «Максимальный уровень электромагнитной помехи (1,15 В)

может привести к возникновению ложного информационного сигнала в пакете данных сети (уровень информационных сигналов ± 1 В)».

В качестве примера авторами приведены результаты приближенного прогнозирования для сети Fast Ethernet при внешнем высокочастотном импульсном электромагнитном воздействии. Исходные данные: спецификации Ethernet: 10Base-T, 100Base-TX; длина пакета — минимальная 64 байт, максимальная 1518 байт. В статье отмечено: «С учетом частоты повторения воздействующих ЭМИ вводятся ложные информационные сигналы в пакет данных, которые приводят к ошибке контрольной суммы пакета. Такие пакеты отбрасываются, и требуется их повторная передача» [63].

В статье [23] рассматривается новый принцип имитации деструктивного воздействия сверхмощных электромагнитных импульсов на электронную аппаратуру через кабельные линии, где предлагается принцип «интегрального импульса», который основан на следующих трех одновременно выполняемых положениях:

1. Имитирующий относительно маломощный (переносной) источник ЭМИ должен воздействовать на кабельный фрагмент электромагнитно-индукционным, волновым или комбинированным способом в соответствии с временными и пространственными критериями подобия для процессов преобразования индукционного ЭМИ.

2. Непосредственное воздействие на электронный объект мощного индуцированного кондуктивного ЭМИ $U_{\text{ЭМИ}}(t) I_{\text{ЭМИ}}(t)$ либо имитируется эквивалентной по суммарной энергии воздействия временной последовательностью из n менее мощных импульсов $u_{u(t)}$, либо $i_{u(t)}$ той же формы, причем

$$W_{\Sigma} = \int_0^{t_{\text{ЭМИ}}} I_{\text{ЭМИ}}(t) \times U_{\text{ЭМИ}}(t) dt = n \times \int_0^{t_u} u_u(t) \times i_u(t) dt \quad (1.3)$$

3. Энергия каждого из n имитационных импульсов должна превышать критический уровень начального необратимого разрушения микроструктур исследуемых электронных объектов

$$\int_0^{t_u} u_u(t) \times i_u(t) dt > W_{\text{едгд}}$$

На основе предложенных расчетных соотношений представляется возможным анализировать передаточные функции кабельного фрагмента отдельно для каждой из составляющих ЭДС.

Недостатками работ, представленных в первом методическом подходе, являются:

- отсутствие комплексных исследований по существующим технологиям передачи данных;
- отсутствие имитационных моделей с достаточным уровнем абстракции и проработки;
- отсутствие математического аппарата, позволяющего учитывать снижение производительности современных высокоскоростных сетей передачи данных.

Второй методический подход

Второй методический подход наиболее широко представлен в основном материалах экспериментальных работ зарубежных авторов. Это обуславливается наличием современной экспериментально-измерительной базы и более ранним началом исследований, чем в России. Поэтому в период 2005–2009 гг. отечественные специалисты, чтобы разобраться в тонкостях проводимых экспериментов, в основном повторяли результаты зарубежных исследований в собственной редакции.

В 2004 г. в техническом отчете МЭК 61000-1-5 [229] приводятся результаты экспериментальных исследований влияния сверхкоротких электромагнитных импульсов на элементы электронной инфраструктуры объекта информатизации [264]. В частности, рассматривалось воздействие наносекундных импульсных помех, а также микросекундных импульсных помех с параметрами 1/50–6,4/16 и 6,5/700–4/300 мкс на участок кабеля (неэкранированную витую пару категории 5) локальной вычислительной сети Ethernet.

Передача данных осуществлялась согласно спецификации 10Base-T. Эксперименты показали, что воздействие наносекундных импульсных помех на

витые пары сети Ethernet представляет серьезную опасность для локальных сетей, вызывая повреждения компьютеров при относительно низком напряжении помех (от 1,5 кВ до 2 кВ). Данные импульсы будут испытывать затухание при распространении по кабелям категории 5, но это затухание является приемлемым (30 % для расстояния 50 м).

Нарушения функционирования отмечались при напряжении 4 кВ (при подаче помех по схеме «провод — провод» (симметричное напряжение)). Перекрытия напряжения наблюдались при напряжении 3 кВ. Энергия, необходимая для повреждения платы Ethernet, была равна 4 Дж.

В работах [235, 236] представлены результаты экспериментальных исследований по воздействию электромагнитным полем с различной модуляцией на линии связи - неэкранированную витую пару (UTP) категории 5. Авторами рассмотрен фрагмент локальной сети, по которой осуществлялась передача данных между двумя ПК согласно спецификации 100Base-TX. Генератор создавал электромагнитное поле в двух режимах: незатухающая гармоническая волна (CW) и амплитудно-модулированные (AM) сигналы.

Показано, что с помощью проведения Wavelet-анализа электрических сигналов Ethernet в линии связи возможно выявить критические амплитудно-частотные характеристики, изменение которых повлечет к снижению, искажению и блокированию передаваемых данных. Авторы провели натурный эксперимент, в котором осуществлялось воздействие электромагнитным полем с различными параметрами (выявленными в результате серии предварительных расчетов) на участок кабеля, расположенного в поперечно-электромагнитной ячейке с расширенным диапазоном частот.

По результатам экспериментов авторами были сделаны следующие выводы: при формировании в кабеле помех с амплитудой 140 мВ в результате воздействия электромагнитным полем с амплитудно-модулированными сигналами значительно ухудшается пропускная способность сети. Локальная сеть наиболее уязвима при воздействии незатухающих гармонических волн при частоте следования 10–500 МГц и излучений соамплитудной модуляцией в диапазонах частот:

10–50, 60–70 и 80–100 МГц. Таким образом, авторами сделан вывод, что наиболее опасны воздействия с амплитудно-модулированными сигналами.

В работе [216] представлены результаты исследования влияния сверхширокополосного воздействия затухающей синусоиды (DS) и СВЧ высокой мощности (HPM) на ИТ-систему, состоящую из двух коммутаторов и двух персональных компьютеров. В ходе эксперимента кабель, соединяющий два коммутатора, помещался в поперечно-электромагнитную ячейку и подвергался воздействию электромагнитного поля.

По результатам исследований сделаны следующие выводы: СШП-импульсы с высокой частотой повторения могут привести к большому количеству ошибок и разрушению сетевого соединения во время передачи данных. Воздействие импульсами в виде затухающей синусоиды может привести к значительному нарушению сигналов, особенно в линии питания, что приводит к немедленному отключению всей системы. Сверхвысокочастотные (СВЧ) воздействия оказывают наибольшее влияние на передачу данных или линии питания и могут легко проникать через отверстия в корпусе, оказывая влияние на элементную базу.

В работе [254] представлены результаты исследования влияния СШП ЭМИ на локальную сеть Ethernet. Рассматриваются спецификации 10Base-T и 100Base-TX, в качестве физической среды передачи использовалась экранированная витая пара категории 5. Одна станция посылала другой поток данных в течение двух минут, одновременно кабель помещался в поперечно-электромагнитную ячейку и подвергался электромагнитному воздействию. Экспериментально оценивалось количество посланных, искаженных и потерянных кадров. Экспериментально установлено, что при напряженности электрического поля в 12 кВ/м в неэкранированной витой паре наводилось напряжение до 90 В и наблюдалась потеря связи. При напряженности более 12 кВ/м происходило разрушение аппаратного обеспечения, при уровне поля 6 кВ/м временное нарушение работы, а при 0,5–1 кВ/м наблюдаются ошибки в работе локальной сети.

В работе [226] приведены результаты экспериментов, в которых рассматривается влияние электромагнитных воздействий на передачу данных в сети Ethernet. Инжекция электромагнитных импульсов осуществлялась в линию связи - неэкранированную витую пару категории 5е с использованием индукционной связи. В результате серии экспериментов определялись пороговые уровни функционирования 8-портового концентратора при инъекции в линию связи электромагнитных импульсов. По результатам экспериментов делается вывод, что концентратор Ethernet наиболее уязвим к синфазным токам ≥ 10 мА при частоте следования импульсов около 80 МГц.

В статье [266] представлено исследование по инъекции ЭМИ различной модуляции и формы в линию связи между двумя ПК. Целью проводимых испытаний было тестирование различных типов сетевых адаптеров на устойчивость к периодически повторяющимся импульсным помехам, распространяющимся по линиям связи в результате электромагнитного воздействия. В качестве источника нагружения использовались три типа генераторов, формирующих пачки импульсов различной длительности (1, 2; 5; 10 нс).

В ходе эксперимента было установлено, что при воздействии с помощью емкостной инъекции амплитуда воздействующих импульсов снижается на 50 % от исходной амплитуды. Также было установлено, что наибольшее количество деструктивных эффектов проявляется при положительной полярности инжестируемых импульсов. Амплитуда воздействующих импульсов достигала 4,5 кВ, при этом наблюдалось выгорание отдельных дискретных элементов на платах сетевых адаптеров и зависание ПК. Несмотря на это, после перезагрузки ПК соединение в локальной сети в нескольких экспериментах восстанавливалось.

В работе [227] приведены результаты исследования электромагнитных воздействий на различные конфигурации сети Ethernet. В частности, при воздействии на линию связи между концентратором и маршрутизатором было установлено, что отказ концентратора и маршрутизатора происходит при частоте следования периодически повторяющихся импульсов: 112 МГц, 407 МГц, 2,95 ГГц, 3,15 ГГц и в полосе частот 500–690 МГц. Делается вывод, что наиболее-

вероятная причина отказов сети - электромагнитное воздействие на периферийные компоненты сети (концентратор и маршрутизатор), которое может осуществляться через кабель электропитания, сетевой кабель.

Среди отечественных исследований можно выделить работы сотрудников ФГУП «ВНИИОФИ» [186], в которых приводятся результаты исследований функционирования простейшей локальной сети в условиях воздействия СК ЭМИ разной амплитуды и частоты следования в помещении и на открытом пространстве. Проведено исследование по оценке влияния частоты следования воздействующих импульсов на фрагмент кабеля (неэкранированной витой пары категории 5е) локальной сети Ethernet (10Base-T и 100Base-T). В качестве источника излучения использовалась 4-рупорная антенная система апертурой $0,5 \times 0,5$ м, возбуждаемая генератором импульсов напряжения с максимальной амплитудой 40 кВ и длительностью фронта с обострителем ~ 200 пс, без обострителя ~ 800 пс. Между компьютерами осуществлялась пересылка пакетов длиной 64 байт.

На рисунке 1.4 (а и б) показана зависимость доли потери информационных пакетов от напряженности электрического поля при облучении информационного кабеля [186].

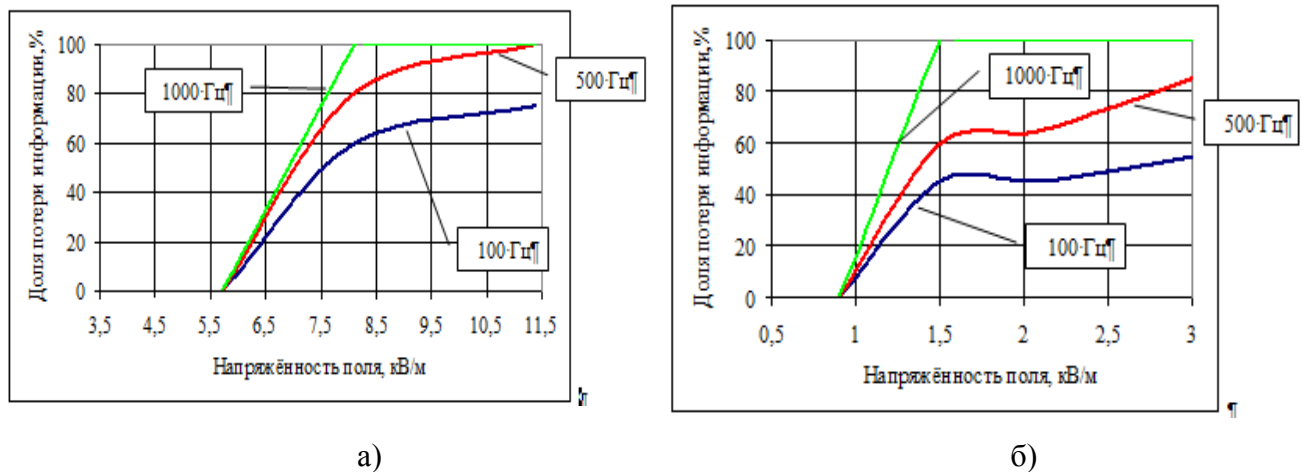


Рисунок 1.4 - Зависимость доли потери информационных пакетов от напряженности электрического поля при облучении информационного кабеля (а - без обострителя; б - с обострителем)

Установлено, что амплитуда наводок на информационный кабель, при ко-

торых происходит 100%-ная потеря информационных пакетов (скорость передачи данных в сети равна 0), составляет от 6 до 15 В, а частота следования импульсов составляла 100, 500, 1000 кГц.

В работе [16] рассматривается влияние СК ЭМИ на фрагмент сети Ethernet (спецификация 100Base-TX). Воздействие осуществлялось электромагнитным полем на участки кабеля, расположенные на различном расстоянии от сетевого адаптера. По результатам эксперимента делается вывод, что амплитуда наведенных помеховых сигналов может в единицы-десятки раз превышать амплитуду штатных сигналов (в рабочей полосе частот). Установлено, что наиболее опасные воздействия СК ЭМИ с характерными частотами излучения 100-300 МГц и амплитудами 3–15 кВ приводят к искажению и блокированию процесса передачи данных в сети Ethernet.

Экспериментальные исследования по выявлению критериальных уровней устойчивости сетей передачи данных при ПД ЭМВ (по ГОСТ Р 52863-2007) проведены ООО «Эмсотех» [27, 87, 90, 209]. Авторы подробно представляют параметры воздействующих импульсов, но совершенно не рассматривают импульсные токи и напряжения, создаваемые на нагрузке сетевого интерфейса.

Проведенный анализ работ по второму методическому подходу позволил выявить ряд недостатков. Так, в работах [1, 16, 186, 188, 191, 226, 235, 236, 254, 266] согласно применяемым экспериментальным методикам не учитываются типы трафика. Ни в одной из работ не рассматривается воздействие на сетевой трафик мультисервисной сети, где длина пакетов и интервалы между пакетами имеют случайных характер. Также во всех приведенных редакциях экспериментов не применяются общепризнанные методики, используемые для тестирования сетей связи. Каждый автор сам решает, как он будет проверять снижение производительности сети при проведении эксперимента. Несмотря на выводы, сделанные о степенях устойчивости сети, нет четкого определения, когда сеть способна передавать данные, а когда нет, т.е. фактически отсутствуют явные критерии работоспособности сети.

Третий методический подход.

В работах [47, 258] представлена численная модель оценки деградации Канала передачи данных при воздействии периодически повторяющейся импульсной помехи. Проведен сравнительный анализ эффективности воздействия различных импульсных помех, имеющих одинаковую среднюю мощность. Разработанная численная модель проверена экспериментальным путем. Установлено, что полное блокирование канала передачи данных возникает при высокой частоте повторения импульсной помехи ($f \geq 500$ Гц). При низких частотах повторения импульсной помехи ($f = 10$ и 50 Гц) увеличение ее средней мощности за счет повышения напряжения генератора не приводит к существенному снижению скорости передачи данных в информационной системе. Рассмотренная в данных работах численная модель также используется в [46], где предложена комплексная методика оценки стойкости цифровых устройств к воздействию периодически повторяющихся сверхкоротких электромагнитных импульсов.

В работах [46, 47, 258] приведен математический аппарат для двоичных методов кодирования информации. Примером такого кодирования служит манчестерский код, применяемый в сетях Ethernet, спецификация 10GBase-T.

В работе [82] автор делает основной упор на расчет наведенных токов и напряжений в кабельных линиях связи в результате электромагнитного воздействия. Предложен математический аппарат на базе уравнений Максвелла. На основе проведенного исследования сделаны выводы:

- амплитуда помеховых сигналов, наведенных в кабелях, может приводить к сбоям в работе аппаратуры, подключенной к кабельным линиям, или выводить из строя входные элементы устройств, имеющие низкий уровень электрической прочности;
- амплитудно-временные характеристики наведенных помеховых сигналов сложным образом зависят от амплитудно-временных параметров воздействующих импульсов и ориентации кабелей относительно вектора воздействующего поля;
- частота воздействующей помехи лежит в области частот от 100 МГц до 1 ГГц.

В работе [25] автор применил аналитический подход к оценке стойкости телекоммуникационных систем при электромагнитных воздействиях по проводным линиям связи бесконтактным способом. Стоит отметить, что предложенные аналитические модели можно использовать только для анализа наведенного напряжения на прямые проводники и кабели. В работе не представлены сравнения полученных результатов с другими численными или экспериментальными подходами.

В статьях [31, 83-85] подробно рассмотрены последствия воздействия СК ЭМИ на локальные сети, оригинальные способы обнаружения и защиты от последствий воздействий. При рассмотрении методических подходов основной упор делается на оценку числа ошибочных пакетов, появляющихся в результате воздействия СК ЭМИ на линии связи. Разработан программно-математический метод обнаружения результатов воздействия СК ЭМИ на элементы и информационные потоки ЛВС на основе сравнительного анализа изменений потока обмена данными, происходящих в ЛВС при воздействии СК ЭМИ. Проведенный эксперимент подтверждает эффективность предложенных методов защиты ЛВС.

В работе [63] предложены способы защиты сетей Ethernet от наведенных токов и напряжений с использованием модальных явлений. Основная идея - разложение импульса в отрезке линии связи на два импульса меньшей амплитуды, ослабляя тем самым амплитуду наведенного импульса до безопасных значений. Рассмотрено последовательное разложение импульса в нескольких отрезках, представлены приемы моделирования и описаны различные механизмы разложения импульсов.

В рамках третьего методического подхода авторы не рассматривают передачу данных в высокоскоростных сетях (Gigabit Ethernet, 10 Gigabit Ethernet).

Проведенный анализ результатов российских и зарубежных исследований, доступных автору, показал, в частности, что при наличии емкостной связи с витой парой, используемой в качестве среды передачи данных, злоумышленник может достигнуть практически любого заранее определенного ос-

мысленного искажения информации, а также снижения скорости передачи данных вплоть до полной остановки.

Из материалов проведенного обзора можно сделать заключение, что наиболее опасны СК ЭМИ, амплитуды и длительности которых сопоставимы с аналогичными характеристиками информационных сигналов.

В настоящее время отсутствуют исследования, в которых был бы проведен полный комплекс исследований механизмов деструктивного воздействия и испытаний устойчивости сети связи хотя бы для одной из существующих технологий, например Ethernet, и при этом использовались бы общепризнанные методики диагностики сетей. Решение поставленной задачи исключительно экспериментальными методами невозможно. Поэтому при проведении исследований предполагается также использовать расчетно-теоретические методы и имитационное моделирование.

1.3.2. Экспериментальные методы

Необходимо отметить, что любой реальный объект чрезвычайно сложен и имеет многочисленные внутренние связи. Поэтому вопрос о реальной стойкости БСУ к воздействию ЭМИ может быть часто решен только путем экспериментальных исследований с использованием излучателей ЭМП.

Экспериментальная оценка стойкости осуществляется путем проведения испытаний (экспериментальных исследований) на моделирующих установках, создающих импульсные электромагнитные поля с характеристиками, соответствующими заданным требованиям или близким к ним. Экспериментальная оценка дает более достоверные результаты по сравнению с другими методами (полнее учитывает функциональные связи, конструктивные особенности), поэтому, если представляется возможность испытать объект в целом, то она является определяющей.

В настоящее время разработаны различные типы излучателей СКИ ЭМП. К ним относятся излучатели на основе: антенной решетки из ТЕМ рупоров и излучатели на основе параболического рефлектора. Излучатель на основе антенной решетки из ТЕМ рупоров в общем случае состоит из возбуждающего генератора,

импульсного коаксиального трансформатора на неоднородной линии, согласующего трансформатора-разветвителя (устройство для ввода высоковольтных импульсов напряжения в ТЕМ-рупорную антенну) и ТЕМ рупорной антенной системы.

Излучатель на основе параболического рефлектора был впервые предложен К. Баумом в начале 90-х годов и оказался чрезвычайно удобным инструментом для формирования узких пучков СШП ЭМИ с шириной диаграммы в несколько градусов. Наиболее подробно различные варианты этой антенны и результаты теоретического и экспериментального исследования отечественного варианта СКИ ЭМП излучателя с параболическим рефлектором изложены в работах [185, 194].

Проведенный анализ методов экспериментальной оценки показал, что определенные достижения в области воспроизведения параметров СКИ ЭМП имеются, особенно в части разработки излучателей и измерительных преобразователей, однако методы испытаний на стойкость БЦВК в субнаносекундной области практически отсутствуют.

1.3.3. Расчетно-экспериментальные методы

Расчетно-экспериментальная оценка стойкости аппаратуры предполагает сочетание экспериментальных и расчетных методов. В тех случаях, когда образец (ввиду его протяженности, больших габаритов) не представляется возможным испытать в целом, проводятся испытания составных частей изделия в ЭМП имитаторов, а реакция протяженных элементов изделия (кабельных линий, антенно-фидерных устройств и др.) оценивается расчетным путем. Расчетные данные используются при выборе нагрузок и генераторов напряжения (тока) [24].

Другой разновидностью использования расчетно-экспериментального метода является оценка стойкости сложных систем и комплексов. При этом оценка стойкости их составных частей выполняется путем испытаний, а работоспособность всего комплекса оценивается с использованием математического моде-

лирования, позволяющего учитывать функциональные связи составных частей при разных условиях применения аппаратуры.

Оценка стойкости объекта к действию ЭМП включает в себя определение параметров электромагнитных полей, воздействующих на составные части, находящиеся в разных условиях (в полете, на открытой площадке, заглубленные в грунт, в сооружениях с электромагнитной экранировкой и др.), и последующую оценку воздействия этих ЭМП на работоспособность составных частей и объекта в целом. При этом расчетная оценка стойкости должна предшествовать экспериментальной оценке. В процессе предварительного анализа учитываются и определяются: назначение объекта и его составных частей, решаемые ими задачи и особенности применения; сведения о режимах применения объекта (его составных частей), о размещении составных частей и их устройств в объекте с анализом особенностей экранирования, прокладки кабельных и проводных линий, антенно-фидерных устройств, контуров заземления; основные параметры составных частей, критерии работоспособности объекта и его составных частей с учетом воздействия полей ЭМИ; чувствительные к воздействию ЭМИ составные части объекта и возможные виды их отказов, приводящие к нарушению функционирования аппаратуры. При анализе используются: технические условия и технические описания на объект и его составные части; функциональные и принципиальные схемы аппаратуры; конструкторские и монтажные чертежи; справочные данные о стойкости к ЭМП комплектующих изделий; результаты испытаний аналогов составных частей объекта и их элементов.

Одной из основных задач, решаемых при оценке воздействия ЭМИ на БЦВК, является определение наиболее уязвимых мест. На основе проведенного анализа можно сформулировать основные положения по определению уязвимых элементов в различных электронных устройствах, используемых в БЦВК:

- анализ наблюдаемых эффектов воздействия и логики работы устройств;
- использование помодульного отключения либо замены отдельных устройств системы при проведении экспериментов;

- измерение сигналов в контрольных точках устройства и токов потребления элементов при штатной работе устройства;
- измерение параметров реакции устройства в его контрольных точках и токов потребления отдельных элементов при СКИ воздействии.

1.4 Анализ методов и средств обеспечения устойчивости БЦВК к деструктивному воздействию мощных ЭМИ

Оценка и обеспечение стойкости структурно-сложных систем к воздействию электромагнитных полей, токов и напряжений СКИ ЭМИ предусматривали проведение мероприятий, связанных с анализом и расчетными оценками, приведенными в таблице 1.2.

Т а б л и ц а 1.2

№ п/п	Мероприятия
1	Подготовка данных об амплитудно-временных параметрах полей, токов и напряжений, воздействующих на элементы бортовых вычислительных комплексов и межблочные соединения
2	Проведение анализа состава БЦВК с целью определения основных каналов воздействия, выявления наиболее критичных цепей, схем, элементов
3	Формулировка критериев стойкости
4	Проведение расчетных оценок действия электромагнитных полей, токов и напряжений на межблочные кабельные линии, цепи и схемы оборудования
5	Определение показателей стойкости аппаратуры
6	Оценка стойкости аппаратуры в соответствии с выбранными критериями и полученными показателями стойкости
7	Разработка мероприятий по обеспечению стойкости и работоспособности аппаратуры в условиях воздействия СКИ ЭМИ

Проблема обеспечения стойкости радиоэлектронной аппаратуры в автоматизированных системах управления БСУ, включающих средства вычислительной техники, средства связи и целый комплекс специального оборудования, является одной из сложнейших задач, решаемых при проектировании таких систем [43, 111-116]. Сложность задачи многократно увеличивается при размещении

БСУ в ограниченном пространстве на борту космического, авиационного либо мобильного объекта, сбои и отказы аппаратуры в котором, как правило, не допускаются, так как приводят к необратимым последствиям. В связи с этим, оценка стойкости БЦВК к воздействию электромагнитных полей является исключительно актуальной, поскольку БЦВК – центральное звено АСУ, во многом определяющее тактико-технические характеристики объектов. Тем более, что за последнее десятилетие быстро выросла оснащённость различных объектов БЦВК, а устойчивость этих вычислительных систем к электромагнитным воздействиям с учётом роста уровня интеграции элементной базы (ЭБ), стремительно падает.

Международной электротехнической комиссией (МЭК) установлена следующая классификация электромагнитных явлений:

- электромагнитные помехи малой энергии (E до 100 В/м);
- мощные электромагнитные поля (E свыше 100 В/м).

Проведенный анализ показал, что применительно к БСУ, наибольшую опасность представляют мощные импульсные электромагнитные поля, в частности, сверхкороткий ЭМИ [148-152].

С точки зрения проектирования, повышение стойкости оборудования для защиты от воздействия СКИ ЭМП представляет собой целую техническую проблему. Ее необходимо решать на всех этапах проектирования, начиная с исходного представления и до разработки и эксплуатационного обслуживания [131].

На практике разработчиками БСУ не всегда своевременно принимаются меры к обеспечению их стойкости в заданной (в общем случае непрогнозируемой) электромагнитной обстановке. Отсутствие системного подхода к решению вопросов ЭМС и стойкости радиоэлектронных средств (РЭС) может привести к отрицательным результатам и значительным дополнительным затратам времени и средств по доработке аппаратуры. Очевидно, что защита может быть значительно эффективней при небольшом увеличении стоимости БСУ, если бы угроза воздействия мощных ЭМП (в частности, молниевых разрядов, излучений мощных РПС и т.п.) читывалась на стадии эскизного проектирования. Понятие

«системный» в данном случае применено потому, что защита технических средств должна строиться на основе их анализа как системы.

В настоящее время для защиты информационно-телекоммуникационных систем от деструктивного электромагнитного воздействия применяются следующие методы:

1. Общее и местное экранирование телекоммуникационных узлов и информационных линий связи. Однако, результаты анализа функционального назначения БЦВК и технико-экономической экспертизы показывают, что применение метода экранирования для защиты их от деструктивного воздействия СКИ ЭМИ в ряде случаев является недостаточно эффективным, или экономически нецелесообразным по следующим причинам:

- воздействие источников СКИ ЭМИ характеризуется широкой полосой частот и большой амплитудой излучаемых электромагнитных полей, высокой проникающей способностью в неоднородности экранов. Поэтому для обеспечения эффективного экранирования от такого вида воздействия должны выполняться требования к целостности построения экранирующих конструкций, а также должны исключаться возможности наличия щелей и неоднородностей в разъемах и соединениях. Реализация данных условий, как правило, связано со значительными конструктивными трудностями и материальными затратами;

- БЦВК является распределенной инфокоммуникационной системой, поэтому в большинстве случаев технологически невозможно выполнение условия целостности построения экранирующих конструкции, что резко понижает эффективность применения экранирования как метода защиты.

2. Применение технических средств для минимизации или предотвращения влияния электромагнитного излучения на БЦВК.

Анализ применяемых помехоподавляющих фильтров и газоразрядных элементов показал, что на данный момент их применение не позволяет эффективно бороться с деструктивным воздействием СКИ ЭМИ. Основным параметром современных газовых разрядников, такой как его время срабатывания, на порядок ниже длительности воздействия сверхкороткого электромагнитного им-

пульса. Частотные характеристики современных помехоподавляющих фильтров и трансформаторов не позволяют эффективно отделять наведенные помехи СКИ ЭМИ от полезного сигнала в информационных линиях. Поэтому применение стандартных технических средств защиты БЦВК от электромагнитного излучения на сегодняшний день не позволяет исключить возможность разрушения информационных сигналов при воздействии СКИ ЭМИ.

3. Применение помехозащищенного кодирования для передачи информации. Этот метод позволяет эффективно бороться только с небольшим количеством ошибок, возникающих в информационных линиях связи в результате воздействия случайной, как правило, единичной помехи. Основным недостатком данного метода является необходимость внесения в передаваемую информацию избыточности, которая зависит от количества возникающих искажений, а в некоторых случаях и повторная передача информации, в т.ч. и искаженной. Все это в свою очередь снижает пропускную способность информационных каналов в частности и быстродействие БЦВК в целом. Поскольку современные источники СКИ ЭМИ позволяют генерировать импульсы с частотой до нескольких МГц, что соответственно создает в информационном канале помехи с большой периодичностью.

Поэтому применение данного метода защиты в условиях воздействия СКИ ЭМИ является также малоэффективным. Все это приводит к необходимости разработки специальных системных решений, выбора параметров используемых сигналов и методов их обработки, что может оказаться наиболее эффективным методом обеспечения устойчивости, т.к. не потребует применения средств защиты от помех по всем путям их распространения.

1.5 Выводы по главе и выбор направления исследований

На основе результатов анализа состояния вопроса по теоретическим и экспериментальным методам исследования воздействия СКИ ЭМИ на БЦВК и методам оценки устойчивости можно сделать следующие основные выводы:

1. БЦВК подвергаются широкому спектру воздействия дестабилизирующих электромагнитных факторов. В общем случае БЦВК функционирует в условиях воздействия динамически изменяемых факторов, в зависимости от условий окружающей среды: электрических, магнитных, электромагнитных полей; широкого спектра механических и климатических воздействий.

2. В состав бортовых систем управления входят как цифровые устройства (устройства автоматики, телеметрии, цифровой обработки сигналов и т.п.), так и аналоговые и гибридные устройства (устройства электропитания, приемопередающие устройства, устройства навигации, усилительные и измерительные устройства и т.д.), которые работают в широком интервале частот (от единиц Гц до ГГц), напряжений (от десятых долей вольт до киловольт) и токов (от мА до сотен ампер).

3. Существующие методы и средства обеспечения стойкости в основном ориентированы на решение проблемы ЭМС, электромагнитных факторов природного и техногенного происхождения ЭМИ ВЯВ и не затрагивают сложнейший комплекс задач устойчивости БЦВК в условиях воздействия СКИ ЭМП, изложенных в стандартах МЭК.

4. В известной литературе приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований по определению физических механизмов поражающего действия на технические средства однократных электромагнитных импульсов, гармонических полей и получены исходные данные для построения математических моделей процессов воздействия. Требования к БЦВК по стойкости к электромагнитным полям наносекундного диапазона не задавались.

5. Информация по исследованиям критериев поражения БЦВК, эффектов и физических механизмов поражающего действия многократных, преднамеренных СКИ ЭМП на функционирование БЦВК в широком диапазоне изменения параметров воздействия в открытой литературе отсутствует.

6. Реальные образцы БЦВК не подвергались воздействию СКИ ЭМП в рабочем состоянии и автору не известны исследования в области:

- оценки работоспособности БЦВК при воздействии многократных сверхкоротких электромагнитных импульсов с высокой частотой повторения;
- проверки основных эксплуатационных характеристик БЦВК при и после воздействия СКИ ЭМП;
- определения параметров воздействующих СКИ ЭМП, приводящих к нарушениям в работе БЦВК.

7. На основе результатов анализа состояния проблемы обеспечения устойчивости БЦВК к воздействию СКИ ЭМИ можно констатировать, что существующие методы априорной оценки устойчивости к воздействию СК ЭМИ носят общий постановочный характер.

8. Оценить воздействие ЭМИ на БЦВК и получить достоверные данные одними аналитическими методами невозможно из-за многообразия способов их построения и действия, а также из-за сложности учета реальных электромагнитных связей с окружающим пространством. Поэтому основным методом исследований должен быть расчетно-экспериментальный, основанный на сочетании математических моделей взаимодействия ЭМИ с элементами БЦВК и экспериментальных данных, полученных с учетом современного состояния ЭКБ и средств метрологического обеспечения испытаний.

9. Анализ состояния проблемы обеспечения устойчивости структурно-сложных систем к СК ЭМИ показывает, что, несмотря на достигнутые результаты в исследованиях устойчивости технических систем к СКИ ЭМИ, эта большая комплексная научно-техническая проблема требует дальнейшего теоретического и экспериментального развития применительно к БЦВК по следующим направлениям исследований:

- исследование воздействия СКИ ЭМИ на бортовые цифровые вычислительные комплексы с учетом условий эксплуатации и конструктивных особенностей объекта применения;
- развитие, совершенствование и разработка новых специальных перспективных численных и интеллектуальных методов анализа и оценки воздействия СКИ ЭМИ на бортовые цифровые вычислительные комплексы и

установление перечня параметров, определяющих поражающее действие СКИ ЭМИ;

- обоснование требований к методам и средствам испытаний на стойкость перспективных БЦВК в условиях воздействия СКИ ЭМИ;

- разработка системных методов и средств обеспечения устойчивости бортовых цифровых вычислительных комплексов к воздействию перспективных СКИ ЭМИ с учетом современных требований к устойчивости БЦВК.

ГЛАВА 2 МЕТОДЫ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО АНАЛИЗА ДАННЫХ В ЗАДАЧАХ ОЦЕНКИ УСТОЙЧИВОСТИ БЦВК К ДЕСТРУКТИВНОМУ ВОЗДЕЙСТВИЮ ЭМИ

Проведенный анализ открытых источников об использовании интеллектуальных средств для решения задач оценки устойчивости элементов и узлов бортовых вычислительных комплексов к деструктивному действию электромагнитных импульсов (ЭМИ), в том числе, посвященных применению адаптивных систем обнаружения деструктивных воздействий различной природы на радиоэлектронное и телекоммуникационное оборудование [55, 87, 90, 175, 209], показал, что в настоящее время используются следующие инструменты интеллектуального анализа данных: экспертные системы (ЭС), нейронные сети (НС), системы нечеткой логики (НЛ) и гибридные интеллектуальные системы, с интеграцией вышеуказанных подходов [27, 175, 167, 257].

2.1 Структура интеллектуальной системы анализа устойчивости БЦВК к деструктивному воздействию ЭМИ

При формализации проблемы исследования будем основываться на следующем представлении интеллектуальной системы анализа устойчивости (ИСАУ) бортового цифрового вычислительного комплекса (БЦВК) к деструктивному воздействию ЭМИ (рисунок 2.1).

При этом ИСАУ должна осуществлять анализ и оценку устойчивости бортового вычислительного комплекса к деструктивному воздействию ЭМИ так же, как было и на этапе проектирования, точно так будет и на этапе эксплуатации. Для этого будем использовать подход, который основывается на анализе модели БЦВК при построении которой в качестве базы примем набор спецификаций, описывающих конфигурацию бортовой сети (топологию, состав программного обеспечения (ПО) и аппаратных средств (АС)) и реализуемые в ней аппаратные и программные средства обнаружения деструктивных воздействий. На этапе проек-

тирования бортового вычислительного комплекса такие спецификации формируются разработчиком, на этапе эксплуатации – при помощи программных модулей, которые устанавливаются на узлах БЦВК, и формируются в автоматическом режиме [117].

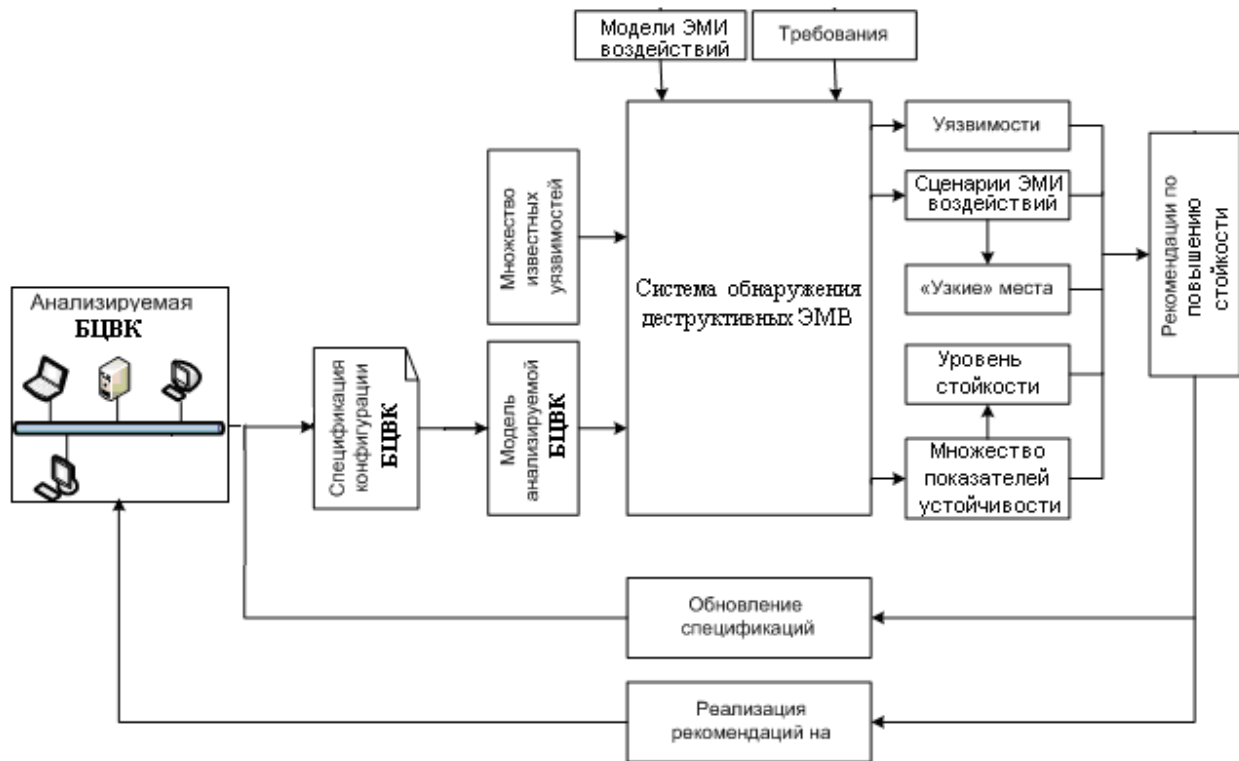


Рисунок 2.1 – Структурная схема интеллектуальной системы анализа и оценки устойчивости БЦВК к деструктивному воздействию ЭМИ

В процессе функционирования ИСАУ должна проводить анализ сценариев поведения бортового комплекса при воздействии на его элементы и узлы электромагнитных воздействий, с учетом моделей ЭМИ на всем диапазоне частот, осуществлять расчет целевых показателей, характеризующих устойчивость БЦВК в целом и его отдельных подсистем к воздействию ЭМИ, на основе топологии бортовой сети, используемых аппаратных средств и программного обеспечения, в т.ч. обеспечивающих обнаружение деструктивных электромагнитных воздействий [117].

В научном плане проблема диссертационного исследования может быть формализована как: разработка методологии анализа и оценки устойчивости

БЦВК к деструктивному воздействию ЭМИ на этапах проектирования и эксплуатации. Реализация данной методологии позволит не только оценивать уровень устойчивости бортового вычислительного комплекса к деструктивному воздействию ЭМИ, но и обеспечивать устойчивость БЦВК путем применения комплекса методов и средств, например, путем изменения конфигурации бортовой сети.

Одной из первых задач по реализации методологии анализа и оценки устойчивости БЦВК к деструктивному воздействию ЭМИ на этапах проектирования и эксплуатации является разработка моделей воздействий ЭМИ на элементы и узлы бортового вычислительного комплекса, формирование сценариев поведения БЦВК при электромагнитных воздействиях на его элементы и узлы и оценка уровня стойкости БЦВК к деструктивному воздействию ЭМИ.

Дадим математическую формализацию проблемы синтеза ИСАУ БЦВК к деструктивному воздействию ЭМИ. Для этого введем следующие обозначения: G – комплекс мер, формируемых системой анализа устойчивости и направленных на повышение устойчивости бортового комплекса (ObDC) к воздействию ЭМИ. Тогда $ObDC_G$ – конфигурация бортового комплекса с реализованным в нем комплексом мер G , $StabilityLevel(ObDC_G)$ – функция, результатом которой является обеспечение устойчивости БЦВК ObDC к деструктивным воздействиям ЭМИ.

В этом случае целевой функцией будет обеспечение максимального общего уровня устойчивости бортового вычислительного комплекса $StabilityLevel(ObDC_G) \rightarrow \max$ (в частном случае целевую функцию можно задать в виде $StabilityLevel(ObDC_G) \rightarrow ST^{\text{обд}}$, где $ST^{\text{обд}}$ – требуемый уровень устойчивости), при выполнении ограничений по остальным критериям, предъявляемым к ИСАУ:

- к своевременности: $P_{\text{св}}(t \leq T^{\text{доп}}) \geq P_{\text{св}}^{\text{доп}}$, где $P_{\text{св}}^{\text{доп}} = 0.99$ и допустимом времени проведения анализа $T_{\text{пр}}^{\text{доп}} = T_{\text{пр}}^{\text{тр}}$, на этапе проектирования $T_{\text{пр}}^{\text{тр}} = 45$ мин. и

на этапе эксплуатации $T_{\text{эк}}^{\text{ТР}} = 25_{\text{мксек}}$ - ($T_{\text{уе}}^{\text{ОД}} < T_{\text{ид}}^{\text{ОД}}$, в связи с тем, что при эксплуатации автоматически реализуются все мероприятия данного этапа методологии);

- к обоснованности: $N_C \geq \max_{s \in S} N_C^s$, $N_Y \geq \max_{s \in S} N_Y^s$ и $N_{\Pi} \geq \max_{s \in S} N_{\Pi}^s$, где N_C , N_Y , N_{Π} – количество анализируемых сценариев поведения БЦВК при воздействии на его элементы и узлы ЭМИ, число обнаруженных ИСАУ уязвимостей и количество учитываемых параметров ИСАУ, S – множество вариантов реализации ИСАУ, N_C^s , N_Y^s , N_{Π}^s – количество анализируемых сценариев воздействий ЭМИ на элементы и узлы БЦВК, обнаруженных уязвимостей и учитываемых параметров s -й реализацией ИСАУ соответственно. При этом, будем учитывать следующие параметры ИСАУ:

а) архитектура бортового комплекса (в том числе, используемые ОС, топология бортовой сети и др.);

б) используемые аппаратные средств и программное обеспечение, обеспечивающее обнаружение деструктивных электромагнитных воздействий (например, сетевые фильтры, экранирование отдельных элементов и др.);

в) характеристики ЭМИ (место воздействия, временные, частотные, энергетические характеристик и т.д.);

г) системные характеристики (обновление БД ЭМИ воздействий, сценариев ЭМИ воздействий, и т.д.);

- к ресурсопотреблению: $P_{\text{рес}}(r \leq R^{\text{доп}}) \geq P_{\text{рес}}^{\text{доп}}$, где $P_{\text{рес}}^{\text{доп}} = 0.99$, $R^{\text{доп}} = 0.15$ (15% от общего ресурса, доступного для выполнения, возложенных на бортовой комплекс, задач) для критических ресурсов БЦВК.

В такой постановке, проблему разработки методологии анализа и оценки устойчивости БЦВК к деструктивному воздействию ЭМИ на этапах проектирования и эксплуатации можно декомпозировать на следующие основные задачи:

1) Разработка модели бортового вычислительного комплекса, в достаточной степени, описывающей аспекты, влияющие на процесс анализа устойчивости к воздействию ЭМИ.

2) Разработка моделей воздействия ЭМИ на элементы и узлы БЦВК, на которых базируются механизмы формирования сценариев ЭМИ воздействий.

3) Разработка сценариев поведения БЦВК при ЭМИ воздействиях на его элементы, отражающих возможные варианты реализации таких воздействий с учетом места воздействия, временных, частотных и энергетических характеристик ЭМИ воздействия.

4) Разработка метода оценки уровня устойчивости БЦВК к деструктивным ЭМИ воздействиям, охватывающего все множество ЭМИ воздействий на элементы и узлы БЦВК.

5) Алгоритмизация основных процедур анализа и оценки устойчивости БЦВК к деструктивным ЭМИ воздействиям на этапах проектирования и эксплуатации.

Методологическую систему анализа и оценки устойчивости БЦВК к деструктивному воздействию ЭМИ воздействий на этапах проектирования и эксплуатации можно представить следующим образом:

$$Met_{AOY} = MP_{AOY} \cup \langle M_{AC}, M_{ЭМИВ}, M_{ФСВ}, M_{OYC} \rangle, \quad (2.1)$$

где MP_{AOY} – комплекс методов по реализации основных этапов методологии и интеграции отдельных моделей и методов анализа и оценки устойчивости БЦВК в методологическую систему, M_{AC} – модель анализируемого БЦВК, $M_{ЭМИВ}$ – множество моделей ЭМИ воздействий на элементы и узлы БЦВК, $M_{ФСВ}$ – модель формирования сценариев ЭМИ воздействий, M_{OYC} – модель оценки уровня устойчивости бортового комплекса.

Исходными данными для реализации основных этапов методологии анализа и оценки устойчивости БЦВК к деструктивному воздействию ЭМИ будут:

$$(SDC, SPC, EDB, P_{\dot{Y} \dot{E}}, P_{AO}, R), \quad (2.2)$$

где SDC – спецификация анализируемой БЦВК, SPC – спецификация реализуемой в сети политики безопасности, EDB – внешняя база данных ЭМИ воздейст-

вий, $P_{ЭМИ}$ – множество параметров, характеризующих ЭМИ воздействия, P_{AV} – множество параметров, характеризующих процесс анализа устойчивости, R – требования к уровню стойкости БЦВК.

В процессе функционирования интеллектуальная система анализа и оценки устойчивости БЦВК должна реализовывать комплекс мер, позволяющий максимально возможно повысить устойчивость бортового вычислительного комплекса при выполнении ограничений по остальным критериям, предъявляемым к ИСАУ. Таким образом, ИСАУ должна позволять определять множество

$$\{V, SC, C, F, G\} \quad (2.3)$$

при условии $StabilityLevel(ObDC_G) \rightarrow \max$

(или $StabilityLevel(ObDC_G) \rightarrow ST^{\partial\partial\partial}$),

где $ObDC_G$ – конфигурация бортового комплекса с реализованным в нем комплексом мер G , V – множество обнаруженных уязвимостей, SC – сценарии ЭМИ воздействий, C – «узкие» места по электромагнитной совместимости бортового комплекса, F – множество показателей устойчивости, G – комплекс мер по обеспечению требуемого уровня устойчивости бортового комплекса, $StabilityLevel(ObDC_G)$ – функция, результатом которой является обеспечение устойчивости БЦВК $ObDC$ к деструктивным воздействиям ЭМИ.

2.2 Интеллектуальные методы решения задач оценки устойчивости элементов и узлов БЦВК к деструктивному действию СК ЭМИ

Ядром интеллектуальной системы анализа и оценки устойчивости БЦВК к деструктивному воздействию ЭМИ будет являться система обнаружения деструктивных электромагнитных воздействий (ЭМВ), на которую возлагаются функции интеллектуального анализа сценариев электромагнитных воздействий на элементы и узлы БЦВК и оценки уровня устойчивости бортового комплекса к деструктивному воздействию ЭМИ. На выходе этого модуля ИСАУ будем иметь множе-

ство обнаруженных уязвимостей БЦВК, сценарии поведения БЦВК при ЭМИ воздействиях на его элементы, наиболее критичные компоненты бортовой сети, вероятность выхода из строя которых наивысшая, и комплекс мер по обеспечению устойчивости бортового вычислительного комплекса [72].

Представленное функциональное наполнение системы обнаружения деструктивных ЭМВ позволяет сформулировать основную задачу этого модуля ИСАУ, которая состоит в автоматизации функций по обеспечению устойчивости БЦВК.

По аналогии с системами обнаружения атак в теории защиты информации, системы обнаружения деструктивных ЭМВ (СОДЭМВ) в предлагаемой методологии возможно дать следующую классификацию [72, 157]:

а) по способу ответа:

пассивные СОДЭМВ – фиксируют факт электромагнитного воздействия, записывают данные в файл журнала, формируют предупреждения и передают их ЛПР (лицо принимающее решение или оператор);

активные СОДЭМВ – фиксируют факт электромагнитного воздействия, записывают данные в файл журнала и выполняют функции противодействия электромагнитному воздействию, например, путем мультиплексирования трафика бортовой сети.

б) по режиму работы:

автономные СОДЭМВ – в определенные промежутки времени проводят анализ состояния бортовых систем (порой после осуществления ЭМВ) на основе регистрационных записей в электронных журналах БЦВК;

СОДЭМВ реального времени – осуществляют непрерывный мониторинг состояния всех систем БЦВК, позволяя своевременно обнаруживать факт электромагнитного воздействия и осуществлять нейтрализацию последствий ЭМВ. При этом, решения по нейтрализацию последствий ЭМВ принимаются СОДЭМВ в самом начале воздействия ЭМИ, исходя из минимального количества данных, что иногда снижает достоверность обнаружения ЭМВ.

в) по способу выявления ЭМВ:

системы обнаружения аномального поведения. Обнаружение осуществляется с помощью сигнатур, характеризующих электромагнитные воздействия (такие СОДЭМВ позволяют обнаруживать ЭМВ от известных генераторов ЭМИ, но мало эффективны для обнаружения ЭМВ от новых генераторов). Характерные реакции элементов и узлов БЦВК на ЭМВ представляются в шаблоне, отклонения от которого и считаются аномалией. Такой класс СОДЭМВ требует непрерывного обновления шаблонов;

системы обнаружения отказов и неисправностей. Процесс анализа основывается на использовании аппарата математической статистики.

г) по способу сбора информации об электромагнитных воздействиях:

СОДЭМВ верхнего уровня – определяют факт ЭМВ на основе анализа данных в бортовой сети. Такой класс СОДЭМВ реализуют на базе оконечных устройств (например, бортовых вычислителей) или интегрируют в коммутационное оборудование;

СОДЭМВ отдельного узла – определяют факт ЭМВ на основе анализа информации из электронных журналов регистрации событий в ОС и различных приложений (СУБД и т. д.);

СОДЭМВ уровня приложений – определяют факт ЭМВ на основе анализа последствий от электромагнитного воздействия в конкретном приложении.

С учетом проведенной классификации предлагается следующая обобщенная структура СОДЭМВ, которая состоит из пяти основных групп функциональных компонентов (рисунок 2.2):

- модули-датчики, предназначенные для сбора информации о состоянии элементов и узлов бортового комплекса;
- модули выявления ЭМВ, осуществляющие обработку данных, собранных датчиками, и на её основе определяющие факт ЭМВ;
- модули реагирования на ЭМВ, на основе своевременно выявленного модулями выявления ЭМВ факта электромагнитного воздействия, осуществляющие нейтрализацию последствий ЭМВ;

- базу данных для хранения информации, собранной датчиками, а также о работе СОДЭМВ;
- модули управления СОДЭМВ.

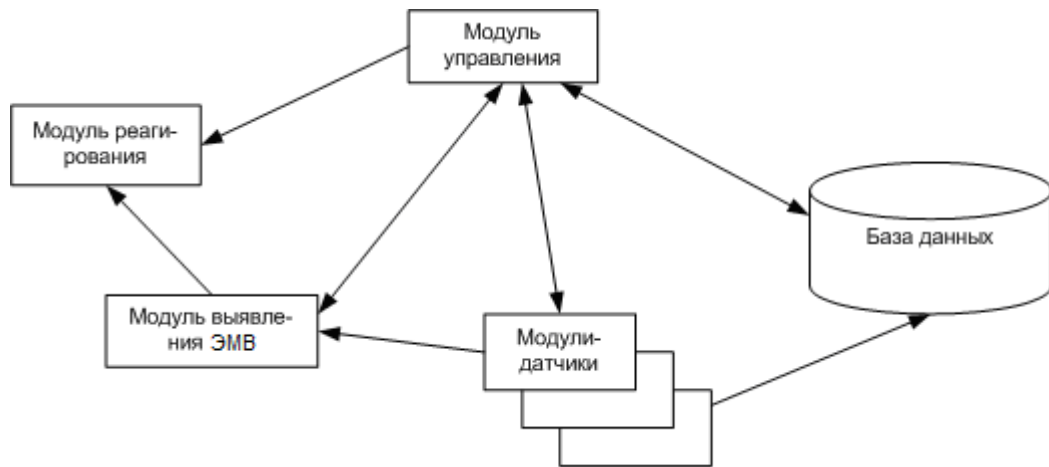


Рисунок 2.2 – Структура СОДЭМВ

В структуре БЦВК все обозначенные модули СОДЭМВ могут быть территориально и функционально распределены.

Первичной информацией для функционирования СОДЭМВ будут данные от модулей-датчиками. Понятно, что эффективность работы СОДЭМВ, в первую очередь, будет зависеть от того, насколько оперативно и точно модули-датчики передали информацию модулям выявления ЭМВ. С этой целью проведем анализ существующих вариантов реализации датчиков и методов сбора информации (таблица 2.1).

Ключевым компонентом системы обнаружения деструктивных ЭМВ является модуль выявления электромагнитных воздействий, т.к. от него на прямую зависит успешное функционирование всего бортового комплекса. В таблице 2.2 представлены характеристики современных методов обнаружения электромагнитных воздействий.

Т а б л и ц а 2.1 – Анализ методов сбора информации СОДЭМВ

Критерии	Характеристики	
	Сетевые датчики (СД)	Датчики узла (ДУ)
Обработка данных, передаваемых по защищенным каналам связи	СД не осуществляют обработку данных, передаваемых по защищенным каналам связи, организованных на базе криптопротоколов IPSec и SSL/TLS, поскольку эти протоколы криптографии зашифровывают всю передаваемую информацию на сетевом уровне, так и прикладном уровне, а сетевые датчики перехватывают сетевой трафик только на канальном уровне, то есть в зашифрованном виде. Поэтому СД не могут предоставить СОДЭМВ информацию, необходимую для обнаружения ЭМВ.	ДУ осуществляют обработку данных, передаваемых по защищенным сетевым соединениям, т.к. они осуществляют перехват сетевого трафика как на канальном, так и на вышележащих уровнях эталонной модели взаимодействия открытых систем (ЭМВОС).
Обработка данных, передаваемых по высокоскоростным каналам связи	Сетевой датчик выполняет обработку всего трафика сети, передаваемого по каналу связи. При скоростях передачи 1 Гбит/с и выше часть пакетов данных отбрасывается из-за того, что сетевой датчик не может вовремя обработать любые перехваченные пакеты с информацией. Это приводит к тому, что СОДЭМВ не обладает информацией, необходимой для обнаружения ЭМВ.	ДУ осуществляют обработку только пакетов, приходящих на конкретный узел. Т.о. вся нагрузка равномерно распределяется между имеющимися ДУ при скоростях передачи 1 Гбит/с и выше и исключает отбрасывание пакетов из-за перегрузки.
Защита коммуникационного оборудования бортовой сети (коммутаторов и др.)	Для обеспечения возможности обнаружения ЭМ воздействий на коммуникационное оборудование СД должны устанавливаться в канале связи перед коммуникационным оборудованием.	ДУ не позволяют обеспечить сбор информации о состоянии коммуникационного оборудования, т.к. не могут устанавливаться на коммуникационное оборудование бортовой сети.

Работа датчиков в сегментах бортовой сети, состоящей из большого числа узлов	СД позволяет выполнять сбор данных для всех пакетов информации переходящих в сегменте бортовой сети. Поэтому для обеспечения возможности обнаружения ЭМВ в сегменте, включающем большое количество узлов, достаточно одного СД.	Для оценки устойчивости сегмента бортовой сети, включающего много узлов, необходимо устанавливать ДУ на каждом активном элементе сегмента, что приводит к большим материальным затратам.
Влияние на производительность бортовой сети	СД не оказывает влияния на производительность бортовой сети, т.к. устанавливается на выделенный узел.	ДУ устанавливаются на те узлы сети, ЭМ воздействия на которые важно обнаруживать. При функционировании данные датчики узла тратят как программные, так и аппаратные ресурсы того узла, где они соответственно и установлены.
Источники исходных данных	СД осуществляют сбор информации, касающейся передаваемых пакетов данных.	ДУ помимо информации о сетевом трафике, поступающем в узел сети, могут использовать источники данных, расположенные на сетевом узле.

Т а б л и ц а 2.2 – Характеристика современных методов обнаружения электромагнитных воздействий на БЦВК

Методы обнаружения атак	Достоинства	Недостатки
1.Интеллектуальные методы	Вычисление аномалий, которые не указаны в базе	Частые ложные срабатывания
1.1 Статические профили	Не имеются специфичные преимущества.	Нет возможности для адаптирования к различным санкционированным изменениям трафика сети.
1.2 Динамические	Пониженный уровень	Существуют свойство "об-

профили	ложных срабатываний за счет адаптации.	хода" умышленно благодаря плавному целенаправленному изменению настроек трафика.
1.3 Профили на основе нейросетей	Низкий уровень ложных срабатываний благодаря адаптации. Повышение качества обнаружения за счет использования интеллектуальных методов.	Специфичных недостатков нет.
2 Сигнатурные методы	Нулевой уровень ложных срабатываний.	Малая возможность найти аномалии, которых нет в базе
2.1 Поиск по полной базе шаблонов	Специфичных преимуществ нет.	Специфичных недостатков нет.
2.2 База шаблонов с обратной связью	Благодаря анализу истории воздействия, происходит повышение как качества, так и скорости обнаружения	Особых недостатков нет
2.3 Граф переходов соответствующий ЭМВ	Построение верхнеуровневой модели ЭМВ и БЦВК для оценки реализуемости ЭМ воздействия и возможных последствий.	Повышенный уровень ложного пропуска для ряда ЭМ воздействий (внесенных в базу графов сигнатур).

Анализ характеристик современных методов обнаружения электромагнитных воздействий показал, что наиболее перспективным подходом к обнаружению деструктивных электромагнитных воздействий на БЦВК является совершенствование методов интеллектуального анализа данных бортового комплекса.

Традиционно выделяют следующие основные задачи интеллектуального анализа данных:

а) *классификация* (выявление признаков, характеризующих принадлежность объекта к той или иной группе с помощью анализа уже категоризованных объектов и использования определенного набора правил);

б) *прогнозирование* (оценка значений прогнозируемых переменных на основе анализа поведения временных рядов);

в) *кластеризация* (отнесение объектов к той или иной группе с возможностью расширения перечня групп);

г) *ассоциация* (выявление структуры связей во множестве коррелированных событий);

д) *последовательность* (разновидность ассоциации, в которой учитываются как порядок появления, так и временные отрезки между событиями);

е) *визуализация данных* (удобная для оператора или ЛПР форма представления информации, полученная с использованием методов интеллектуального анализа данных).

Ряд задач из представленного обзора решаются на основе предсказательных моделей: по обучающей выборке с заранее известными исходами разрабатываются модели, которые с большой вероятностью позволяют предсказывать исходы для наборов реальных данных.

Ряд задач из представленного обзора решаются на основе описательных моделей: по выявленным зависимостям в известной выборке, разрабатываются модели для ситуационно-советующих систем и систем принятия решений.

Визуализация данных, представляющих собой многопараметрическую информацию, основывается на выявлении многомерного пространства настроек исследуемых вычислений в пространства малой размерности (двумерные и трехмерные, удобные для представления оператору или ЛПР).

Все вышеперечисленные методы могут быть интегрированы в рамках единой методологии для обнаружения деструктивных электромагнитных воздействий на элементы и узлы БЦВК, не вступая в противоречие с традиционными сферами использования экспертных систем, нейронных сетей, систем нечеткой логики и т.п. [55, 27, 42, 72, 134, 135, 140, 157, 172, 175].

2.3 Нейросетевые методы обнаружения деструктивных ЭМВ

За счет своей способности выявлять значимые признаки и скрытые закономерности в больших массивах разнородных данных, т.е. консолидировать инфор-

мацию, наиболее часто во многих приложениях для интеллектуального анализа данных используются нейронные сети [20, 72, 90, 92, 133, 157, 255]. Многие из вышеперечисленных задач могут быть решены на основе многослойных нейронных сетей (НС).

Многослойные нейронные сети

Обычно, многослойная нейронная сеть состоит из входного слоя, ряда скрытых и выходного слоев (рисунок 2.3). Входной слой (ВхС) нейронной сети (НС) - это репликатор входного вектора (ВхВ) для передачи координат входных сигналов (ВхС) ко всем формальным нейронам (ФН) 1-го скрытого слоя. Ядро нейронной сети - это порядок взвешенных межнейронных связей различных скрытых и ВхС, формирующихся в процессе обучения. Таким образом, НС, которая является обученной, осуществляет необходимую обработку ВхВ в вектор выходных сигналов (ВыхС) в порядке взвешенных межнейронных связей, образующих избыточное распределенное информационное поле (ИП) нейронной сети [72, 157]. Следовательно, скрытые слои вместе с выходным слоем нейронной сети записывают в ядре осуществляемое функциональное преобразование входных данных в выходную информацию.

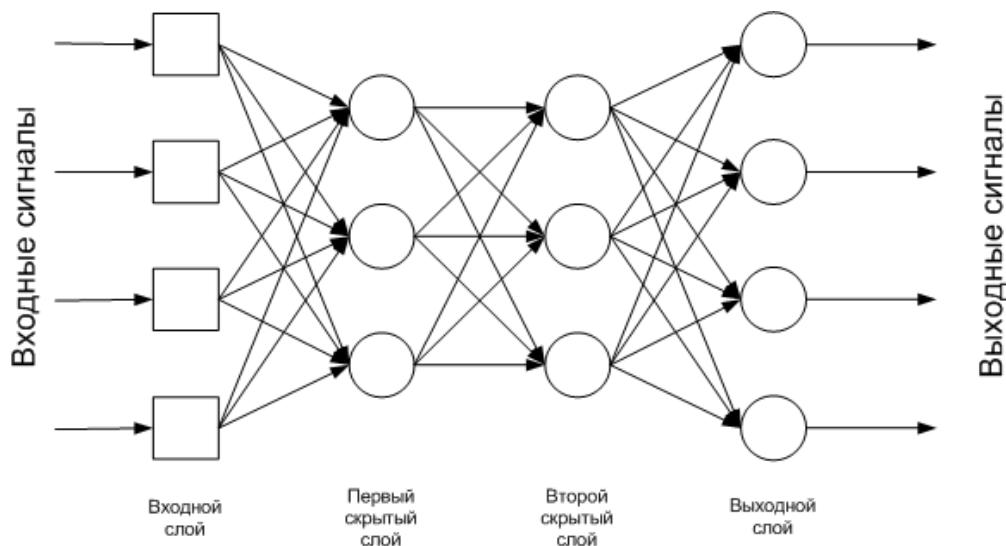


Рисунок 2.3 – Многослойная нейронная сеть

Такой процесс, как обработка ВхВ и получения выходной информации осуществляется путем обработки оперативной информации в виде входного и

промежуточных векторов на основе долговременной информации ИП нейронной сети, осуществляющееся в ядре системы и нейронах последовательно расположенных слоев НС.

Как показано в работе [72], некоторую непрерывную функцию $V \times C$ можно представить нейронной сетью с одним скрытым слоем и прямыми полными связями, для чего достаточно в случае n -мерного $V \times V$ $2n+1$ формальных нейронов скрытого слоя с ограниченными функциями активации.

В экспериментальных нейронных сетях могут быть четыре и более скрытых слоев, содержащего до 10^6 нейронов, таким образом, обеспечивая большую избыточность распределенного ИП НС. Но нейронная сеть чаще всего содержит один или два скрытых слоя, включающие $10 \div 10^3$ нейронов [72, 157]. Ограничение по количеству слоев и формальных нейронов связаны, главным образом, ростом по экспоненте затрат на вычисления при программной эмуляции нейронной сети [72].

Адаптация нейронных сетей с экспертом

Умение обучаться является фундаментальным свойством нейронной сети, которая необходима для создания приспособленных средств обнаружения деструктивных ЭМВ на элементы и узлы БЦВК. Обучение нейронных сетей рассматривается как настройка различных взвешенных межнейронных связей сети, которые образуют распределенное ИП нейронной сети, согласуясь с необходимой функциональной зависимостью $V_{\text{вых}} \times V$ от значений $V \times V$ нейронной сети [72, 157]. Настройка необходима для определения весовых коэффициентов взвешенных связей, топологии нейронной сети и т.д.

Известны многочисленные алгоритмы адаптации ИП НС с экспертом [71, 154- 57, 163-165, 169, 200, 202]. Неплохие результаты получены при использовании алгоритмов локальной оптимизации в сочетании с процедурой преодоления локальных минимумов и увеличением числа формальных нейронов [157].

Самообучающиеся НС

Возможность самообучения – необходимый атрибут НС для анализа и выявления скрытых закономерностей во входной информации, свойственных боль-

шинству задач интеллектуального обнаружения деструктивных ЭМВ на элементы и узлы БЦВК.

Самообучение нейронной сети не дает возможности получения готовых результатов на входные воздействия, а заключается в том, что из внутренних закономерностей информации, в нейронной сети создаются определенные условия для разбиения ВхВ по различным категориям и формирования структуры классов информации. В этом случае избыточные данные и скрытые закономерности, заключенные в информации, являются, своего рода, экспертом по обучению нейронной сети. Уменьшение степени избыточности входных данных НС дает возможность определить главные независимые признаки, что позволяет выявлять скрытые в данных закономерности для идентификации воздействий на элементы и узлы бортового цифрового вычислительного комплекса.

Базовым правилом для самообучающихся нейронных сетей является правило, которое сформулировал Хебб, учитывающее степень активности входов и выхода формального нейрона и содержащее постулат о том, что нейронная сеть обладает свойством самоорганизации: «Если нейроны с обеих сторон синапса активизируются одновременно и регулярно, то сила синаптической связи возрастает».

Правка синаптической связи с весом W_{ij} между выходом i -го нейрона и входом j -го формального нейрона после исполнения p -й итерации по правилу Хебба может быть описано, например, следующим образом:

$$\Delta w_{ij}(p) = \eta y_j(p) x_i(p), \quad (2.4)$$

где η – показатель скорости обучения,

$x_i(p)$ и $y_j(p)$ – соответственно значения предсинаптической и постсинаптической активности.

При дифференциальном представлении правила Хебба сильнее обучаются синапсы, которые соединяют формальные нейроны с выходами наиболее динамично увеличившимися:

$$\Delta w_{ij}(p) = \eta[x_i(p) - x_i(p-1)][y_j(p) - y_j(p-1)] \quad (2.5)$$

Однако, необходимо ограничивать возрастание вектора весов формального нейрона, к примеру, по правилу падения силы синаптической связи: «Если нейроны с обеих сторон синапса активизируются асинхронно, то сила синаптической связи ослабевает». Для уменьшения весов в правило Хебба необходимо ввести такой коэффициент, как коэффициент «забывания»:

$$\Delta w_{ij}(p) = \eta y_j(p)x_i(p) - \phi y_j(p)w_{ij}(p), \quad (2.6)$$

где ϕ – это коэффициент забывания со значениями в интервале от 0 до 1 (обычно 0.01 и 0.1).

Общий алгоритм обучения по Хеббу тогда можно формализовать в виде последовательности итераций, начинающуюся с $P = 1$:

1. *При инициализации* взвешенным связям ИП нейронной сети приписывают некоторые случайные значения в интервале от 0 до 1, а показателю скорости η и коэффициенту забывания ϕ – следует присвоить некоторые случайные положительные значения.

2. *При активации* для p -й итерации необходимо вычислить значение постсинаптической активности на выходе каждого j -го формального нейрона $y_j(p)$:

$$y_j(p) = \sum_{i=1}^n x_i(p)w_{ij}(p) - w_{j0}, \forall j, \quad (2.7)$$

где n – число входов формального нейрона,

w_{j0} – значение порога активного j -го формального нейрона.

3. *При обучении* проводим коррекцию весов межнейронных связей ИП нейронной сети:

$$\Delta w_{ij}(p+1) = w_{ij}(p) + \Delta w_{ij}(p), \forall i, j, \quad (2.8)$$

где $\Delta w_{ij}(p)$ вычисляется в соответствии с общим правилом:

$$\Delta w_{ij}(p) = \phi y_j(p) [\lambda x_i(p) - w_{ij}(p)] \quad (2.9)$$

4. Для завершения обучения необходимо проверить достижение требуемой устойчивости результата работы нейронной сети. Таким условием может быть, например, евклидово расстояние между ВыхВ p -й и $p-1$ итерациями. В случае, если такое расстояние превосходит требуемое значение, то процедура продолжается, номера итерации p увеличивается на 1, происходит возврат на п.2 и повторение этапов алгоритма. В противном случае – нейронная сеть считается обученной.

Из-за того, что на стадии инициализации состояние нейронов ВыхС обученной нейронной сети не определено из-за случайного распределения весов, то для приведения ВыхВ обученной нейронной сети к формализованному представлению необходимо включить в нейронную сеть еще один ВыхС, который может быть определен по методу обратного распространения ошибки. Другими словами, для определения взвешенных связей всех слоев нейронной сети (не считая выходного) наиболее приемлемым будет метод самообучения, а ВыхС будем настраивать по методу обучения с учителем [72, 157].

Нейронная сеть для визуализации многомерных данных

В общем случае большинство задач по интеллектуальному анализу данных (ИАД) решается в интерактивном режиме при участии эксперта предметной области [166, 157, 162], в нашем случае, эксперта по электромагнитной совместимости. Для чего инструментальная среда по ИАД должна обеспечивать эксперта дружественным интерфейсом, в том числе графическим, для визуализации многомерной информации такого анализа. Одним из характерным примеров могут служить самоорганизующиеся топографические карты Кохонена, принцип действия которых базируется на соревновательном способе обучения нейронов [51, 52].

При соревновательном способе обучения формальные нейроны внутреннего слоя стремятся быть активированными первыми, так как в любой момент времени

лишь один формальный нейрон-прототип может быть активирован, в дальнейшем такой формальный нейрон будем называть нейрон-победитель.

Применение отдельного вида нейронных сетей, именуемых, самоорганизующимися картами Кохонена [51, 52], позволяет наглядно представить результаты самоорганизации нейронной сети. Самоорганизующиеся карты Кохонена строятся на основе топографического формирования отображения: «Близкие входные векторы активируют близкие нейроны выходного слоя НС».

Алгоритм Кохонена обеспечивает настройку взвешенных связей текущей итерации на основе данных показаний весов на предшествующей итерации

$$\Delta w_{ij}(p) = \eta [x_i(p) - w_{ij}(p-1)] \quad (2.10)$$

Алгоритм Кохонена аналогичен методу обучения по правилу Хебба, за исключением того, что на третьем шаге из слоя нейронной сети выявляют формальный нейрон-победитель, со значениями синапсов близкими к VxV , и лишь для него происходит подстройка весов. Другие же формальные нейроны слоя из-за боковых затормаживающих связей деактивируются (рисунок 2.4).

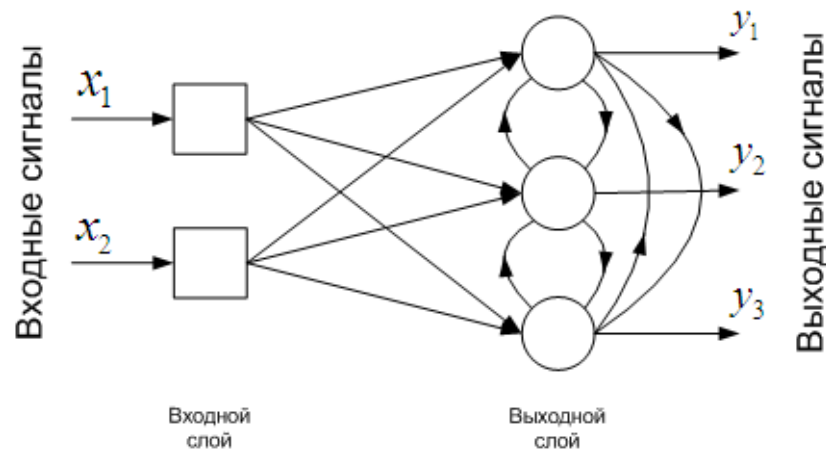


Рисунок 2.4 – Графическая иллюстрация алгоритма Кохонена

Как правило, такой вид нейронных сетей, как самоорганизующиеся карты Кохонена, визуализируется с помощью двумерного массива нейронов, причем таким образом, что обеспечивается взаимосвязь каждого формального нейрона со

всеми d входными узлами (на рисунке 2.5 $d = 2$). На рисунке 2.5 формальный нейрон-победитель показан темно-серым цветом, окружающие его формальные нейроны – серым цветом, а белым – заторможенные на данной итерации формальные нейроны.

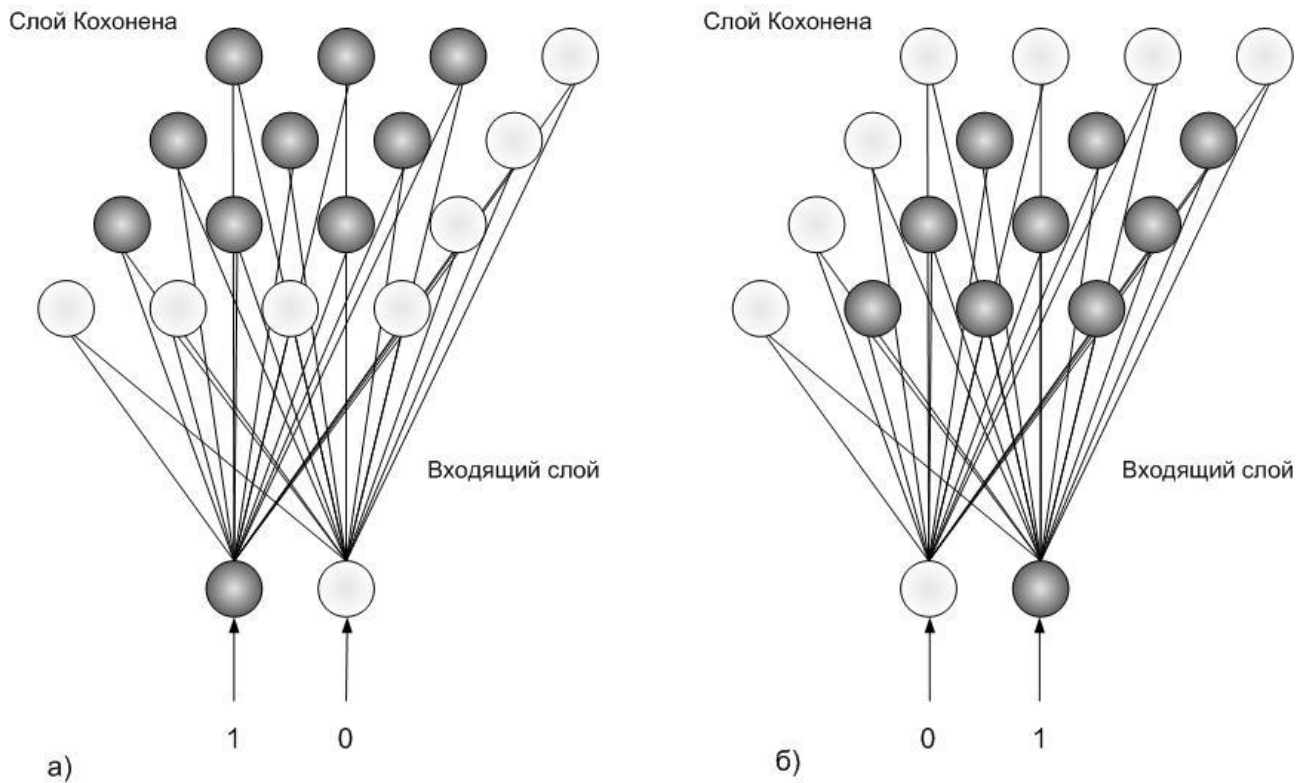


Рисунок 2.5 – Самоорганизующиеся карты Кохонена

Самоорганизующиеся карты Кохонена – отдельный класс нейронных сетей, который использует для обучения соревновательный метод, определяющий пространственную окрестность для каждого выходного формального нейрона. При этом, после определения в слое формального нейрона-победителя, происходит обучение ФН-соседей по пространственной окрестности. Начальное приближение такой окрестности, как правило, выбирается равным $1/2 - 2/3$ размера нейронной сети и уменьшается по некоторому правилу (к примеру, по закону убывающей экспоненты). В процессе обучения корректируются весовые коэффициенты, связанные с нейроном-победителем и его соседями. Поэтому, к концу обучения по-

лучаем более точную картину групп нейронов, соответствующих тому или иному классу образов

Самоорганизующиеся карты Кохонена благодаря своему свойству группировать многомерные образы около конечного числа формальных нейронов-прототипов пространства выходов нейронной сети, позволяют автоматизировать процесс построения визуальной карты для анализа многомерных данных в задачах интеллектуального обнаружения деструктивных ЭМВ на элементы и узлы БЦВК.

Нейронная сеть встречного распространения

Нейронная сеть встречного распространения – это интеграция самоорганизующихся карт Кохонена [202] и звезды Гроссберга (рисунок 2.6) [72, 157].

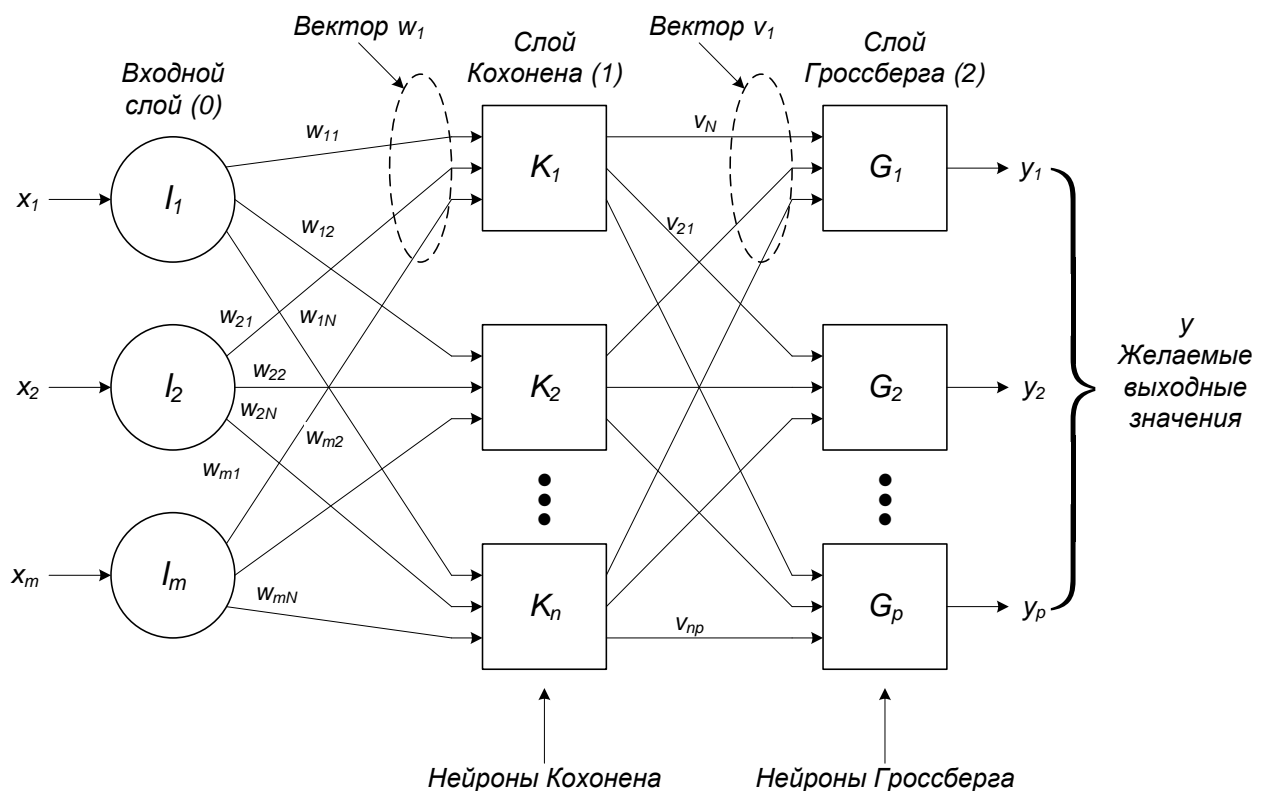


Рисунок 2.6 – Нейронная сеть встречного распространения

Нейроны нулевого слоя служат точками расхождения на ветви. Каждый формальный нейрон нулевого слоя соединен с каждым формальным нейроном первого слоя, слоем Кохонена весом w_{nm} , которые (веса) в совокупности образуют

матрицу весов W . По аналогии с этим, каждый формальный нейрон в слое Кохонена соединен с каждым формальным нейроном в слое Гроссберга весом v_{np} , которые также в совокупности дают нам матрицу весов V .

При функционировании такой нейронной сети по ВхВ X рассчитывается ВыхВ Y . При обучении веса матриц V и W формируются так, чтобы как можно точно обеспечить близость значений расчетного и эталонного ВыхВ.

Каждый слой такой нейронной сети имеет свои преимущества. Так, слой Кохонена – обладает свойством самообучения и позволяет классифицировать ВхВ. Это достигается с помощью такой подстройки весов слоя Кохонена, что близкие ВхВ активируют один и тот же формальный нейрон-победитель. А слой Гроссберга – позволяет определять необходимые координаты ВыхВ. При этом, следует иметь в виду, что слой Гроссберга обучается с учителем. Так ВхВ слоя Кохонена приходит на слой Гроссберга и позволяет определить расчетные значения координат ВыхВ слоя Гроссберга. После чего, веса матрицы V изменяются лишь тогда, когда они связаны с формальным нейроном слоя Кохонена, у которого есть ненулевой выход. Величина изменения веса матрицы V прямо пропорциональна отклонению веса от требуемого выхода нейрона Гроссберга, с которым он связан:

$$v_{ijx} = v_{ijc} + \beta(y_j - v_{ijc})k_i \quad (2.11)$$

где k_i – выход i -го формального нейрона слоя Кохонена; y_j – j -ая компонента требуемого ВыхВ; β принимает значение равное 0.1 и снижается при обучении.

Отдельно стоит сказать и про время обучения НС, так как этот параметр особенно важен для оперативности обновления состояния средств обнаружения деструктивных ЭМВ на элементы и узлы БЦВК. Экспериментальные исследования показали, что обучение НС встречного распространения на порядок (в 10 раз и более) быстрее, чем обучение НС с обратным распространением ошибки.

2.4 Гибридные средства обнаружения деструктивных ЭМВ на элементы и узлы БЦВК

Анализ экспертных систем, систем нечеткой логики (НЛ), НС и эволюционных систем, к которым относятся генетические алгоритмы, показал возможность определить технологии по аспекту возможности манипулирования с неотчетливыми и не вполне правдивыми данными, а это свойственно системам обнаружения деструктивных электромагнитных вероятностей, таким как: НС, системы НЛ и ГА. При этом последние направлены на вычисление оптимизационных задач, а НС – на вычисление задач разбора и выявления закрытых закономерностей в информации.

В гибридных средствах, которые используются для вычисления задач интеллектуального разбора информации и поиска закрытых закономерностей, где совмещаются преимущества разных интеллектуальных механизмов. В каждом из методов имеются как сильные, так и слабые стороны (таблица 2.3) [72, 157].

Т а б л и ц а 2.3 - Сравнительная характеристика интеллектуальных методов

	Экспертные системы	Системы НЛ	Нейронные сети	Генетические алгоритмы
Представление знаний	скорее хорошо	хорошо	плохо	скорее плохо
Нечеткие выводы	плохо	хорошо	хорошо	хорошо
Адаптируемость	плохо	скорее плохо	хорошо	хорошо
Способность обучения	плохо	плохо	хорошо	хорошо
Описание результата	хорошо	хорошо	плохо	скорее плохо
Искусственный интеллект	плохо	скорее плохо	хорошо	скорее хорошо
Простота обслуживания	плохо	скорее хорошо	хорошо	скорее хорошо

Не сильными сторонами нейронной сети определяется не вполне «прозрачное» для пользователя воображение данных в информационном поле нейронной сети и неочевидность метода определения итогов работы НС. Для разрешения

указанных недостатков необходимо сочетание инструментария нейронной сети или с другими подходами.

2.4.1 Эволюционно-генетический подход

Эволюционно-генетический подход позволяет строить алгоритмы поиска оптимальных решений, называемые *генетическими алгоритмами*, на основе моделирования биологических механизмов популяционной генетики [44]. Поиск оптимального решения в них осуществляется путем прямого манипулирования с совокупностью из нескольких допустимых решений, образующих популяцию, каждое из которых закодировано в двоичном коде. Следует выделить следующие свойства генетических алгоритмов (ГА):

- независимость от характера функции, чей экстремум определяется;
- нечувствительность к количеству компонентов вектора допустимого решения;
- отсутствие необходимости расчетов производных от целевой функции (ЦФ) (ГА - алгоритмы нулевого порядка);
- на каждой итерации алгоритма вычисляется несколько допустимых решений;
- набор допустимых решений на очередной итерации определяется с учетом информации о всех предыдущих допустимых решениях;
- допускается многокритериальность задачи.

Рассмотрим подробно основные этапы построения генетических алгоритмов и терминологию, используемую в [44].

Представление допустимых решений экстремальной задачи в виде бинарных строк.

Допустимое решение $x \in D$ экстремальной задачи однокритериального выбора является n -мерным вектором $x = (x_1, \dots, x_n)$. В том случае, когда задача принадлежит классу задач переборного типа, имеется конечное множество допустимых решений, в которых каждая компонента x_i , $i = \overline{1, n}$ вектора $x \in D$ кодируется с помощью целого неотрицательного числа [44]

$$\beta_i \in [0, K_i], i = \overline{1, n}, \quad (2.12)$$

где (K_i+1) – число возможных дискретных значений i -й управляемой переменной в области поиска D .

Это позволяет поставить во взаимнооднозначное соответствие каждому вектору $x \in D$ вектор β с целочисленными компонентами

$$(x_1, \dots, x_n) \leftrightarrow (\beta_1, \dots, \beta_n), \quad (2.13)$$

где для каждой компоненты $\beta_i, i = \overline{1, n}$ областью возможных значений являются целые числа от 0 до K_i .

Далее предлагается ввести алфавит B_2 , содержащий только два символа 0 и 1: $B_2 = \{0, 1\}$. Для того, чтобы представить целочисленный вектор $\beta = (\beta_1, \dots, \beta_n)$ в алфавите B_2 необходимо определить максимальное число двоичных символов θ , которое достаточно для представления в двоичном коде любого значения β_i из области его допустимых значений $[0, K_i]$. Нетрудно видеть, что параметр символьной модели θ должен удовлетворять неравенству $K < 2^\theta$, где $K = \max_{1 \leq i \leq n} (K_i)$.

Запись произвольного целого неотрицательного числа $\beta_i = (0 \leq \beta_i < 2^\theta)$

с помощью θ двоичных символов определяется соотношением:

$$\beta_i = \sum_{l=1}^{\theta} \alpha_l 2^{\theta-l},$$

где α_l – двоичное число, равное 0 или 1; θ – длина двоичного слова, кодирующего целое число β_i . Тогда символьная запись целочисленного кода β_i для фиксированного значения управляемой переменной x_i в обычном двоичном коде запишется в виде следующей бинарной комбинации:

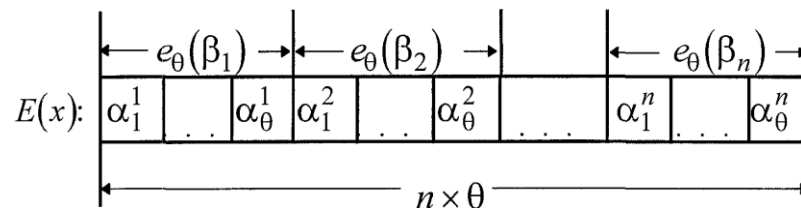
$$e_\theta(\beta_i): \begin{array}{|c|c|c|c|} \hline \alpha_1 & \alpha_2 & \dots & \alpha_\theta \\ \hline \end{array}$$

$\xleftarrow{\hspace{1.5cm} \theta \hspace{1.5cm} \xrightarrow{\hspace{1.5cm}}$

где α_l – двоичные символы (0 или 1), $l = \overline{1, \theta}$.

Для представления допустимого решения $x \in D$ экстремальной задачи в алфавите B_2 объединим символьные записи $e_\theta(\beta_i)$, описывающие все n компонент вектора x , в виде линейной последовательности из бинарных комбинаций: $E(x) = (e_\theta(\beta_1), \dots, e_\theta(\beta_n))$.

Этой записи соответствует $(n \times \theta)$ -битовая строка из двоичных символов (0, 1):



Таким образом, *символьная модель экстремальной задачи переборного типа может быть представлена в виде множества бинарных строк, которые описывают конечное множество допустимых решений x , принадлежащих области поиска D* [44].

Выбор символьной модели исходной экстремальной задачи во многом определяет эффективность и качество применяемых генетических алгоритмов. Для каждого класса задач переборного типа должна строиться своя символьная модель, отражающая специфику и особенности решаемой задачи.

Наименьшей неделимой единицей биологического вида, подверженной действию факторов эволюции, является особь a_k^t (индекс k обозначает номер особи, а индекс t – некоторый момент времени эволюционного процесса). В качестве аналога особи a_k^t в экстремальной задаче однокритериального выбора принимается произвольное допустимое решение $x \in D$, которому присвоено имя a_k^t . Действительно, вектор управляемых переменных (x_1, \dots, x_n) – это наименьшая неделимая единица, характеризующая в экстремальной задаче внутренние параметры на каждом t -м шаге поиска оптимального решения, которые изменяют свои значения в процессе минимизации критерия оптимальности $Q(x)$. Каче-

ственные признаки особи a_k^t определяются из символьной модели экстремальной задачи как соответствующая точке x с именем a_k^t бинарная строка $E(x)$ и составляющие ее бинарные комбинации $e_\theta(\beta_1), \dots, e_\theta(\beta_n)$.

Интерпретация этих признаков приводится в терминах хромосомной теории наследственности [44].

В качестве *гена* – единицы наследственного материала, ответственного за формирование альтернативных признаков особи, принимается бинарная комбинация $e_\theta(\beta_i)$, которая определяет фиксированное значение целочисленного кода β_i – управляемой переменной x_i в обычном двоичном коде.

Одна особь a_k^t будет характеризоваться n генами, каждый из которых отвечает за формирование целочисленного кода соответствующей управляемой переменной. Тогда структуру бинарной строки $E(x)$ можно интерпретировать *хромосомой*, содержащей n сцепленных между собой генов, которые расположены в линейной последовательности «слева–направо». Согласно хромосомной теории наследственности передача качественных признаков $e_\theta(\beta_i), i = \overline{1, n}$, закодированных в генах, будет осуществляться через хромосомы от «родителей» к «потомкам».

Местоположение определенного гена в хромосоме называется *локусом*, а альтернативные формы одного и того же гена, расположенные в одинаковых локусах хромосомы, называются *аллелями* (*аллелеформами*):



где $e_\theta(\beta_i)$ – аллель i -го гена, находящаяся в локусе i .

Хромосома, содержащая в своих локусах конкретные значения аллелей [44] называется *генотипом* (*генетическим кодом*) $E(a_k^t)$, который содержит всю наследственную генетическую информацию об особи a_k^t , получаемую от «предков» и передаваемую затем «потомкам». Конечное множество всех допустимых генотипов образует *генофонд*.

При взаимодействии особи a_k^t с внешней средой ее генотип $E(a_k^t)$, порождает совокупность внешне наблюдаемых количественных признаков (характеристик φ_i) включающих *степень приспособленности* $\mu(a_k^t)$ особи a_k^t к внешней-среде и ее *фенотип* $\phi(a_k^t)$.

Воздействие внешней среды учитывается в виде критерия оптимальности $Q(x)$, степенью приспособленности $\mu(a_k^t)$ каждой особи a_k^t является численное значение функции $Q(x)$, вычисленное для допустимого решения $x \in D$ с именем a_k^t . В общем случае степень приспособленности $\mu(a_k^t) \geq 0$ задается с помощью следующего выражения

$$\mu(a_k^t) = \begin{cases} Q^2(x), Q(x) \rightarrow \min; \\ \frac{1}{Q^2(x) + 1}, Q(x) \rightarrow \max. \end{cases} \quad (2.14)$$

Из этого выражения следует, что чем больше численное значение степени приспособленности $\mu(a_k^t)$, тем лучше особь a_k^t приспособлена к внешней среде. Следовательно, цель эволюции особей заключается в повышении их степени приспособленности.

Фенотипом особи $\phi(a_k^t)$ в рамках экстремальной задачи являются численные значения вектора управляемых переменных $x \in D$ и соответствующих ему характеристик $\varphi_i(x), i = \overline{1, s}$.

В качестве *ареала* – области [44] в пределах которой только и могут встречаться особи, участвующие в эволюционном процессе, рассматривается область поиска D .

Совокупность особей (a_1^t, \dots, a_v^t) , принадлежащих ареалу, образует *популяцию* P^t . Число v , характеризующее число особей a_k^t , которые образуют популяцию, называется *численностью популяции*. В общем случае экстремальной задачи популяция $P^t = (a_1^t, \dots, a_v^t)$ соответствуют совокупности допустимых решений $x^k \in D, k = \overline{1, v}$.

Во времени популяции P^t состоят из дискретных, не перекрывающихся между собой *поколений* – групп особей, одинаково отдаленных в родственном отношении от общих предков, т.е. каждое последующее поколение P^{t+1} является совокупностью из v особей, которые отбираются только из особей предыдущего t -го поколения. Номер поколения отождествляется (верхний индекс t в обозначениях особи a_k^t и популяции P^t) с моментом времени $t = 0, 1, 2, \dots, T$, где T – *жизненный цикл популяции*, определяющий период ее эволюции.

В дальнейшем *эволюция популяции* P^t рассматривается как чередование поколений, в процессе которого особи изменяют свои переменные признаки таким образом, чтобы каждая следующая популяция проявляла лучшую степень приспособленности к внешней среде, например, в смысле обеспечения наибольшего значения *средней степени приспособленности по популяции* P^t

$$\mu_{sr} = \frac{1}{v} \sum_{i=1}^v \mu(a_i^t). \quad (2.15)$$

Совокупность из v генотипов всех особей a_k^t , составляющих популяцию P^t , образует *хромосомный набор*, который полностью содержит в себе генетическую информацию о популяции P^t в целом. Наличие изменчивости хромосомного набора от поколения к поколению является необходимым условием эволюции популяции P^t на генетическом уровне. Для оценки разнообразия генотипов попу-

ляции P^t введем в рассмотрение *функцию диаллельного разнообразия* [44] по каждому биту хромосомного набора

$$D_i = 1 - 4 * \left[0,5 - \frac{v_i}{v} \right]^2, i = \overline{1, n \times \theta}. \quad (2.16)$$

Где v_i – число нулей в i -м бите хромосомного набора популяции P^t ;

v – численность популяции P^t .

Тогда *побитовое разнообразие* популяции P^t определим как среднее значение диаллельных разнообразий по всем $(n \times \theta)$ битам хромосомного набора:

$D_{b(t)} = \frac{1}{n \times \theta} \sum_{i=1}^{n \times \theta} D_i$ При $D_{b(t)} = 1$ имеем максимальное разнообразие генотипов в популяции; при $D_{b(t)} = 0$ все генотипы в хромосомном наборе совпадают между собой.

Обобщением побитового разнообразия на общий случай экстремальной задачи является *генетическое разнообразие P^t по всем n локусам*

$$D_\lambda = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n D_\lambda(i), \quad (2.17)$$

где $D_\lambda(i) = 1 - \frac{v^2}{(1-v)^2} \left(\frac{1}{v} - \max_{1 \leq k \leq m_i} P(e_\theta(k), i) \right)^2$ – функция аллельного разнообразия в i -м фокусе;

$P(e_\theta(k), i) = \frac{v_i}{v}$ – частота аллельной формы $e_\theta(k)$ в i -м локусе;

v_i – число генотипов в хромосомном наборе популяции P , в которых i -й локус содержит аллельную форму $e_\theta(k)$;

v – численность популяции P^t ;

m_i – число форм аллелей в i -м локусе, $1 \leq m_i \leq v$.

Популяция $P^t = (a_1^t, \dots, a_v^t)$ [44] представляет собой *репродукционную группу* – совокупность из v особей, любые две из которых $a_k^t, a_l^t \in P^t, k \neq l$ могут разм-

ножаться, выступая в роли «родителей» (a_k^t – «мать»; a_l^t – «отец»). Здесь под *размножением* понимается свойство особей $a_k^t \in P^t$ воспроизводить одного или нескольких себе подобных непосредственных «потомков» («детей») b_i^t , $i \geq 1$ обеспечивать у них непрерывность и наследственную преемственность качественных признаков «родителей».

Таким образом, этот фактор эволюционного развития популяции приводит к получению новой генетической информации, содержащей различные комбинации аллельных форм генов «родительских» генотипов.

В терминах экстремальной задачи однокритериального выбора «воспроизводство себе подобных» можно интерпретировать как возможность построения по заданным допустимым решениям $x^k, x^l \in D$ нового допустимого решения $x^i \in D$, а «непрерывность и наследственную преемственность» – как возможность использования аллельных форм в виде бинарных комбинаций $e_\theta(\beta_i)$, содержащихся в генотипах «родителей» $E(x^k)$ и $E(x^l)$, для формирования генотипа $E(x^i)$ «потомка», тем самым, обеспечивая передачу наследственных признаков особей от поколения к поколению на уровне обмена генами.

Основными схемами передачи потомкам качественных признаков родителей, являются рекомбинация генов и кроссовер, имеющие множество различных модификаций. Рекомбинация представляет из себя формирование каждого отдельного гена потомка путем переноса аллельного значения из соответствующего локуса одного из родителей. Кроссовер, в общем случае, представляет из себя аналогичный перенос, но уже нескольких сцепленных генов.

Мультихромосомные генетические алгоритмы.

Для сложных систем способ представления вектора допустимого решения, при котором каждому внутреннему параметру системы ставится в соответствие числовое значение, оказывается неприемлемым. Дело в том, что для критериев оптимизации $Q(x)$ сложных систем не всегда удастся точно определить состав компонентов вектора внутренних параметров $x = (x_1, \dots, x_n)$, т.е. выделить струк-

турные компоненты, влияющие на критерий. Но даже если состав вектора внутренних параметров определен, каждый внутренний параметр сам может являться сложной системой, уровень сложности определяется исходными данными. То есть компонент вектора допустимого решения может вообще не иметь числового значения, что противоречит принципу представления допустимого решения в ГА [44].

В данной ситуации следует искать такие структурные показатели, от которых зависят все существенные свойства системы и которые можно представить в числовом обозначении.

В качестве таких показателей предлагается использовать *соотношения компонентов системы*, отражающие *факт связи этих компонентов*. Учет связей компонентов является естественным способом моделирования структуры любой системы. Рассмотрев все имеющиеся в системе связи компонентов и построив схему, мы, тем самым, построим модель структуры системы.

Построенную модель назовем *моделью связей системы*.

Понятие *компонент системы* (КС) достаточно общее, к компонентам системы следует относить компоненты любой подсистемы – вида обеспечения. То есть связи КС могут иметь различный характер, обозначающий как физическую связанность компонентов (связь компьютеров в сети), так и просто совместную активность компонентов (компьютер и программное обеспечение при выполнении процедуры обработки информации). В бортовой сети над информацией осуществляются следующие действия:

- ввод-вывод информации;
- защиту информации (реализация процедур защиты информации);
- обработка информации (реализация процедур обработки информации);
- хранение информации;
- передача информации между элементами сети.

Ввод и вывод информации, в принципе, являются составляющими практически любой процедуры обработки информации, характер связей компонентов системы, при этом, такой же, как и при обработке информации, поэтому отдель-

но их можно не рассматривать. Связи реализации процедур защиты информации имеют ту же природу, что и связи реализации процедур обработки информации. Связи компонентов у трех оставшихся видов действий над информацией имеют различную природу. Соответственно можно выделить следующие виды связей компонентов системы:

- *связи реализации процедур обработки информации* подразумевают одновременную или поочередную активность компонентов тех или иных видов обеспечения;
- *связи хранения информации* подразумевают связанность компьютера (как места хранения) с блоком данных или программным комплексом (как объектом хранения);
- *связи передачи информации* подразумевают физическую связанность между различными компьютерами (автоматизированными рабочими местами).

Для учета всех имеющихся в системе связей рассматривается декомпозиция [44] системы по видам обеспечения процесса обработки и защиты информации (рисунок 2.7).

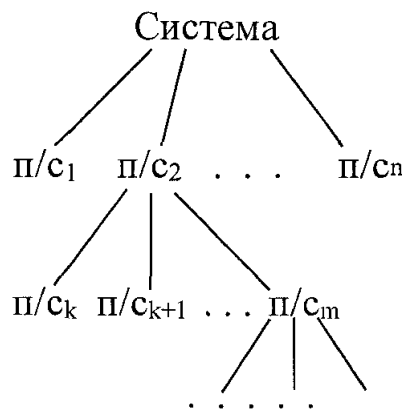


Рисунок 2.7 - Декомпозиция системы

Учет всех имеющихся связей необходим для получения полного представления о структуре системы.

В результате декомпозиции выделены подсистемы видов обеспечения, причем компоненты подсистем более низкого уровня осуществляют полное обеспечение процесса обработки и защиты информации в подсистеме более вы-

сокого уровня, составными частями которой они являются (компоненты подсистем $1, \dots, n$ обеспечивают процесс обработки информации системы в целом, компоненты подсистем k, \dots, m обеспечивают обработку информации в подсистеме 2 и т.д.). В дальнейшем будем говорить, что компоненты базовой подсистемы обеспечиваются компонентами образующих подсистем.

О п р е д е л е н и е 2.1. Подсистемы J_1, \dots, J_k (виды обеспечения обработки информации) в подсистеме i назовем *образующими подсистемами*, а саму подсистему i назовем *базовой подсистемой*.

Основная идея данного способа моделирования структуры БЦВК заключается в том, что всякое существенное свойство системы зависит от соотношений компонентов системы различных уровней сложности, следовательно, значения целевых функций можно рассчитывать, учитывая эти соотношения. Поскольку количество компонентов системы конечно, то каждому соотношению можно присвоить уникальный числовой код, который будет затем использован при построении хромосомы.

Все рассматриваемые связи компонентов объединяются в несколько групп, отражающие связи подсистем. Связанность подсистем отражается функцией f^i (в дальнейшем – функция связи подсистем), i – номер комбинации связанных подсистем. Аргументами этой функции являются номера компонентов связанных подсистем. Область определения этой функции – декартово произведение номеров компонентов связанных подсистем. Область допустимых значений – множество, состоящее из двух элементов, например $\{0, 1\}$. При этом значение функции 0 говорит о том, что компоненты с данными номерами не связаны, а значение 1 – наоборот, что связаны.

График функции f^i , характерный для комбинации из двух связанных подсистем представлен на рисунке 2.8.

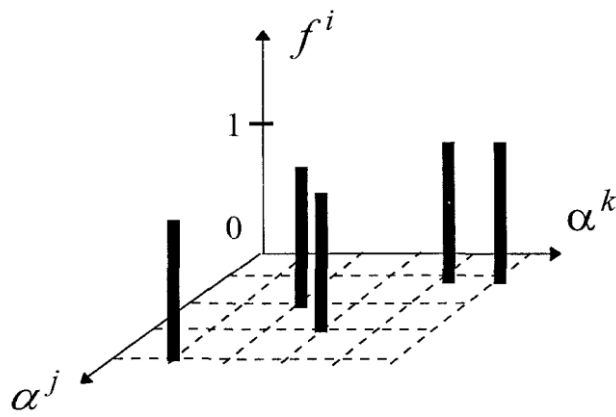


Рисунок 2.8 - График функции связи подсистем

Здесь по координатным осям α^j, α^k откладываются номера компоненты соответственно j -й и k -й подсистем.

В реализации процедур обработки и защиты информации принимают участие компоненты подсистем первого уровня декомпозиции. Следовательно, необходимо учесть все возможные комбинации связанных подсистем этой группы составляющих. Если у какой-либо подсистемы первого уровня декомпозиции выделены собственные составляющие, то необходимо учесть все возможные комбинации и в этой группе образующих. Таким образом, общее число связей реализации процедур обработки и защиты информации составляет

$$S_p = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{N_i} C_{N_i}^j$$
, где N – число выделенных групп образующих подсистем, N_i – число подсистем в i -й группе образующих, $C_{N_i}^j$ – число сочетаний из N_i по j .

Связи хранения информации, как уже говорилось, характеризуются местом хранения и объектом хранения. Обычно в системе выделяется одна подсистема технического обеспечения, компоненты которой могут рассматриваться как место хранения информации. Следовательно, общее число комбинаций связанных подсистем равно количеству видов обеспечения первого уровня декомпозиции, компоненты которых требуют определенного места хранения.

Связи передачи информации возникают только в подсистеме, компоненты которой рассматриваются как место хранения информации, т.е. в пределах

подсистемы технического обеспечения. Количество комбинаций связанных подсистем равно количеству подсистем технического обеспечения (обычно 1).

Найти все наборы аргументов функций связей подсистем, на которых значения этих функций равно единице – значит найти все комбинации связанных компонентов, т.е. восстановить структуру системы.

О п р е д е л е н и е 2.2. Допустимое решение представляет собой набор аргументов функций связей подсистем, на которых значения этих функций равны единице.

Допустим, выделено s различных комбинаций связанных подсистем (всех возможных видов). Допустимое решение имеет вид:

где γ_j^i – j -й набор аргументов, на котором функция связи подсистем f^i принимает значение 1; n_i – количество таких наборов аргументов. Множество допустимых решений D описывается как

$$x = \left(\left(\gamma_1^1, \dots, \gamma_{n_1}^1 \right), \left(\gamma_1^2, \dots, \gamma_{n_2}^2 \right), \dots, \left(\gamma_1^s, \dots, \gamma_{n_s}^s \right) \right), \quad (2.18)$$

$$D = \left\{ x = \left(\left(\gamma_1^1, \dots, \gamma_{n_1}^1 \right), \dots, \left(\gamma_1^s, \dots, \gamma_{n_s}^s \right) \right) \mid \left(\forall i = \overline{1, s} \wedge \forall j = \overline{1, n_i} \right) \Rightarrow f^i(\gamma_j^i) = 1 \right\}. \quad (2.19)$$

О п р е д е л е н и е 2.3. Решением задачи оптимизации структуры системы является элемент множества D (2.2), для которого комплексная оценка критериев оптимизации имеет наилучшее значение.

Для перехода от модели связей к генетической модели производится кодирование каждого набора аргументов γ_j^i , которое проводится с учетом номеров связанных компонентов [44]. Используемый способ кодирования должен обеспечивать взаимно однозначное соответствие между номерами компонентов и числовым представлением этой связи. В итоге получим числовые строки;

$$\begin{array}{c}
 E(f^1): \boxed{\beta_1^1 \mid \beta_2^1 \mid \dots \mid \beta_{n_1}^1} \\
 E(f^2): \boxed{\beta_1^2 \mid \beta_2^2 \mid \dots \mid \beta_{n_2}^2} \\
 \dots \\
 E(f^s): \boxed{\beta_1^s \mid \beta_2^s \mid \dots \mid \beta_{n_s}^s}
 \end{array}$$

где β_j^i – численное представление набора аргументов γ_j^i .

Если в классических ГА одна хромосома соответствовала всему вектору внутренних параметров, то в данном случае одна хромосома ставится в соответствие каждому компоненту вектора допустимого решения (2.12).

2.4.2 Нейросетевые экспертные системы в задачах обнаружения деструктивных ЭМВ

Можно выделить следующие варианты применения НС в системах обнаружения деструктивных ЭМВ. Дополнение нейронной сетью существующих экспертных систем для снижения числа ложных срабатываний, присущих экспертной системе. Так как экспертная система получает от НС данные только о событиях, которые рассматриваются в качестве подозрительных, чувствительность системы возрастает. Если обученная НС получила возможность идентифицировать новые воздействия, то экспертную систему также следует обновить. Иначе новые воздействия будут игнорироваться экспертной системой, прежние правила которой не описывают данную угрозу.

Если НС представляет собой отдельную систему обнаружения ЭМВ, то она обрабатывает трафик бортовой сети и анализирует информацию на наличие в нем искажений. Любые случаи, которые идентифицируются с указанием на ЭМВ, перенаправляются к ЛПР или используются системой автоматического реагирования на ЭМВ. Этот подход обладает преимуществом в скорости по сравнению с предыдущим подходом, т.к. существует только один уровень анализа, а сама система обладает свойством адаптивности.

К основным недостаткам НС относят «непрозрачность» процесса формирования результатов [255]. Однако использование гибридных нейросетевых экспертных или нейро-нечетких систем позволяет явным образом отразить в структуре НС систему нечетких правил вывода, которые автоматически корректируются в процессе обучения НС [72, 163, 260].

Нейросетевые экспертные системы.

При этом следует иметь ввиду, что нейронные сети и экспертные системы существенно различаются по способам представления и обработки информации. НС ориентированы на распределенную обработку данных, в ходе которой сложно найти аналог рассуждений, процесс решения задачи логически «не прозрачен», а накопленные в процессе обучения знания распределены по всему информационному полю НС, что затрудняет объяснение их конкретного местоположения и делает трудновыполнимым отражение в информационное поле необученной нейронной сети априорного опыта квалифицированных специалистов по ЭМС.

Априорный опыт в экспертных системах представляется в «прозрачной» для пользователя иерархии правил IF-THEN, например, в виде дерева решений, а процесс логического вывода сходен с последовательным характером человеческих рассуждений. Известны методы организации цепочек рассуждений, управляемых данными (data-driven) и управляемых целью (goal-driven). В обоих случаях имеются предпосылки распараллеливания обработки высказываний.

В отличие от экспертных систем НС обладают свойством адаптивности, причем сам процесс обучения достаточно прост и формализуем. В то же время, задача приобретения знаний экспертными системами в значительной мере трудоемка, т.к. основана на создании непротиворечивой системы логического вывода, основанной на личном опыте отдельных экспертов. Кроме того, ориентированная на четкие достоверные данные иерархия правил экспертной системы не обладает гибкостью и элементами самоорганизации. В то время как биологический мозг и его модель – искусственная НС выявляют зависи-

мости и делают выводы в условиях неопределенности и неполной достоверности данных.

Основанная на правилах экспертная система (рисунок 2.9) состоит из базы знаний (knowledge base), информационной базы (database), механизма логического вывода (inference engine), средств объяснения результатов (explanation facilities) и пользовательского интерфейса (user interface) [72, 157].

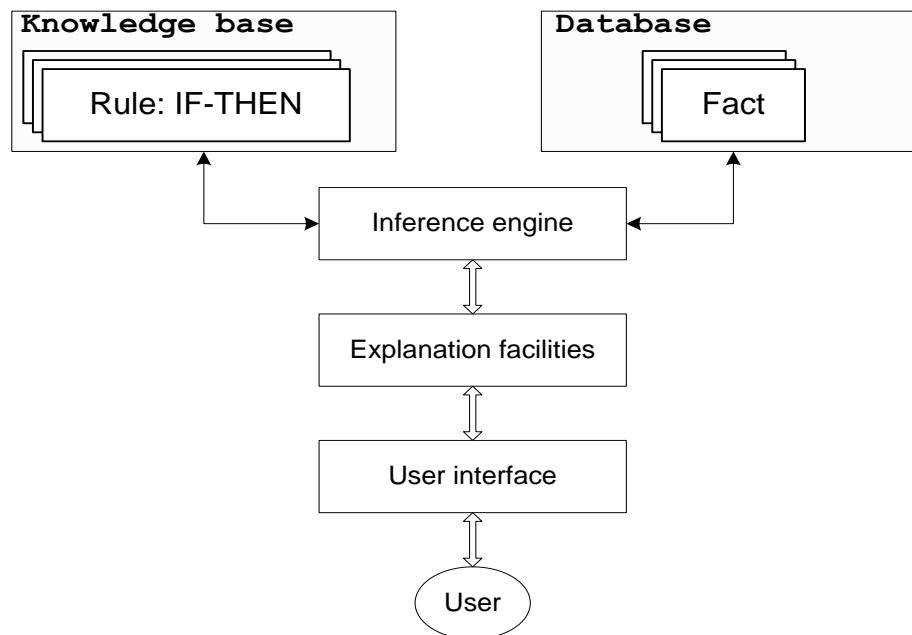


Рисунок 2.9 - Основанная на правилах экспертная система

Знания в экспертной системе организованы в виде системы правил вида: IF (условие) THEN (следствие). Система логического вывода осуществляет сравнение данных из информационной базы с полем базы знаний и в случае четкого совпадения активизируются заданные полем действия. Результаты работы экспертной системы доступны пользователю через диалоговый интерфейс, который позволяет ознакомиться также с ходом логических «рассуждений» системы, повлекших получение данного результата.

Нейросетевая экспертная система (рисунок 2.10) имеет во многом аналогичную организацию. Однако принципиальное отличие заключается в том, что база знаний нейросетевой экспертной системы (neural knowledge base) организована в виде нейронной сети, знания в которой представлены в форме нечеткого адаптивного распределенного информационного поля.

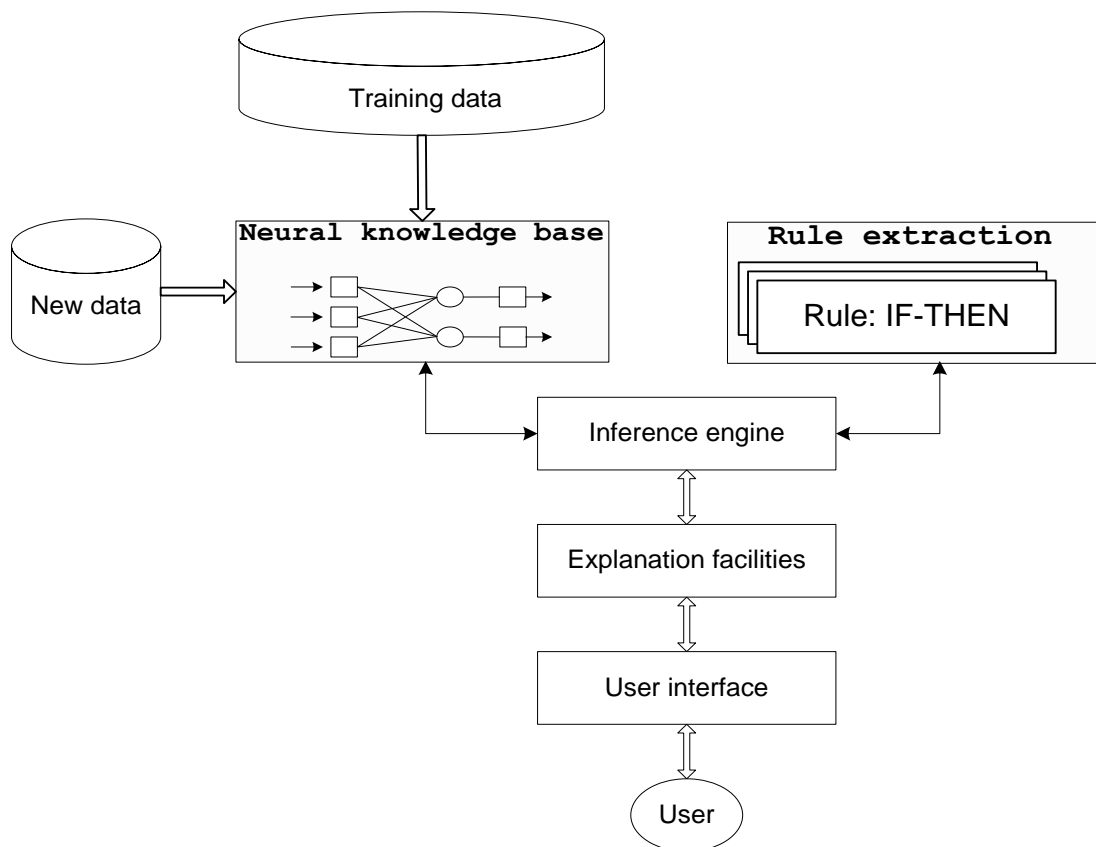


Рисунок 2.10 - Нейросетевая экспертная система

Если используется специализированная НС, то ее топология ориентирована на реализуемую систему правил (занесение априорного опыта экспертов в информационное поле НС), а взвешенные связи настраиваются в процессе предэксплуатационного обучения, например по обучающим образцам (training data). В процессе обучения НС автоматически уточняется сформулированная экспертами система правил, устраняются выявленные противоречия. Т.е. при загрузке система правил распределяется по структуре НС, формируя базу знаний нейросетевой экспертной системы, а процесс обучения адаптирует информационное поле по обучающим образцам, выявляя скрытые в них закономерности. Использование нейросетевой базы знаний позволяет устранить один из основных недостатков основанных на правилах экспертных систем – невозможность оперирования с не вполне достоверной информацией.

На самом деле нейросетевая база знаний корректирует зашумленную и частично искаженную входную информацию (new data), что эквивалентно в IF-

THEN правиле активации заданных полем действий даже в случае нечеткого-выполнения условия. Активация нейросетевой базы знаний аналогична извлечению правила IF-THEN (rule extraction) из информационного поля нейронной сети.

Видоизменяются также и функции блока логического вывода, который оперирует уже нечеткими рассуждениями исходя из потока данных в нейросетевой экспертной системе.

2.4.3 Нейро-нечеткие методы для обнаружения деструктивных ЭМВ

Объединение возможностей нейронных сетей и нечеткой логики является наиболее перспективным подходом к организации интеллектуальных систем обнаружения деструктивных ЭМВ на элементы и узлы БЦВК.

Согласно таблице 2.3 именно системы НЛ, которые компенсируют две основные «непрозрачности» НС: в представлении знаний и объяснений результатов работы интеллектуальной системы, наилучшим образом дополняют нейронные сети. Нечеткая логика позволяет формализовать качественную информацию, полученную от экспертов в данной области знаний, и о веществе их в системе нечетких правил, позволяющих трактовать результаты работы системы.

Нейронные сети дают возможность отобразить алгоритмы нечеткого логического вывода в структуре НС, вводя тем самым в информационное поле сети априорную информацию, которая в процессе предэксплуатационного обучения может корректироваться аналогично случаю нейросетевой экспертной системы, рассмотренному выше.

В нечетких НС свойство адаптивности позволяет решать не только отдельно взятые задачи идентификации ЭМВ с имеющимися в системе шаблонами, но и автоматически формировать новые правила при изменении поля ЭМВ.

Нейро-нечеткая система представляет собой НС (рисунок 2.11), которая является адаптивным функциональным эквивалентом нечеткой модели вывода, например, алгоритма Mamdani [72, 157].

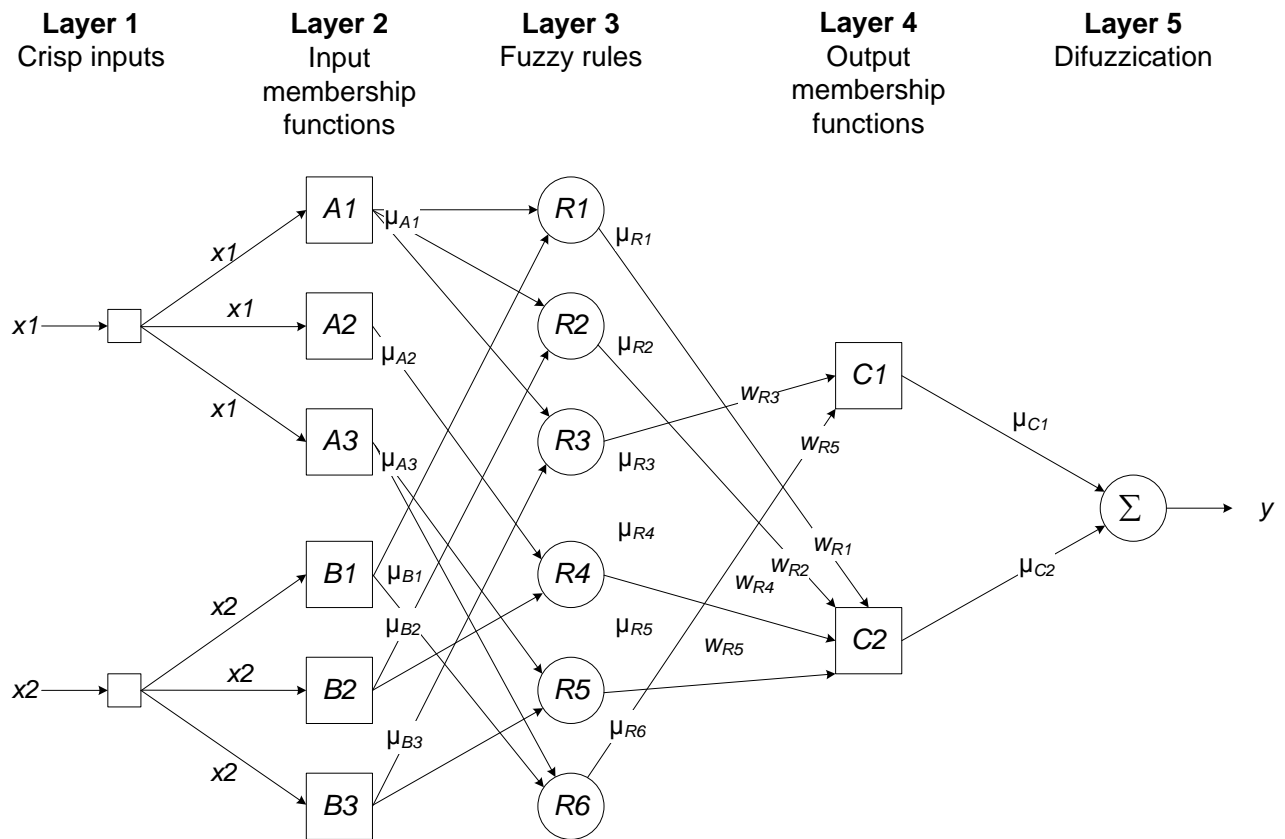


Рисунок 2.11 - Нейро-нечеткая сеть

Основные этапы нечеткого логического вывода непосредственно отражены в распределении специализации по слоям НС:

а) введение нечеткости (fuzzification) выполняется слоем входных функций принадлежности A_1 - A_3 B_1 - B_3 (input membership functions), осуществляющих преобразование каждого из четких входных значений и crisp inputs в степень истинности соответствующей предпосылки для каждого правила $\mu_{A_i}, \mu_{B_i}, i = 1, 2, 3$;

б) нечеткому логическому выводу соответствует слой нечетких правил R_1 - R_6 (fuzzy rules), который по степени истинности предпосылок $\mu_{A_i}, \mu_{B_i}, i = 1, 2, 3$ формирует заключения по каждому из правил $\mu_{R_i}, i = \overline{1-6}$ – соответствующие нечеткие подмножества;

в) композиция нечетких подмножеств $\mu_{ri}, i = \overline{1-6}$ производится слоем выходных функций принадлежности C_1, C_2 (output membership functions) с целью формирования нечетких подмножеств $\mu_{ci}, i = 1, 2$;

г) объединение (aggregation) нечетких подмножеств $\mu_{ci}, i = 1, 2$ и приведение к четкости (defuzzification) выполняется в выходном слое и приводит к формированию выходного четкого значения y .

Как и в случае нейросетевых экспертных систем существует необходимость коррекции информационного поля нейро-нечеткой системы путем предэксплуатационного обучения [72, 157].

Знания экспертов по проблемной области или данных экспериментальных исследований, представленные в форме нечетких переменных и нечетких правил, могут быть прозрачным способом отражены в структуре нейро-нечеткой сети. Последующее обучение нечеткой НС позволяет не только настроить веса связей (т.е. откорректировать достоверность отдельных нечетких правил), но и устранить противоречивость системы нечетких правил в целом.

В случае отсутствия априорной информации по данной предметной области, но при достаточном объеме обучающей выборки нейро-нечеткая сеть автоматически преобразует скрытые в данных обучающей выборки закономерности в систему правил нечеткого логического вывода.

ANFIS - адаптивная нейро-нечеткая система

Специализированная нейросетевая структура, ориентированная на извлечение знаний в виде системы нечетких правил из данных обучающей выборки, характеризующаяся хорошей сходимостью, известна под названием адаптивной нейро-нечеткой системы вывода – ANFIS (Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System) [72, 157].

ANFIS является функциональным эквивалентом нечеткой модели вывода по алгоритму Sugeno, которой соответствует следующая система нечетких правил

$$R_j : IF x_1 is A_1 AND x_2 is A_2 AND ... x_m is A_m, THEN y = f_j = f(x_1, x_2, ..., x_m), \forall j, (2.21)$$

где x_1, x_2, \dots, x_m – входные переменные,

A_1, A_2, \dots, A_m – нечеткие множества,

$y = f_j$ – либо константа, либо линейная функция входных переменных,

j – число нечетких правил в системе.

Например, если система нечетких правил имеет вид:

Rule 1: IF x_1 is A_1 AND x_2 is B_1 THEN $y = f_1 = k_{10} + k_{11}x_1 + k_{12}x_2$;

Rule 2: IF x_1 is A_2 AND x_2 is B_2 THEN $y = f_2 = k_{20} + k_{21}x_1 + k_{22}x_2$;

Rule 3: IF x_1 is A_2 AND x_2 is B_1 THEN $y = f_3 = k_{30} + k_{31}x_1 + k_{32}x_2$;

Rule 4: IF x_1 is A_1 AND x_2 is B_2 THEN $y = f_4 = k_{40} + k_{41}x_1 + k_{42}x_2$;

то нейро-нечеткой системе ANFIS будет соответствовать структура (рисунок 2.12).

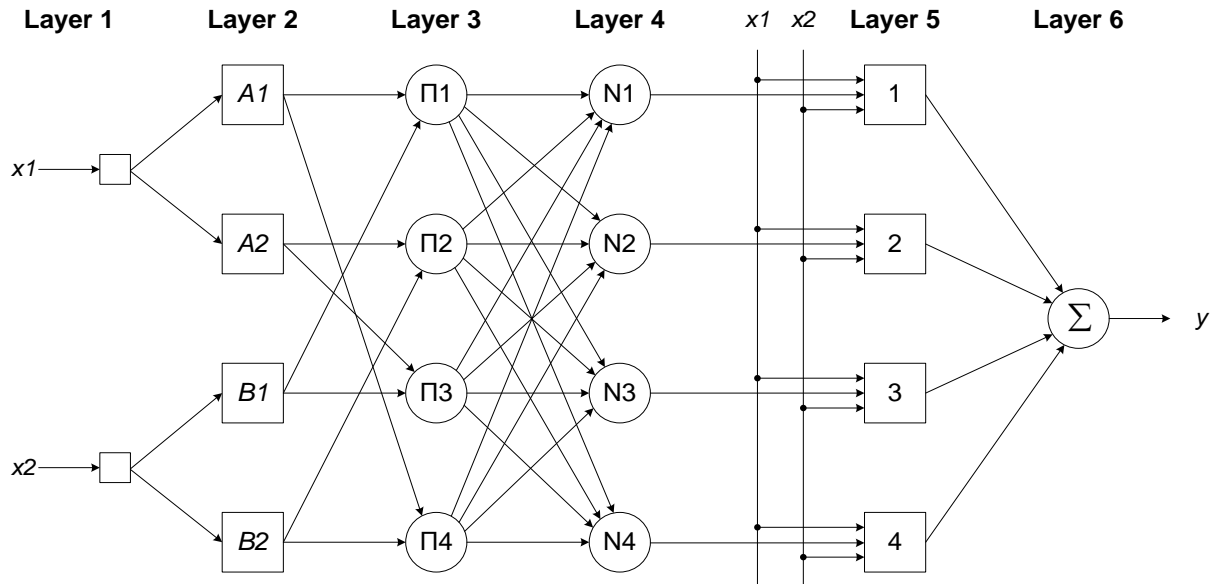


Рисунок 2.12 - Архитектура нейро-нечеткой системы ANFIS

Введение нечеткости выполняется слоем функций принадлежности A_1-A_1, B_1-B_2 осуществляющих преобразование входных значений x_1 и x_2 в степень истинности соответствующей предпосылки для каждого из 4-х правил.

Нечеткому логическому выводу соответствует слой нечетких правил R1-R4 (соответствующие нейроны обозначены П1-П4), который по степени истинности предпосылок формирует заключения по каждому из правил, используя операцию prod :

$$\mu_{Rj} = \prod_{k=1}^4 \mu_k, j = \overline{1-4} \quad (2.22)$$

Слой нейронов N1-N4 выполняет функцию нормализации

$$\mu_{Nj} = \frac{\mu_{Rj}}{\sum_{k=1}^4 \mu_{Rk}}, j = \overline{1-4} \quad (2.23)$$

а композиция производится слоем выходных функций принадлежности 1-4

$$\mu_{Oj} = \mu_{Nj} (k_{j0} + k_{j1}x_1 + k_{j2}x_2), j = \overline{1-4} \quad (2.24)$$

Объединение нечетких подмножеств $\mu_{Oj}, j = \overline{1-4}$ и приведение к четкости выполняется в выходном слое и приводит к формированию выходного четкого значения y [72, 157].

2.5 Выводы по главе

1. Проведенный анализ литературных источников показал необходимость использования для разработки адаптивных средств обнаружения деструктивных ЭМВ на элементы и узлы БЦВК интеллектуальных механизмов нейронных сетей, нечеткой логики и гибридных, в частности, нейро-нечетких систем, а также методов генетических алгоритмов и эволюционных процессов наследования, развития, адаптации и отбора.

2. Проведенный анализ существующих подходов применения интеллектуальных средств для решения задачи обнаружения деструктивных воздействий на элементы и узлы БЦВК показал, что наиболее часто используемым подходом при разработке адаптивных средств обнаружения деструктивных воздействий является использование нейронных сетей или гибридных систем на их основе.

3. Показано, что включение нечеткой логики в состав нейросетевых средств обнаружения деструктивных воздействий позволяет учитывать априорный опыт экспертов, реализовать присущее нейронным сетям нечеткое представление информации, извлекать знания из входных неполных и не вполне достоверных данных.

4. Предложено при разработке адаптивных средств обнаружения деструктивных ЭМВ на БЦВК использовать такие свойства нейронных сетей, как: возможность классификации признаков воздействий, представление системой нечетких продукционных правил, адаптивность НС и системы нечетких продукционных правил, «прозрачность» для анализа системы нечетких продукционных правил и структуры межнейронных связей нечетких нейронных сетей.

5. Предложено для предэксплуатационного обучения нечетких нейронных сетей использовать механизм нечеткого логического вывода, позволяющий представить опыт экспертов в виде системы нечетких продукционных правил. Последующее обучение нечеткой НС позволяет устранить противоречивость системы нечетких продукционных правил и провести анализ процесса логического вывода для коррекции системы нечетких продукционных правил адаптивных средств обнаружения деструктивных ЭМВ на БЦВК.

6. Проведенный анализ показателей для оценки устойчивости БЦВК к деструктивному ЭМВ показал, что известные оценки отражают статическое состояние комплекса, не учитывают действительную загруженность узлов и подсистем БЦВК по обнаружению ЭМВ, динамику изменения характера ЭМВ, возможность адаптации средств обнаружения ЭМВ, не дают указаний на изменение состава датчиков, механизмов защиты, структуры системы обнаружения деструктивных ЭМВ.

7. Показана необходимость разработки модели нейросетевой системы обнаружения деструктивных ЭМВ на БЦВК.

ГЛАВА 3 МОДЕЛИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ МОЩНЫХ ИМПУЛЬСНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ С ЭЛЕМЕНТАМИ БЦВК

В главе рассматриваются принципы построения перспективных БЦВК на базе высоко интегрированных модульных бортовых средств обработки информации на основе высокоскоростных сетевых интерфейсов, которые обеспечивают совершенно новые качества и характеристики (масштабируемость, реконфигурируемость, надежность, стойкость, повышенную производительность и пропускную способность).

Анализ существующих подходов к оценке воздействия электромагнитных импульсов на подсистемы современных БЦВК показал необходимость разработки новых расчетных моделей оценки воздействия ЭМИ на элементы и узлы БЦВК с возможностью их интеграции в рамках единого комплекса, позволяющего проводить интеллектуальный анализ и оценку параметров искажений информационного потока в системе для предотвращения деструктивного действия ЭМИ на БЦВК [134].

Расчетно-экспериментальная оценка стойкости аппаратуры БЦВК подразумевает совмещение экспериментальных и расчетных методов. В тех случаях, когда не представляется возможным испытать образец в целом (из-за его больших габаритов), требуется проводить испытания отдельных составных частей изделия с использованием ЭМП имитаторов, а реакция протяженных элементов изделия (кабельных линий и др.) оценивается расчетным путем. И тогда оценка стойкости элементов и узлов БЦВК проводится путем испытаний, а при использовании математического моделирования, которое позволяет учитывать функциональные связи составных частей при разных условиях применения аппаратуры, оценивается работоспособность всего комплекса.

Выбор метода оценки стойкости аппаратуры зависит от этапа ее разработки. На ранних стадиях, как правило, применяются расчетные методы и лабораторные испытания с применением генераторов ЭМП, генераторов тока и напряжения, на

последующих - экспериментальные или расчетно-экспериментальные методы с использованием имитаторов ЭМП [134, 152, 150].

Оценка стойкости объекта к действию ЭМП включает в себя определение параметров электромагнитных полей, которые воздействуют на составные части, находящиеся в разных условиях (в полете, на открытой площадке, с электромагнитной экранировкой и др.), и последующую оценку воздействия этих ЭМП на работоспособность составных частей и БЦВК в целом. И при этом расчетная оценка стойкости должна быть перед экспериментальной оценкой.

При анализе используются: технические условия и технические описания на комплекс и его составные части; функциональные и принципиальные схемы аппаратуры; конструкторские и монтажные чертежи; справочные данные о стойкости к ЭМП комплектующих изделий; результаты испытаний аналогов составных частей объекта и их элементов.

Для достоверной оценки стойкости БЦВК к воздействию СКИ ЭМП требуется проведение комплекса исследований по разработке новых расчетных моделей оценки воздействия полей СКИ ЭМП на элементы и узлы БЦВК, разработке методик испытаний и проведение испытаний, исследование эффективности применяемых конструктивных и схемных средств защиты аппаратуры в наносекундном временном диапазоне.

Для достижения поставленной цели предлагается использовать подход, при котором проводится анализ модели БЦВК. Данная модель строится на базе спецификаций, описывающих конфигурацию бортовой сети (топологию, каналы передачи данных, состав программного обеспечения и аппаратных средств). На этапе проектирования БЦВК спецификации определяются проектировщиком, на этапе эксплуатации – в автоматическом режиме при помощи программных агентов, функционирующих на узлах БЦВК.

3.1 Структура и характеристики современных БЦВК

Развитие БЦВК характеризуется постоянным повышением сложности решаемых задач. При этом большая часть реализуемых задач (60-70%) являются традиционными, претерпевающими эволюционное изменение алгоритмы обработки информации в интересах задач навигации, связи, опознавания, управления оборудованием контроля, отображения информации и т.д. Таким образом, задачи данной группы не предъявляют каких либо особенных требований к быстродействию и памяти бортовых ЦВМ с универсальной архитектурой общего назначения (БЦВМ-ОН) [174].

Кроме традиционных задач, реализуемых БЦВК с универсальной архитектурой, должны решаться задачи, которые требуют повышенной надежности (задачи управления двигательной установкой, системой энергоснабжения и т.д.), а также задачи, которые требуют повышенного быстродействия (обработки сигналов и изображений) и задачи с нечеткой формализацией исходных условий.

К слабо формализуемым задачам можно отнести задачи распознавания, распределения ресурсов, задачи нечеткого управления, которые могут решаться с использованием методов искусственного интеллекта.

В общем случае структуру современных БЦВК формируют четыре вычислительных системы (ВС), различающиеся своими ресурсами. ВС комплексной обработки, обеспечивающая решение основных задач, ВС обработки сигналов, ВС интеллектуальной обработки, накопления знаний и принятия решений и высоконадежная ВС, обеспечивающая решение общесистемных задач (рисунок 3.1). Задачи комплексной обработки реализуются на БЦВМ-ОН, которые принципиально могут объединяться в вычислительную среду. Для обработки сигналов необходимы БЦВМ-ОС, которые также могут быть объединены в вычислительную среду. Решение задач обработки, накопления знаний и принятия на этой основе оптимальных решений может потребовать как БЦВМ общего назначения, так и специализированных. Для решения общесистемных задач требуются БЦВМ с высокой степенью надежности. Первые три ВС имеют сетевую организацию и могут

реализовываться как интегрированная вычислительная среда (ИВС) [174]. ВС интеллектуальной обработки управляет конфигурацией структуры БЦВК, объединяя ресурсы ИВС в единый ресурс.

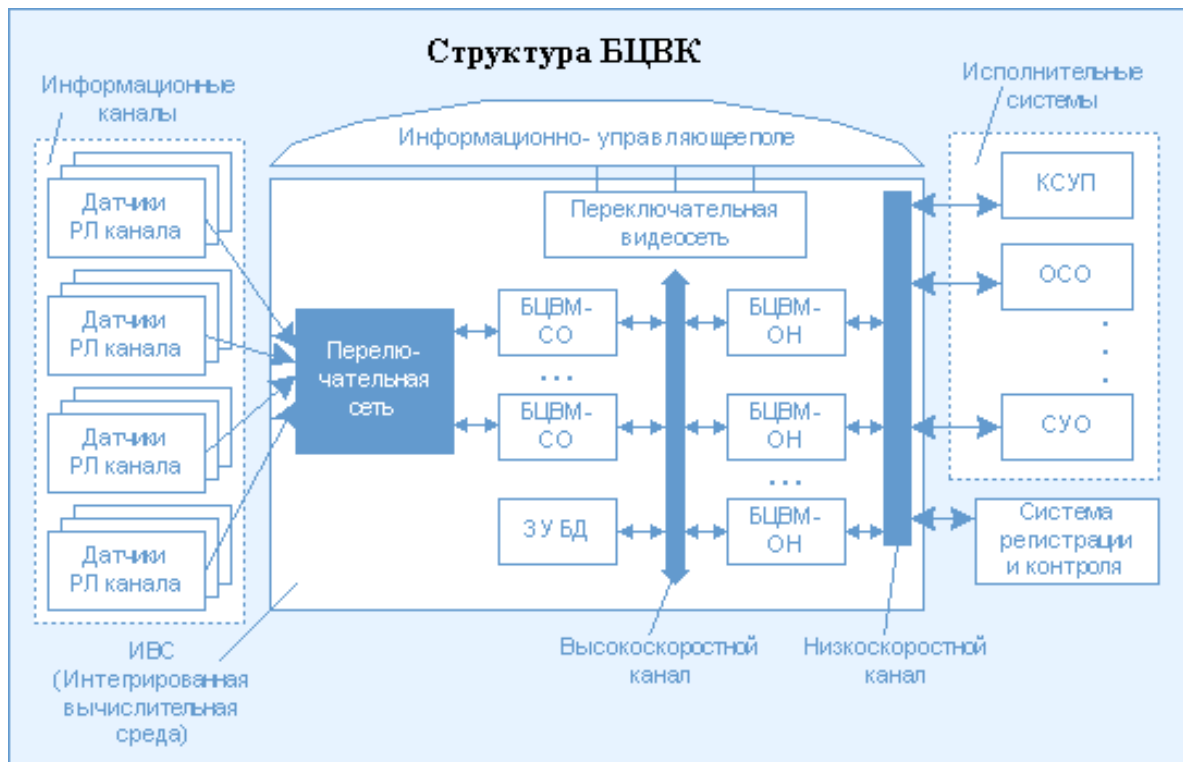


Рисунок 3.1 - Структура современного БЦВК

Интегральный анализ требований к характеристикам современных БЦВК показывает, что быстродействие ЭВМ-ОН составляет порядка 20-25 млн. опер./с, а емкость ЗУ соответственно 2-4 Гбайта. Специализированные вычислительные средства первичной обработки информации обладают быстродействием, величина которого не менее 1000 млн. опер./с. Особо следует выделить возросшие требования к характеристикам каналов передачи данных и управления. На системном уровне величина трафика составляет не менее 10 Мбит/с, а на уровне первичной обработки информации не менее 2 Гбит/с.

Для взаимодействия ИВС с подсистемами нижнего уровня, как правило, используется низкоскоростной мультиплексный канал по ГОСТ 26765.52 87 или его развитие ГОСТ Р50832-95. Также, в составе БЦВК функционирует переключательная сеть, которая обеспечивает связь датчиков со средствами обработки сигналов. Для управления датчиками и для связи с другими системами используется

мультиплексный канал по ГОСТ 25765.52 87/ГОСТ Р 50832-95 (рисунок 3.2) [84, 130, 169, 273].

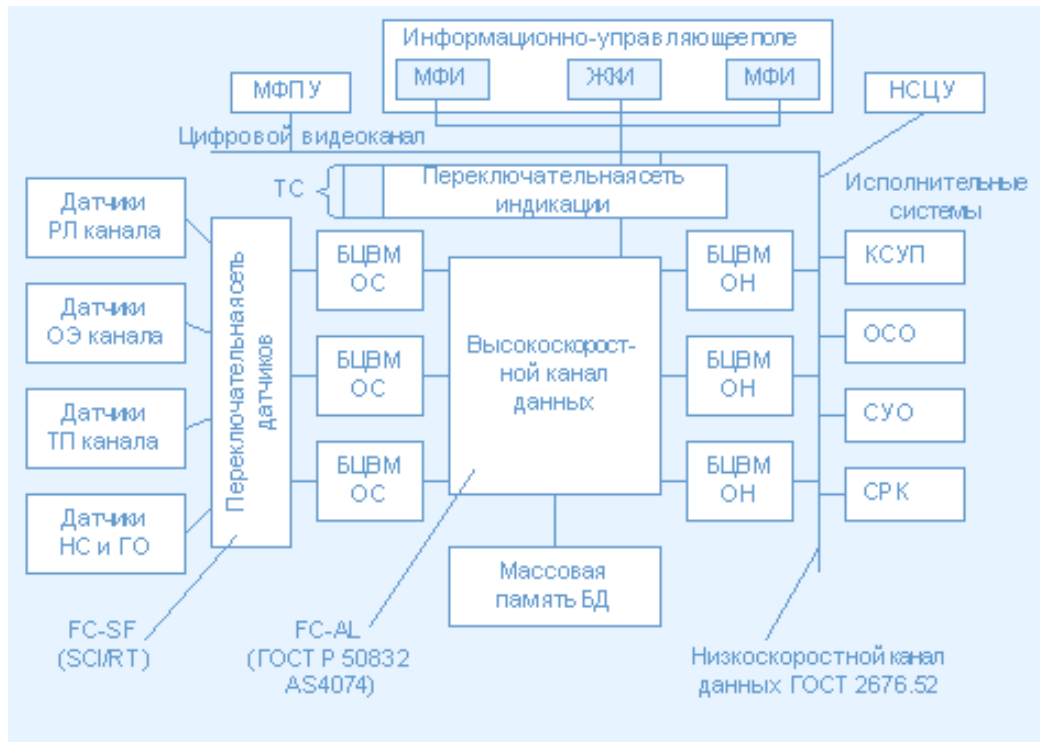


Рисунок 3.2 - Пример структурной организации многомашинного БЦВК

В качестве примера рассмотрим БЦВК, предназначенный для использования в составе подвижных автоматизированных вычислительных комплексов, которые состоят из унифицированных вычислителей, объединенных высокопроизводительной оптической средой передачи информации в соответствии со стандартом IEEE Std 802.3, 1000Base-T и 1000Base-LX. Комплекс имеет следующие модификации – унифицированный, отказоустойчивый вычислитель (УОВ), Сервер с оптическим коммутатором (Сервер), Устройство Управления (УУ). УОВ и Сервер предназначены для построения высокопроизводительных кластерных вычислителей. УУ предназначен для ввода-вывода информации в специальные внешние устройства, а также для визуализации графической и текстовой информации. УОВ предназначен для приема входных потоков информации по каналам Gigabit Ethernet 1000Base-LX, обработки их на 3-х высокопроизводительных процессорных модулях и передачи результатов в вычислительные средства автоматизированного комплекса. Сервер предназначен для организации вычислительных про-

цессов в комплексе посредством резервируемого оптического коммутатора, входящего в его состав (рисунок 3.3).



Рисунок 3.3 - Внешний вид БЦВМ бортового комплекса

Модули кондуктивного исполнения, входящие в состав БЦВМ, и их предназначение:

- процессорный модуль—для обработки и временного хранения информации;
- модуль унифицированных интерфейсов – для ввода-вывода информации по специальным интерфейсам;
- модуль управления и контроля – для управления включения и выключения электропитания и контроля температурных режимов и несанкционированного доступа к БЦВК;
- модуль оптических конверторов – для ввода-вывода информации по каналам Gigabit Ethernet 1000Base-LX;
- модуль оптического коммутатора – для обеспечения взаимодействия между процессорными модулями и внешними вычислителями через два коммутатора в режиме резервирования, выходящие в среду передачи информации по каналам Gigabit Ethernet 1000Base-LX;
- блок вентиляторов – для обеспечения модулей комплекса эффективного, ресурсосберегающего функционирования;
- модуль электропитания – для гарантированного обеспечения БЦВМ электропитания от сети 27 В.

В состав программного обеспечения (ПО) БЦВК входят следующие основные компоненты: общее программное обеспечение (ОПО) и тестовое программное обеспечение (ТПО). Программное обеспечение устанавливается на флэш-памяти одного из модулей БЦВК. В таблице 3.1 представлены некоторые технические данные БЦВМ.

Т а б л и ц а 3.1 - Технические данные БЦВМ

Параметр	Значение параметра
<p>1.1 Системная плата базового вычислителя выполнена на базе процессорного модуля:</p> <p>а) Intel® 2Duo SU9300;</p> <p>б) архитектура VME;</p> <p>в) микропроцессор с частотой, ГГц, не менее</p> <p>г) ОЗУ емкостью, Мбайт, не менее</p> <p>д) видеоконтроллер SVGA, Мбайт, не менее</p> <p>е) модуль памяти (флэш-память) на IDE-интерфейсе, емкостью, Гбайт, не менее</p> <p>ж) контроллер Ethernet 100\1000 BASE TX:</p> <p>- номинальная скорость обмена информацией, Мбит/с, не менее;</p> <p>- количество каналов.</p>	<p>1,2</p> <p>4000</p> <p>64</p> <p>8</p> <p>100</p> <p>4</p>
<p>1.2 Модуль контроля и управления обеспечивает:</p> <p>- контроль температурного режима нагретых зон вычислителя;</p> <p>- формирование сигналов готовности и неисправности контрольных узлов базового вычислителя;</p> <p>- управление включением и выключением блока электропитания;</p> <p>- формирование сигнала целостности механической и электрической стыковки системного модуля;</p> <p>Драйвер модуля обеспечивает передачу информации о факте попыток НСД и СПО вычислителя.</p>	

Продолжение таблицы 3.1

Параметр	Значение параметра
<p>1.3 Унифицированный модуль сопряжения интерфейсов. Обеспечивает связь между шиной VME и каналами последовательного ввода-вывода по ГОСТ 18977-79 и РТМ 1495-75:</p> <ul style="list-style-type: none"> - количество независимых каналов ввода/вывода и каналами параллельного обмена разовыми командами по ГОСТ 18977-79: - количество независимых каналов на вывод типа “корпус-разрыв” - количество независимых каналов на ввод 	<p>4/4</p> <p>4</p> <p>8</p> <p>8</p>
1.4 Модуль оптических конверторов предназначен для ввода / вывода оптических каналов в БЦВМ.	до 4
<p>1.5 Модуль оптического коммутатора имеет основной и резервный коммутатор, которые обеспечивают организацию построения локальной оптической вычислительной среды комплекса.</p> <p>Количество оптических каналов</p>	2x6

Процессорный модуль (ПМ) является РС/АТ-совместимым модулем процессора и предназначен для использования в качестве основного центрального вычислительного и обрабатывающего устройства в БЦВК.

ПМ имеет интерфейс шины VME, полностью совместимый с VMEbus Specification Rev. D и IEC 821/297 (публикация МЭК 821), и может работать в режимах ведущего или ведомого на шине VME.

Процессоры семейства Intel обеспечивают высокую производительность при низком потреблении и характеризуется технологией Enhanced Intel SpeedStep®, которая предоставляет возможность динамически регулировать мощность и производительность процессора на основе требований CPU. Это позволяет оптимизировать производительность без дополнительных потерь мощности. Основные технические характеристики процессорного модуля приведены в таблице 3.2.

Т а б л и ц а 3.2- Основные технические характеристики процессорного модуля

Наименование	Основные характеристики
Микропроцессор	<u>Intel® Core™ 2 Duo SL9400</u> (2x1.86GHz, 6 MB L2cache, 17W)
Cache RAM	4 Мбайт кэш памяти второго уровня
DRAM	4.0 Гбайта DDR3
Fast Ethernet	Четыре канала Ethernet с интерфейсами 10BaseT/100BaseTX/1000BaseTX
Контроллер HDD	Интерфейс EIDE/ATAPI с синхронным режимом UDMA со скоростью передачи до 100 МБ/с, с каналом IDE
Интерфейс VGA/DVI	Графический контроллер с интегрированной видеопамятью объемом 16 (32) Мбайта, с разрешением не менее 1280 x 1024 и 256 цветов для DVI-интерфейса, и 1600 x 1200 и 256 цветов для VGA-интерфейса.
Flash Drive	SATA, объём 32 Гбайта
EEPROM	Последовательная EEPROM объемом 512 байт или 64 Кб для пользовательской информации
Порт ввода/вывода GPIO	Порт ввода/вывода (6 бит), доступен для программирования пользователем
Последовательные порты	2 асинхронных 16550-совместимых канала со скоростью передачи до 115.2 Кбод, 16 байтами FIFO, с возможностью выбора интерфейса RS232/RS422/RS485
USB 2.0	Два канала последовательного интерфейса USB2.0
Клавиатура/мышь	IBM PC/AT совместимый контроллер клавиатуры с разъёмом типа PS/2
PMC слоты	PMC-интерфейс 64 бита /66 МГц с выводом на заднюю сторону модуля.
Интерфейс VME	Интерфейс VME: - Контроллер PCI–VME; - Режимы передачи для ведущего и ведомого: A32/A24/A16 и D32/D16/D8; - Полный системный контроллер шины VME.

Контроллер памяти в ПМ поддерживает синхронную DRAM (DDR SDRAM) с двойной скоростью передачи и шириной данных 64 бита с функцией ECC. В ПМ поддерживается один, два или четыре блока памяти, каждый по 256 Мб или 512 Мб. Следовательно, минимальный объем памяти – 256 Мб, а максимальный – 2 Гб.

В ПМ, как и в стандартных AT-совместимых компьютерах, встроены два контроллера DMA, объединенных каскадом. Оба контроллера совместимы с Intel 8237A. Первый контроллер DMAC1 используется для побайтной передачи, а второй DMAC2 – для словной передачи.

ПМ поддерживает обработку прерывания с помощью контроллера APIC (усовершенствованным контроллером прерываний). Такая обработка прерываний может поддерживаться операционной системой.

ПМ имеет таймер совместимый с Intel 8254. Данный таймер содержит три счетчика. Выход каждого счетчика обеспечивает одну из ключевых системных функций.

Часы реального времени (RTC) – это энергосберегающие часы, которые обеспечивают календарные время, дату и год с функцией будильника и питанием от внешней батареи. Функция календарной даты располагает 14 регистрами управления. Другие функции, включая маскируемые источники прерываний и 242 байта CMOS RAM общего назначения используются системным BIOS. Достоверность даты и времени после отключения питания поддерживается путем использования внешнего батарейного источника.

Каждый последовательный порт ПМ поддерживает 16-байтный FIFO и обеспечивает более высокую производительность, чем ранее используемые стандартные последовательные интерфейсы. UART-ы имеют программируемые генераторы скорости передачи, обеспечивающие скорость от 50 до 115200 бод.

Интерфейс PMC (мезонинных плат PCI) это дополнительный слот для параллельной установки дополнительных плат или плат расширения.

Графический VGA контроллер реализованный на микросхеме GeForce4 410/420 Go производства NVIDIA® с характеристиками:

- 256-битный 3D и 2D графический ускоритель;

- встроенная в кристалл 16/32 МБ видеопамять (66-190 МГц);
- два независимых видеоканала;
- интегрированный 350М Гц ЦАП для аналоговых мониторов VGA с разрешением до 2048x1536;
- DVI-I интерфейс (PanelLink®) для TFT дисплеев с разрешением до 1280 x 1024, одноканальный DVI (165М Гц), PnP поддержка EDID дисплея;
- вывод интерфейсов через переднюю и заднюю стороны модуля;
- полная поддержка для OpenGL 1.2 для всех операционных систем Windows и Linux;
- 32-бит / 33 МГц PCI интерфейс.

Интерфейс VME

В качестве интерфейса VME ПМ использует высокопроизводительный контроллер UNIVERSE, содержащий полный 64-битный интерфейс шины VME с функциями master/slave по 32-битной PCI и системного контроллера, что позволяет устанавливать интерфейс VME на позицию 1 (магистраль VME) без дополнительных устройств с функциями системного контроллера.

На процессорный модуль могут быть установлены следующие мезонины:

- два канала сети Ethernet 10/100 BaseT;
- один резервный канал MIL-1553B (Манчестер МКИО).

Интерфейс Ethernet

Используемый в ПМ контроллер Ethernet Intel 8254GB - это высокопроизводительный двухканальный Gigabit Ethernet 10/100/1000 Мбит/с PCI контроллер. В ПМ реализованы оба канала.

Для регистрации и идентификации рабочей станции в бортовой сети необходим ID (идентификационный номер). Каждой сетевой плате назначается уникальный сетевой ID, который зашивается в Ethernet ROM адреса модуля.

Драйверы для контроллера Ethernet 82546GB поддерживают большое число операционных систем.

Интерфейс MIL-STD-1553B (МКИО)

Модуль PMC мезонин предназначен для подключения РС-совместимых компьютеров, модулей-носителей PMC, которые имеют интерфейс на мезонинный модуль PMC, к резервированной магистрали, выполненной в соответствии с требованиями ГОСТ Р 52070-2003 (MIL-STD-1553B). Модуль выполнен в конструктиве IEEE PMC (PCI MEZZANINE CARD) и удовлетворяет стандарту Conduction Cooled PMC, VITA 20-199x/D1.6.

Режимы работы модуля по мультимплексной линии передачи информации, задаваемые программно:

- контроллер канала (КК),
- оконечное устройство (ОУ),
- монитор канала (МТ).

Модуль предназначен для эксплуатации в составе БЦВК, работающего в сложных условиях эксплуатации.

Модуль внешних системных интерфейсов (далее - адаптер) предназначен для организации обмена между внешними устройствами и процессорными модулями БЦВК, в составе которых данный адаптер эксплуатируется.

Взаимодействие адаптера с остальными модулями в составе БЦВК организуется по магистральной шине VME.

Для выполнения заложенных в него функций модуль внешних системных интерфейсов имеет в своем составе следующие функциональные блоки:

- блок сопряжения с шиной VME;
- узел конфигурации адаптера;
- блок управления дискретными каналами ввода-вывода разовых команд;
- узлы физического уровня каналов разовых команд;
- блоки канального уровня интерфейса ARINC;
- узлы физического уровня каналов интерфейса ARINC;
- блоки канального уровня интерфейса каналов ГОСТ 27232-87;
- блоки физического уровня интерфейса каналов ГОСТ 27232-87;

Адаптер обеспечивает параллельный ввод-вывод 8 независимых (мультиплексируемых) каналов ввода и 8 независимых каналов вывода в соответствии с ГОСТ 18977-79, последовательный ввод-вывод 4-х каналов по ГОСТ 18977-79 и последовательный ввод-вывод 3-х каналов ГОСТ 27232-87.

Адаптер имеет возможность программной настройки режимов работы каналов ввода/вывода.

Адаптер обменивается управляющей информацией и данными с процессорными модулями БЦВМ при помощи шины VME. 2.3.9. При работе с адаптером хост-контроллер шины VME (задатчик), которым является мост шины VME одного из процессорных модулей, использует линии интерфейса VME.

Для организации обмена с внешними устройствами в модуле внешних системных интерфейсов используется параллельный интерфейс разовых команд по ГОСТ 18977-85.

Режимы адаптера:

- вывод информации во внешние устройства;
- ввод информации из внешних устройств;
- режим самопроверки на уровне проекта PLCC.

Для организации работы адаптера в данных режимах перед обработкой состояний информационных линий производится настройка при помощи записи управляющих комбинаций в регистры настройки, формата данных, маскирования прерываний и блокировки каналов. Регистры управления адаптером доступны для записи и чтения.

Ввод информации с внешних устройств относится к основным режимам работы адаптера. Адаптером реализуются два режима ввода информации:

- режим разовых опросов состояний каналов ввода по команде;
- режим циклического опроса с анализом изменений состояния.

В режиме циклического опроса с анализом изменений состояния каналов ввода опросы инициируются автоматически с частотой, заданной настроечными параметрами. Переход в режим циклического опроса осуществляется после записи настроечных параметров в регистры управления и подачи команды «Разрешить

ввод». Для начала работы в данном режиме следует подать команду «Начать циклический опрос».

В данном режиме в буферах БДПМ сохраняются результаты лишь тех опросов, при которых были обнаружены изменения состояний каналов ввода. Прерывания генерируются после первого опроса, следующего за командой «Разрешить ввод» и при следующей смене состояния хотя бы одного разблокированного и незамаскированного канала, если данные изменения разрешены. Прерывания не влияют на продолжение процесса циклического опроса. И к моменту окончания обработки прерывания в буферах БДПМ могут находиться результаты нескольких опросов, количество которых отображается в статусном регистре приёмного тракта.

Процесс циклического опроса можно остановить при помощи подачи команд «Разовый опрос» или «Остановить циклический опрос», которые повлекут переход в режим разовых опросов. При выполнении команды «Разовый опрос» выполняется опрос состояния каналов ввода в режиме разовых опросов. При получении команды «Остановить циклический опрос» приёмный тракт адаптера переходит в режим ожидания иных команд.

Команда «Запретить ввод» переводит приёмный тракт адаптера в исходное заблокированное состояние, при котором сохраняются параметры настройки, но блокируются все каналы ввода и соответствующие им прерывания. При запрещённом вводе команды разового и циклического опроса адаптером игнорируются.

После подачи команды «Разрешить ввод» при запрещённой работе приёмного тракта происходит переход в режим разовых опросов. Подача команды «Разрешить ввод» во время работы в режимах циклического или разового опросов не оказывает воздействия.

Команда «Сброс адаптера» переводит в исходное состояние все функциональные блоки адаптера и их регистры за исключением блока сопряжения с шиной VME.

Адаптер контроля и управления предназначен для обработки информации с контролируемых точек БЦВК и управления тепловым режимом.

Взаимодействие адаптера контроля и управления (АКУ) с процессорными модулями в составе БЦВК производится по линиям дискретного ввода-вывода общего назначения.

Для выполнения заложенных в него функций АКУ имеет следующие функциональные блоки:

- блок обмена данными;
- блок каналов контроля состояния;
- блок каналов управления;
- согласующие элементы и цепи гальванической развязки.

АКУ обеспечивает:

- работу каналов разовых команд сервисных функций;
- гальваническую развязку каналов последовательных интерфейсов RS-232C, реализованных на вычислительных модулях БЦВМ.

В АКУ предусмотрена возможность программной настройки режимов работы.

АКУ обменивается управляющей информацией и данными с процессорными модулями изделия при помощи четырех линий дискретного ввода-вывода, в каждом из каналов. Каждый из каналов используется для взаимодействия с одним процессорным модулем.

3.2 Организация систем информационного обмена и требования к стойкости каналов передачи данных современных БЦВК

При выборе организации перспективной бортовой сетевой магистрали, которая рассчитана на эксплуатацию в "жестких" условиях реального времени, необходимо принимать во внимание следующие требования к ее функциональным характеристикам, обеспечивающих:

- нечувствительность в широком диапазоне к длинам соединений при передаче информации, а также отказоустойчивость и ремонтпригодность применяемых топологий физической среды;

- поддержку последовательных и параллельных физических систем связей, реализуемых с малым числом физических контактных соединений;
- поддержку различных топологий физической среды на основе распределенных и централизованных переключательных модулей, электрических и оптических реализации физической среды;
- поддержку специализированных ("жестких") условий эксплуатации системы;
- поддержку высокой технической скорости передачи данных и малого времени задержки;
- парадигмы передачи сообщений сетевого характера и передачи данных в общей распределенной между процессорными модулями памяти;
- масштабируемость и наращиваемость вычислительных характеристик в системах;
- поддержку функционирования в режиме реального времени;
- формирования изохронных видеоизображений;
- низкую стоимость/эффективность масштабируемых вычислительных средств в широком смысле слова.

В настоящее время для построения БЦВК (в том числе и с архитектурой ИВС) используются следующие связанные платформы, которые образуют систему информационного обмена [97, 98]:

- VMEbus, с возможным переходом на CPCIbus (CompactPCI) в качестве внутрисистемных межмодульных магистралей;
- последовательные цифровые интерфейсы по ГОСТ 26765.52-87 (аналог стандарта MIL-STD-1553B) и ГОСТ Р 50832-95 (аналог технологии передачи данных STANAG 3910) в качестве межсистемных с последующим переходом в перспективе к интерфейсам, использующим сетевые принципы информационного обмена (типа FC-AE, AS4074, AS4075 и т.д.);
- SCSI в качестве системного периферийного интерфейса;

–STANAG 3350 с возможным переходом на цифровую коммутационную технологию обмена "точка-точка" FC-SF (или Fire wire);

–RS-XXX (-232C, -422, -423, -449, -485) в качестве технологических интерфейсов.

Для объединения всех элементов современных БЦВК используются стандартные цифровые соединения, основанные на специализированных технологиях информационного обмена с использованием централизованного или децентрализованного методов доступа (MIL-STD-1553B, STANAG3910, AS4074, AS4075).

Архитектурная организации управления современными БЦВК включает четыре иерархических уровня:

- общесистемный уровень;
- уровень взаимосвязанных функциональных подсистем;
- уровень датчиков и исполнительных органов.

Регламентируемые концепции информационной архитектуры задают уровни и характер информационных связей (интерфейсов) между общими модулями внутри БЦВК (внутриобъектовые межсистемные связи):

- высокоскоростные локальные информационные связи между информационными датчиками и модулями специализированных процессоров;
- межмодульный (региональный) интерфейс, обеспечивающий соединения общих модулей между собой в пределах одной функциональной подсистемы или элемента обработки информации БЦВК;
- межсистемные (глобальные внутриобъектовые) соединения, обеспечивающие взаимные связи в пределах объекта [97, 98].

По данному принципу построена архитектура рассматриваемого БЦВК (см. раздел 3.1). В состав БЦВК входит Модуль конвертера среды передачи Gigabit Ethernet. Структурная схема модуля приведена на рисунке 3.4.

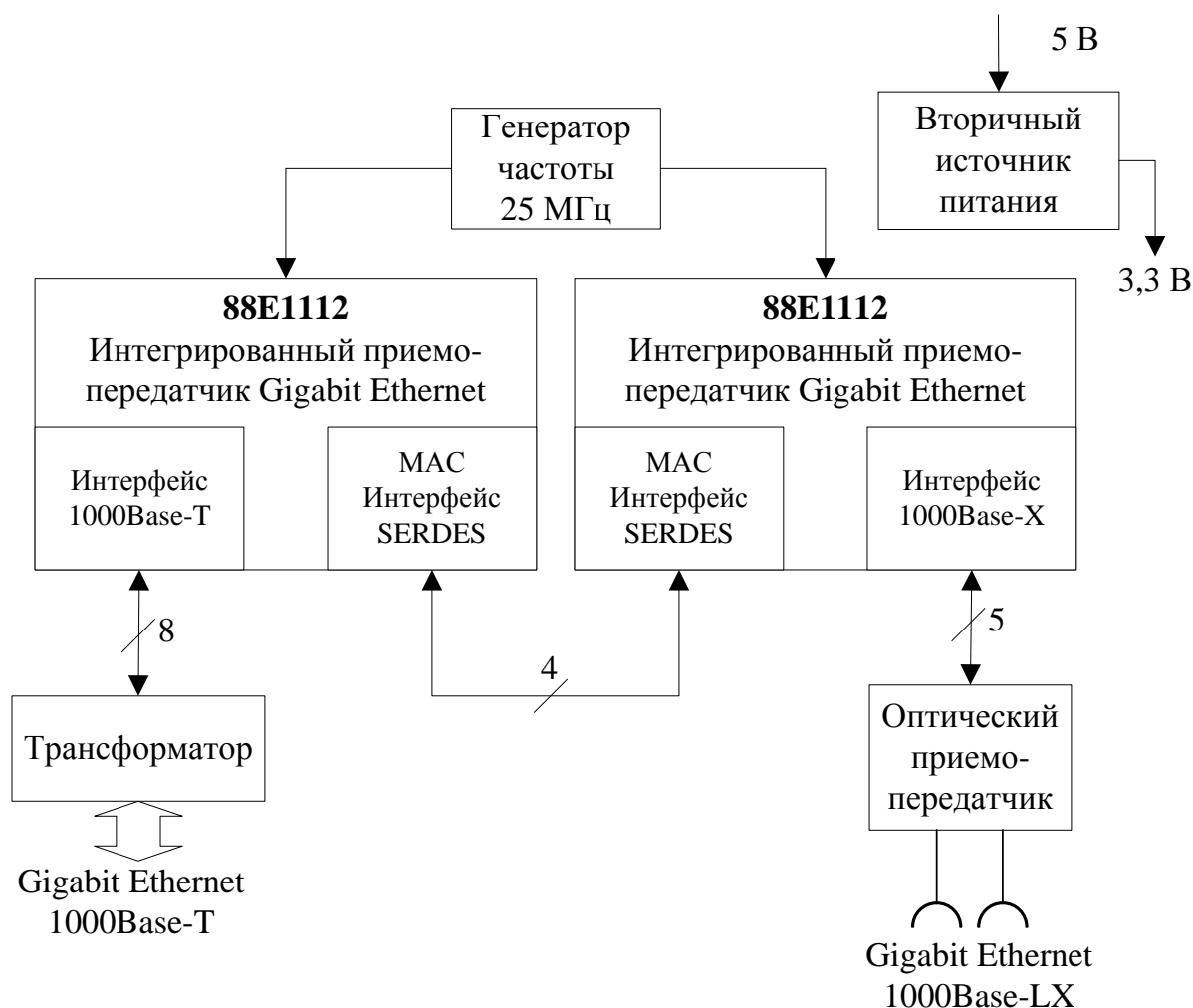


Рисунок 3.4 - Структурная схема модуля конвертера среды передачи Gigabit Ethernet

В состав модуля входит: два интегрированных приёмо-передатчика Gigabit Ethernet, трансформатор, модуль оптического приемопередатчика, генератор, вторичный источник питания.

Приемо-передатчик Gigabit Ethernet осуществляет преобразование электрического сигнала, полученного по двум витым парам в сигналы последовательного гигабитного интерфейса Serdes. В качестве приемо-передатчика используется микросхема 88E1112.

Микросхема 8E1112 использует современную аналого-цифровую обработку сигналов, что позволяет выполнять коррекцию сигнала, нейтрализацию эха и переходных помех, регенерацию данных, исправление ошибок на гигабитной скоро-

сти передачи данных. Микросхема обеспечивает устойчивую работу в шумных средах при малой мощности потребления энергии.

Структурная схема микросхемы 8E1112 приведена на рисунке 3.5. Микросхема 8E1112 содержит три различных интерфейса для приёма и передачи пакетов.

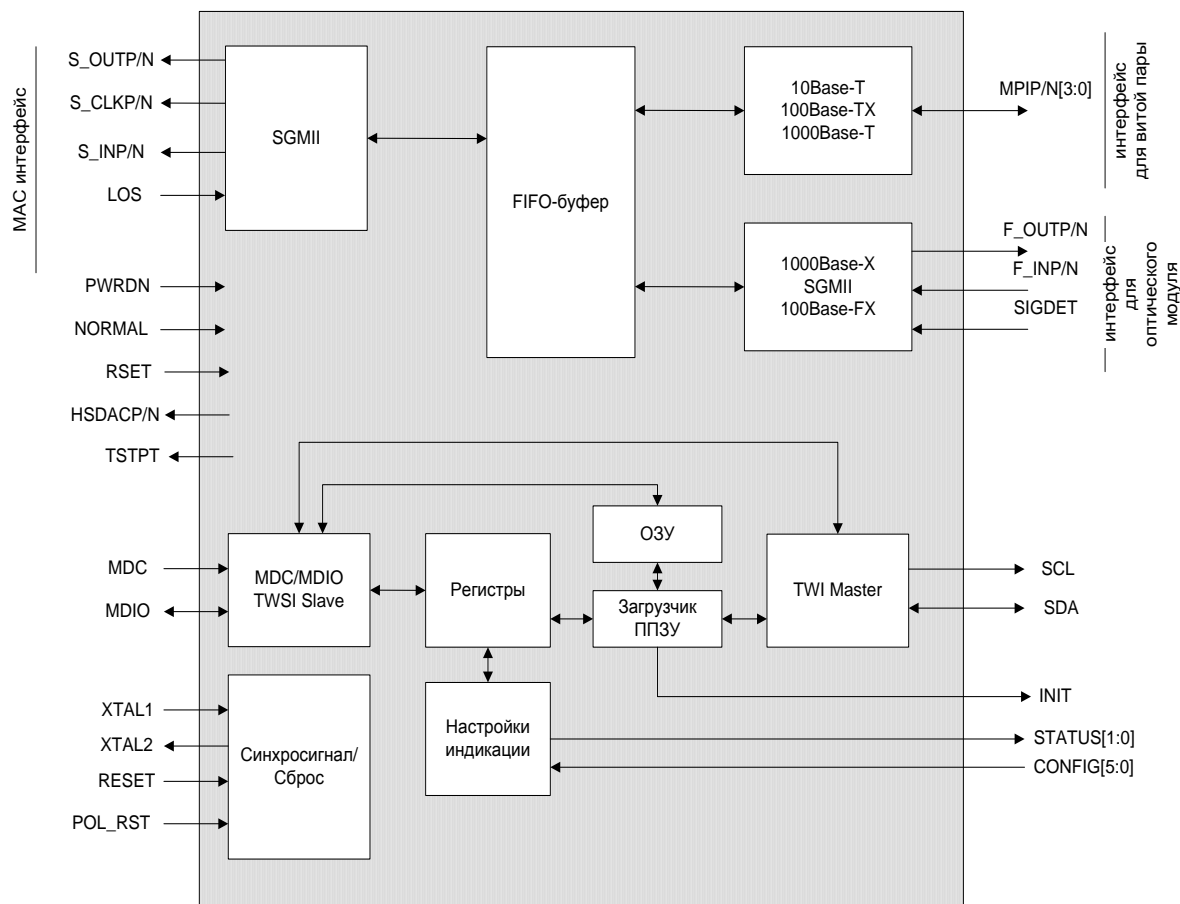


Рисунок 3.5 - Структурная схема микросхемы 88E1112

Оптический интерфейс

Оптический интерфейс выходит на выводы F_OUTP/N, F_INP/N и SIGDET.

Интерфейс работает в трёх режимах:

- 1000BASE-X.
- 100BASE-FX,
- SGMII (Последовательный Гигабитный Независимый от среды Интерфейс).

Электрический интерфейс

Электрический интерфейс выходит на выводы MDIP/N[3 0], которые подключаются к трансформатору, обеспечивая режимы работы 1000BASE-T, 100BASE-TX и 10BASE-T. Трансформатор – четырёх секционный на все четыре канала витой пары.

Поддерживается автоматическая настройка на соединение с абонентом «прямым» кабелем (режим MDI) и «перевернутым» кабелем (режим MDIX).

MAC Интерфейс

MAC интерфейс выходит на выводы S_OUTP/N, S_INP/N, S_CLKP/N и LOS. Обычно этот интерфейс соединяется с SGMII или SERDES MAC.

Интерфейс работает в трёх режимах:

- SGMII,
- GBIC,
- Media Converter (Конвертор среды).

MAC интерфейс работает в режиме конвертора среды, позволяющего подключить к нему модуль оптического приемопередатчика.

Микросхема 88E1112 с помощью встроенного FIFO-буфера регулирует синхронизацию приёмника и передатчика, чтобы урегулировать частотные различия между синхроимпульсами интерфейса MAC и внешней среды (электрический интерфейс). Глубина FIFO-буфера приёмника и передатчика, может быть независимо запрограммирована.

Электрический интерфейс приемо-передатчика Gigabit Ethernet подключается к трансформатору, обеспечивая режимы работы 1000BASE-T.

Оптический интерфейс работает в режиме 1000BASE-X и двумя дифференциальными парами подключается к оптическому приёмопередатчику.

Данные, полученные с оптического приемника, синхронизируются сигналом, выделяемым из входного сигнала. Данные для оптического передатчика синхронизируются сигналом, полученным от внешнего генератора.

Модуль коммутатора Gigabit Ethernet

Модуль коммутатора на базе технологии Gigabit Ethernet (GE) (далее коммутатор) предназначен для коммутации пакетов данных и организации

локальных бортовых информационных сетей гигабитной производительности.

Характеристики портов коммутатора:

- 3 порта соответствуют технологии Ethernet 1000Base-T;
- 5 портов соответствуют технологии Ethernet 1000Base-LX;
- один порт в зависимости от конфигурации соответствует технологии Ethernet 1000Base-LX или Ethernet 1000Base-T;
- десятый порт предназначен для подключения платы управления;
- максимальная дальность передачи по волоконно-оптической линии - 5 км без ретрансляции;
- режимы работы: дуплекс;
- автоматическая настройка на соединение с абонентом «прямым» кабелем (режим MDI) и «перевернутым» кабелем (режим MDIX);
- индикация режимов работы порта.

Модуль коммутатора построен на основе семейства микросхем фирмы Marvell: 88E6185 и 88E1112.

Микросхема 88E6185 фирмы MARWELL является 10-портовым коммутатором 10/100/1000 битного Ethernet. Все порты имеют MAC интерфейс SERDES, 8-10 порты могут непосредственно работать на оптический приемопередатчик без микросхем физического уровня, 10-й порт дополнительно имеет интерфейс GMI/MI, через который подсоединяется модуль управления коммутатором.

Микросхема 88E1112 – микросхема одноканального приемопередатчика. Преобразовывает MAC интерфейс SERDES в Ethernet 1000Base-T или Ethernet 1000Base-LX в зависимости от конфигурации микросхемы (задается внешними сопротивлениями).

Внешний генератор 25 МГц синхронизирует работу всех микросхем.

Светодиодные индикаторы указывают факт установки связи каждого порта с абонентом, приём/передача данных для портов 1000Base-T, а также индикатор подачи питания.

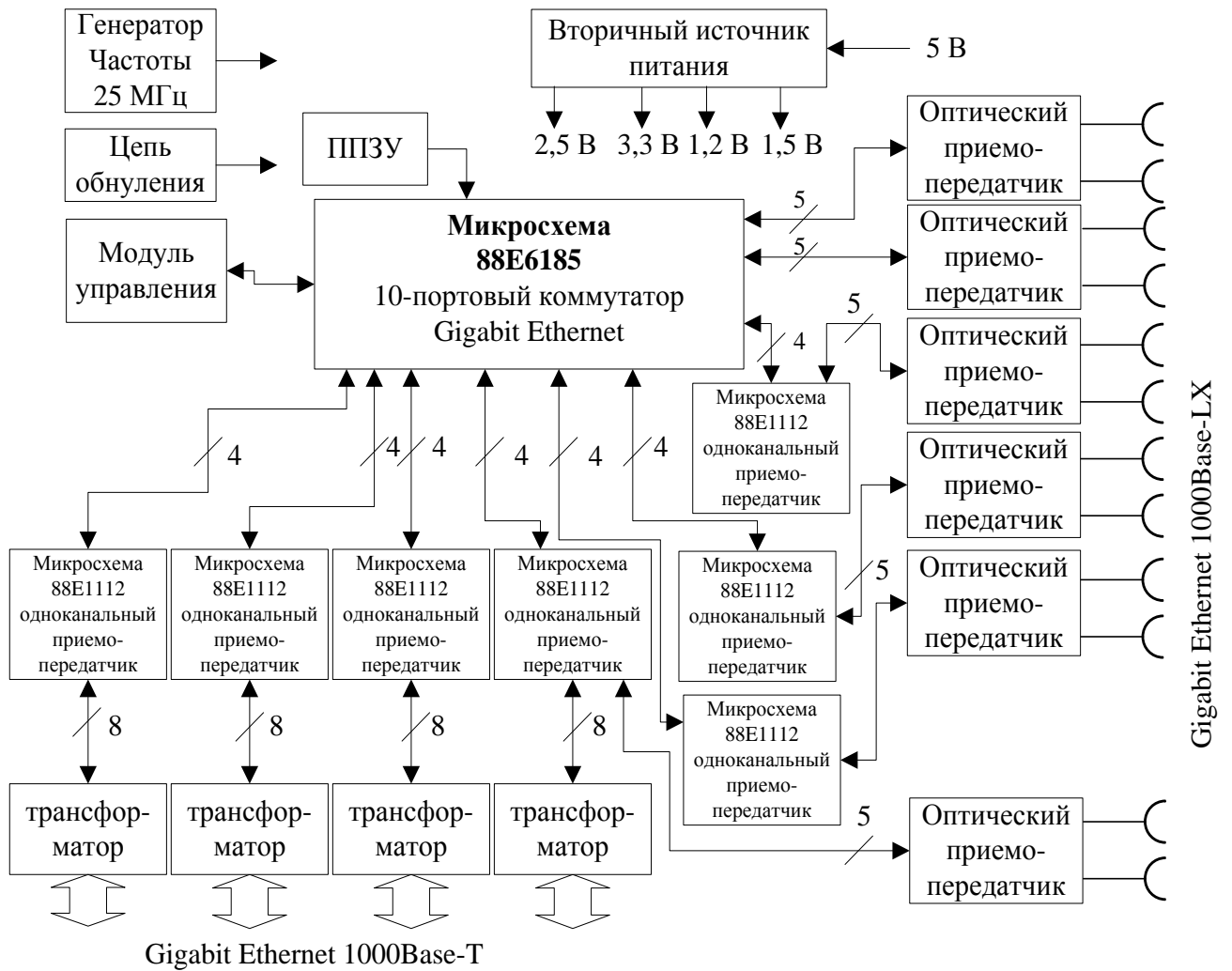


Рисунок 3.6 - Структурная схема модуля коммутатора Gigabit Ethernet

Работа БЦВМ в составе БЦВК

БЦВМ в бортовом комплексе подключается через внешние соединители согласно схеме подключения, приведенной на рисунках 3.7, 3.8, 3.9.

УОВ выполняет функции унифицированного отказоустойчивого вычислителя и предназначено для обеспечения решения высокопроизводительных задач на трех процессорных модулях, с учетом заданного коэффициента отказоустойчивости.

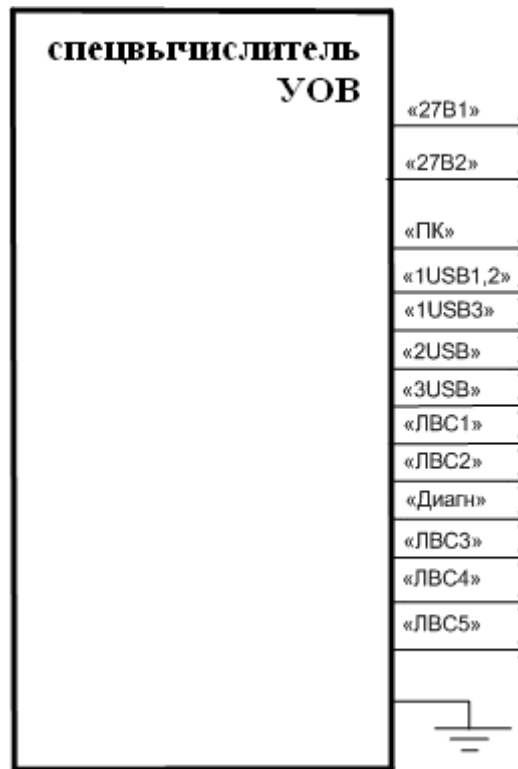


Рисунок 3.7 - Схема подключения отказоустойчивого спецвычислителя

УОВ построено на принципах кластерной организации. К УОВ подключаются две сети электропитания через разъемы «+27B1», «+27B2» для обеспечения гарантированного электропитания. С помощью двух разъемов «1ЛВС» и «2ЛВС» УОВ подключается к трем оптическим каналам высокопроизводительной передачи данных по технологии Gigabit Ethernet 1000-FL. Для обеспечения сетевого проводного доступа используются разъемы «ЛВС3», «ЛВС4» и «ЛВС5». Организация рабочего места оператора на борту осуществляется методом подключения видеомонитора с интерфейсом DVI к разъему «ПК», а клавиатуры и манипулятора к разъему «USB1-1,2». Для подключения дополнительных внешних устройств, а также внешней флэш-памяти, имеющих интерфейс USB 2.0, используются разъемы «USB1-3», «USB2» и «USB3». Разъем «Диагн» предназначен для расширения функций УОВ при организации рабочего места оператора.

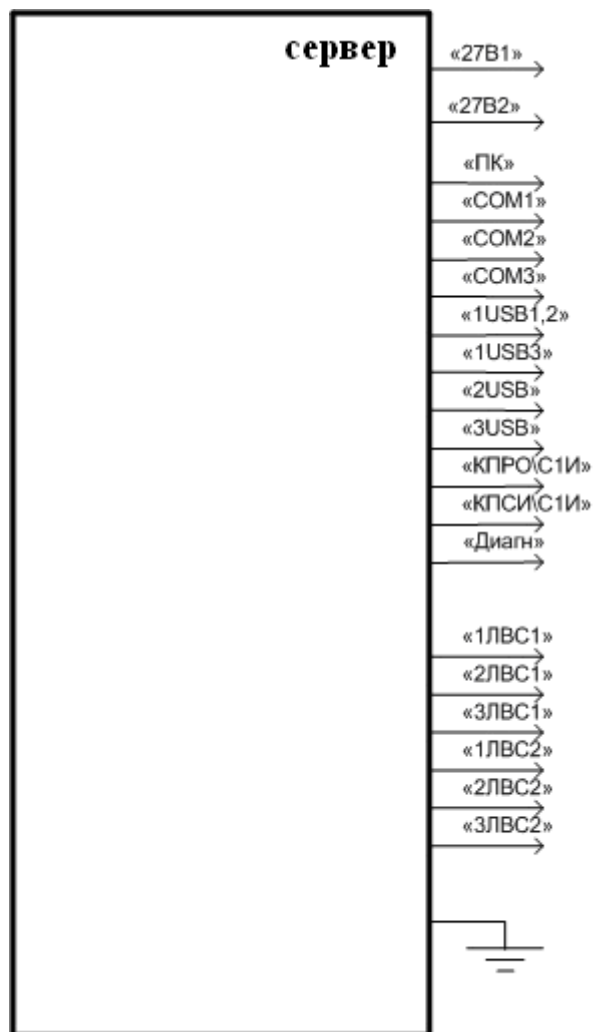


Рисунок 3.8 - Схема подключения модуля сервера
с оптическим коммутатором

Модуль выполняет функции сервера с оптическим коммутатором и предназначено для обеспечения сетевой организации функционирования вычислительных устройств, входящих в состав бортового вычислительного комплекса. Назначение разъемов «+27B1», «+27B2», «ПК», «1USB1,2», «1USB3», «2USB» и «3USB», «Диагн» было изложено выше. Разъемы «1ЛВС1», «1ЛВС2», «1ЛВС3», обеспечивают подключение по основному коммутатору к серверу вычислителей комплекса. Разъемы «2ЛВС1», «2ЛВС2», «2ЛВС3», обеспечивают подключение по резервному коммутатору к серверу вычислителей комплекса. Разъемы «1COM1», «2COM1», «3COM1», обеспечивают подключение к каждому процессорному модулю внешних устройств, имеющих интерфейс RS-232. Разъемы

«КПРО\С1И», «КПСИ\С1И» обеспечивают подключение к серверу внешних устройств, имеющих интерфейсы параллельной и последовательной передачи информации по ГОСТ 18977 и ГОСТ 27232-87.

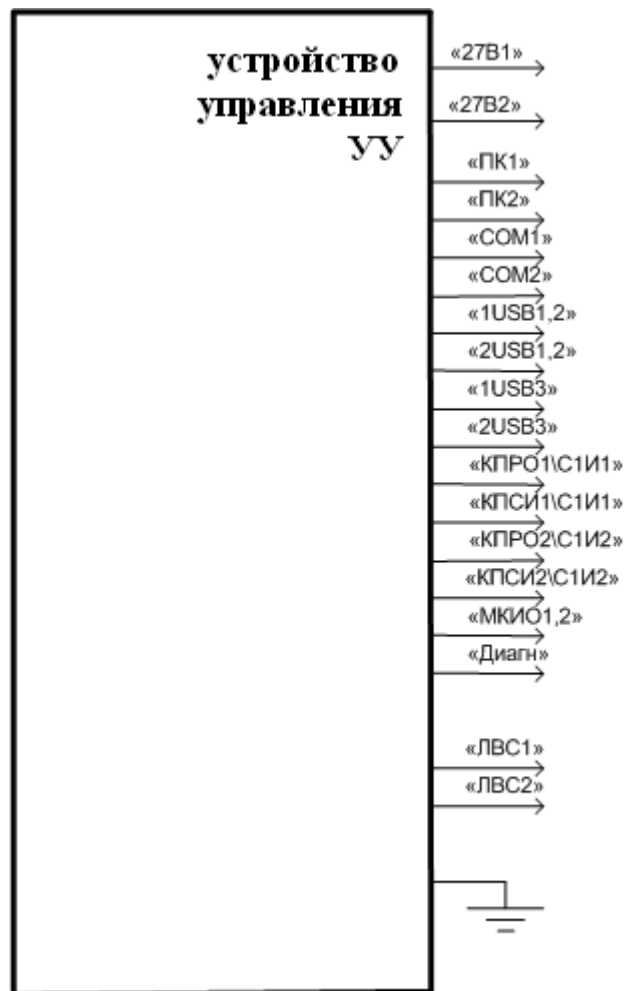


Рисунок 3.9 - Схема подключения устройства управления

УУ предназначено для ввода-вывода информации в специальные внешние устройства, а также для визуализации графической и текстовой информации.

Требования к стойкости каналов передачи данных БЦВК

Увеличение скорости передачи данных заставляет отказаться от единого физического моноканала и перейти к использованию локальных физических связей типа "точка-к-точке", а также к использованию синхронных принципов передачи данных для достижения минимальных задержек во времени и приемлемых параметров передаваемых сигналов в данной среде [97, 98].

Основное требование к отказоустойчивости связей состоит в том, что отказы соединений обязаны иметь высокий шанс обнаружения и локализации, при этом ни один (даже единственный) отказ не должен отключать полностью все соединение. Все это требует введения дополнительных избыточных связей и организации парирования отказов. Сетевая магистраль должна иметь возможность выполнять простые процедуры изменения состава объединенных функциональных узлов с помощью их подключения или отключения.

Одни типы связей, которые используются для соединений в системах с распределенной памятью, должны иметь скорость передачи данных в несколько Гбит/с - для перспективных технологий процессоров. Другие же типы связи, которые используются для обработки видеосигналов, должны поддерживать скорость передачи не менее 1 Гбит/с. Следовательно, унифицированной сети необходимо эффективно адаптироваться к изменениям требований скоростей передачи данных.

Сетевая магистраль также обязана передавать данные с маленькими задержками для того, чтобы обеспечить предсказуемость откликов, что важно в режиме реального времени. Для образования изображений в реальном масштабе времени перспективной сетевой магистрали необходимо обеспечивать небольшие задержки и при "строгих" ограничениях на максимально допустимое время передачи данных. Небольшие задержки нужны как в системах с распределенной памятью, так и в системах передачи сообщений, которые используют одну общую сеть для всех потоков информации по контролю и управлению, а также потоку данных, как того требует унифицированный протокол связей. В системах передачи сообщений длительное время задержки в связях может легко приводить к очень плохой эффективности функционирования параллельных процессоров.

Обеспечение своевременной доставки высокоприоритетных команд и данных управления в случае их смешения в едином потоке с большими трафиками низкоприоритетных сообщений можно выполнить при помощи следующих подходов:

- использования единственных и неповторимых топологий связей

- определения физической топологии и характеристик, которые обеспечивают малую суммарную информационную загруженность системы информационного обмена;
- разных способов планирования передачи данных.

Анализ огромного спектра сетевых архитектур информационного обмена в качестве перспективных кандидатов на применения в бортовой сети показал, что наилучшими кандидатами на роль сетевой магистрали остаются архитектуры передачи данных, используемые в локальных сетях на основе технологии Ethernet. Что требует разработки математической модели воздействия деструктивных ЭМИ на каналы передачи данных и управления БЦВК на основе технологии Ethernet.

3.3 Математическая модель воздействия СК ЭМИ на каналы передачи данных и управления БЦВК

Ранее было показано, что при анализе модели БЦВК необходимо уделять внимание каналам передачи данных, а именно, на основе технологии Ethernet [63-65]. Эти каналы обеспечивают требуемые характеристики и необходимую динамическую модификацию архитектуры бортового цифрового вычислительного комплекса (БЦВК) в целом при воздействии деструктивных ЭМИ.

Благодаря проведенному аналитическому исследованию можно сделать выводы, что на данный момент наиболее распространенной технологией на уровне доступа в бортовых сетях является Gigabit Ethernet и такие соответствующие кабельные спецификации:

1. 100Base-TX;
2. 1000Base-T;
3. 1000Base-LX.

Среда передачи, в большинстве случаев, это неэкранированная витая пара категорий 5е и 6. Сеть на основе оптоволокна позволяет соединить компьютеры со скоростью до 10 Гб/с не беспокоясь об ограничении расстояний и проблемах связанных с магнитными наводками от других линий. Эти сети имеют:

1. Большую пропускную способность.
2. Меньшее затухание сигналов на единицу длины.
3. Меньший вес.
4. Устойчивость к электромагнитным излучениям.

Исходя из данных фактов, можно сделать заключение, что при анализе механизмов воздействия СК ЭМИ на процесс передачи данных в сетях Ethernet необходимо в первую очередь рассматривать спецификации Ethernet, в которых используется неэкранированная витая пара как потенциальный объект воздействия.

Исходя из этого, предметом исследования были выбраны механизмы искажения данных в сетях Ethernet, которые функционируют по кабельным линиям связи вследствие формирования периодически повторяющихся импульсных помех при воздействии СК ЭМИ [63-65].

3.3.1 Особенности построения высокоскоростных бортовых сетей на основе технологии Gigabit Ethernet

Основная идея разработчиков стандарта Gigabit Ethernet состояла в том, чтобы максимально сохранить идею классической технологии Ethernet при достижении битовой скорости в 1000 Мбит/с. Технология Gigabit Ethernet описывает нижние уровни эталонной модели ISO/OSI:

1. Канальный, который обеспечивает создание, передачу и прием кадров данных.
2. Физический, который получает пакеты данных от вышележащего канального уровня и преобразует их в оптические или электрические сигналы, соответствующие 0 и 1 бинарного потока.

Реализация канального уровня осуществляется посредством поддержки подуровней LLC и MAC. В задачи LLC и MAC входит:

1. Преобразование данных, поступающих с вышележащего (сетевого) уровня в Ethernet-кадры.
2. Планирование передачи и приема.

MAC-уровень получает и отправляет пакеты через независимый от среды передачи интерфейс (MII, GMII, XGMII) [63-65]. Данные интерфейсы производят стандартное подключение устройств, совместимых с Ethernet MAC, к любому из физических уровней, определяемому спецификацией Ethernet, поэтому необходимо подробно рассмотреть спецификацию Gigabit Ethernet (1000Base-T).

Из спецификации 1000Base-T очевидно, что данные, поступающие от уровня MAC, разбиваются на контрольные символы и символы данных.

На подуровне PCS для кодирования контрольных символов используется алгоритм 8bit-1 Quinary quarter (кодирование 8B1Q4), который преобразует 8 бит в 4 пятеричных символа (Q4) [63-65], передаваемые в течение одного тактового сигнала (1Q4).

На подуровне PMA для кодирования группы кодов данных используется принцип четырехмерного пятиуровневого модулирования амплитуды импульса (4-dimensional 5 level pulse amplitude modulation – 4D-PAM5).

Следовательно, при передаче данных по каналу 1000Base-T представляет собой чередование последовательности пятиуровневых символов, каждый из которых передается по отдельной паре кабеля. Каждый из таких символов кодируется одним из разрешенных уровней кодового напряжения в пределах одного такта изменения сигнала (8 нс).

Очень вероятно и опасно воздействие СК ЭМИ в бортовых сетях доступа на участках «вычислитель – вычислитель» и «вычислитель – коммутатор». С точки зрения построения технологии Ethernet на 1-м и 2-м уровнях модели ISO/OSI рассмотренные фрагменты идентичны, так как сетевые интерфейсы бортового вычислителя и коммутатора выполняют одни и те же действия по проверке целостности поступивших кадров.

Известно, что сети Ethernet, построенные с использованием витой пары в качестве физической среды передачи, очень чувствительны к внешним электромагнитным помехам, которые оказывают существенное влияние на передачу сигнала и приводят к возникновению ряда неисправностей кабельной системы [60]. При воздействии СК ЭМИ на линию связи по

кабелю распространяются периодически повторяющиеся импульсные помехи, которые по амплитуде больше или равны полезному электрическому сигналу Ethernet и приводят к искажению исходной последовательности символов. Пример наложения наведенных импульсных помех на электрические сигналы в кабеле для спецификации 100Base-TX представлен на рисунке 3.10.

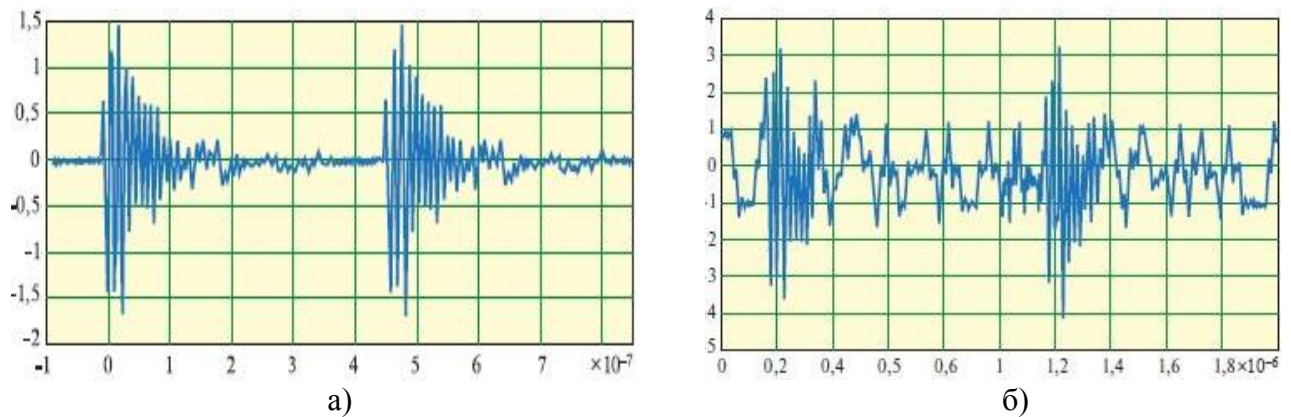


Рисунок 3.10 -Типовая форма наведенных импульсных помех в линии связи:

а) без передачи данных; б) при передаче данных (спецификация 100Base-TX)

Искаженная последовательность электрических символов поступает в сетевой адаптер или на порт активного сетевого оборудования, далее на микроконтроллер для преобразования в логические 0 и 1. При декодировании в микроконтроллере детектор интерпретирует искаженные символы, присваивая им некорректные значения (рисунок 3.11).

После формирования кадра и сравнения его длины с данными поля FCS происходит отбрасывание кадра, из-за чего последний не поступает на дальнейшую обработку. Из-за периодически повторяющейся помехи, число потерянных кадров возрастает в зависимости от частоты следования импульсов и времени воздействия помехи и приводит к снижению производительности сетей Ethernet [63].

После определения вероятности потери кадров можно установить количественную связь между этой вероятностью и параметрами периодически повторяющихся импульсных помех, возникающих в кабеле.

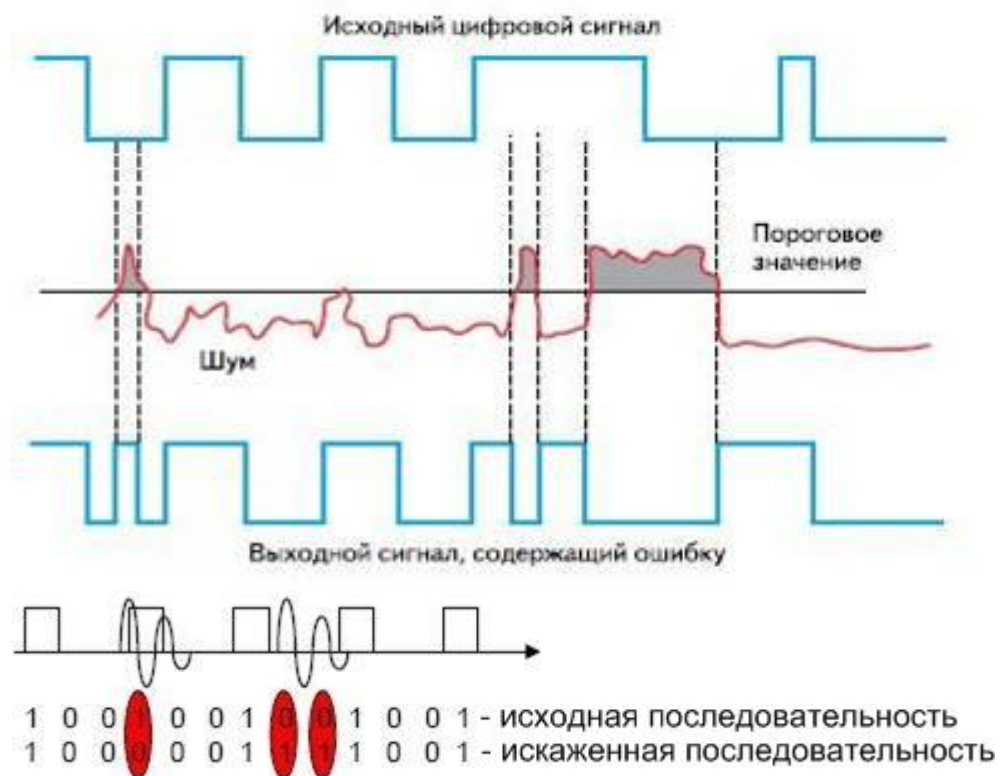


Рисунок 3.11 - Искажение исходного сигнала при воздействии помехи

Искаженные символы должны быть обнаружены микроконтроллером на физическом уровне при попытке декодировать поток данных и зафиксированы как параметр Symbol Error. В технологии Gigabit Ethernet приемное устройство пересчитывает контрольную сумму кадра и отслеживает, чтобы она соответствовала данным, помещенным в кадр передатчиком. Если сумма некорректна, не соответствует или пропущена полем FCS, то устройство сбрасывает кадры, фиксируя ошибку FCS (CRC) Error.

3.3.2 Анализ воздействия деструктивных ЭМИ на каналы передачи данных БЦВК на основе технологии Gigabit Ethernet

На физическом уровне технологии Gigabit Ethernet математическая модель предполагает описание основных логических операций.

Как объект воздействия рассмотрим фрагмент бортовой сети Ethernet, состоящий из двух вычислителей (УОВ) и линии связи – витой пары категории 5е (рисунок 3.12). Обобщение разработанного ниже расчетного аппарата на

другие вышеуказанные участки сети достаточно очевидно из-за идентичности сетевых интерфейсов [63, 66].

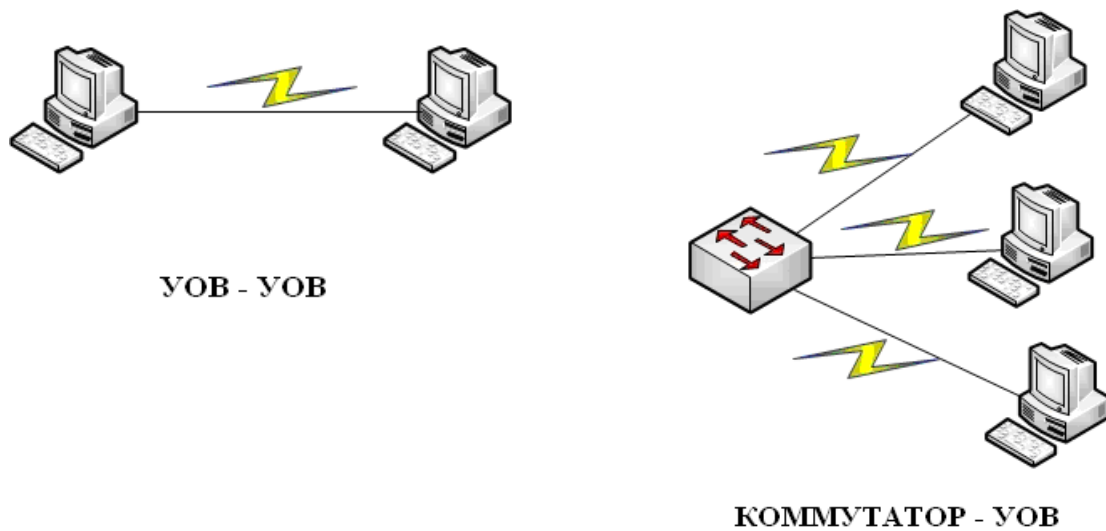


Рисунок 3.12 - Фрагмент сети Ethernet, подверженный воздействию СК ЭМИ

С помощью генератора СК ЭМИ осуществляется преднамеренное электромагнитное воздействие на неэкранированную витую пару с помощью емкостной связи. В результате этого воздействия возрастает число потерь, возникают ошибки при передаче данных и, следовательно, происходит снижение производительности сети.

На рисунке 3.13 представлена осциллограмма помехи $V(t)$, представляющая собой периодически повторяющуюся импульсную помеху в линии связи с частотой следования f и длительностью τ_p .

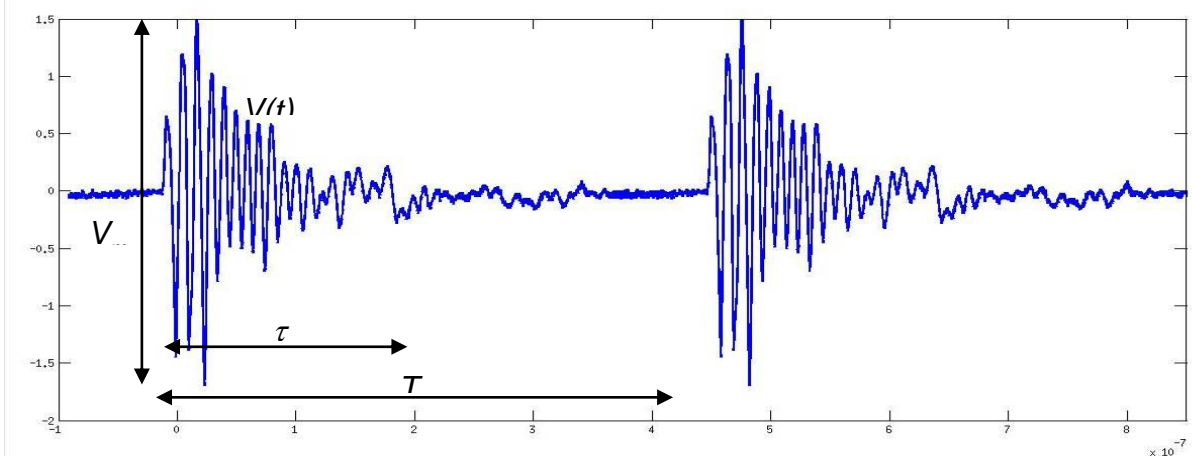


Рисунок 3.13 - Осциллограмма периодических импульсных помех, наведенных в линии связи

Рассмотрим математическую модель, связывающую параметры периодически повторяющейся импульсной помехи с вероятностью потери кадра Ploss, для рассмотренных спецификаций Gigabit Ethernet.

Для связи вероятности единичного сбоя P_e с параметрами периодически повторяющейся импульсной помехи, наведенной в кабеле, допустимо преобразовать напряжение $V(t)$ в эквивалентное напряжение гауссова шума V_{ng} . Данная задача рассматривалась в основополагающей работе Шеннона по теории информации, в которой был изложен общий теоретический подход к получению значения V_{ng} , основанный на концепции информационной энтропии. Замена детерминированной периодически повторяющейся импульсной помехи $V(t)$ эквивалентным гауссовским шумом производится с условием равенства энергий этих помех. Среднеквадратичное напряжение на каждом символьном интервале рассчитывается согласно схеме декодирования, реализованной в сетевых интерфейсах, для принятия решения о сопоставлении электрическому сигналу последовательности информационных символов в микросхеме-детекторе. Таким образом, не амплитуда, а энергия является ключевой величиной.

Стоит отметить, что периодически повторяющаяся импульсная помеха заменяется эквивалентным гауссовым шумом не полностью, а только на участке, равном длительности импульса.

Начнем оценку значения V_{ng} с усреднения формулы (3.1).

$$V_{ng} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T V^2(t) dt} = V_m \cdot \sqrt{f \cdot K} \quad (3.1)$$

V_{ng} – среднеквадратичное значение амплитуды гауссового шума;

V_m – амплитуда импульса помехи;

f – частота следования импульсов помехи;

$$K = \int_0^{\tau_p} g^2(t) dt$$

K – энергия импульса;

τ_p – длительность импульса помехи;

$$g(t) = \frac{V(t)}{V_m}$$

$g(t)$ – форма импульса помехи;

$V(t)$ – амплитуда импульса помехи в момент времени t .

$$V_{ng} = V_m \sqrt{f \tau_p}$$

Вероятность искажения единичного элемента можно сопоставить с устоявшимся параметром BER (bit error ratio) – коэффициентом ошибок по символам, использующимся для характеристики цифровых потоков плезиохронной (PDH) и синхронной (SDH) иерархии [63, 65, 66].

Отличие сетей Gigabit Ethernet от сетей SDH и PDH заключается в асинхронном пакетном режиме передачи данных. Большая часть устройств канального уровня отбрасывает принимаемые кадры при несовпадении рассчитанной контрольной суммы с данными в поле FCS или при искажении служебных полей кадра. Это означает, что единственный ошибочный бит при передаче кадра приводит к отбрасыванию всего кадра. Следовательно, основной критерий качества услуг SONET/SDH–BER не подходит для Ethernet, так как используются схемы избыточного кодирования и скремблирования, поэтому далее будем оценивать вероятность неправильной передачи кадра данных P_{loss} .

Через предположение о том, что исходная (некодированная) последовательность бит является псевдослучайной с вероятностями появления нуля или единицы $1/2$ учитывается наличие скремблера.

Пусть кадр передаваемых данных состоит из N битов, а номинальная скорость передачи данных равна R .

Обозначим m – число символов в пакете длиной N , подверженных воздействию, $\frac{\tau}{1/R}$ – количество символов в кадре, искаженных в пределах длительности одного импульса помехи. Очевидно,

$$m = f \frac{N}{R} \cdot \frac{\tau}{1/R} = f \tau N = DN = \frac{N}{S}, \quad (3.2)$$

где D – коэффициент заполнения импульса, S – скважность.

Из выражения (3.2) видно, что число символов, которые подвержены воздействию, не зависит от символьной скорости R .

Вероятность, что подверженный воздействию бит информации будет воспринят правильно, равна $Q = 1 - P_e$, а вероятность неправильной передачи кадра данных в результате единичного сбоя будет равна:

$$P_{loss} = 1 - \left(1 - P_e(V_{ng}) \right)^m, \quad (3.3)$$

где P_e – вероятность единичного сбоя; m – число символов в кадре, подвергаемых воздействию помехи.

Из соотношения (3.3) следует, что вероятность неправильной передачи кадра данных возрастает при увеличении вероятности единичного сбоя, которая, в свою очередь, растет с уменьшением отношения «сигнал – шум», т.е. с увеличением V_{ng} . Вероятность P_{loss} также возрастает с увеличением частоты повторения импульсной помехи [64, 66].

В настоящей работе рассматривается обобщение расчетного аппарата на случай более сложных методов кодирования, используемых в современных высокоскоростных сетях Gigabit Ethernet.

3.3.3 Математическая модель потерь кадров в сетях Gigabit Ethernet при воздействии СК ЭМИ

На канальном уровне согласно спецификации IEEE 802.3ab осуществляется детектирование кадров, содержащих ошибку, путем проверки циклического избыточного кода. Следовательно, искажение хотя бы одного символа служебных полей или поля данных ведет к отбрасыванию кадра. Механизмы деструктивного воздействия в сетях Gigabit Ethernet исследуются с учетом ряда особенностей, которые присущи данной спецификации.

В качестве иллюстрации возможных случаев искажения единичных символов рассмотрим модель кода РАМ-5.

Имеется последовательность символов, каждый элемент которой является одним из пяти символов «-2», «-1», «0», «+1», «+2», что соответствует уровням напряжения -1 ; $-0,5$; 0 ; $+0,5$; $+1$ В, в связи с использованием согласующего трансформатора с коэффициентом 1:2. Также заданы уровни $-a$, a и $-b$, b , соответствующие пороговым уровням напряжений, используемых при определении каждого символа соответственно.

В контроллере Gigabit Ethernet сетевого интерфейса декодирование принятого уровня напряжения осуществляется по алгоритму:

- -1 : если напряжение U (В) лежит в интервале $-\infty > U > -b$;
- $-0,5$: если напряжение U (В) лежит в интервале $-b > U > -a$;
- 0 : если напряжение U (В) лежит в интервале $a > U > -a$;
- $0,5$: если напряжение U (В) лежит в интервале $b > U > a$;
- 1 : если напряжение U (В) лежит в интервале $\infty > U > b$.

При воздействии СК ЭМИ исходный сигнал подвергается искажающему воздействию аддитивной помехи в виде центрированного гауссова шума z , из-за чего, согласно модели РАМ-5-кодирования, возможны следующие комбинации искажения исходной последовательности символов, представленные ниже:

$$\begin{aligned}
 \text{"-1" может принять значения} & \left\{ \begin{aligned} & -1 \rightarrow -0,5 : 1-a > z > 1-b \\ & -1 \rightarrow 0 : 1+a > z > 1-a \\ & -1 \rightarrow 0,5 : 1+b > z > 1+a \\ & -1 \rightarrow 1 : z > 1+b \end{aligned} \right. \\
 \text{"-0,5" может принять значения} & \left\{ \begin{aligned} & -0,5 \rightarrow -1 : 0,5-a < z < 0,5-b \\ & -0,5 \rightarrow 0 : 0,5-b < z < 0,5-a \\ & -0,5 \rightarrow 0,5 : 0,5-a < z < 0,5+a \\ & -0,5 \rightarrow 1 : z > 0,5+b \end{aligned} \right.
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & \text{"0" может принять значения} \left\{ \begin{array}{l} 0 \rightarrow -1: z < -b \\ 0 \rightarrow -0,5: -b < z < -a \\ 0 \rightarrow 0,5: b > z > a \\ 0 \rightarrow 1: z > b \end{array} \right. \\
 & \text{"+0,5" может принять значения} \left\{ \begin{array}{l} 0,5 \rightarrow -1: -0,5 - a < z < -0,5 - b \\ 0,5 \rightarrow -0,5: a - 0,5 < z < -0,5 - a \\ 0,5 \rightarrow 0: b < z < a - 0,5 \\ 0,5 \rightarrow 1: z > b \end{array} \right. \\
 & \text{"+1" может принять значения} \left\{ \begin{array}{l} 1 \rightarrow -1: -1 - a < z < -1 - b \\ 1 \rightarrow -0,5: a - 1 < z < -1 - a \\ 1 \rightarrow 0: b - 1 < z < a - 1 \\ 1 \rightarrow 0,5: z < b - 1 \end{array} \right. .
 \end{aligned}$$

Определим вероятность появления напряжений -1 В, $-0,5$ В, 0 В, $+0,5$ В, $+1$ В с помощью экспериментальных методов.

Вероятность появления символов определялась с помощью экспериментальных методов. Пример обработки осциллограммы с помощью пакета MATLAB 2009b для удобства идентификации уровней сигналов « -1 », « $-0,5$ », « 0 », « $0,5$ », « 1 » и подсчитаны частоты появления каждого символа (рисунок 3.14).

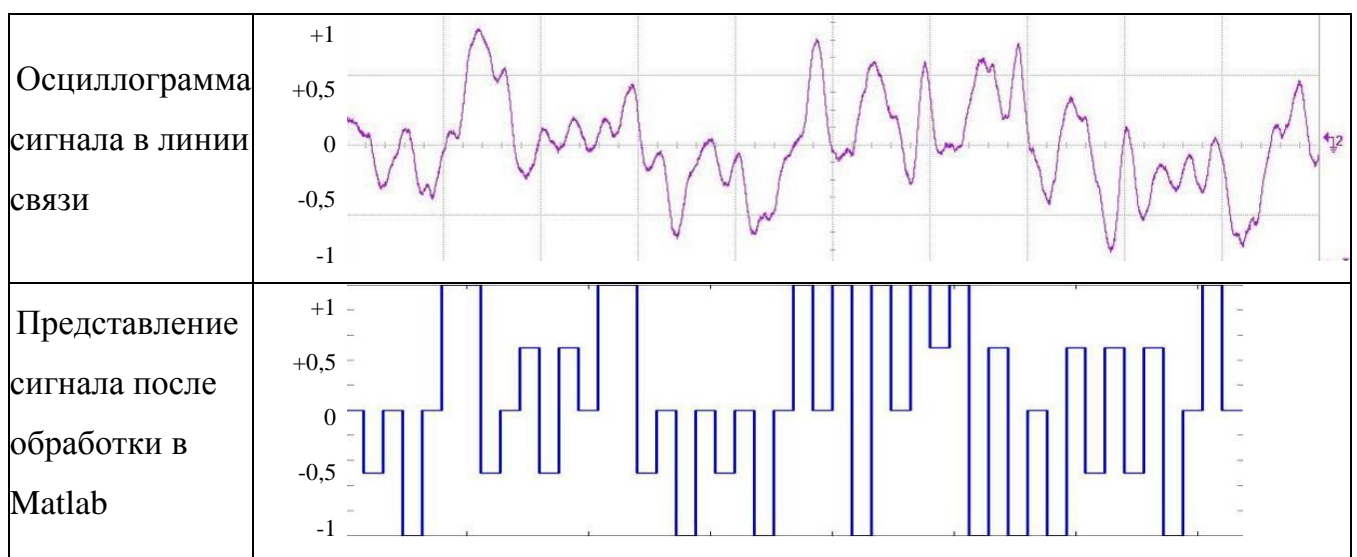


Рисунок 3.14 - Результат обработки фрагмента осциллограммы в пакете MATLAB для спецификации 1000Base-T

Обработка осциллограмм в MATLAB дает следующие значения вероятностей появления символов: $p(-1) = 0,1739$; $p(-0,5) = 0,2161$; $p(0) = 0,2150$; $p(0,5) = 0,1175$; $p(1) = 0,1775$.

Аналогично выражаем вероятность единичного сбоя P_e для спецификации 1000Base-T:

$$\begin{aligned}
 P_e(z) &= p_{(-1)} (\mu\{-0,5-a > z > 1-b\} + \mu\{1+a > z > 1-a\} + \mu\{1+b > z > 1+a\} + \mu\{z > 1+b\}) \\
 &+ p_{(-0,5)} (\mu\{0,5-a < z < 0,5-b\} + \mu\{0,5-b < z < 0,5-a\} + \mu\{0,5-a < z < 0,5+a\} + \mu\{z < 0,5+b\}) \\
 &+ p_0 (\mu\{z < -b\} + \mu\{-b < z < -a\} + \mu\{b > z > a\} + \mu\{z > b\}) \\
 &+ p_{0,5} (\mu\{-0,5-a < z < -0,5-b\} + \mu\{a-0,5 < z < -0,5-a\} + \mu\{b < z < a-0,5\} + \mu\{z > b\}) \\
 &+ p_1 (\mu\{-1-a < z < -1-b\} + \mu\{a-1 < z < -1-a\} + \mu\{b-1 < z < a-1\} + \mu\{z < b-1\}) = \\
 &= p_{(-1)} \mu\{z < -0,25\} + p_{(-0,5)} \mu\{z < -0,25\} + p_0 (\mu\{z < -0,25\} \\
 &+ \mu\{z > -0,25\}) + p_{(1)} \mu\{z > 0,25\} + p_{(0,5)} \mu\{z > 0,25\}
 \end{aligned}$$

Исходя из представления повторяющейся импульсной помехи в виде эквивалентного гауссова шума, вероятность того, что мгновенная амплитуда гауссова шума z примет значение, меньшее V , по соотношению

$$\mu\{z \leq V\} = \frac{1}{2} \left(1 + \operatorname{erf} \left(\frac{V}{\sqrt{2}V_g} \right) \right), \quad (3.4)$$

где $\operatorname{erf}(x)$ - функция ошибок.

$$\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt.$$

Выразим вероятность $\mu\{\dots\}$ через интеграл вероятности, подставляя значения $p(-1)$, $p(-0,5)$, $p(0)$, $p(0,5)$, $p(1)$ и задавая уровни $a = 0,25$; $-a = -0,25$; $b = 0,75$; $-b = -0,75$, получаем вероятность искажения единичного символа

$$P_e = 0,2 \left(4 - \operatorname{erf} \left(\frac{1,75}{\sqrt{2}V_g} \right) - \operatorname{erf} \left(\frac{0,75}{\sqrt{2}V_g} \right) - \operatorname{erf} \left(\frac{0,25}{\sqrt{2}V_g} \right) - \operatorname{erf} \left(\frac{1,25}{\sqrt{2}V_g} \right) \right). \quad (3.5)$$

Подставляя полученные значения в (3.3), окончательно получаем

$$P_{\text{loss}} = 1 - \left(\frac{1 + \operatorname{erf} \left(\frac{1,75}{V_m \sqrt{f \tau_p}} \right) + \operatorname{erf} \left(\frac{1,25}{V_m \sqrt{f \tau_p}} \right) + \operatorname{erf} \left(\frac{0,75}{V_m \sqrt{f \tau_p}} \right) + \operatorname{erf} \left(\frac{0,25}{V_m \sqrt{f \tau_p}} \right)}{5} \right)^m \quad (3.6)$$

Отдельно остановимся на учете различной длины кадра в мультисервисных сетях Ethernet.

Отдельно рассмотрим, как осуществляется учет различной длины кадра в мультисервисных сетях Ethernet

Предположим, что длины кадров распределены согласно вероятностному распределению Парето [66, 67] с параметрами X_m и k . Распределение Парето – одностороннее, «с тяжелым хвостом». Плотность вероятности убывает по показательному закону

$$\left(\frac{X_m}{X} \right)^k \frac{kX_m}{k-1}, k > 1 \quad (3.7)$$

Обозначим теперь N_{packet} – среднюю длину кадра, а N_{pause} – среднюю длину паузы – межкадрового интервала. Проведем оценку по принципу максимального правдоподобия, то есть формулу (3.5) оставим прежними, но значение длины кадра, которая в них входит, подберем так, чтобы $P_{\text{loss}}(\tilde{N}) - P_{\text{loss}}(\bar{N}) \rightarrow 0$.

В результате вычислений самым близким значением оказалась средняя длина кадра. Следовательно, формула для числа символов, подверженных воздействию, для трафика, в котором длины кадров распределены по закону Парето, будет следующей

$$m = D \bar{N}_{\text{packet}} \cdot \frac{\bar{N}_{\text{packet}}}{\bar{N}_{\text{packet}} + \bar{N}_{\text{pause}}} = D \frac{\bar{N}_{\text{packet}}^2}{\bar{N}_{\text{packet}} + \bar{N}_{\text{pause}}} \quad (3.8)$$

Видно, что отличие от формулы (3.2) состоит только в том, что вместо длины кадра здесь стоит эффективная длина кадра, определяемая равенством

$$N_{effect} = \frac{\bar{N}_{packet}^2}{\bar{N}_{packet} + \bar{N}_{pause}} \quad (3.9)$$

Следовательно, учет пауз и реального недетерминированного трафика сводится к изменению длины кадра, поэтому далее этот вариант в работе не рассматривается.

3.4 Математическая модель взаимодействия СК ЭМИ с универсальными вычислителями контура управления БЦВК

3.4.1 Исследование воздействия сверхкоротких электромагнитных импульсов на универсальные вычислители БЦВМ

В работах [69, 84, 85] показано, что уровни СК ЭМИ, приводящие к нарушению работы микропроцессорных управляющих устройств, составляют несколько кВ/м. Поэтому в качестве источника излучения использовалась 4-х рупорная антенная система апертурой 0,36м*0,36м, возбуждаемая генератором импульсов напряжения амплитудой 30 кВ и длительностью фронта около 200 пс. Частота следования импульсов излучателя составляла 100 Гц. Так как генератор не имел возможности регулировки амплитуды импульсов, для ослабления СК ЭМИ использовался радиопоглощающий материал типа «Терновник», который частично перекрывал апертуру антенны [118-121, 171].

В качестве объекта исследования использовался процессорный модуль БЦВМ, основные технические характеристики которого приведены в таблице 3.2.

При исследовании процессорный модуль размещался на высоте ~0,7 м от пола в помещении длиной 20 м. Перед проведением испытаний проводилось измерение параметров СК ЭМИ создаваемых на различных расстояниях от апертуры антенны по оси излучения. Регистрация проводилась с помощью полоскового измерительного преобразователя ИППЛ-5 (время нарастания пере-

ходной характеристики не более 70 пс) и стробоскопического регистратора TDSSODO (полоса 50 ГГц).

Результаты эксперимента показали, что амплитуда первой положительной полуволны сигнала поля изменяется по закону $1/R$, то есть эта полуволна является прямым излучением от антенны. Искажение импульса по мере удаления от антенны свидетельствует о наличии отражений импульсов поля от стен помещения. При расстояниях до 6 м эти отражения практически отсутствовали.

Вначале излучатель располагался максимально далеко от объекта исследований, затем медленно придвигался к нему. При этом фиксировались эффекты уязвимости процессорного модуля.

В результате испытания были получены следующие результаты. На расстоянии 12,7 м ($E=3,1$ кВ/м) процессорный модуль «завис» через одну секунду. При повторении после перезагрузки процессор «завис» почти мгновенно.

Т.к. эффекты от воздействия СК ЭМИ на универсальный вычислитель-БЦВМ держались под наблюдением на расстоянии от 12 до 14 м, где воздействующий СК ЭМИ кроме прямого излученного сигнала включают в себя отраженные от стен сигналы, было сделано решение в уменьшении мощности излучателя с помощью перекрытия половины апертуры антенны радиопоглощающим материалом и повторить испытания при тех же уровнях поля, но при уменьшенных R . При проведении повторных замеров параметров СК ЭМИ было вычислено, что амплитуда излучаемых импульсов поля стала меньше, но сама форма осталась без каких-либо изменений.

При затененной апертуре излучателя на дальности 12 метров, а затем и при увеличении близости излучателя сначала до отметки 11 метров, а затем до 10 метров, отказов в работоспособности процессорного модуля не отмечалось. На расстоянии 9 метров ($E=2,7$ кВ/м) процессор «завис» сразу. При продолжении сближения излучателя эффект зависания снова воспроизводился, и точки самого плохого проявления эффекта зависания (время облучения до «зависания» до 20 секунд) находились на расстоянии 7 метров ($E=4,2$ кВ/м) и 5

метров ($E=5,4$ кВ/м). При дистанции 4 метров ($E=6,8$ кВ/м) сбой вычислителя была через 3-5 секунд [63].

Исходя из этого, при полной апертуре антенны сбой вычислителя БЦВМ происходит на больших расстояниях при сравнительно малом значении амплитуды прямого излученного сигнала (2 кВ/м), зато амплитуда вторичных отраженных сигналов; которые также воздействуют на облучаемый объект, велика. При уменьшении мощности излучения за счет перекрытия части апертуры радиопоглощающим материалом форма излучаемого сигнала не менялась, а устойчивый эффект сбоя появляется при значительно большем значении амплитуды прямого излучаемого ЭМИ (5 кВ/м и более). Получается, что основной вклад в уязвимость вычислителя вносят отраженные от стен помещения сигналы. Для оценки уязвимости вычислителя при воздействии СШП ЭМИ без отражений, было сделано решение о проведении исследований на открытой площадке. Исследования были проведены при полной апертуре антенн. Уменьшение силы излучаемого сигнала с целью нахождения точки сбоя процессора вычислялось при помощи увеличения расстояния (повторные отражения отсутствовали).

Из результатов эксперимента, следует, что форма импульса поля от расстояния почти неизменна. Незаметные различия в сигналах можно наблюдать на второй полуволне импульса, которые, судя по всему, вычисляются с помощью наложения на основной сигнал отражения от земли (датчик и излучатель были на высоте $\sim 0,7$ метра от ее поверхности).

Результаты наблюдений за воздействиями излучаемых импульсов на универсальный вычислитель БЦВМ показали следующее. На дистанции 11 метров ($E=3,7$ кВ/м) не наблюдалось сбоя процессорного модуля. На дистанции 6,3 метра ($E=6,5$ кВ/м) вычислитель почти сразу «повис». После перезагрузки и повторе воздействия «зависание» случалось почти мгновенно.

В таблице 3.3 собраны главные результаты наблюдений вычислителя БЦВМ на открытом пространстве и в помещении. Тут указаны значе-

ния напряженности поля и дистанция до излучателя при получении стабильного (повторяющегося) результата сбоя универсального вычислителя.

Т а б л и ц а 3.3 - Значения напряженностей электрического поля

Антенна	Универсальный вычислитель БЦВМ		
	Помещение		Открытое пространство
A36, полная апертура	3,1 кВ/м (12,7 м)		6,5 кВ/м (6,3 м)
A36, половина апертуры	2,7 кВ/м (9 м)*	6,8 кВ/м (4 м)	-

* сбои происходили нестабильно, при уменьшении расстояния повторяемость зависания ухудшалась.

Из вычисленных результатов исследований можно сделать выводы:

- вычислители наиболее уязвимы в помещениях, где присутствуют отражения от стен;
- на открытом пространстве нет «провалов» в эффекте сбоя при сближении излучателя и исследуемого объекта, а в помещении они есть. Может быть, в помещении данные «провалы» объясняются не понижением эффекта сбоя СК ЭМИ излучением, а повышением этого эффекта на больших расстояниях из-за дополнительных отражений [130, 169, 194].

3.4.2 Математическая модель взаимодействия электромагнитного поля с микропроцессорными устройствами БЦВМ

В современных микропроцессорных устройствах БЦВК системная плата базового вычислителя выполнена на базе процессорного модуля на печатной плате. При этом проводники, которые напечатаны на плате, становятся источниками излучения электромагнитных полей (ЭМП). После воздействия СКИ ЭМП может произойти нарушение работоспособности таких устройств. Традиционным решением при создании печатных плат является использование чередующихся экранирующих слоев с максимальной площадью экранирования. Однако с увеличением быстродействия аппаратуры данный способ не дает достаточно эффективной защиты от внутренних электромагнитных помех, из-

за излучений, которые производят печатные проводники микропроцессорных устройств.

Если известен принцип устройства многослойной платы, которая состоит из нескольких склеенных между собой сигнальных слоев имеющих специальный рисунок печатного монтажа и заданные электрические связи между слоями, то для обеспечения управляемых перекрестных наводок многослойная печатная плата имеет сплошные экранирующие слои. Они соединены напрямую со слоем «GND» переменного тока [28, 29, 122].

Минусы этой конструкции:

1. Очень высокая вероятность потери работоспособности платы при увеличении габаритных размеров платы и использовании сплошных экранирующих слоев из-за возможности расслоения, по вине физических свойств диэлектрика и проводящего слоя.

2. Высокий прирост уровня внутренних электромагнитных помех при применении печатной платы в производительных устройствах, которое вызвано воздействием высокочастотных ЭМП.

3. Использование сплошных экранирующих слоев приводит к увеличению веса печатной платы.

Пусть также известен принцип устройства многослойной печатной платы состоящей из нескольких сигнальных слоев со специальным рисунком печатного монтажа, чередующихся с экранирующими слоями, которые выполнены в виде сетки, это позволяет понизить вес платы и увеличить ее отказоустойчивость из-за меньшей вероятности ее расслоения.

Минусы данной конструкции:

1. Плохая устойчивость к помехам и мощное влияние перекрестных наводок при наличии проводников разного сечения и конфигурации, что говорит о невозможности ее применения на повышенных частотах, при малом времени нарастания и спада информационного сигнала, а также при использовании приборов с большим входным сопротивлением, и с увеличением площади многослойной платы все недостатки резко увеличиваются в силе.

2. Большое увеличение уровня внутренних электромагнитных помех при применении печатной платы в производительных устройствах, вызванное воздействием СКИ ЭМП.

Очень близким к правильному техническому решению является конструкция многослойной печатной платы, состоящей из диэлектрических сигнальных слоев, которые содержат специальный рисунок печатного монтажа, а также экранирующих слоев, выполненных в виде сетки и оборудованных печатными проводниками, повторяющими устройство проводников ближайшего сигнального слоя.

Изъяном данной конструкции является то, что при использовании печатной платы в производительных устройствах, очень сильно возрастает уровень внутренних электромагнитных помех в результате воздействия ЭМП.

Перечисленные в предыдущем разделе эффекты объясняются тем, что излучение СК ЭМИ наводит на печатном монтаже микропроцессорных бортовых устройств токи и напряжения с частотой и формой сигнала близкими к рабочим сигналам этих приборов. В виду высокой напряженности воздействующего поля, а также малых уровней рабочих сигналов в современной технике, наведённые импульсы приводят к сбоям и неправильному функционированию.

При построении математической модели взаимодействия электромагнитного поля с печатным монтажом микропроцессорных бортовых устройств, расчет токов и напряжений, наведенных на проводящий объект, будем осуществлять с использованием интегрального уравнения электрического поля (ИУЭП) в частотном представлении [169]. При этом сначала будем вычислять токи на частотах, а временная форма импульсов тока находится обратным преобразованием Фурье для свертки частотного представления токов со спектром воздействующего импульса поля.

Интегральное уравнение электрического поля

При выводе ИУЭП полное электрическое поле представляется в виде суммы падающего \vec{E}^i (поля без объекта) и рассеянного \vec{E}^s (обусловленного то-

ками и зарядами, наведенными падающим полем на поверхности объекта) полей

$$\vec{E}(\vec{r}, t) = \vec{E}(\vec{r}) \cdot \exp(j\omega t) = \vec{E}^i + \vec{E}^s, \quad (3.10)$$

где \vec{r} - радиус-вектор точки пространства; ω - частота падающего поля.

Рассеянное поле выражается через токи $\vec{J}(\vec{r})$ и заряды $\sigma(\vec{r})$ на поверхности проводника S через векторный магнитный потенциал $\vec{A}(\vec{r})$ и скалярный электрический потенциал $\Phi(\vec{r})$ следующим образом

$$\vec{E}^s(\vec{r}) = -j\omega\vec{A}(\vec{r}) - \nabla\Phi(\vec{r}), \quad (3.11)$$

где

$$\vec{A}(\vec{r}) = \frac{\mu}{4\pi} \int_S \vec{J}(\vec{r}') \frac{\exp(-jkR)}{R} dS'; \quad (3.12)$$

$$\Phi(\vec{r}) = \frac{1}{4\pi\epsilon} \int_S \sigma(\vec{r}') \frac{\exp(-jkR)}{R} dS' = -\frac{1}{4\pi j\omega\epsilon} \int_S \nabla_s \cdot \vec{J}(\vec{r}') \frac{\exp(-jkR)}{R} dS'; \quad (3.13)$$

$k=2\pi/\lambda$ - волновое число; $R=|\vec{r}-\vec{r}'|$ - расстояние между произвольно расположенной точкой наблюдения \vec{r} и точкой источника \vec{r}' на поверхности проводника S; μ, ϵ - параметры окружающей среды; $\nabla_s \cdot \vec{J}$ - поверхностная дивергенция вектора \vec{J} .

В уравнении (3.13) при замене поверхностной плотности заряда плотностью тока использовано уравнение неразрывности:

$$\nabla_s \cdot \vec{J}(\vec{r}) = -j\omega\sigma(\vec{r}), \quad (3.14)$$

Применяя к касательной составляющей электрического поля $\vec{E}_{\text{tan}}(\vec{r})$ на поверхности S импеданское граничное условие Леонтовича в виде [83]

$$\vec{E}_{\text{tan}}(\vec{r}) = Z_s \vec{J}(\vec{r}), \quad (3.15)$$

где Z_s - поверхностный импеданс металла; получаем интегральное уравнение электрического поля:

$$\left(j\omega \vec{A}(\vec{r}) + \nabla \Phi(\vec{r}) \right)_{\text{tan}} = \vec{E}_{\text{tan}}^i - Z_s \vec{J}(\vec{r}), \quad (3.16)$$

где $\vec{E}_{\text{tan}}^i(\vec{r})$ - касательная к S составляющая падающего электрического поля.

Введение поверхностного импеданса позволяет при решении задач рассеяния или излучения моделировать элементы активного и реактивного сопротивления [11-13].

Для печатных проводников на системной плате вычислителя БЦВМ будем решать уравнение (3.16) методом моментов с использованием «тонкопроволочного формализма». При этом исследуемая линия моделируется участками проволоки круглого сечения, и делаются следующие приближения:

- ток течет только в направлении оси проволоки;
- плотности тока и заряда аппроксимируются нитями тока I и заряда σ на оси проволоки;
- условие (3.15) применяется только к аксиальной компоненте поля на поверхности проволоки.

С целью численного решения уравнения (3.16) геометрия объекта аппроксимируется прямолинейными проволочными отрезками (рисунок 3.15). Каждому месту соединения двух проволочных отрезков (неграничному узлу) поставим в соответствие базисную функцию, отличную от нуля лишь на соответствующей паре отрезков, где она имеет вид (рисунок 3.16):

$$\vec{f}_n(\vec{r}) = \frac{\pm \left(\vec{r}_n^{\pm} - \vec{r} \right)}{I_n^{\pm}}, \quad (3.17)$$

где n - номер узла;

знаки «-» и «+» в качестве индексов приписаны первому (W_n^-) и второму (W_n^+) отрезку в паре, соответственно;

I_{\pm}^{\pm} - длина проволочного отрезка W_n^{\pm} ;

\vec{r}_n^{\pm} - радиус-вектор второго (отличного от n -го узла) конца проволочного отрезка W_n^{\pm} .

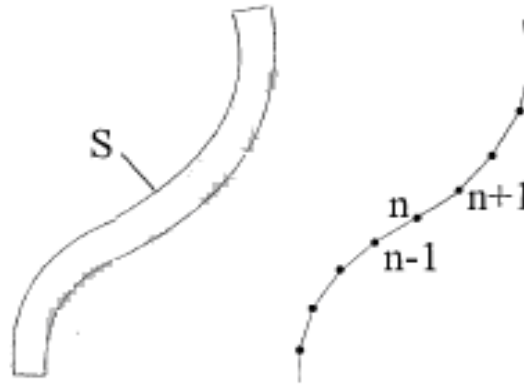


Рисунок 3.15 - Отрезок проволоки и его аппроксимация

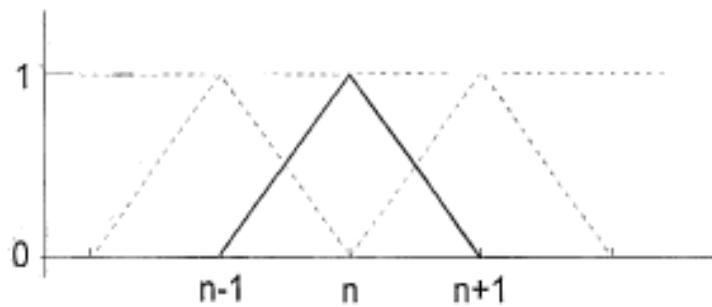


Рисунок 3.16 - Модуль базисной функции, соответствующей n -му узлу

Ток на проволочной структуре аппроксимируется разложением по базисным функциям

$$\vec{I}(\omega) \approx \sum_{n=1}^N I_n \vec{f}_n, n = 1 \dots N, \quad (3.18)$$

где N – число базисных функций (т.е. число неграничных углов);

I_n – коэффициенты разложения.

Применяя к левой и правой частям (3.16) процедуру взвешивания с использованием, согласно методу Галеркина, в качестве весовых функций базисные функции, получим N уравнений вида

$$j\omega \langle \vec{A}, \vec{f}_m \rangle + \langle \nabla \Phi, \vec{f}_m \rangle = \langle \vec{E}^i, \vec{f}_m \rangle - \left\langle \frac{Z_s}{2\pi a} \vec{I}, \vec{f}_m \right\rangle, \quad (3.19)$$

где a – радиус проволоки, а произведение $\langle \vec{f}, \vec{g} \rangle$ двух функций, заданных на проволочной структуре, определено как

$$\langle \vec{f}, \vec{g} \rangle = \int_I \vec{f} \cdot \vec{g} dI, \quad (3.20)$$

Переменная интегрирования I в (3.20) связана с осью проволочной структуры.

Во избежание двойного интегрирования при вычислении интегралов в (3.20) функции Φ , \vec{E}^i и \vec{A} аппроксимируем их значениями в серединах \vec{r}_m^{\pm} интервалов, в результате чего данные принимают вид

$$\frac{j\omega}{2} \left(\vec{I}_m^+ \cdot \vec{A}(\vec{r}_m^{c+}) + \vec{I}_m^- \cdot \vec{A}(\vec{r}_m^{c-}) \right) - \Phi(\vec{r}_m^{c+}) + \Phi(\vec{r}_m^{c-}) + \left\langle \frac{Z_s}{2\pi a} \vec{I}, \vec{f}_m \right\rangle = \frac{1}{2} \left(\vec{I}_m^+ \cdot \vec{E}^i(\vec{r}_m^{c+}) + \vec{I}_m^- \cdot \vec{E}^i(\vec{r}_m^{c-}) \right), \quad (3.21)$$

Подстановка разложения тока (3.18) в выражении (3.12), (3.13) приводит к преобразованию уравнений (3.21) в систему линейных алгебраических уравнений (СЛАУ):

$$Z_{mn} I_n = V_m, m, n = 1, \dots, N, \quad (3.22)$$

Коэффициенты и правая часть СЛАУ вычисляются по формулам:

$$Z_{mn} = \frac{j\omega}{2} \left(\vec{I}_m^{+-} \cdot \vec{A}_{mn}^{+} + \vec{I}_m^{-} \cdot \vec{A}_{mn}^{-} \right) - \Phi_{mn}^{+} + \Phi_{mn}^{-} + Z_{mn}^S; \quad (3.23)$$

$$V_m = \frac{1}{2} \left(\vec{I}_m^{+} \cdot \vec{E}_m^{+} + \vec{I}_m^{-} \cdot \vec{E}_m^{-} \right); \quad (3.24)$$

$$\vec{A}_{mn}^{\pm} = \frac{\mu}{4\pi} \int_I \vec{f}_n(I') \frac{\exp(-jkR_m^{\pm})}{R_m^{\pm}} dI'; \quad (3.25)$$

$$\Phi_{mn}^{\pm} = -\frac{1}{4\pi j\omega\epsilon} \int_I \nabla_I \cdot \vec{f}_n(I') \frac{\exp(-jkR_m^{\pm})}{R_m^{\pm}} dI'; \quad (3.26)$$

$$R_m^{\pm} = \left| \vec{r}_m^{c\pm} - \vec{r}' \right|, \vec{r}' \in W_n^{\pm}. \quad (3.27)$$

В соответствии с допущениями «тонкопроволочного формализма», при вычислении \vec{A}_{mn}^{\pm} , Φ_{mn}^{\pm} интегрирование по поверхности заменено интегрированием вдоль образующей линии проволочной структуры, а вместо поверхностной дивергенции использован оператор $\nabla_I = \frac{\partial}{\partial I} \vec{e}_I$ (\vec{e}_I - единичный вектор в направлении оси проволоки). Заметим, что интегрирование в (3.25), (3.26), как и в более общих выражениях (3.12), (3.13), производится по штрихованной координате.

Матрица Z_{mn}^S выражает влияние поверхностного импеданса

$$Z_{mn}^S = \int_I \frac{Z_s}{2\pi a} \vec{f}_m(I) \cdot \vec{f}_n(I) dI. \quad (3.28)$$

Разрешая систему (3.22) относительно неизвестных коэффициентов разложения (3.21), получаем распределение токов на заданной частоте. Соответствующие напряжения на активных и реактивных элементах объекта, моделируемых с помощью поверхностного импеданса, заданного на участке ΔI , могут быть получены с использованием формулы [11-13].

$$\Delta U(\omega) = \int_I^{I+\Delta I} \frac{Z_s}{2\pi a(I)} \cdot I(\omega) dI. \quad (3.29)$$

С использованием вышеописанного метода и разработанного на его основе программного обеспечения решалась задача по расчету импульсного тока, наводимого в печатном монтаже системной платы вычислителя БЦВМ при воздействии импульсного ЭМП (рисунок 3.17) [109].

В обобщенном виде результаты оценки максимальных по Θ амплитуд, наводимых импульсов тока в зависимости от длины печатного монтажа L , представлены на рисунке 3.18.

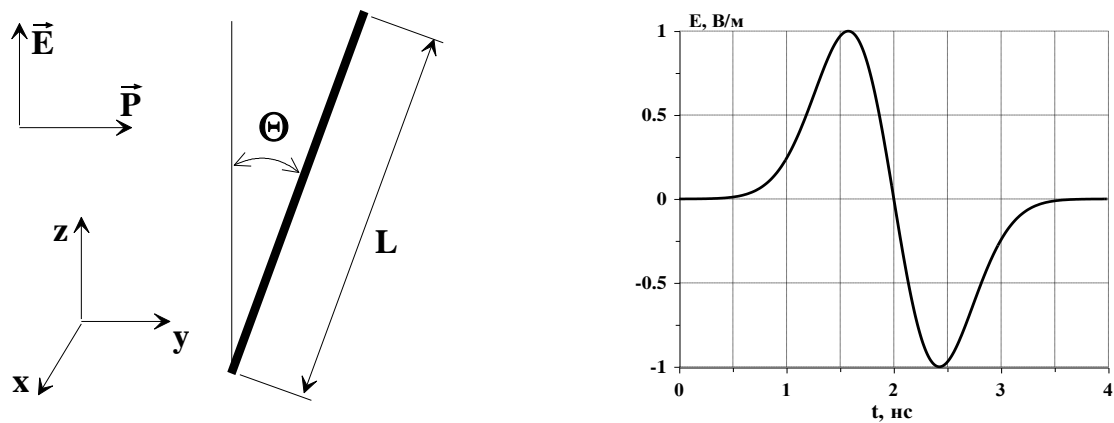


Рисунок 3.17 - Геометрия задачи и форма воздействующего импульса поля

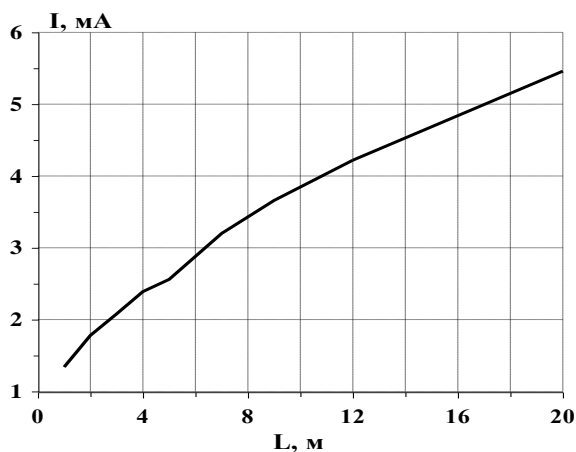


Рисунок 3.18 - Максимальная по Θ амплитуда импульсов тока в печатном монтаже в зависимости от L при амплитуде воздействующего импульса 1 В/м

Максимальная амплитуда тока для проводников до 20 м при амплитуде воздействующего импульса 1 В/м составила ~5,5 мА. Соответствующую

щее этому току напряжение на нагрузке 50 Ом (при условии, что сопротивление нагрузки расположено в точке, где достигается максимальная амплитуда тока) составит около 0,25 В.

3.4.3 Эффективность поражающего действия СК ЭМИ на печатные платы управляющих устройств БЦВК

Эффективность воздействия СК ЭМИ в значительной степени определяется их широкополосностью, которая обеспечивает воздействие электромагнитного излучения на печатные проводники вычислителей БЦВК с включением различных механизмов взаимодействия

Так воздействие СШП ЭМИ на печатную плату может быть описано с помощью передаточной функции [11-13]

$$G = \frac{F_{out}(j\omega)}{F_{in}(j\omega)}, \quad (3.30)$$

где $F_{out}(j\omega)$ - спектр выходной функции;

$F_{in}(j\omega)$ - спектр воздействия.

Эффективность воздействия может быть определена как отношение энергий

$$\eta_E = \frac{\int_0^{\infty} F_{out}(j\omega)^2 d\omega}{\int_0^{\infty} F_{in}(j\omega)^2 d\omega}. \quad (3.31)$$

Данная величина была оценена для четырех типовых двухэкспоненциальных импульсов ЭМП, параметры которых приведены в таблице 3.4 [109]. В таблице 3.6 приведены плотности энергии импульсов с амплитудой 100 кВ/м.

Для упрощения полагалось, что передаточная функция $G(j\omega)$ равна 1 в определенном диапазоне частот и равна нулю вне него. Результаты оценки эффективности воздействия для печатного монтажа различной длины L приведены в таблице 3.5 [109].

Т а б л и ц а 3.4 - Типы исследуемых импульсов и их параметры

Тип импульса	Длительность фронта импульса	Постоянная спада импульса	W_{nx} , Дж/м ²
СШП ЭМИ	0.1 нс	2.5 нс	$7,05 \cdot 10^{-2}$
"Быстрый" ЭМИ	1.5 нс	80 нс	2.19
"Средний" ЭМИ	5 нс	300 нс	8.19
"Медленный" ЭМИ	10 нс	500 нс	13.72

Верхняя и нижняя частоты диапазона были определены на половине высоты амплитудно-частотной характеристики проводников, нагруженных в средней точке на $R=50$ Ом, при воздействии ЭМП с электрической составляющей E , направленной параллельно проводнику.

Т а б л и ц а 3.5 - Эффективность воздействия импульсного ЭМП на печатный монтаж различной длины

L, м	Полоса частот, МГц	Эффективность воздействия импульса (номера импульсов соответствуют табл. 3.5)			
		1	2	3	4
0,1	840-2040	$2 \cdot 10^{-2}$	$3,3 \cdot 10^{-6}$	$7 \cdot 10^{-8}$	$1,5 \cdot 10^{-9}$
0,5	84-204	$2,7 \cdot 10^{-2}$	$4 \cdot 10^{-6}$	$9,2 \cdot 10^{-8}$	$2 \cdot 10^{-9}$

Анализ приведенных данных показывает, что СШП импульсы обладают высокой эффективностью воздействия на печатный проводники системных плат БЦВМ. При $L < 0,5$ м они могут оказать большее влияние на объект, чем другие типы импульсов, даже, несмотря на их сравнительно малую энергетику.

Можно сделать вывод, что для печатных плат БЦВМ с резонансными частотами между 100 МГц и 1 ГГц СШП ЭМИ оказывает наибольшее влияние по энергии (напряжению) несмотря на то, что его общая энергия значительно меньше, чем энергия других импульсов с $E=100$ кВ/м.

Таким образом, опасность воздействия СШП ЭМИ для микропроцессорных управляющих устройств БЦВК определяется не только амплитудой, фрон-

том импульса и энергией, но и эффективностью его воздействия по энергии и напряжению [25, 35, 130, 169].

3.5 Методика оценки воздействия СКИ ЭМИ на типовые микропроцессорные устройства контура управления БЦВК

На основании анализа результатов экспериментальных исследований и возможностей расчетных методов, была разработана расчетно-экспериментальная методика оценки воздействия импульсного ЭМИ на микропроцессорные устройства контура управления БЦВК. Разработанная методика основана на экспериментальном определении наиболее подверженных электромагнитному воздействию элементов контура управления БЦВК, определяющих уязвимость БЦВК в целом, оценке параметров наводок на нём и позволяет определить характер эффектов воздействия импульсных СВЧ-полей в зависимости от их спектрального состава, длительностей и частот следования.

Одной из наиболее сложных задач решаемых при оценке воздействия импульсного ЭМИ на контур управления БЦВК является выявление уязвимых элементов. Ниже приведены основные положения методики выявления уязвимых элементов в различных электронных устройствах контура управления БЦВК (рисунок 3.19):

- анализ наблюдаемых эффектов воздействия и логики работы устройства;
- использование помодульного отключения либо замены отдельных устройств объекта при проведении экспериментов;
- измерение сигналов в контрольных точках устройства и токов потребления элементов при штатной работе устройства;
- измерение параметров реакции устройства в его контрольных точках и токов потребления отдельных элементов при СВЧ-воздействии.

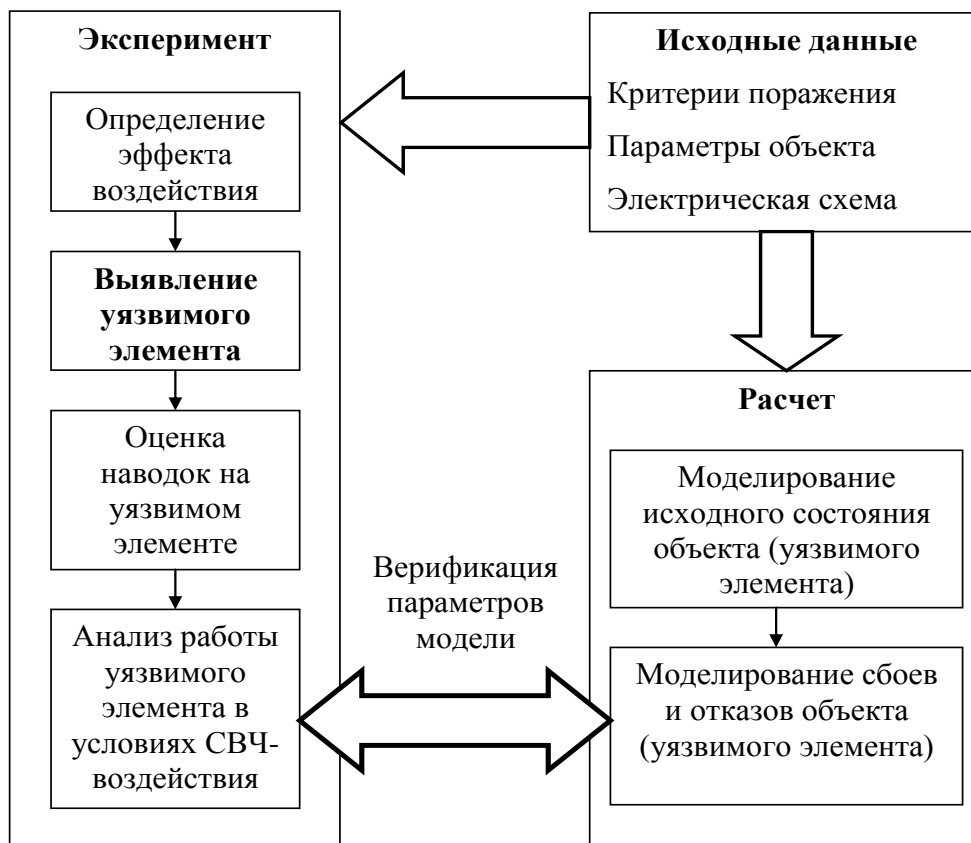


Рисунок 3.19 - Алгоритм оценки воздействия электромагнитного излучения на элементы и узлы БЦВК

По указанной методике были выявлены, в частности, уязвимые элементы следующих устройств:

- микропроцессорные управляющие устройства промышленного исполнения (в частности, контроллеры накопителя на жестком магнитном диске (обратимый отказ при воздействии СВЧ-излучения с длиной волны 10 см и 35 см и СКИ-излучения с длительностью импульсов 0,2...1,5 нс);
- микросхема LC75823, управляющая DTMF-клавиатурой и дисплеем (катастрофический отказ при воздействии СВЧ-излучения с длиной волны 35 см), и микросхема памяти (обратимый отказ при воздействии СВЧ-излучения с длиной волны 10 см и СКИ-излучения с длительностью импульсов 0,2...1,5 нс).

3.6 Выводы по главе

1. Проведен анализ существующих подходов к оценке воздействия электромагнитных импульсов на подсистемы современных БЦВК, который показал необходимость разработки новой методологии оценки воздействия ЭМИ на элементы и узлы БЦВК с возможностью их интеграции в рамках единого комплекса, позволяющего проводить интеллектуальный анализ и оценку параметров искажений информационного потока в системе для предотвращения деструктивного действия ЭМИ на БЦВК.

2. Проведен анализ отечественных и зарубежных литературных источников и результатов экспериментальных исследований по проблеме оценки стойкости элементов БЦВК к воздействию СК ЭМИ, который показал, что для расчетных оценок токов и напряжений, наводимых электромагнитным полем в каналах передачи данных и микропроцессорных управляющих устройств БЦВК, целесообразно использовать математический аппарат электродинамики и достаточно хорошо разработанный математический аппарат линий передач, являющийся следствием уравнений Максвелла.

3. Проведен анализ особенностей построения физического уровня каналов в передачи данных современных БЦВК на основе технологий Fast, Gigabit Ethernet, применяемого кодирования и методов модуляции сигналов в физической среде передачи, который показал, что наиболее распространенные технологии Fast Ethernet (100Base-TX) и Gigabit Ethernet (1000Base-T) не используют алгоритмы кодирования с коррекцией ошибок, поэтому даже искажение одного символа в кадре ведет к ошибке приема всего кадра.

4. Обоснована математическая модель потерь кадров в каналах передачи данных современных БЦВК на основе технологий Fast, Gigabit Ethernet при воздействии периодических импульсных помех, обобщающая существующую методику расчета вероятностей возникновения ошибок на варианты:

3-символьного кодирования MLT-3;

5-символьного кодирования PAM-5.

При расчетах учтены избыточность кодирования, вероятности появления символов, возможность коррекции ошибок.

5. Обоснована необходимость задания в математической модели длины кадра и межкадрового интервала для случая передачи данных в бортовых сетях на основе технологии Gigabit Ethernet, где длина кадра и межкадрового интервала различны в произвольный момент времени. Показано, что учет длин кадров и интервалов между ними сводится к учету среднего значения длины кадра в бортовой сети.

6. Установлено, что при воздействии СКИ ЭМП на бортовую кабельную сеть, подключенную к БЦВМ, на входе блоков БЦВМ возникают токи и напряжения, представляющие опасность для микросхем печатных плат и информационных пакетов. В частности, для печатных плат БЦВМ с резонансными частотами между 100 МГц и 1 ГГц СШП ЭМИ оказывает наибольшее влияние по энергии (напряжению) несмотря на то, что его общая энергия значительно меньше, чем энергия других импульсов с $E=100$ кВ/м.

7. Обосновано, что опасность воздействия СШП ЭМИ для микропроцессорных управляющих устройств БЦВК определяется не только амплитудой, фронтом импульса и энергией, но и эффективностью его воздействия по энергии и напряжению.

8. Показано, что при разработке математической модели взаимодействия СК ЭМИ с микропроцессорными управляющими устройствами БЦВК может быть использован метод моментов для интегрального уравнения электрического поля. При этом целесообразно использовать «тонкопроволочный формализм», как более адекватный с физической точки зрения.

9. Результаты проведенных тестовых расчетов доказывают корректность и адекватной разработанной математической модели взаимодействия СК ЭМИ с микропроцессорными управляющими устройствами БЦВК.

ГЛАВА 4 КРИТЕРИАЛЬНО - МАТЕМАТИЧЕСКИЙ АППАРАТ ПОСТРОЕНИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ АНАЛИЗА И ОЦЕНКИ УСТОЙЧИВОСТИ БЦВК К ДЕСТРУКТИВНОМУ ВОЗДЕЙСТВИЮ ЭМИ

Одним из основных атрибутов интеллектуальной системы анализа и оценки устойчивости БЦВК является наличие иерархии уровней анализа и оценки [45, 72, 154]. В данной главе рассматривается критериально-математический аппарат построения интеллектуальной системы анализа и оценки устойчивости БЦВК к деструктивным ЭМ воздействиям, включающий в себя уровень формирования признаков деструктивных воздействий на элементы и узлы БЦВК, уровень идентификации деструктивных воздействий на БЦВК, уровень обобщения и накопления опыта обнаружения таких деструктивных воздействий. Адаптивный характер уровней системы анализа и оценки устойчивости обусловлен использованием интеллектуальных средств нечеткой логики и нейронных сетей для решения задач классификации и кластеризации деструктивных ЭМ воздействий по их признакам, формируемых датчиками электромагнитных воздействий (ДЭМВ) [72, 154, 157].

4.1 Базовые принципы построения интеллектуальной системы анализа и оценки устойчивости БЦВК к деструктивному воздействию ЭМИ

Подход к интеллектуальному анализу и оценке влияния деструктивных ЭМ воздействий на элементы и узлы БЦВК основывается на свойствах систем нечеткой логики, нейронных сетей и экспертных систем, которые связаны с адаптивностью и возможностью представления опыта специалистов по ЭМС в виде системы нечетких продукционных правил, доступных для анализа [156, 157].

Возможность адаптации к изменениям условий работы и новым угрозам электромагнитного воздействия рассматривается как одно из наиболее важных свойств интеллектуальных систем, позволяющих корректировать работу БЦВК

при изменении входной информации и внешнего окружения. Обучающим фактором являются избыточность входной информации и скрытые в данных закономерности, видоизменяющие ИП нейронной сети в процессе адаптации системы анализа и оценки устойчивости БЦВК к деструктивному воздействию ЭМИ.

За счет уменьшения степени избыточности входной информации нейронные сети позволяют выделять во входных данных существенные признаки, а соревновательные методы обучения за счет использования механизма кластеризации, то есть динамически увеличивать классификацию при поступлении «новой» информации. Похожие векторы входных данных группируются нейронной сетью в отдельный кластер и представляются конкретным формальным нейроном-прототипом. В процессе решения задачи кластеризации данных нейронная сеть находит усредненные по кластеру значения весов связей формального нейрона-прототипа, которые уменьшают ошибку представления сгруппированных в кластер данных.

Возможность представления опыта квалифицированных специалистов по ЭМС в виде базы знаний экспертной системы, которая представляется системой нечетких продукционных правил, и их последующее отображение в виде нейро-нечетких сетей, входящих в состав классификаторов интеллектуальной системы анализа и оценки устойчивости БЦВК, позволяет, с одной стороны, объяснить результаты работы системы анализа и оценки устойчивости через анализ информационных полей НС, а с другой – передавать накопленный опыт путем наследования – перезаписи информационных полей НС интеллектуальной системы анализа и оценки устойчивости БЦВК.

Проведенный анализ [54, 156-158, 154] показал, что основным принципом построения интеллектуальных средств для анализа и оценки влияния деструктивных ЭМ воздействий на элементы и узлы БЦВК является принцип подобия организации устойчивого функционирования в биосистемах.

При организации интеллектуальных средств анализа влияния деструктивных ЭМ воздействий на элементы и узлы БЦВК следует учитывать особую роль, которую играет в эволюции живых организмов нервная система как адап-

тивный инструмент взаимодействия со средой. Для формирования рефлексов в ответ на воздействия и необходима нервная система. Рефлексия – продукт верхнего уровня защиты биологической системы [156, 154].

Поведенческие реакции в биологической системе – качество нервной системы, которое свидетельствует о развитии связи между воздействиями и реакцией организма. Выделяют разделение информации между носителями различной природы: ДНК и нервными клетками – нейронами. Поведенческая информация формируется на основе механизмов, передаваемых через ДНК, и фиксируется в информационных полях нейронных сетей нервной системы. Биосистемам свойственно накопление жизненного опыта и передача его потомкам через обучение.

Обеспечение устойчивого функционирования БЦВК при воздействии на её элементы деструктивных ЭМИ должно базироваться на следующих положениях [45, 73, 75, 154]:

а) подобие в архитектуре бортовых инфокоммуникационных систем и биосистем;

б) использование в бортовых инфокоммуникационных системах известных механизмов обеспечения стойкости, свойственных биологическим системам, таких как:

- иерархия средств адаптации;
- на нижних уровнях иерархии осуществляется сохранение генетической информации, реализация механизма мутаций, преобразование информации, разделение информации по критерию «свой/чужой» и нейтрализация чужеродной информации;
- на верхних уровнях иерархии реализована связь системы со средой через органы чувств и накопление опыта в информационных полях НС нервной системы;
- изменение генетической информации связано с изменением не формы представления, а содержания информации, исходя из жизненного опыта

- устойчивое функционирование обеспечивается за счет адаптивности
- приобретения жизненного опыта, позволяющего успешно оперировать смысловыми ситуациями, в частности, распознавать «своих» и «чужих», выбирать поведение биологической системы в изменяющейся обстановке;

в) аналогия в организации средств обеспечения стойкости, используемых в СОДЭМВ:

- информация в СОДЭМВ должна храниться в виде структурированных информационных полей, в частности, информационного поля идентификации деструктивных воздействий на БЦВК, предназначенного для накопления опыта классификации известных деструктивных ЭМ воздействий;

- идентифицирующая информация – своя для каждого БЦВК и связана с формой, но не содержанием информации;

- СОДЭМВ в процессе эксплуатации и взаимодействия с внешней средой накапливает в информационном поле НС опыт классификации деструктивных ЭМ воздействий на БЦВК;

- перенос и наследование информации – передача информационных полей, сформированных в процессе жизненного цикла ИСАУ, в последующие реализации;

г) применение адаптивных свойств НС, «прозрачности» систем нечеткой логики, возможности используемого в экспертных системах представления знаний в виде системы правил IF-THEN для реализации функций обнаружения деструктивных ЭМ воздействий на БЦВК:

- возможность наследования ранее накопленного опыта адаптивной системы обнаружения деструктивных ЭМ воздействий в виде информационных полей нейронных и нейро-нечетких сетей;

- способность к кластеризации признаков ЭМ воздействий на элементы и узлы БЦВК и обучения информационных полей иерархии адаптивной СОДЭМВ;

- способность к адаптации накопленного опыта по обнаружению известных ЭМ воздействий – коррекция и расширение системы нечетких правил IF-THEN логического вывода, адаптация информационных полей СОДЭМВ;
- возможность анализа, коррекции и переноса (наследования) информации.

4.2 Основные этапы построения интеллектуальной системы с использованием адаптивных средств для обнаружения деструктивных ЭМВ на элементы и узлы БЦВК

Основными этапами построения интеллектуальной системы анализа и оценки устойчивости БЦВК к деструктивным ЭМ воздействиям являются [156, 204, 154]:

1. Решение задачи классификации уже известных ЭМ воздействий на элементы и узлы БЦВК по вектору признаков таких воздействий; производится соотнесение посылок (вектора признаков ЭМВ) с классификационными заключениями (деструктивное ЭМ воздействие).
2. Решение задачи кластеризации деструктивных ЭМ воздействий на БЦВК по признакам таких воздействий как саморазвитие классификации при расширении множества известных ЭМ воздействий. Производится разбиение входных векторов на группы (векторов признаков ЭМВ) и отнесение вновь поступающего входного вектора к одной из групп либо формирование новой группы (группы деструктивных ЭМ воздействий).
3. Формирование экспертных оценок для определения степени соответствия ЭМ обстановки признакам деструктивного ЭМ воздействия.
4. Представление результатов решения задач п.1 и 3, полученных в процессе нечеткого логического вывода классификационных заключений по нечетким посылкам (соотношения «признаки ЭМВ – деструктивное ЭМ воздействие на БЦВК»), в виде систем нечетких продукционных правил.

5. Реализацию систем нечетких продукционных правил в виде специализированных структур – нейро-нечетких классификаторов (классификаторов «признаки ЭМВ – деструктивное ЭМ воздействие на БЦВК»).

6. Реализацию результатов решения задачи п.2 в виде четких кластеризаторов на основе самообучающейся адаптивной системы (кластеризаторов «признаки ЭМВ – деструктивное ЭМ воздействие на БЦВК»).

7. Наследование (передача) опыта системы обнаружения деструктивных ЭМВ, приобретенного в процессе эксплуатации БЦВК, в проектируемую систему путем перенесения информационных полей четких и нейро-нечетких сетей.

8. Обучение классификаторов по п.5, 6 на обучающей выборке – подмножестве входных векторов (векторов признаков ЭМВ) с целью формирования информационных полей четких и нейро-нечетких сетей.

9. Адаптацию в процессе эксплуатации БЦВК информационных полей четких и нейро-нечетких сетей (классификаторов и кластеризаторов «признаки ЭМВ – деструктивное ЭМ воздействие на БЦВК»).

10. Коррекцию адаптируемых экспертных оценок (п. 3) и систем нечетких продукционных правил (п. 4) по результатам адаптации.

11. Формулирование новых нечетких продукционных правил в случае расширения классификации (кластеризации) по результатам выполнения п.9 и 10.

12. Формирование оценок устойчивости БЦВК к деструктивному воздействию ЭМИ, исходя из результатов выполнения п. 10 и распределения датчиков ЭМВ по иерархии ИСАУ.

13. Анализ структуры связей нейро-нечетких классификаторов, «прозрачной» системы нечетких продукционных правил и комплекса оценок устойчивости БЦВК по п. 12 для выявления наиболее используемых или отсутствующих в БЦВК датчиков ЭМВ.

14. Формирование спецификации на разработку отсутствующих датчиков ЭМВ.

15. Коррекция системы обнаружения деструктивных электромагнитных воздействий на элементы и узлы БЦВК за счет расширения перечня используемых

мых датчиков ЭМВ и их размещения в интеллектуальной системе анализа и оценки устойчивости БЦВК к деструктивным ЭМ воздействиям.

Шаги по п. 9-15 повторяются в процессе эксплуатации ИСАУ с целью постоянного обновления базы знаний СОДЭМВ и накопления опыта по обнаружению деструктивных ЭМВ.

Выполнение данных этапов позволяет:

а) формировать матрицы адаптируемых экспертных оценок и с их учетом – исходные системы нечетких продукционных правил и структуры нейро-нечетких классификаторов (классификаторов «признаки ЭМВ – деструктивное ЭМ воздействие на БЦВК»);

б) идентифицировать известные деструктивные ЭМ воздействия, а при расширении множества известных ЭМВ – решать задачу кластеризации таких воздействий с последующей адаптацией информационных полей НС системы обнаружения деструктивных ЭМВ на БЦВК;

в) решать задачу кластеризации деструктивных ЭМ воздействий вследствие изменения множества известных ЭМ воздействий на элементы и узлы БЦВК, соответственно корректировать или расширять системы нечетких продукционных правил СОДЭМВ;

г) модифицировать системы нечетких продукционных правил и матрицы экспертных оценок по результатам обучения и последующего анализа классификаторов СОДЭМВ при расширении множества известных деструктивных ЭМ воздействий на БЦВК;

д) формировать описание отсутствующего датчика ЭМ воздействия при расширении системы нечетких продукционных правил (вследствие «прозрачности» системы нечетких правил), что позволяет сформулировать спецификацию на создание отсутствующего датчика ЭМ воздействия;

е) включать (в случае экономической целесообразности) новый датчик ЭМ воздействия в состав СОДЭМВ на основании анализа оценок устойчивости БЦВК.

4.2.1 Иерархия уровней системы обнаружения деструктивных ЭМВ

В основе построения интеллектуальной системы анализа и оценки устойчивости БЦВК к деструктивным ЭМ воздействиям лежит подход [157, 158, 154], согласно которому система рассматривается как адаптивная аналитическая система, решающая задачи автоматической и оперативной идентификации деструктивных ЭМ воздействий и накопления опыта по обнаружению таких воздействий на элементы и узлы БЦВК. Для решения сформулированных задач используется совокупность взаимосвязанных интеллектуальных средств, а именно: экспертной базы знаний в виде продукционных правил IF-THEN, нейронечетких классификаторов, нейросетевых самообучающихся кластеризаторов [45, 54, 73, 75, 155].

Устойчивость биосистем к деструктивным воздействиям обеспечивается, как правило, сочетанием эволюционных процессов, а также информационно-полевых, программных и структурных методов.

Информационно-полевые методы обеспечения устойчивости биосистем к деструктивным воздействиям связаны с представлением, хранением и передачей информации в пределах биологического вида в форме распределенных избыточных информационных полей.

Методы обеспечения устойчивости биосистем к деструктивным воздействиям заключаются в описании структуры информационных полей, а не в задании алгоритмов поведения в виде определенной последовательности действий. На молекулярном уровне структура информационных полей биосистемы реализована в пространственной организации ДНК, а на уровне нервной системы – в распределенных межнейронных связях нейронных сетей. Во всех случаях для обеспечения устойчивости к деструктивным воздействиям используются механизмы избыточности, распределенный характер представления и параллельной обработки информации, адаптивность, возможность передачи знаний в виде накопленного жизненного опыта в форме структурированных информационных полей, например, информационных полей ДНК и нейронных сетей.

Структурные методы обеспечения устойчивости биосистем к деструктивным воздействиям связаны с формой представления информации (пространственно-распределенных избыточных информационных полей) и иерархической организацией самих биосистем.

Для реализации принципов построения адаптивной СОДЭМВ иерархические уровни системы должны в обязательном порядке содержать следующие модули [154, 157]:

- систему нечетких продукционных правил, описывающих работу идентификатора с учетом экспертных оценок;
- нейро-нечеткую сеть, в структуре которой отражена система нечетких продукционных правил;
- четкую самообучаемую нейронную сеть (НС) для решения задачи кластеризации входных векторов.

Уровень идентификации деструктивных электромагнитных воздействий, которые предназначены для классификации по вектору признаков воздействий ЭМИ на элементы и узлы БЦВК, формируемых датчиками электромагнитных воздействий (ДЭМВ), иллюстрирует рисунок 4.1 .

Основными механизмами реализации интеллектуальной системы анализа и оценки устойчивости БЦВК к деструктивным ЭМ воздействиям являются:

- а) представление априорного опыта экспертов по ЭМС в виде базы знаний, описанной системой продукционных правил;
- б) нечеткий логический вывод, который позволяет использовать опыт экспертов по ЭМС в виде системы нечетких продукционных правил для начальной настройки информационного поля (системы межнейронных связей) нечеткой НС;
- в) способность нейронных сетей к классификации и кластеризации;
- г) способность информационного поля нейронных сетей к накоплению опыта в процессе обучения.

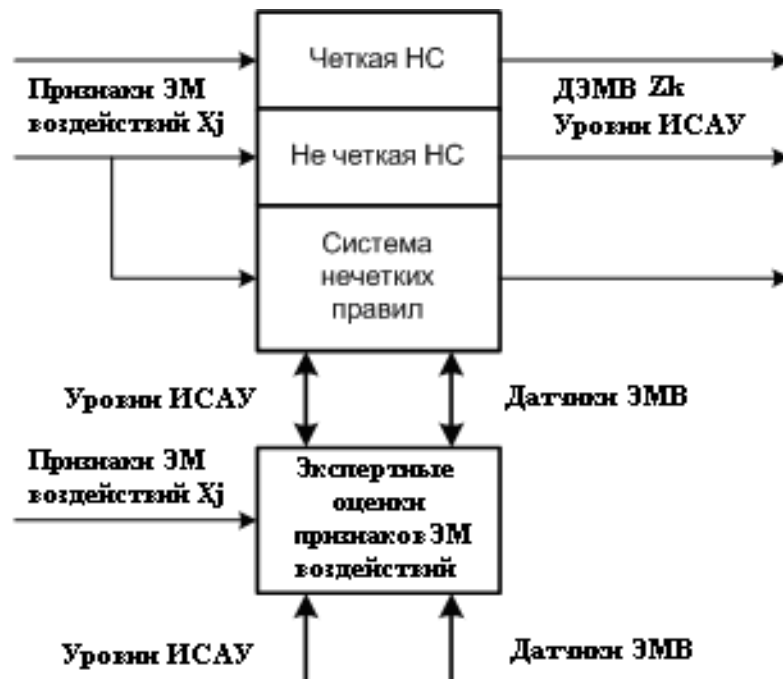


Рисунок 4.1 - Адаптивный классификатор уровня идентификации деструктивных ЭМ воздействий

Механизм нечеткого логического вывода основан на представлении опыта специалистов (экспертов) по ЭМС системой нечетких продукционных правил вида IF-THEN, например:

$$\begin{aligned}
 &P_1: \text{если } x_1 \text{ есть } A_{11} \text{ и } \dots x_n \text{ есть } A_{1n}, \text{ то } y \text{ есть } B_1, \\
 &P_2: \text{если } x_1 \text{ есть } A_{21} \text{ и } \dots x_n \text{ есть } A_{2n}, \text{ то } y \text{ есть } B_2, \\
 &\dots \\
 &P_k: \text{если } x_1 \text{ есть } A_{k1} \text{ и } \dots x_n \text{ есть } A_{kn}, \text{ то } y \text{ есть } B_k,
 \end{aligned}$$

где x_i и y_i – нечеткие входная и выходная переменные,

A_{ij} и B_i – соответствующие функции принадлежности, $j = 1, \dots, n$, $i = 1, \dots, k$.

Объединение возможностей нейронных сетей и нечеткого логического вывода является одним из самых перспективных подходов к организации систем искусственного интеллекта. Как было показано в работе [154] системы нечеткой логики компенсируют основные «непрозрачности» НС: в представлении знаний и способности объяснений результатов работы интеллектуальной системы, т.е. дополняют нейронные сети.

Нечеткая логика позволяет формализовать качественную информацию, полученную от экспертов по ЭМС, и описывать ее в виде системы нечетких продукционных правил IF-THEN, позволяющих анализировать результаты работы системы оценки и анализа устойчивости БЦВК к деструктивным воздействиям ЭМИ. Нейронные сети дают возможность отобразить алгоритмы нечеткого логического вывода в структуре нейро-нечеткой сети, вводя в информационное поле НС априорную информацию.

Важной для ИСАУ особенностью нейро-нечетких сетей является способность автоматически генерировать систему нечетких продукционных правил в процессе обучения, извлекая скрытые закономерности из данных входной обучающей выборки. При отсутствии априорного опыта, но при достаточном объеме обучающей выборки нечеткая НС преобразует скрытые во входных данных закономерности в систему правил нечеткого логического вывода.

С другой стороны, знания квалифицированных специалистов по ЭМС, представленные в форме лингвистических переменных и нечетких продукционных правил, прозрачным способом отражаются в структуре нейро-нечеткой сети (информационном поле НС). Предэксплуатационное обучение нейро-нечеткой сети позволяет настроить веса связей (откорректировать достоверность посылок и заключений нечетких правил) и устранить противоречивость системы нечетких продукционных правил логического вывода.

4.2.2 Организация иерархии уровней системы обнаружения деструктивных ЭМВ

Способность нейронной сети к классификации и кластеризации используется в интеллектуальной системе анализа и оценки устойчивости БЦВК к деструктивным воздействиям ЭМИ для решения двух основных задач:

- 1) классификации входного вектора, например, вектора признаков ЭМ воздействий на элементы и узлы БЦВК;
- 2) расширения классификации в случае появления на входе классификатора ранее не встречавшегося сочетания признаков воздействий.

Рассмотрим организацию нейро-нечеткого классификатора в составе иерархического уровня СОДЭМВ, использующего механизм нечеткого логического вывода при решении нейронной сетью задачи классификации нечетких входных векторов на примере классификации совпадения нечетких координат x_1 и x_2 входного вектора. Т.е. необходимо настроить нейро-нечеткую сеть на реализацию логической функции «Равнозначность».

Для иллюстрации возможности нейро-нечеткой сети корректировать исходную систему нечетких продукционных правил в процессе обучения сформируем не вполне корректную систему нечетких правил. Пусть R_1 , и R_2 – взаимоисключающие правила (при одинаковых посылках получаются противоположные заключения), а L и S – функции принадлежности, соответственно, «большая» и «малая».

R_1 : если x_1 есть S и x_2 есть S , то y есть L ,

R_2 : если x_1 есть S и x_2 есть S , то y есть S ,

R_3 : если x_1 есть S и x_2 есть L , то y есть S ,

R_4 : если x_1 есть L и x_2 есть S , то y есть S ,

R_5 : если x_1 есть L и x_2 есть L , то y есть L .

Как следует из опыта разработки нейро-нечетких сетей (таблица 4.1) для построения систем, которые основаны на системе нечетких продукционных правил вывода используют нейро-нечеткие сети типов 2, 3 и 4 [154, 157].

Для формирования в нейро-нечетком классификаторе информационного поля, которое соответствует реализуемой функции, и, следовательно, коррекции системы нечетких продукционных правил необходимо предэксплуатационное обучение нечеткой нейронной сети. Рисунок 4.2 иллюстрирует результаты адаптации информационного поля нейро-нечеткого классификатора после 50 циклов обучения.

Т а б л и ц а 4.1 - Характеристика нейронных сетей различного типа

Тип нейро-нечеткой сети	Веса	Входные вектора	Цели
Тип 1	crisp	fuzzy	crisp
Тип 2	crisp	fuzzy	fuzzy
Тип 3	fuzzy	fuzzy	fuzzy
Тип 4	fuzzy	crisp	fuzzy
Тип 5	crisp	crisp	fuzzy
Тип 6	fuzzy	crisp	crisp
Тип 7	fuzzy	fuzzy	crisp

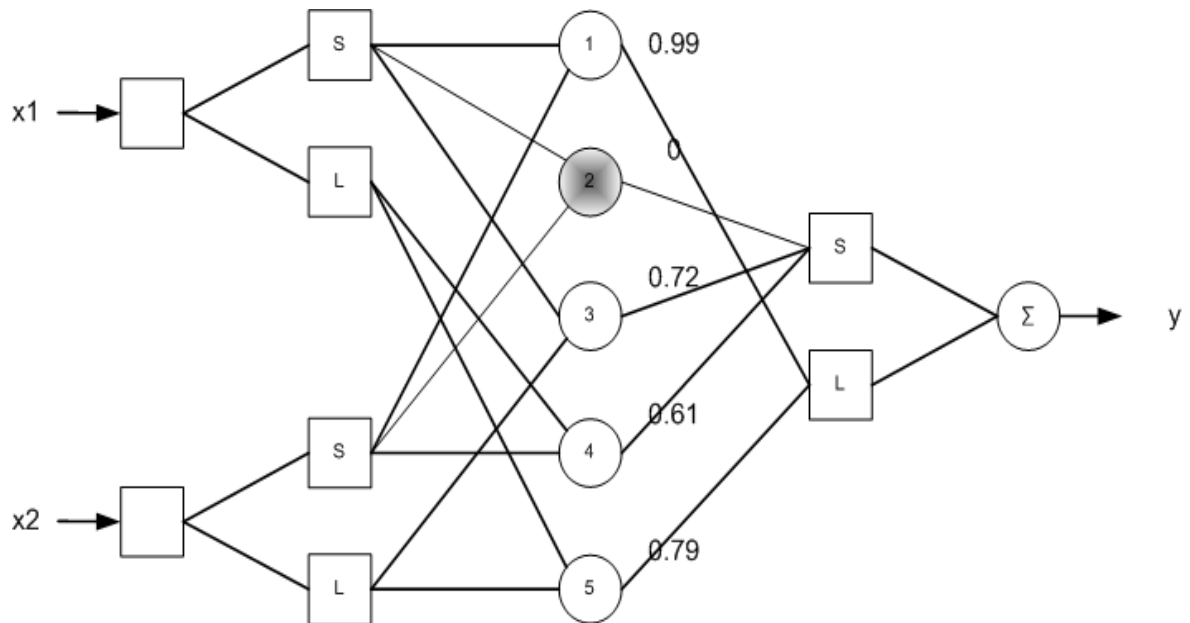


Рисунок 4.2 - Нейро-нечеткий классификатор для логической функции «Равнозначность»

В процессе обучения достоверность связей информационного поля нечеткой нейронной сети (исходные значения весов равны максимальной достоверности связей, т.е. единице) претерпели изменения и соответствуют значениям, приведенным на рисунке 4.2. Вес связи $w_{k2} = 0$, что подтверждает ошибочность включения правила R_2 в систему нечетких продукционных правил и позволяет исключить правило R_1 из системы как противоречивое.

Для использования в интеллектуальной системе анализа и оценки устойчивости БЦВК к деструктивным воздействиям ЭМИ нейро-нечеткого классификатора модифицируем этапы логического вывода, учитывая, что входные и выходные значения классификаторов представляют собой достоверность некоторых нечетких высказываний входных и выходных лингвистических переменных. Можно из ранее рассмотренной последовательности нечеткого логического вывода исключить этап приведения к четкости, оставив этапы введения нечеткости, логического вывода и композиции.

Пусть задано полное пространство посылок $X = \{\tilde{X}_1, \dots, \tilde{X}_m\}$ и полное пространство заключений $Y = \{\tilde{y}_1, \dots, \tilde{y}_n\}$. Между \tilde{x}_i и \tilde{y}_j , $i=1, \dots, m$, $j=1, \dots, n$, существуют нечеткие причинные отношения $\tilde{x}_i \rightarrow \tilde{y}_j$, которые можно представить в виде матрицы R с элементами r_{ij} , $i=1, \dots, m$, $j=1, \dots, n$, а посылки и заключения - как нечеткие множества A и B на пространствах X и Y , отношения которых можно представить в виде: $B = A \bullet R$, где \bullet – операция композиции, например, max-min-композиция.

В нечетком логическом выводе знания эксперта $A \rightarrow B$ отражает нечеткое отношение $R = A \rightarrow B$, где операция \rightarrow соответствует нечеткой импликации. Нечеткое отношение R можно рассматривать как нечеткое подмножество прямого произведения $X \times Y$ полного множества посылок X и заключений Y , а процесс получения нечеткого результата вывода B по посылке A и знаниям $A \rightarrow B$ можно представить в виде композиционного правила: $B = A \bullet R = A \bullet (A \rightarrow B)$.

На уровне накопления опыта СОДЭМВ нейро-нечеткий классификатор n -мерных векторов деструктивных воздействий X с координатами $(\tilde{x}_1, \dots, \tilde{x}_m)$ будем представлять в виде трехслойной нечеткой НС (рисунок 4.3) [154, 157].

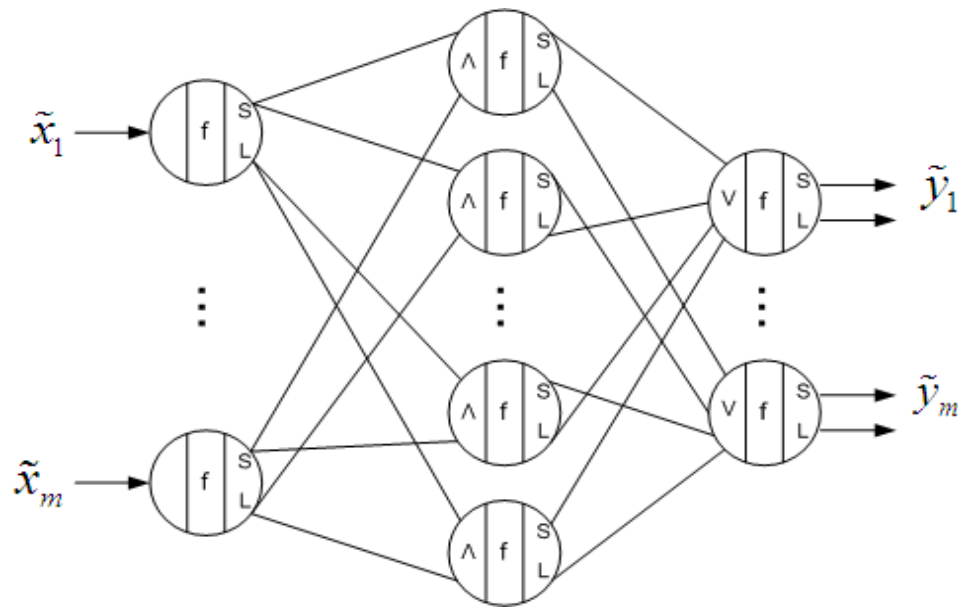


Рисунок 4.3 - Нейро-нечеткий классификатор

В полном пространстве посылок $X = \{\tilde{x}_1, \dots, \tilde{x}_m\}$ максимальное число входных нечетких векторов задается всевозможными сочетаниями координат \tilde{x}_j , $j=1, \dots, m$. Каждому входному вектору из пространства X можно поставить в соответствие нечеткий формальный нейрон классификатора, выполняющий операцию логического вывода, например, \min . Отображение множества результатов логического вывода в полное пространство заключений $Y = \{\tilde{y}_1, \dots, \tilde{y}_n\}$ можно реализовать через операцию композиции, и каждому выходному вектору датчиков деструктивных воздействий из пространства Y можно поставить в соответствие нечеткий формальный нейрон классификатора, выполняющий операцию, к примеру, \max .

Средний слой содержит до 2^m нечетких формальных нейронов, выполняющих операцию логического вывода (например, \min) над сочетаниями нечетких высказываний (НВ) первого слоя нейронного слоя для формирования системы нечетких классификационных заключений.

Выходной слой содержит n , по числу координат выходного вектора ДЭМВ, нечетких формальных нейронов, выполняющих операцию композиции (например, \max) над нечеткими классификационными заключениями второго

слоя нейронной сети для формирования n -мерных векторов y выходных нечетких заключений $(\tilde{y}_1, \dots, \tilde{y}_n)$.

В узлах первого слоя формируются комплементарные пары значений истинности для входных нечетких переменных (НП) $\tilde{x}_n, i = 1 \dots m$, координат входного вектора X . При заданном значении координаты вектора X на отрезке области определения каждому значению входной нечеткой переменной соответствует значение ординат функций принадлежности S и L , которые в сумме дают 1 (рисунок 4.4). Т.е. в каждом узле первого слоя реализуется пара «частично противоположных» нечетких высказываний, которые через комплементарную пару связей полются на средний слой нейронной сети.

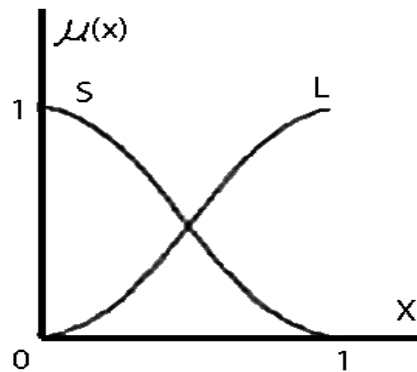


Рисунок 4.4 - Комплементарная пара функций принадлежности

Если во втором слое нечеткой нейронной сети содержится максимальное число нечетких формальных нейронов «И», то промежуточный вектор нечетких заключений будет содержать всевозможные нечеткие классификационные заключения, которые могут следовать из всевозможных векторов входных посылок.

Третий слой нечеткой нейронной сети образован из нечетких формальных нейронов «ИЛИ» (по числу нечетких заключений $\tilde{y}_j, j = 1 \dots n$) и формирует вектор выходных нечетких заключений в соответствии с заданной экспертами системой нечетких правил [72, 154, 157].

4.3 Разработка показателей устойчивости элементов и узлов БЦВК к деструктивному воздействию ЭМИ

4.3.1 Требования к элементам БЦВК

Исходя из требований, предъявляемых к надежности и достоверности передачи данных в бортовой сети, будем учитывать следующие требования:

- средства обнаружения ошибок должны выявлять все пакеты, содержащие до четырех искажений битов. Если же достоверность передачи достаточно высока, сеть не должна сама исправлять обнаруженные ошибки. Функции анализа, принятия решения и исправления ошибки должны выполняться ИСАУ;

- появление пакета с обнаруженной ошибкой не чаще одного раза в сутки. Частота обнаруживаемых ошибок может иметь порядок 10^{-8} ;

- отказ или отключение питания подключенного устройства должны вызывать только переходную ошибку.

Проведенный анализ работы современных БЦВК также показал, что большое отрицательное воздействие на работу бортовой сети может нанести не предусмотренное отключение, «зависание» БЦВМ или падение напряжения в сети.

Для защиты данных в случае возникновения таких ситуаций в БЦВК применяются различные виды резервирования, например, автоматическая передача функций управления резервной БЦВМ. Для этого применяются специальные устройства переключения, имеющие платы-адаптеры. При этом сетевая операционная система (ОС) взаимодействует с адаптером, и в случае сбоя в системе оповещает об этом подсистемы БЦВК. В БЦВК имеет смысл снабжать такими устройствами только БЦВМ и наиболее важное сетевое оборудование: концентраторы и коммутаторы.

Поражающее действие ЭМИ на элементы и узлы БЦВК может быть вызвано как непосредственным воздействием импульсных электромагнитных полей

на элементы и узлы БЦВК, так и наведенными в соединительных линиях и цепях токами и напряжениями. Чувствительность элементов БЦВК к воздействию ЭМИ в высокой степени зависит от положения ее относительно направления векторов электрического и магнитного полей, геометрических размеров электрических цепей и контуров, их конфигурации, взаимных связей, номиналов электрических нагрузок, величин емкостных и индуктивных связей с элементами конструкций системы и окружающей средой, качества экранирования и др.

Особенностью ЭМИ по сравнению с другими поражающими факторами является способность энергии ЭМИ передаваться по соединительным линиям и воздействовать на входные элементы систем и устройств БЦВК.

Для БЦВК, у которых корпуса способны выполнять роль электромагнитных экранов, или расположенных в экранированных объемах, ЭМИ воздействует главным образом через соединительные линии и разъемы. Таким образом, все виды проводящих объектов, имеющих в системе, играют роль коллекторов опасной энергии ЭМИ. Наведенные в проводниках токи и напряжения могут привести к электрическому пробое (например, пробоем изоляции кабеля), или к повреждению подключенных к проводникам устройств, если в них имеются чувствительные к перенапряжению элементы. Наведенные импульсы могут разрушить и нарушить работу элементов БЦВК почти одновременно в ряде мест. Наведенные в проводниках токи и напряжения, как правило, тем больше, чем больше длина проводника, и зависят от условий его прокладки, ориентации и т.д. Наводка в рабочей цепи кабеля существенно зависит от того, является ли данный кабель экранированным или нет.

Особая опасность ЭМИ для БЦВК, кроме наличия возможных проводящих коммуникаций, вызвана сравнительно низкой электрической прочностью их элементов, а также высокой чувствительностью к электрическим помехам.

С точки зрения оценки воздействия ЭМИ на БЦВК могут быть разбиты на составляющие системы БЦВК, каждая из которых может рассматриваться отдельно. Это обусловлено следующими причинами:

- ограниченными возможностями существующих методов оценки

воздействия ЭМИ на БЦВК в целом;

- различием требований к различным бортовым ЦВК по защищенности от воздействия ЭМИ;

- отсутствием в подавляющем большинстве случаев гальванической связи между всеми элементами БЦВК.

В общем случае воздействующими факторами на элементы и узлы БЦВК при воздействии ЭМИ являются:

- электромагнитные поля (ЭМП), воздействующие на элементы БЦВК;
- электромагнитные поля, проникающие через конструкции экранированных объемов;
- ЭМП, заносимые импульсными токами с внешних кабельных и инженерных коммуникаций внутрь экранированных объемов;
- импульсные напряжения и токи, наводимые в цепях «жила - экран» кабелей и воздействующие на изоляцию оборудования и аппаратуры, имеющих гальваническую связь с внешними кабельными системами;
- импульсные напряжения и токи, наводимые в межстоечных кабелях ЭМП, проникающими через неоднородности экранов и ЭМП, заносимыми по внешним инженерным системам.

Технологическое оборудование БЦВК, как правило, выполняется на микросхемах, имеющих в общем случае достаточно низкую к воздействию импульсных токов и напряжений, а в совокупности с межстоечными соединительными линиями критична к воздействующим ЭМИ [1].

Одним из основных требований к БЦВК является обеспечение живучести, т.е. способности выполнить свои функции при воздействии внешних поражающих электромагнитных факторов. Такой показатель живучести, как стойкость к ЭМИ, является одним из основных для современных БЦВК и приобретает все большую значимость для проектируемых систем, учитывая тенденцию перехода на интегральные микросхемы, увеличения быстродействия, уменьшения энергетических уровней сигналов и т.д.

В результате воздействия ЭМИ на элементы БЦВК могут быть следующие типовые повреждения и отказы:

- нарушение функционирования отдельных подсистем или БЦВК в целом в результате ложных срабатываний импульсных схем во входных и выходных цепях блоков аппаратуры;
- выход из строя пультов, щитов из-за пробоя изоляции входных или выходных элементов этих блоков;
- выход из строя источников питания БЦВК в результате пробоя изоляции трансформаторов во входных цепях блоков питания, что приводит к отказу аппаратуры автоматики, связанных с данным блоком питания;
- полная потеря работоспособности отдельных подсистем БЦВК в результате пробоя изоляции и выхода из строя кабелей.

В зависимости от уровня воздействия полей ЭМИ на БЦВК могут возникать как сочетания типовых отказов элементов, так и все типовые отказы одновременно.

Из проведенных отечественных и зарубежных исследований воздействия ЭМИ на элементы и узлы БЦВК известно, что уровни наводимых напряжений в элементах системы и кабельных линиях могут превышать значения их импульсной прочности, либо напряжения ложного срабатывания. Величины наводок зависят от целого ряда факторов, например, от конструктивных особенностей объектов и материала экранов, длина кабелей и др. Необходимость защиты БЦВК сильно возрастает из-за использования в своем составе микропроцессоров и микросхем, которые особенно чувствительны к полям ЭМИ.

Соединительные линии, из-за своей протяженности, более всего подвержены воздействию ЭМИ. Способность кабельных коммуникаций передавать электромагнитную энергию на расстояния приводит к тому, что наведенные токи и напряжения могут выводить из строя оборудование и аппаратуру, расположенные вне зоны действия поражающих факторов.

И, наконец, проблема проникновения ЭМИ внутрь корпусов и экранов элементов БЦВК. Очевидно, что полностью герметичный экран любой реальной

толщины практически непроницаем для ЭМИ. Если принять нижнюю границу спектра ЭМИ в 40 МГц, то соответствующий скин-слой для меди составит 0,01 мм. Однако в экранах элементов БЦВК всегда имеются отверстия и щели, что не позволяет провести достоверную оценку.

4.3.2 Анализ эффектов, возникающих в БЦВК при деструктивном воздействии СК ЭМИ

Проведенные эксперименты показали, что режимами воздействия ЭМИ на элементы БЦВК, насыщенных цифровыми устройствами при которых наступают сбои, могут считаться следующие:

- амплитуда воздействующих импульсов поля 10 кВ/м;
- диапазон частот воздействующих импульсов должен находиться в интервале 10-100 Гц – в случае применения излучателей на основе искровых разрядников и 100-1000 Гц – в случае применения излучателей на основе полупроводниковых ключей. Длительность излучаемых импульсов (или длительность фронта генераторов, возбуждающих антенну) должна находиться в пределах 0,25-0,5 нс.

Проведенные исследования показали, что в общем случае воздействующими факторами на элементы БЦВК при воздействии ЭМИ являются:

- импульсные напряжения и токи в печатных платах элементов БЦВК, наводимые электромагнитными полями, проникающими через неоднородности корпусов БЦВМ и коммутаторов;
- импульсные напряжения и токи, наводимые в цепях «жила-экран» соединительных кабелей и проводов типа витая пара;
- электромагнитные поля, проникающие через экраны конструкций элементов БЦВК и соединительные разъемы.

Анализ эффектов, возникающих в БЦВК при деструктивном воздействии ЭМИ, осуществлялся по результатам экспериментальных исследований [69, 83, 79, 123, 127-129, 206]. Излучающая система и исследуемые компоненты БЦВК располагались на передвижных диэлектрических площадках, которые

взаимно перемещались относительно друг друга. В начальном положении излучающая система находилась на расстоянии, при котором не наблюдалось сбоев в работе БЦВМ, затем производилось сближение излучающей системы и исследуемого объекта и фиксировались расстояние, на котором отмечалось воздействие на элементы БЦВК. После перезагрузки БЦВМ эксперимент повторялся несколько раз. Исследования проводились при вертикальной поляризации импульсов напряженности электрического поля. Используемая в эксперименте излучающая система состояла из антенно-фидерной системы, обостряющего разрядника и возбуждающего генератора. Антенно-фидерная система имела четыре рупора конической формы длиной 60 см.

В результате исследований были получены следующие результаты.

БЦВМ на базе Pentium 2. При приближении генератора к БЦВМ при амплитуде импульса $E=5$ кВ/м через 1-5 сек происходило «зависание» устройства ввода-вывода и, как следствие, «зависание» БЦВМ. Восстановление БЦВМ было возможно только при полной перезагрузки. При $E=15$ кВ/м после повторных включений в одной из БЦВМ были обнаружены испорченные файлы. При $E=30$ кВ/м (ЦВМ находилась в ближней зоне облучения) у БЦВМ при включении неоднократно были обнаружены сбои в установках в базовой системе ввода-вывода (BIOS).

БЦВМ на базе Pentium 3. В режиме «SAVE MODE» при $E=3,5$ кВ/м происходило «зависание» ЦВМ в течение 10 сек работы генератора. Восстановление БЦВМ было возможно только при полной перезагрузки. В нормальном режиме работы БЦВМ (в дальнейшем исследования проводились только в этом режиме) её «зависание» происходило на расстоянии при $E=6$ кВ/м. Наблюдался эффект, описанный выше. Время проявления эффекта 1-10 сек. При $E=7,8$ кВ/м при воздействии в течение 2 секунд происходило «зависание» через сбой устройства ввода-вывода. После, отключения устройства ввода-вывода, сервер через 5-10 сек восстанавливался. При воздействии в течение 10 сек в той же точке в некоторых случаях «зависание» БЦВМ удавалось остановить отключением устройства ввода-

вывода, а в некоторых случаях только полной перезагрузкой. При $E = 8,5$ кВ/м «зависание» БЦВМ происходило не более, чем через 2 сек. На этом расстоянии «зависание» БЦВМ происходило также при полностью отключенном устройстве ввода-вывода.

БЦВМ на базе Pentium 4. Эффект «зависания» наблюдался только при $E = 7,8$ кВ/м при воздействии в течение 10 сек. При этом «зависание» происходило через сбой устройства ввода-вывода. Устойчивый эффект наблюдался при 8,5 кВ/м. После отключения устройства ввода-вывода БЦВМ через 5-10 сек восстанавливалась. При $E = 11$ кВ/м «зависание» БЦВМ происходило не более, чем через 5 сек. При этом «зависание» происходило также при полностью отключенном устройстве ввода-вывода.

БЦВМ на базе Pentium 4 и Xeon. При воздействии генератора «ГСС-ОФИ-1» с обострителями ОМ-30 или ОП-30 при $E = 2,5$ кВ/м менее чем через 1 сек работы генератора происходило «зависание» БЦВМ. Эффект сохранялся и при полном отключении устройства ввода-вывода. При воздействии излучателя в составе ГИН-30 и А-4 тот же эффект наблюдался при $E = 2,6$ кВ/м. При воздействии излучателя «И-10/4» устойчивый сбой БЦВМ наступал при $E = 2,5$ кВ/м.

Исследования влияния поляризации показали, что процессы, наблюдаемые при «зависании» БЦВМ практически такие же, что и при вертикальной поляризации, однако они наблюдаются при большей амплитуде поля – примерно на 30 %. При повороте вектора напряженности электрического поля на 40 % от горизонта эффект оказался идентичен вертикальной поляризации.

Результаты экспериментальных исследований показали, что наибольшее влияние на БЦВМ оказывают импульсы поля длительностью $T_{\text{и}} \approx 400$ пс. Импульсы более длинные (~ 600 пс), как и более короткие (~ 220 пс) требуют большей напряженности поля.

Наибольшее влияние на БЦВМ оказывают СКИ ЭМИ длительностью 190-240 пс. Все эти импульсы получены на разных антеннах, которые воз-

буждаются импульсами напряжения с фронтом ~ 200 пс. Уменьшение фронта импульса генератора до 100-120 пс резко снижает эффективность влияния излученного СКИ ЭМИ [69, 83].

Также можно сделать вывод, что влияние частоты следования импульсов происходит только в узком диапазоне расстояний, находящемся в пределах (5-10) % от расстояния сбоя БЦВМ.

Исследование распространения ЭМИ на подвижном объекте показали, что:

а) на подвижном объекте имеют место «провалы» в эффекте сбоя при приближении излучателя к исследуемому объекту. Вероятно, что эти «провалы» объясняются не ослаблением эффекта сбоя излучением, а усилением этого эффекта на больших расстояниях из-за вторичных отражений;

б) различные типы бортовых ВМ имеют различные соотношения в уровнях уязвимости на подвижном объекте. Так проведенные испытания показали, что наибольшую устойчивость к воздействию ЭМИ имеют БЦВМ на базе Pentium 2. С усовершенствованием БЦВМ снижается их стойкость к воздействию ЭМИ. Так, если БЦВМ на базе Pentium 2 практически не удалось вывести из строя полем напряженностью 30 кВ/м, то воздействие таким же полем на БЦВМ на базе Pentium 3 привело к более серьезным последствиям и потребовалась новая установка BIOS. БЦВМ на базе Pentium 4 достаточно было напряженности поля в два раза меньшей, чем Pentium 2, для появления сбоев, требующих полной перезагрузки. Следует отметить, что эксперименты проводились с частотой повторения импульсов 100 Гц. При повышении частоты следует ожидать увеличения чувствительности БЦВМ к воздействию ЭМИ, особенно при совпадении частоты или кратности повторения импульсов с одной из тактовых частот БЦВМ.

После исследования последствий воздействия ЭМИ на отдельные элементы и узлы БЦВК были проведены экспериментальные исследования воздействия ЭМИ на БЦВК в целом. Две БЦВМ соединялись в

сеть при помощи сетевого пятиканального концентратора (соединительные провода длиной 10 и 20 м). Для проведения экспериментальных исследований был использован БЦВК в следующей конфигурации [69, 83]:

а) БЦВМ, характеристики которых приведены в таблице 4.2.

Т а б л и ц а 4.2 – Характеристики БЦВМ

	Характеристики БЦВМ
БЦВМ №1	Intel Pentium 4 2800 МГц, объем ОЗУ – 512 Мб, объем жесткого диска – 120 Гб
БЦВМ №2	AMD Athlon+ 2600 МГц, объем ОЗУ – 256 Мб, объем жесткого диска – 80 Гб

б) сетевой пятиканальный концентратор LG LH1005 (СПК) с комплектом соединительных проводов UTP-5 длиной 10 и 20 м.

При воздействии на БЦВК наблюдались следующие эффекты, нарушения работоспособности, как самих БЦВМ, так и БЦВК в целом:

- временный отказ систем ввода-вывода, при котором их работа невозможна или происходило искажение вводимых в БЦВМ данных;
- сбой видеосистемы БЦВК, при этом наблюдались существенные искажения изображения на мониторе при воздействии ЭМИ;
- «зависание» БЦВМ, требующее для восстановления работоспособности полной перезагрузки, либо самопроизвольная перезагрузка;
- сбой в работе БЦВК, сопровождаемый или разрывом соединения или искажением передаваемых данных или снижением скорости передачи информации во время воздействия.

Необходимо отметить, что при воздействии ЭМИ на концентратор с напряженностями электрического поля 2,5 кВ/м при длительности воздействующего импульса 790 пс наблюдалось полное блокирование работы БЦВК.

В ходе проведения исследований проводились измерения параметров наводок в бортовой сети, выполненных на 4-х канальных витых парах [125, 137, 183]. Установлено, что амплитуда наводок на отдельных линиях

информационного кабеля, при которых происходит 100% потеря информационных пакетов, составляет $6 \div 5$ В. Типовые осциллограммы сигнала наводки на сетевом кабеле, соединяющем БЦВМ с концентратором в эксперименте, когда воздействие осуществляется только на концентратор, представлены на рисунках 4.5 и 4.6.

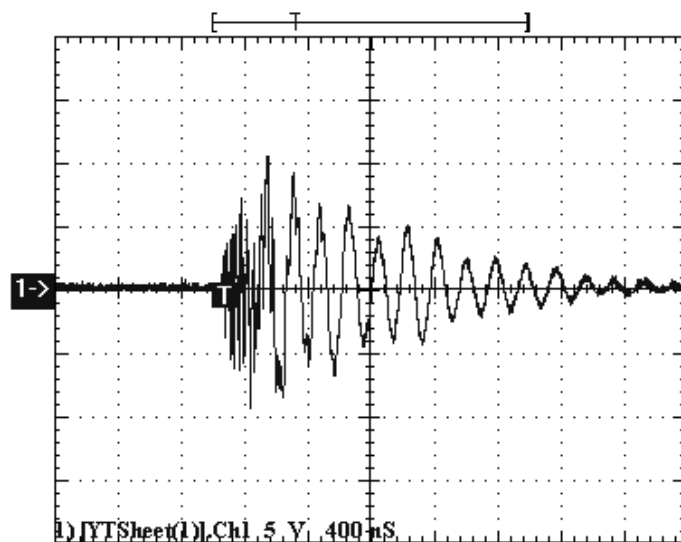


Рисунок 4.5 - Типовая осциллограмма сигнала наводки на сетевом кабеле при воздействии ЭМИ ($\tau_{и} = 790$ пс, 100% потерь)

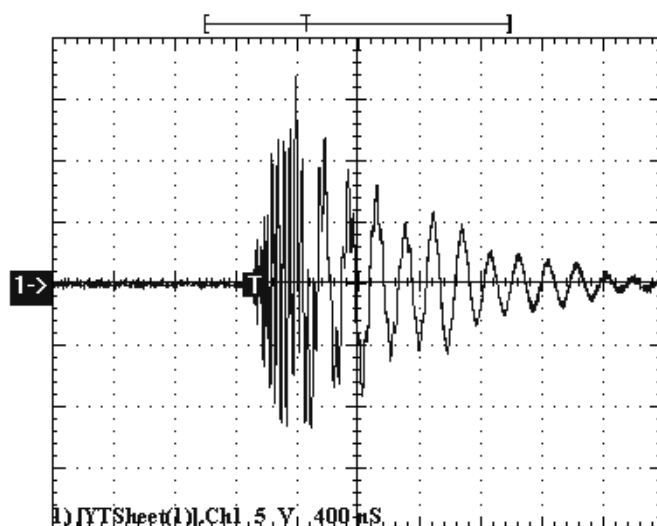


Рисунок 4.6 - Типовая осциллограмма сигнала наводки на сетевом кабеле при воздействии ЭМИ ($\tau_{и} = 170$ пс, 100% потерь)

Результаты анализа вышеуказанных эффектов воздействия ЭМИ на БЦВК, что уровни наводок представляют существенную опасность для

оборудования БЦВК и могут привести к полному выходу его из строя.

4.3.3 Критерии оценки уязвимости БЦВК от воздействия деструктивных СК ЭМИ

Для выработки критериев оценки уязвимости были проведены исследования по воздействию ЭМИ на БЦВК в результате которых:

- были определены наиболее уязвимые элементы БЦВК;
- проведены исследования эффектов воздействия ЭМИ на БЦВК различного назначения;
- определены критерии воздействия ЭМИ на различные типы БЦВК.

В качестве объектов исследований использовались средства вычислительной техники различного назначения и исполнения, а так же построенные на их основе БЦВК.

При воздействии на БЦВК различного назначения исследовались как обратимые эффекты воздействия, так и необратимое поражение устройств.

Обратимые эффекты воздействия выражались во временном отказе устройств ввода-вывода, систем самодиагностики и т.д.

Необратимые отказы происходили при уровнях воздействия в от 4 до 10 раз больших, чем уровни уязвимости. Наиболее уязвимыми являлись внешние для БЦВМ устройства ввода-вывода.

При воздействии ЭМИ на БЦВК наблюдались следующие типы эффектов:

- частичная потеря тестовых пакетов, снижение пропускной способности бортовой сети;
- полная потеря тестовых пакетов, блокирование работы бортовой сети на время воздействия;
- временное блокирование коммутационных устройств БЦВК;
- «зависание» одной из БЦВМ, входящих в БЦВК;
- «зависание» устройств ввода-вывода информации одной из БЦВМ, входящих в БЦВК.

Обобщённые данные по уровням уязвимости элементов цифровых вычислительных комплексов (ЦВК) приведены в таблице 4.3.

Т а б л и ц а 4.3

Объект исследования, группа	Уровни уязвимости, кВ/м	
	Сбой	Отказ
ЦВК общего назначения	1...1,5	10...25
ЦВК в промышленном исполнении	0,5...1,5	5...100
ЦВК на базе беспроводных сетей	0,05...0,2	5...25
БЦВК	5...10	>100

Во всех случаях эффектом воздействия было изменение напряжения на выходе микросхемы, которое, в зависимости от параметров воздействующих сигналов и типа интегральной схемы (ИС) могло приводить к следующим последствиям:

1. Изменение логического состояния микросхемы на время равное или превышающее длительность воздействующего импульса. Превышение длительности сбоя ИС над длительностью помехи наиболее характерно для воздействия СКИ-сигналов. Рассматриваемый эффект характерен для случая, когда длительность помеховых сигналов много меньше периода тактовых импульсов микросхемы.

2. Искажение временных параметров импульсов на выходе ИС. Данный эффект наблюдался при воздействии на микросхему длинных радиоимпульсов (наведенные сигналы в низкочастотных линиях связи) с несущей частотой в диапазоне 0,3...0,5 ГГц с амплитудой, недостаточной для переключения ИС. В результате воздействия происходит существенное увеличение временного интервала, в течение которого выход ИС находится в состоянии логической единицы.

3. Катастрофический отказ ИС. Данный вид отказа наблюдался при достаточно больших уровнях и/или временах воздействия. Особенно характерен для воздействия на микросхемы импульсов с максимумом спектра

0,3...0,5 ГГц. Основными причинами необратимых отказов являются: тепло-вой вторичный пробой, вызванный эффектом «защелки» (для МОП-структур) и сверхбольшими амплитудами сигналов.

Проведённый комплекс экспериментальных исследований позволил определить зависимость уровней функционального поражения элементной базы, а именно, амплитуды помехи на логическом входе элемента (цепи питания, общего сброса и т.д.) от её спектрального состава и длительности. В качестве примера на рисунке 4.7 приведены зависимости показателя нарушения функционирования логических элементов от несущей частоты воздействующих импульсов (5, 50, 100 МГц). Знание этих зависимостей позволяет учесть и влияние параметров элементной базы на уязвимость к действию ЭМИ на этапе разработки устройств БЦВК.

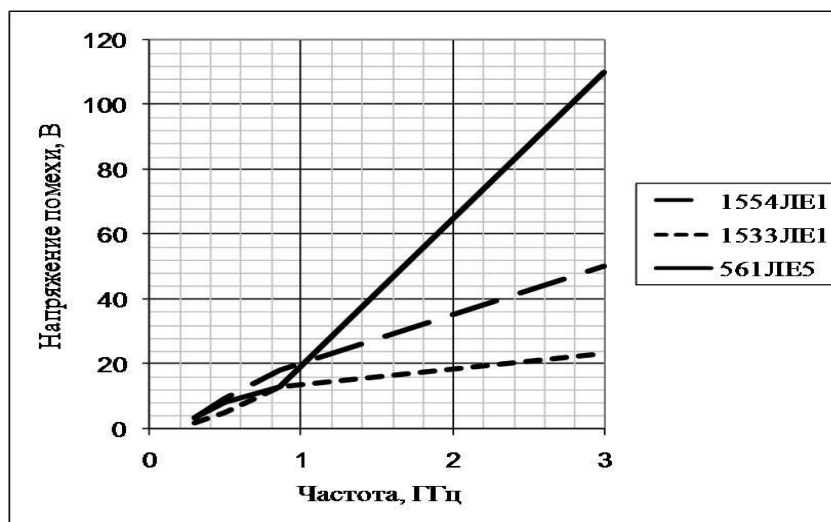


Рисунок 4.7 - Зависимость показателя нарушения функционирования логических элементов от несущей частоты воздействующих импульсов

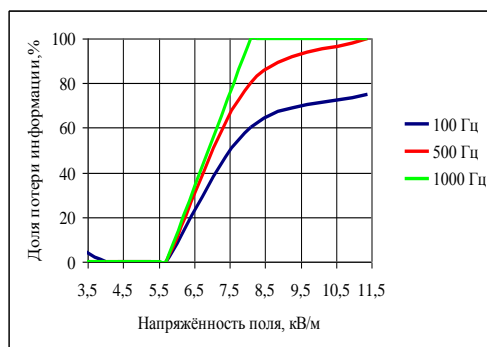
Проведенный анализ результатов экспериментов показал, что основными показателями воздействия ЭМИ на элементы и узлы БЦВК, при которых наступают сбои, являются:

- амплитуда воздействующих импульсов поля 10 кВ/м;
- диапазон частот воздействующих импульсов;
- длительность излучаемых импульсов.

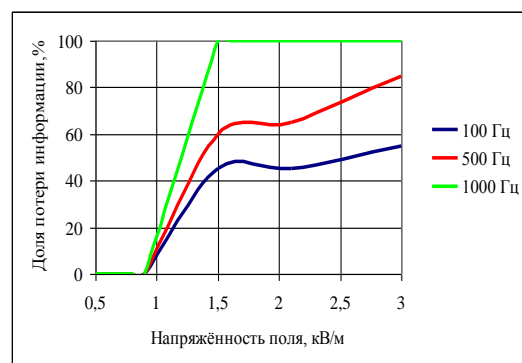
Необходимо отметить, что при воздействии ЭМИ на коммуникационное оборудование (коммутатор) с напряженностями электрического поля 2,5 кВ/м при длительности воздействующего импульса 170 пс и 0,7 кВ/м при длительности воздействующего импульса 790 пс наблюдалось полное блокирование работы БЦВК.

В ходе проведенных исследований были сделаны измерения параметров наводок в бортовых линиях связи, выполненных на 4-х канальных витых парах (UTP 5 cat.). Измерения проводились вне зоны воздействия электромагнитного поля при помощи активного пробника P6243 и осциллографа Tektronix TDS784D. Установлено, что амплитуда наводок на отдельных линиях информационного кабеля, при которых происходит 100% потеря информации, составляет 5-6 В.

При проведении экспериментальных исследований установлено, что эффективность помехового действия ЭМИ на системы функционирующие в циклических режимах зависит от частоты следования воздействующих импульсов. Оценка зависимости влияния эффективности функционирования БЦВК была проведена по критерию процента потерь информационных пакетов. Исследования проводились для длительностей ЭМИ 0,2 нс (рисунок 4.8-а) нс и 0,8 нс (рисунок 4.8-б) [69].



а)



б)

Рисунок 4.8 - Зависимость потери информационных пакетов бортовой сети от частоты воздействующего ЭМИ

На рисунке 4.8 представлена зависимость импульсной напряженности

электрического поля в спектральном диапазоне обеспечивающей потерю информации в бортовой сети от частоты следования воздействующих импульсов.

Проведенные исследования также показали, что применение экранированных объемов для размещения ЦВК значительно снижает эффективность ЭМВ и позволяет исключить влияние ЭМП на функционирование цифровой аппаратуры до уровней воздействия не менее 20...25 кВ/м на поверхности защитного экрана.

Установлено, что основным, и самым значимым эффектом при воздействии на БЦВК ЭМВ является искажение передаваемой по бортовой сети информации. Причиной искажения информации является формирование наводок на линиях связи. Исследования влияния параметров функционирования БЦВК на её уязвимость к воздействию ЭМИ показали, что наиболее уязвимыми являются быстродействующие БЦВМ использующие «длинные», более 128 кБ, информационные пакеты. На рисунке 4.9 показаны зависимости процента потерь информации для различных размеров передаваемых информационных пакетов.

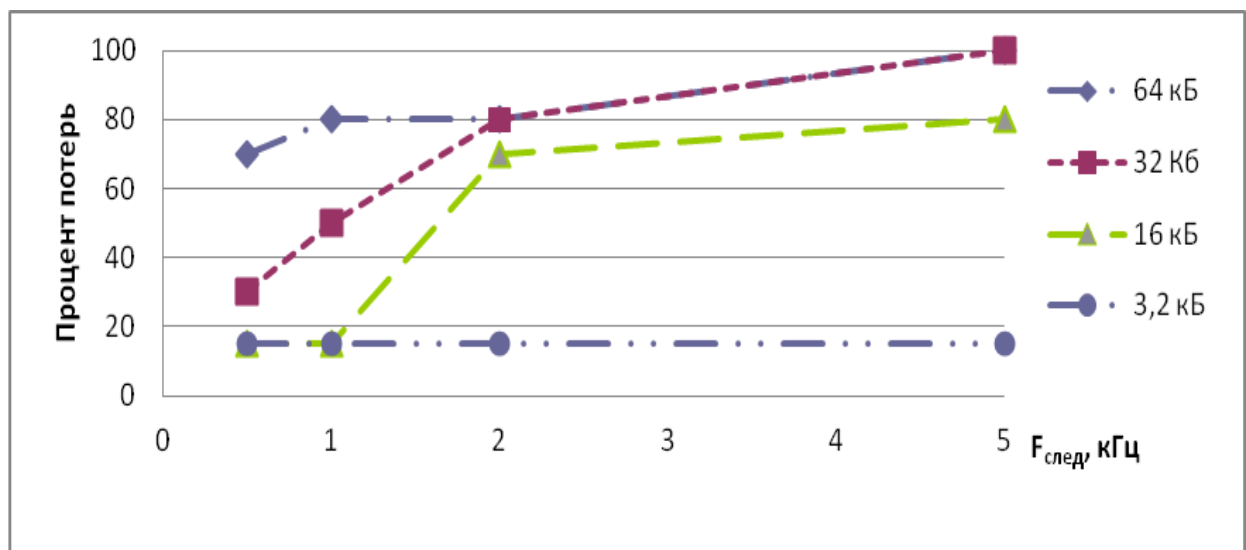


Рисунок 4.9 - Зависимость процента потерь информации от частоты следования ЭМИ

Проведенные исследования нарушений работоспособности БЦВК и

его элементов, позволили определить критерии оценки воздействия [69, 83, 95, 96].

Рассмотрим следующие критерии оценки уязвимости БЦВК от деструктивного ЭМ воздействия:

1. Нарушение функционирования устройств ввода-вывода БЦВК.
2. Временный отказ либо сбой видеосистемы БЦВК, сопровождающийся потерей (существенным искажением) изображения на мониторах во время воздействия ЭМИ.
3. Временный отказ («зависание») БЦВМ, требующий для восстановления работоспособности системной перезагрузки.
4. Необратимые отказы элементов БЦВК.
5. Сбой в работе БЦВК.

На практике применение того или иного критерия определяется требованиями к качеству функционирования системы и элемента в частности, и определяется требованиями к БЦВК в целом, как, например: возможность устойчивого функционирования в реальном масштабе времени, гарантированность доступа к информации и т.д.

Следовательно, для формализации процедуры функционирования СО-ДЭМВ по решению задачи определения уязвимости БЦВК к деструктивному воздействию ЭМИ, необходимо определить зависимость параметров сигнала на входе потенциально уязвимого элемента БЦВК от параметров воздействующего ЭМИ.

По аналогии с [37] решение о расширении классификаций деструктивных ЭМ воздействий производится в соответствии с системой оценок достоверности обнаружения ЭМ воздействий в разрезе отдельных датчиков ЭМВ или конкретных уровней ИСАУ и аналогичных оценок потенциального ущерба, также соотносимых с отдельными датчиками ЭМВ или отдельными уровнями ИСАУ [72]. Потенциальный ущерб будем рассматривать в относительных величинах, к примеру, по отношению к значению максимально допустимого ущерба в БЦВК.

Результаты экспертных оценок, а также последующего обучения нейронечетких сетей могут быть представлены в виде матрицы достоверности «ЭМВ – датчики ЭМВ» ME

$$ME_{m \times n} = \begin{pmatrix} me_{11} & me_{12} & \vdots & me_{1n} \\ me_{21} & me_{22} & \vdots & me_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ me_{m1} & me_{m2} & \vdots & me_{mn} \end{pmatrix},$$

где m – число датчиков ЭМВ;

n – число уровней СОДЭМВ.

Активность уровня СОДЭМВ определяется строкой показателей, представленных строкой показателей значимости [72, 97, 154].

Если матрицу ME анализировать в разрезе уровней СОДЭМВ и каждый столбец матрицы рассматривать в качестве вектора активности отдельного уровня СОДЭМВ, то элементам строки интегральных показателей значимости уровней можно поставить в соответствие модуль вектора активности одноименного уровня в системе обнаружения ДЭМВ.

Сопоставление интегральных показателей в пределах строки позволяет выявить наиболее задействованные уровни СОДЭМВ по обнаружению известных ЭМВ на БЦВК.

Аналогично, если матрицу ME анализировать в разрезе датчиков ЭМВ и каждую строку матрицы рассматривать в качестве вектора активности отдельного ДЭМВ, то элементам столбца интегральных показателей значимости датчиков ЭМВ можно поставить в соответствие длину вектора активности одноименного датчика ЭМВ в СОДЭМВ

$$x_i = \sqrt{\sum_{j=1}^n me_{ij}^2}, i = 1, \dots, m. \quad (4.1)$$

Сопоставление интегральных показателей в пределах столбца позволяет выявить наиболее задействованные датчики ЭМВ в СОДЭМВ.

Приведенные выше показатели будут более информативными, если учитывать не только достоверность использования датчиков ЭМВ в структуре СОДЭМВ, но и показатели потенциального ущерба, возникающего в результате ЭМ воздействия и который может быть предотвращен (существенно уменьшен) системой обнаружения деструктивных ЭМВ. С этой целью по аналогии с [3] оценку стойкости БЦВК можно косвенно связать с предотвращением ущерба БЦВК, и, кроме того, использовать экспертные оценки для сопоставления, с одной стороны, множества ЭМВ с потенциальным ущербом от их воздействия, с другой стороны, размера потенциального ущерба с местом ЭМВ в структуре БЦВК.

4.4 Методика оценки стойкости БЦВК к деструктивному воздействию СК ЭМИ

Для уровней СОДЭМВ формируются экспертные оценки достоверности обнаружения заданного множества ЭМВ посредством набора датчиков ЭМВ и предотвращенного ущерба, исходя из опыта экспертов по ЭМС [72, 74]. Ущерб от деструктивных ЭМВ на БЦВК оценивают в относительных величинах, например, по отношению к максимально допустимой для объекта величине [72, 37, 89]. Расчет потенциального ущерба производится за определенный промежуток времени с учетом частоты ЭМВ.

1) Исходные данные – результаты экспертных оценок, определенные, например, по методу парных сравнений, представляют в матричной форме.

Для каждого уровня многоуровневой ИСАУ оценивается достоверность обнаружения ЭМВ датчиками ЭМВ с последующим формированием матрицы достоверности «ДЭМВ – ЭМВ» *MT* [72, 97, 154]:

$$MT_{m \times p} = \begin{pmatrix} mt_{11} & mt_{12} & \vdots & mt_{1p} \\ mt_{21} & mt_{22} & \vdots & mt_{2p} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ mt_{m1} & mt_{m2} & \vdots & mt_{mp} \end{pmatrix},$$

где m – число датчиков ЭМВ, p – число известных деструктивных ЭМВ, и матрицы достоверности «ЭМВ – уровни системы» TE :

$$TE_{p \times n} = \begin{pmatrix} te_{11} & te_{12} & \vdots & te_{1n} \\ te_{21} & te_{22} & \vdots & te_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ te_{p1} & te_{p2} & \vdots & te_{pn} \end{pmatrix},$$

где p – число известных деструктивных ЭМВ,

n – число уровней системы.

Для каждого уровня многоуровневой ИСАУ оценивается уровень потенциального ущерба и формируются матрицы «уровни – ЭМВ» ET :

$$ET_{m \times p} = \begin{pmatrix} et_{11} & et_{12} & \vdots & et_{1p} \\ et_{21} & et_{22} & \vdots & et_{2p} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ et_{n1} & et_{n2} & \vdots & et_{np} \end{pmatrix},$$

где n – число уровней ИСАУ,

p – число известных деструктивных ЭМВ, и матрицы «ЭМВ – ДЭМВ» TM

$$TM_{p \times m} = \begin{pmatrix} tm_{11} & tm_{12} & \vdots & tm_{1m} \\ tm_{21} & tm_{22} & \vdots & tm_{2m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ tm_{p1} & tm_{p2} & \vdots & tm_{pm} \end{pmatrix},$$

где p – число известных деструктивных ЭМВ, m – число датчиков ЭМВ.

2) Для каждого уровня ИСАУ экспертные оценки в виде системы нечетких продукционных правил отображают в структуре нейро-нечетких сетей. В процессе последующей адаптации нейро-нечетких сетей (в составе

иерархических уровней ИСАУ) на обучающей выборке, соответствующей некоторому подмножеству множества известных деструктивных ЭМВ производится автоматическая коррекция системы нечетких правил, а также показатель потенциального ущерба и достоверности обнаружению набора ЭМВ соответствующим уровнем или датчиками ЭМВ ИСАУ. Корректность исходных экспертных оценок может быть проверена сопоставлением элементов матриц либо интегральных оценок стойкости элементов и узлов БЦВК до и после процесса обучения нейро-нечетких средств обнаружения деструктивных ЭМВ [72, 97, 154].

Интегральные оценки стойкости БЦВК получаются в результате операций над матрицами. Умножение матриц достоверности «ДЭМВ–ЭМВ» MT и «ЭМВ – уровни» TE позволяет получить матрицу «ДЭМВ–уровни» ME – матрицу достоверности активации известных датчиков ЭМВ, распределенных по уровням ИСАУ, для обнаружению известных ЭМВ

$$ME_{m \times n} = \begin{pmatrix} me_{11} & me_{12} & \vdots & me_{1n} \\ me_{21} & me_{22} & \vdots & me_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ me_{m1} & me_{m2} & \vdots & me_{mn} \end{pmatrix},$$

где m – число датчиков ЭМВ, n – число уровней ИСАУ, а умножение матриц потенциального ущерба ET и TM – матрицу потенциального ущерба «уровни–ДЭМВ» EM , отражающую распределение потенциального ущерба от воздействия известных деструктивных ЭМИ по датчикам ЭМВ и уровням ИСАУ [72, 97, 154]:

$$EM_{n \times m} = \begin{pmatrix} em_{11} & em_{12} & \vdots & em_{1m} \\ em_{21} & em_{22} & \vdots & em_{2m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ em_{n1} & em_{n2} & \vdots & em_{nm} \end{pmatrix},$$

где n – число уровней ИСАУ;

m – число датчиков ЭМВ.

Промежуточные оценки в виде строки и столбца интегральных показателей характеризуют активность использования отдельного ДЭМВ либо отдельного уровня в рамках СОДЭМВ, а также позволяют оценить потенциальный ущерб в разрезе датчиков ЭМВ и уровней ИСАУ.

Дальнейшие операции над матрицами ME и EM дают возможность обобщить в диагональных элементах итоговой матрицы как показатель достоверности активации механизма защиты в результате ЭМВ, так и потенциального ущерба от его реализации.

Умножением матрицы достоверности ME и матрицы потенциального ущерба EM получают квадратную матрицу достоверности потенциального ущерба «ДЭМВ – ДЭМВ» MM :

$$MM_{m \times m} = \begin{pmatrix} mm_{11} & mm_{12} & \vdots & mm_{1m} \\ mm_{21} & mm_{22} & \vdots & mm_{2m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ mm_{m1} & mm_{m2} & \vdots & mm_{mm} \end{pmatrix},$$

где m – число ДЭМВ, а умножением матрицы EM и матрицы ME получают квадратную матрицу достоверности потенциального ущерба «уровни – уровни»

$$EE_{n \times n} = \begin{pmatrix} ee_{11} & ee_{12} & \vdots & ee_{1n} \\ ee_{21} & ee_{22} & \vdots & ee_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ ee_{n1} & ee_{n2} & \vdots & ee_{nn} \end{pmatrix},$$

где n – число уровней ИСАУ.

Для матрицы MM в качестве обобщающего показателя можно рассматривать вектор, образованный диагональными элементами $mm_{ij} = p_i, i = j = 1, \dots, m$, матрицы – вектор достоверности распределения потенциального ущерба по датчикам ЭМВ СОДЭМВ

$$P_{t \times m} = (p_1, p_2, \dots, p_m), \quad (4.2)$$

А для матрицы EE – вектор из ее диагональных элементов $ee_{ij} = d_i, i = j = 1, \dots, n$, – вектор достоверности распределения потенциального ущерба по уровням ИСАУ: $D_{t \times n} = (d_1, d_2, \dots, d_n)$. (4.3)

5) В качестве интегральных оценок стойкости БЦВК в разрезе датчиков ЭМВ можно использовать рейтинговый показатель R_m – длину m -мерного вектора $P_{t \times m}$

$$R_m = |P_{t \times m}| = \sqrt{\sum_{i=1}^m p_i^2}, i = 1, \dots, m, \quad (4.4)$$

а в разрезе уровней ИСАУ – рейтинговый показатель R_ε – длину n -мерного вектора $D_{t \times n}$

$$R_\varepsilon = |D_{t \times n}| = \sqrt{\sum_{i=1}^n d_i^2}, i = 1, \dots, n. \quad (4.5)$$

При этом, информация в ИСАУ может храниться и передаваться в поколениях в виде распределенных информационных полей нейронной сети: поля идентификации известных ЭМВ классификатора нижнего уровня СОДЭМВ и поля накопления опыта классификатора верхнего уровня СОДЭМВ. Процесс адаптации ИП идентификации известных ЭМВ связан решением задач классификации ЭМВ по их признакам, приводящих к коррекции ИП идентификации известных ЭМВ на нижнем уровне иерархии СОДЭМВ. Процесс адаптации ИП накопления опыта связан с решением задач кластеризации ЭМВ по совокупному вектору их признаков, формируемому статистической, сигнатурной и адаптивной СОДЭМВ[72, 97, 154].

В процессе обучения классификаторов изменяются информационные поля иерархии уровней СОДЭМВ, адекватно видоизменяются системы нечетких продукционных правил и адаптируемые матрицы экспертных оценок.

Исходное распределение ДЭМВ по уровням ИСАУ определяет размерность матриц экспертных оценок, а изменения в СОДЭМВ отражаются на

количестве и значениях элементов строк и столбцов матриц экспертных оценок.

Для матриц экспертных оценок производят расчет показателей стойкости и рейтинга стойкости БЦВК, которые используются методикой обнаружения деструктивных ЭМВ и оптимизации СОДЭМВ для анализа и коррекции, как значений в матрицах экспертных оценок, так и весах связей нейросетевых классификаторов нижнего и верхнего иерархических уровней, а также соответствующих систем нечетких правил.

Опыт экспертов по ЭМС, представленный в матричной форме, преобразуют в системы нечетких продукционных правил, описывающих соответствие посылок и заключений, например,

$$\begin{aligned} \Pi_1: & \text{если } x_1 \text{ есть } A_{11} \text{ и } \dots x_n \text{ есть } A_{1n}, \text{ то } y \text{ есть } B_1, \\ \Pi_2: & \text{если } x_1 \text{ есть } A_{21} \text{ и } \dots x_n \text{ есть } A_{2n}, \text{ то } y \text{ есть } B_2, \\ & \dots \\ \Pi_k: & \text{если } x_1 \text{ есть } A_{k1} \text{ и } \dots x_n \text{ есть } A_{kn}, \text{ то } y \text{ есть } B_k, \end{aligned}$$

где \tilde{x}_j и \tilde{y}_i – нечеткие входная переменная и переменная вывода, а A_{ij} и B_i $i = \overline{1, k}, j = \overline{1, n}$ – функции принадлежности.

В предложенной модели нашли отражение уровень идентификации известных деструктивных ЭМВ и уровень накопления опыта системы обнаружения деструктивных ЭМВ. Уровень идентификации известных ЭМВ решает задачу классификации ЭМВ $x_j, j = \overline{1, N}$ (заключения) по признакам ЭМВ $p_i, i = \overline{1, P}$ (посылки), а уровень накопления опыта – сходную задачу кластеризации ЭМВ $z_k, k = \overline{1, K}$ (заключения) по совокупному вектору их признаков, формируемому статистической, сигнатурной и адаптивной СОДЭМВ (посыл-

ки). Системы нечетких продукционных правил, в свою очередь, отображаются в «прозрачной» структуре нейро-нечетких сетей, предназначенных для последующего обучения и анализа результатов процесса адаптации.

Классификаторы адаптивных уровней СОДЭМВ организованы по схеме: система нечетких продукционных правил \rightarrow нечеткая НС \rightarrow самообучающаяся НС. Самообучающаяся НС необходима для решения задачи кластеризации. В процессе самообучения НС добиваются такого разбиения векторов обучающей выборки на группы (за счет уменьшения размеров допустимой окрестности кластеров), чтобы число групп в четком классификаторе совпало с числом правил в системе нечетких продукционных правил [72, 97, 154].

Последнее условие необходимо для создания адаптивного классификатора, который при изменении вектора посылок изменяет (при необходимости) размерность вектора заключений, т.е. решая задачу кластеризации, четкая НС изменяет размерность вектора заключений, что вызывает добавление новых правил в систему нечетких продукционных правил и соответствующих формальных нейронов в нечеткую НС. Обучение нечеткой НС и анализ весов связей вновь введенных формальных нейронов позволяют сформировать спецификацию на отсутствующие датчики ЭМВ в СОДЭМВ.

В процессе работы СОДЭМВ происходит накопление опыта по обнаружению деструктивных ЭМВ за счет адаптации информационных полей нейронных и нейро-нечетких сетей, систем нечетких продукционных правил, матриц экспертных оценок. Коррекция матриц экспертных оценок изменяет систему показателей стойкости БЦВК, которая позволяет отслеживать (посредством методики обнаружения деструктивных ЭМВ и оптимизации СОДЭМВ) динамику стойкости БЦВК и принимать решение о расширении структуры и состава ДЭМВ в многоуровневой ИСАУ.

4.5 Сценарии работы СОДЭМВ по обнаружению воздействия на БЦВК деструктивных СК ЭМИ

Результаты экспериментальных исследований показали, что при воздействии ЭМИ очень важно выявить начало воздействия электромагнитного импульса и принять своевременные меры по предотвращению его разрушительного воздействия для БЦВК. Необходимо отметить, что отличительной чертой воздействия ЭМИ на современное бортовое оборудование и его телекоммуникационную инфраструктуру является искажение, нарушение логической целостности информации, передаваемой по этим линиям связи и обрабатываемой вычислительным комплексом, а не физическое разрушение элементной базы БЦВК и каналов связи.

Рассмотрим следующие сценарии работы СОДЭМВ по обнаружению воздействия на БЦВК деструктивных ЭМИ [83, 134, 135, 133, 92]:

- 1) на основе метода анализа параметров искажений информационного потока в условиях воздействия ЭМИ;
- 2) на основе метода анализа информации датчиков обнаружения ЭМВ.

Определение параметров наводок на внешнем детектирующем элементе и проведение анализа параметров искажений информационного потока является основными исходными данными для функционирования СОДЭМВ и формирования сигнала о начале воздействия ЭМИ.

Сценарий работы СОДЭМВ на основе метода анализа параметров искажений информационного потока в условиях воздействия ЭМИ.

Наличие возможности своевременного поступления команд управления о прекращении или приостановке работы БЦВМ, коммутаторов и других телекоммуникационных устройств современных БЦВК в условиях воздействия ЭМИ позволяет минимизировать количество отказов и сбоев или вовсе их исключить, существенно сократить временные затраты на восстановление работы телекоммуникационного оборудования после возникновения сбоев и, как следствие, повысить качество функционирования

БЦВК в целом.

Данный подход гораздо уменьшает возможность дальнейшего поступления искаженной информации в обработку и позволяет оперативно принять решение ИСАУ по выбору режима работы БЦВК, который обеспечивает снижение времени на восстановление работоспособности составляющих элементов БЦВК после прекращения воздействия ЭМИ.

Сценарий работы СОДЭМВ на основе метода анализа параметров искажений информационного потока базируется на анализе информационного потока, обрабатываемого инфокоммуникационными узлами БЦВК и выявлении закономерности появления искаженных пакетов информации. При обнаружении факта воздействия известных источников ЭМИ принимается решение на блокирование искаженной информации [83, 134, 135, 133, 92].

Основными признаками воздействия источников ЭМИ на информационный поток являются периодичность и кратность частоты появления искаженных пакетов частоте формирования импульсов известными источниками ЭМИ.

Из канала связи на вход бортового вычислительного комплекса поступает последовательность сигналов, которая некоторым образом преобразуется и подается на вход СОДЭМВ, где осуществляется её анализ. Если входные данные вследствие воздействия ЭМИ на канал связи будут искажены и не будут соответствовать требованиям по уровню или форме сигнала, которые задаются применяемыми в БЦВК телекоммуникационным протоколом, то данные на выходе БЦВК, также не будут соответствовать требованиям телекоммуникационного протокола.

Таким образом, появляется возможность определения наличия воздействия ЭМИ на линию связи, основанного на проведении сравнительного анализа соответствия данных, поступающих на шину обмена данными БЦВК, требованиям используемого телекоммуникационного протокола.

Сценарий работы СОДЭМВ на основе метода анализа информации от внешних средств обнаружения ЭМИ [83, 134, 135, 133, 92]

Кроме рассмотренного подхода по обнаружению воздействия на БЦВК

деструктивных ЭМИ предлагается использовать датчики ЭМВ. Совокупность применяемых датчиков, должна представлять собой разветвленную сеть, элементы которой должны размещаться на линиях связи и вычислительных узлах БЦВК. При фиксации факта воздействия ЭМИ датчиками, от них в СОДЭМВ передается формализованная информационная посылка (сигнал) о регистрации факта воздействия ЭМИ на элементы бортовой сети.

При поступлении данного сигнала СОДЭМВ вырабатывает команды управления, поступающие по линиям связи на системную шину обмена данных БЦВМ, коммутаторов и других элементов БЦВК. При этом поступающие команды управления учитывают особенности функционирования всех инфокоммуникационных устройств, входящих в состав БЦВК, а также особенности и характер сбоев в их работе.

В качестве примера рассмотрим процедуру разделения трафика, реализуемой одним из режимов ИСАУ БЦВК при воздействии деструктивных ЭМИ [92, 153]. Основной идеей режима разделения трафика является разнесение передачи по нескольким физическим каналам отдельных частей передаваемых данных таким образом, чтобы сложность разрушения данных была максимальной. При последующей пересылке частей данных предполагается использовать промежуточные передатчики $F_i, i \in [1, n]$ (рисунок 4.10).

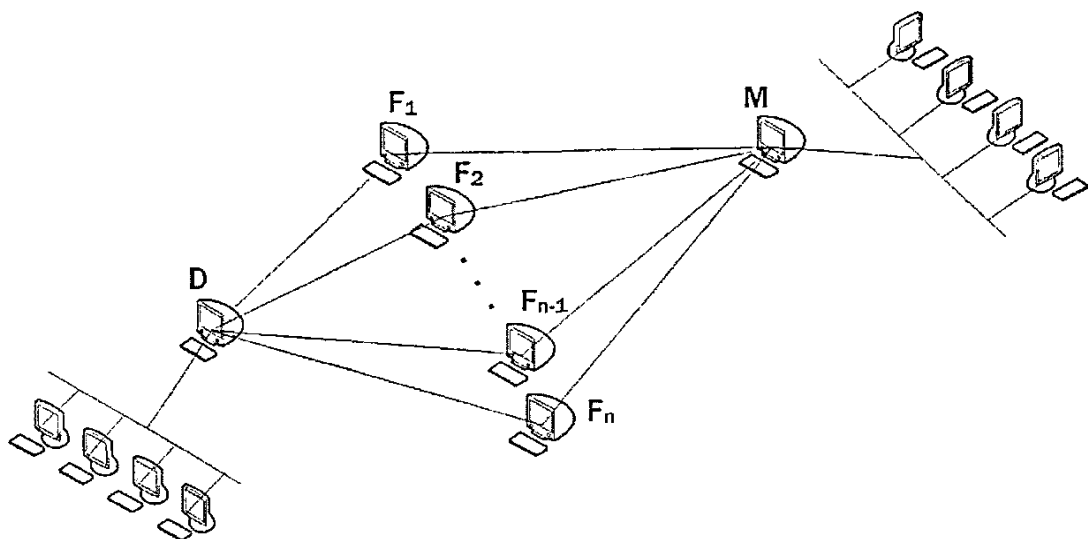


Рисунок 4.10 - Процедура разделения трафика

В работе используется следующая терминология:

Демультимплексор (D) – модуль, отвечающий за разделение поступающих на него данных (исходного сообщения) на проекции и их отправку. Так же на демультимплексор могут быть возложены функции определения состояния бортовой сети на основе состояний определенных компонентов системы, таких как буферы передачи и определенные служебные сигналы (подтверждения).

Мультимплексор (M) – модуль, выполняющий функции обратные демультимплексору. Данный модуль собирает проекции (фрагменты данных), переданные по разным каналам в один поток, образуя исходное сообщение. Как и демультимплексор, мультимплексор способен детектировать определенные события в бортовой сети по состоянию входящих в него потоков.

Логический канал связи между устройствами – логическое соединение протокола передачи.

Физический канал – отдельный, выделенный участок передачи данных, представляющий собой некоторую физическую среду передачи. В одном физическом канале может быть образовано множество логических каналов.

Зона передачи данных – совокупность логических компонентов системы, являющихся законченной, самостоятельной функциональной единицей. Зона осуществляет разнесение, передачу и сбор данных. Каждая зона содержит мультимплексор, демультимплексор и, по крайней мере, пару передатчиков.

Ветвь передачи данных – последовательность логических устройств соединенных по схеме: демультимплексор – передатчик(и) – мультимплексор.

Основное предназначение компонентов демультимплексор и мультимплексор – разделение и сбор данных. Также эти компоненты передают и принимают разделенные данные.

Наиболее очевидный вариант реализации системы в бортовой сети – на сеансовом уровне модели OSI. Из этого следует что, для ее корректного функционирования необходимо использование промежуточных компонентов – передатчиков. Они выступают в качестве узловых точек, между которыми устанавливаются логические соединения.

После обработки данных на уровне приложений стека протокола передачи пакеты передаются сетевому уровню. В заголовке полученного пакета в поле отправитель стоит адрес демультиплексора, а в поле получатель адрес передатчика. В случае если бы мультиплексор и демультиплексор работали друг с другом напрямую, то невозможно было бы произвести разнесение каналов, поскольку отдельные логические потоки передавались бы (маршрутизировались) по одному физическому пути.

Предлагаемое решение подразумевает повышение стойкости информации при деструктивных электромагнитных воздействиях на бортовую кабельную сеть на основе имеющихся физических средств. Характерной особенностью процедуры является то, что она, является полностью привязанной к свойствам среды передачи и топологии бортовой сетевой структуры, полагаясь на наличие структурной избыточности, которая особенно свойственна для бортовых сетей Ethernet.

4.5.1 Сервис маршрутизации

В ИСАУ используется усовершенствованная система «демультиплексор – передатчики – мультиплексор», на основе разработанного инструментария, который позволяет передатчикам выполнять автоматическую «интеллектуальную» маршрутизацию. Реализация данного подхода заключается в установке на передатчиках приложения «сервис маршрутизации», корректирующего работу протоколов маршрутизации для маркированной информации [92, 153].

Разработанное приложение «сервис маршрутизации» (SM), позволяет повысить стойкость передачи информации в бортовых сетях в условиях воздействия деструктивных ЭМИ.

SM – приложение, позволяющее передавать данные специфичным маршрутом. Приведем описание компонентов SM:

$$SM = \{SMS, SMC\}, \quad (4.6)$$

где SMC – управляемый компонент SM, который устанавливается на конечном оборудовании и предоставляет функцию для инициализации процесса передачи информации с помощью сервиса маршрутизации;

SMS – управляющий компонент SM, который устанавливается на БЦВМ, выполненную в защищенном исполнении, и осуществляет динамическую маршрутизацию информации, поступающего на эту БЦВМ.

$$SMS = \{F_s, F_{s\text{дост}}, M, f\}. \quad (4.7)$$

где $F_s = \{F_{s1}, F_{s2}, \dots, F_{sF}\}$ – множество БЦВМ, выполненных в защищенном исполнении, бортовой сети. Под БЦВМ, выполненной в защищенном исполнении, понимается специализированная (или многофункциональная) БЦВМ бортовой сети, которая в результате применения специальных мер (например, экранирования) не подвержена воздействию деструктивных ЭМИ.

$F = |F_s|$ – количество БЦВМ, выполненных в защищенном исполнении, бортовой сети.

$F_{s\text{ дост}} = \{F_{s1\text{дост}}, F_{s2\text{дост}}, \dots, F_{sF\text{дост}}\}$ – множество, описывающее количество доступных БЦВМ в защищенном исполнении в начальный момент времени t_0 , а затем через интервалы времени, равные t . $F_{si\text{ дост}}$ – количество доступных БЦВМ в защищенном исполнении, для F_{si} , $i \in [1, F]$,

$M = \{M_1, M_2, \dots, M_F\}$ – множество матриц маршрутизации. Матрица маршрутизации M_i формируется на БЦВМ F_{si} в начальный момент времени t_0 , а затем переформируется через интервалы t , $i \in [1, F]$. Каждая матрица $M_i \in F_s$ содержит элементы m_{kj} , характеризующие доступность БЦВМ в защищенном исполнении относительно друг друга из F_{si} , $k \in [1, F]$, $j \in [1, F]$.

$F_{si\text{дост}}$ вычисляется с помощью элементов матрицы M_i следующим образом

$$F_{Si}^{доct} = \sum_{j=1}^F m_{ij} \quad (4.8)$$

где f – параметр, определяющий количество используемых БЦВМ в защищенном исполнении на всем маршруте от исходного узла до конечного в течение одного сеанса (размер «кластера сеанса передачи»).

На БЦВМ из множества F_s устанавливается управляющий компонент сервиса – SMS, выполняющий автоматическую «интеллектуальную» маршрутизацию трафика [92, 133, 153].

Показано, что использование SM позволило избежать прохождения трафиком участка, на который оказывалось деструктивное ЭМВ (рисунок 4.11) и таблица 4.4.

Т а б л и ц а 4.4 - Таблица маршрутизации SM топологии рисунка 4.11

	DS	FS1	FS2	FS3	FS4	FS5	MS
DS	0	1	1	1	0	0	0
FS1	1	0	0	0	1	0	0
FS2	1	0	0	0	0	1	1
FS3	1	0	0	0	1	1	0
FS4	0	1	0	1	0	1	1
FS5	0	0	1	1	1	0	1
MS	0	0	1	0	1	1	0

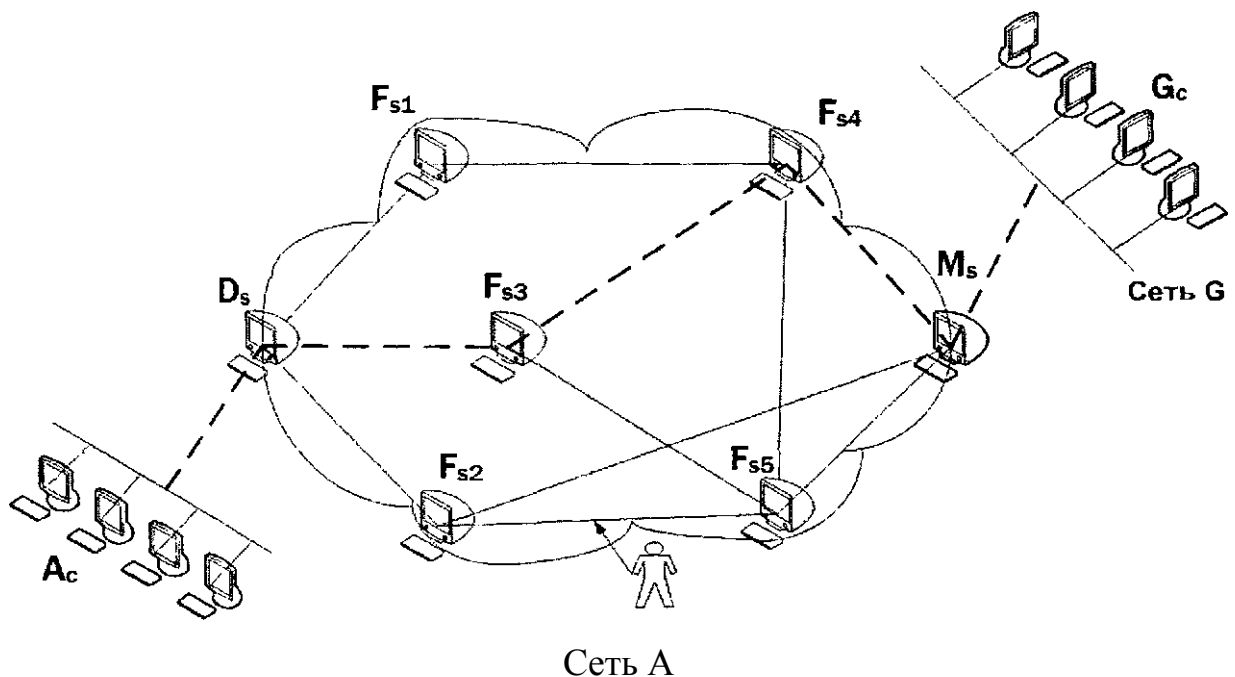


Рисунок 4.11 - Изменение маршрута трафика за счет использования сервиса маршрутизации SM на БЦВМ $F_i, i \in J$

Данное решение SM (итоговый маршрут) является вероятностным с вероятностью принятия p_j , $0 < p_j \leq 1$, $j \in [1, k]$, где k – количество различных маршрутов от D_s до M_s на графе с вершинами D_s , FS_1 , FS_2 , FS_3 , FS_4 , F_{ss} , M_s и ребрами, определяемыми текущей топологией сети.

В отличие от модулей SMC, которые запускаются только в тех случаях, когда необходимо осуществить передачу данных, модули SMS работают постоянно. Помимо обеспечения процесса передачи, $SMS \in F_{si}$ через интервал t вычисляет коэффициенты mir таблицы маршрутизации $M_i \in F_{si}$, $i \in [1, n]$, $r \in [1, n]$.

Элементы mir определяются следующим образом: $mir = 0$, если $i=r$ или F_{sr} недоступна из F_{si} (БЦВМ F_{sr} физически вышла из строя, потеряна связь с F_{sr} и т.п.); $mir = 1$, если F_{sr} доступна из F_{si} .

Предлагаемая методика представлена на рисунках 4.12-4.13 в виде IDEF0-3 диаграмм. Контекстная диаграмма (рисунок 4.12) является вершиной древовидной структуры диаграмм и представляет собой самое общее описание системы и ее взаимодействия с внешней средой [92, 153].

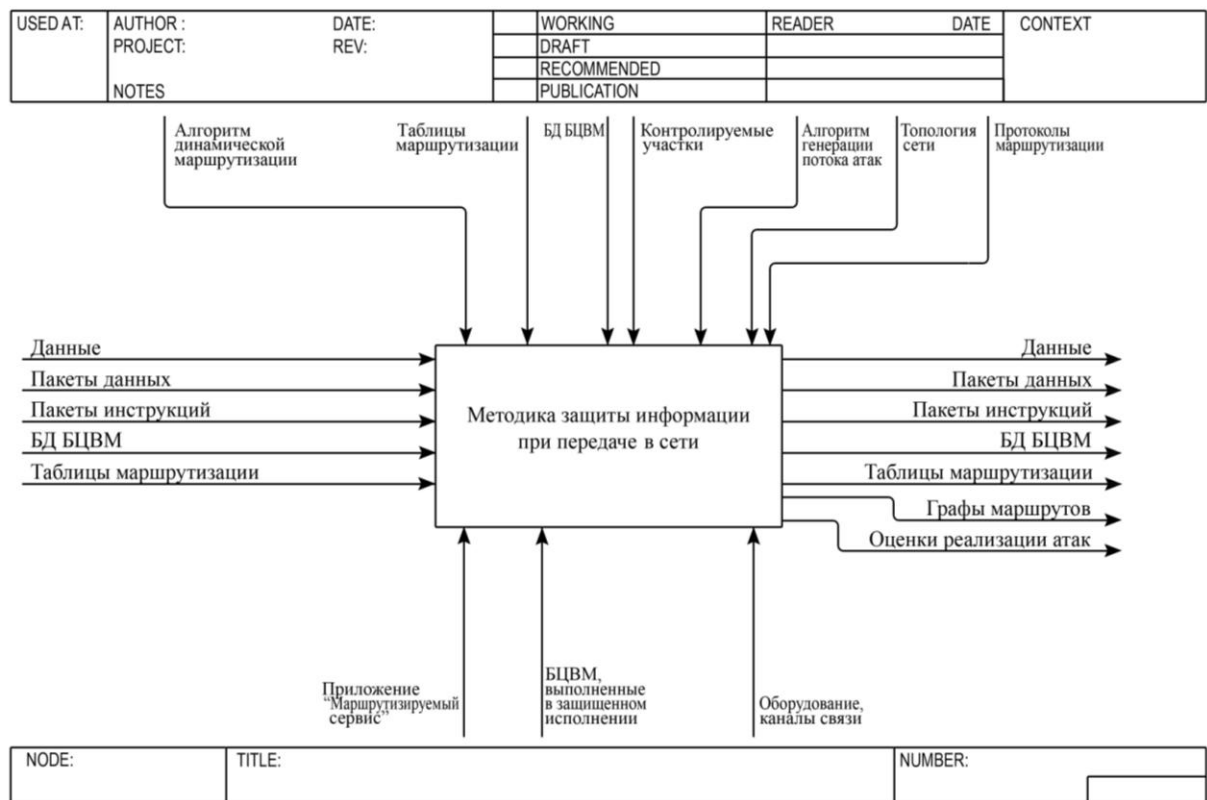


Рисунок 4.12 - Методика защиты информации в бортовых сетях при воздействии деструктивных ЭМИ (представление IDEF0)

Определения контекста – построение наиболее абстрактного уровня описания системы в целом. Поэтому в рамках этой диаграммы под субъектом понимается вся разрабатываемая процедура.

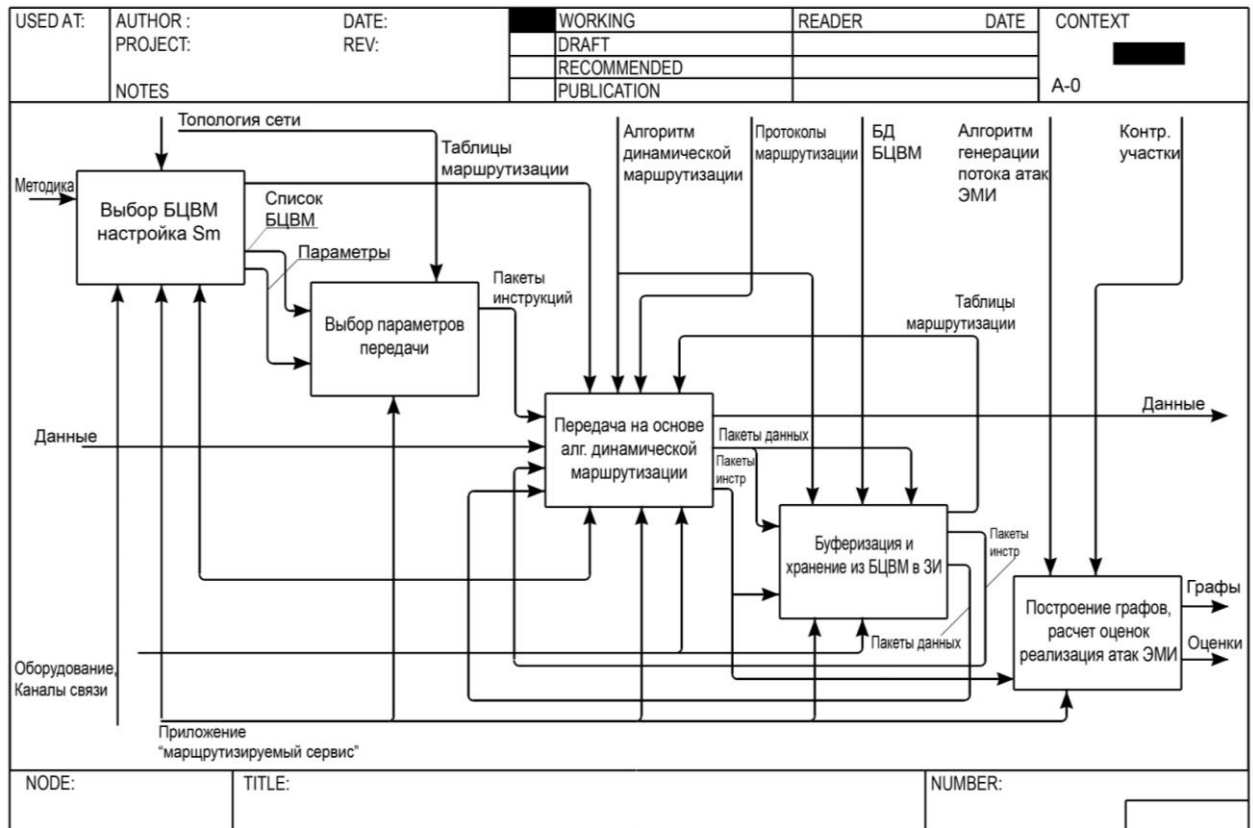


Рисунок 4.13 - Методика защиты информации в бортовых сетях при воздействии деструктивных ЭМИ (представление IDEF3)

В качестве входа – т.е. объектов, используемых и преобразуемых функциональным блоком (работой) для получения результата, выступают объекты: данные, пакеты данных и пакеты инструкций, базы данных, таблицы маршрутизации.

В качестве выхода – т.е. результата работы системы выступают объекты: данные, пакеты данных и пакеты инструкций, базы данных БЦВМ в защищенном исполнении, таблицы маршрутизации, графы маршрутов, оценки реализации ЭМВ.

В качестве управления – т.е. информации, которая используется в процессе выполнения работы, выступают объекты: топология бортовой сети, протоколы маршрутизации, алгоритм динамической маршрутизации, алгоритм генерации по-

тока ЭМВ, контролируемые участки, таблицы маршрутизации, базы данных БЦВМ, выполненных в защищенном исполнении.

Механизмы – ресурсы, выполняющие работу: оборудование, каналы связи; БЦВМ, выполненных в защищенном исполнении; приложение «сервис маршрутизации».

После описания методики в целом проводится разбиение ее на крупные фрагменты. Этот процесс называется функциональной декомпозицией, а диаграммы, которые описывают каждый фрагмент и взаимодействие фрагментов, называются диаграммами декомпозиции.

Декомпозиция блока «Методика защиты информации в бортовой сети при воздействии деструктивных ЭМИ» представлена на рисунке 4.13.

Согласно этой диаграмме, на втором уровне система представляется следующим набором функциональных блоков: «Выбор БЦВМ в защищенном исполнении, настройка SM», «Выбор параметров передачи», «Передача на основе алгоритма динамической маршрутизации», «Буферизация и хранение на БЦВМ в защищенном исполнении», «Построение графов маршрутов, расчет оценок реализации ЭМВ».

Алгоритм динамической маршрутизации трафика

Алгоритм динамической маршрутизации информации в бортовых сетях, описывается следующими этапами [92, 153].

Шаг 1. Вычисление элементов множеств матриц маршрутизации M и множеств, описывающих количество доступных БЦВМ, F_{sd} в начальный момент времени t_0 .

Шаг 2. Инициализация передачи. При поступлении запроса SMC (управляемый компонент SM, который устанавливается на оконечном оборудовании и предоставляет функцию для инициализации процесса передачи информации с помощью сервиса маршрутизации) на инициализацию сеанса передачи данных выполняются следующие действия:

2.1. Осуществляется запрос значения параметра.

2.2. Создается пакет инструкций, содержащий адрес источника, адрес получателя, раздел «БЦВМ в защищенном исполнении».

2.3 Используя операцию рандомизации, получается псевдослучайное число k .

2.4 Проверяется доступность Fsk , если БЦВМ недоступен - возврат к п.2.3.

2.5 Формируется пакет данных и маркируется как пакет SM.

2.6. Отправка пакета данных и пакета инструкций на доступне. БЦВМ Fsk .
Если требуется дальнейшая передача данных - возврат к п. 2.5.

2.7. Завершение работы SMC.

Шаг 3. Динамическая маршрутизация на БЦВМ Fsi :

Формируется новая матрица маршрутизации в случае, если разность текущего времени и времени последнего изменения Mt больше t . При получении пакетов SM - переход к п. 3.2;

Открытие полученного пакета инструкций, в раздел «БЦВМ в защищенном исполнении» добавить адрес Fsi ;

Если количество записей в разделе «БЦВМ в защищенном исполнении» равно f , пакеты данных, относящиеся к данному пакету инструкций, отправляются на адрес источника, возврат на п. 3.1;

Используя операцию рандомизации, получается псевдослучайное число k ;

Проверка доступности $Fыk$, если БЦВМ недоступен - возврат к п. 3.4;

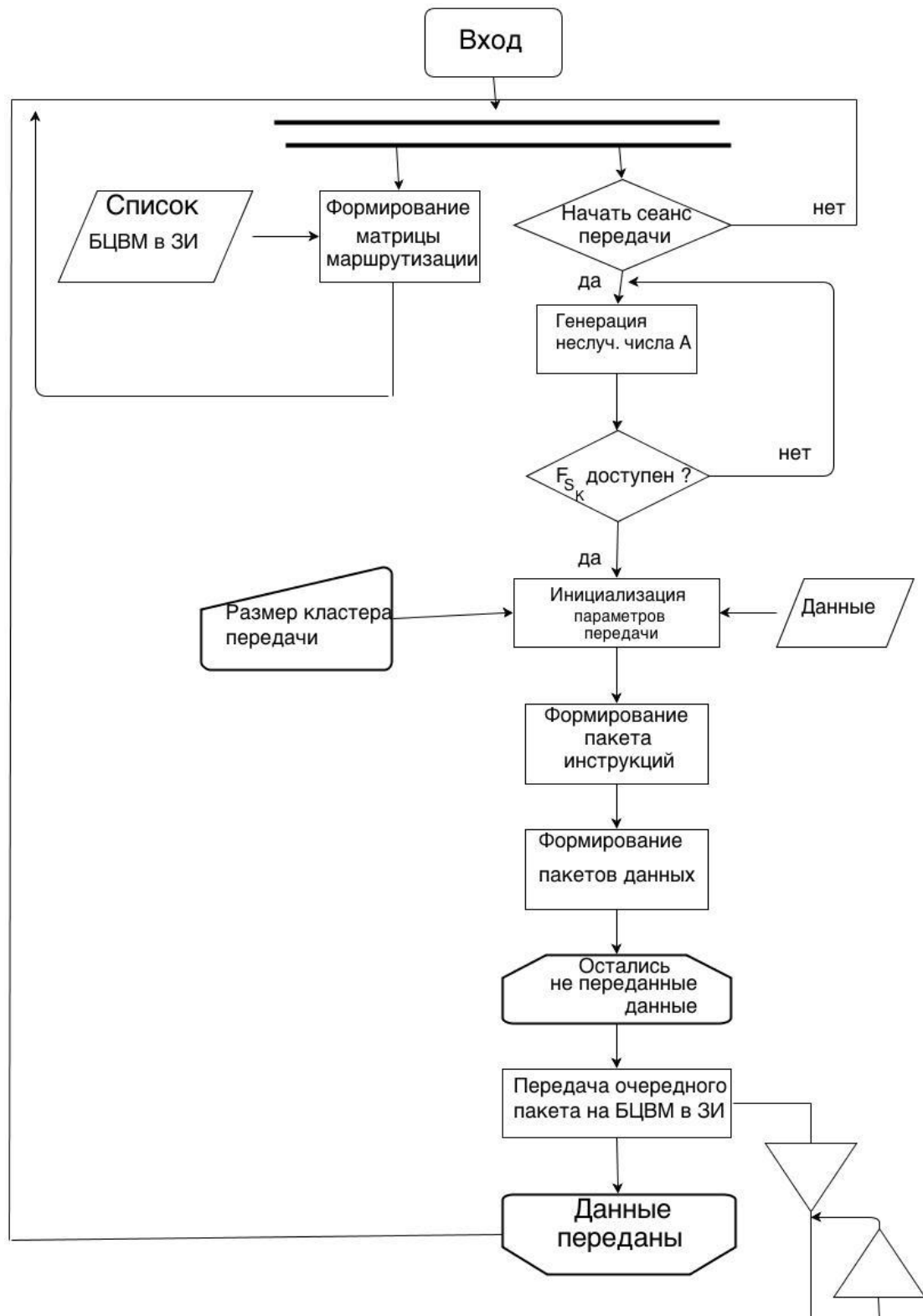
Проверка наличия информации о Fsk в разделе «БЦВМ в защищенном исполнении»:

если Fsk присутствует в данном разделе - возврат к п. 3.4;

3.7.Отправка пакета инструкций и относящихся к нему пакетов данных на БЦВМ, выполненную в защищенном исполнении, Fsk ; возврат к п. 3.1.

Шаг 4. Получение пакета данных и пакета инструкций SMC, определяемым адресом получателя.

Согласно ГОСТ 19.701-90 Единой системы программной документации схему алгоритма можно представить в следующем виде (см. рисунок 4.14).



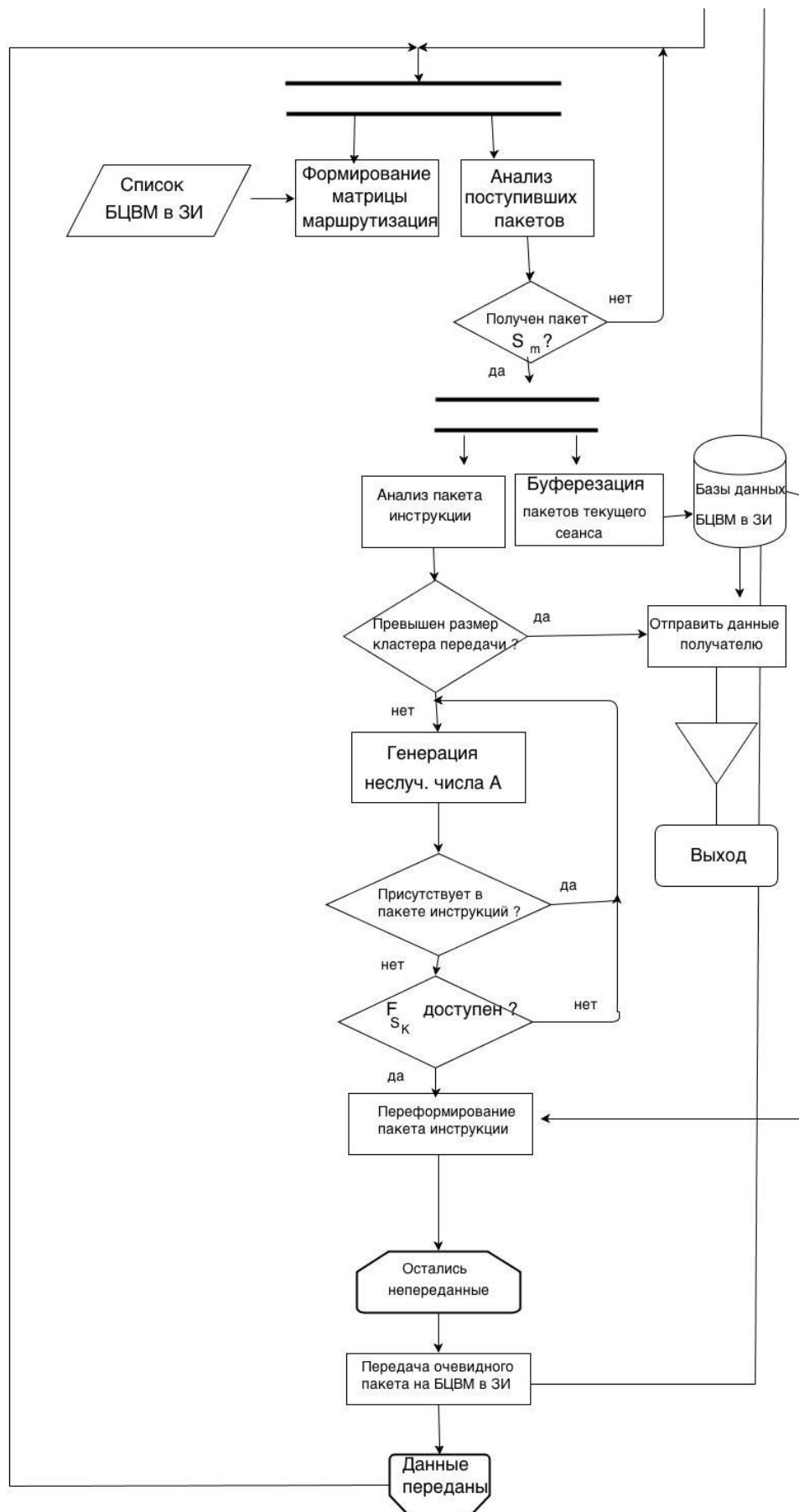


Рисунок 4.14 - Блок-схема алгоритма динамической маршрутизации

В процессе передачи с помощью SM данные проходят через некоторое число БЦВМ в защищенном исполнении, равное f . Выбор каждой следующей БЦВМ происходит динамически. Учитывая приведенное выше определение таблиц маршрутизации для SMS, выбор каждой следующей БЦВМ описывается гипергеометрическим распределением [92, 153].

Гипергеометрическое распределение имеет место быть при выборочном контроле конечной совокупности объектов объема n по альтернативному признаку. Каждый контролируемый объект классифицируется либо как обладающий признаком a , либо как не обладающий этим признаком. Гипергеометрическое распределение имеет случайная величина y , равная числу объектов, обладающих признаком a в случайной выборке объема c , где $c < n$. Например, число y дефектных единиц продукции в случайной выборке объема c из партии объема n имеет гипергеометрическое распределение, если $c < n$.

Для гипергеометрического распределения вероятность принятия случайной величиной y значения y_0 имеет вид:

$$p(y = y_0 | n, d, c) = \frac{\binom{c}{y_0} \binom{n-c}{d-y_0}}{\binom{n}{d}} \quad (4.9)$$

где d – число объектов, обладающих признаком a , в рассматриваемой совокупности объема n . При этом y_0 принимает значения от $\max\{0, c - (n - d)\}$ до $\min\{n, d\}$, при прочих y_0 вероятность в формуле (4.9) равна 0. Таким образом, гипергеометрическое распределение определяется тремя параметрами - объемом генеральной совокупности n , числом объектов d в ней, обладающих рассматриваемым признаком a , и объемом выборки c .

Для маршрутизируемого сервиса вышеприведенные параметры имеют следующие значения:

$n = F$ – количество БЦВМ в защищенном исполнении;

$di - FSi_{\text{дост}}(t)$ – количество доступных БЦВМ в защищенном исполнении, для Fsi в момент времени t ,

$c = 1$ – количество выбираемых БЦВМ в защищенном исполнении на каждом этапе передаче;

$y_0 = 1$ – количество доступных БЦВМ в защищенном исполнении в выборке.

Таким образом, выбор каждой следующей БЦВМ описывается гипергеометрическое распределение $HG(1, FSi_{\text{дост}}, F)$.

Итоговый маршрут трафика от источника до получателя при использовании SM и f БЦВМ в защищенном исполнении, из F , находящихся в бортовой сети, будет выбран с вероятностью:

$$p_j = \prod_{i=0}^f \frac{\binom{F-i-1}{F_{Si}^{\text{доcm}} - i - 1}}{\binom{F-i}{F_{Si}^{\text{доcm}} - i}}, j \in [1, k] \quad (4.10)$$

где $Fsi_{\text{дост}}$ – число доступных БЦВМ для Fsi при выборке $Fs(i+1)$ БЦВМ в защищенном исполнении, на $i+1$ шаге, определяемое формулой (4.9).

Формула (4.10) определяет вероятность построения системой SM одного из возможных маршрутов, использующего только доступные БЦВМ в защищенном исполнении, как статическую систему, то из (4.10) следует неизменность значения p_j . Но в реальности система таковой не является, в разные моменты времени каждая из БЦВМ в защищенном исполнении может быть как доступна, так недоступна. Данный факт учитывается в формуле (4.10) с помощью параметров $Fsi_{\text{дост}}$.

В формуле (4.10) используются выборки без возвратов. Напомним, что:

$$\binom{n}{k} = C_n^k = \frac{n!}{k!(n-k)!} \quad (4.11)$$

Значение формулы (4.11) также называется биномиальным коэффициентом. Преобразуем формулу (4.10), раскрыв все биномиальные коэффициенты:

$$p_j = \prod_{i=0}^f \frac{\binom{F-i-1}{F_{Si}^{docm} - i - 1}}{\binom{F-i}{F_{Si}^{docm} - i}} = \prod_{i=0}^f \frac{C_{F-i-1}^{F_{Si}^{docm} - i - 1}}{C_{F-i}^{F_{Si}^{docm} - i}} = \prod_{i=0}^f \frac{F_{Si}^{docm-i}}{F-i}, j \in [1, k] \quad (4.12)$$

В формуле (4.12) показана вероятность построения сервисом SM маршрута трафика от источника до получателя при использовании в процессе передачи f БЦВМ в защищенном исполнении.

Значительно больший интерес с точки зрения оценки уязвимости SM представляет расчет вероятности построения j -го маршрута (из k -возможных) в том случае, когда оказывается воздействие участок, например, между i -й и $(i+1)$ -й БЦВМ, выполненных в защищенном исполнении, входящими в j -й маршрут.

Таким образом, можно объединить два подхода к обеспечению безопасности передаваемой информации: с одной стороны, снизить вероятность ЭМ воздействия на используемые каналы связи, а с другой – применить логическое преобразование информации. Сервис маршрутизации основывается на двух компонентах: БЦВМ в защищенном исполнении, на которых установлен управляющий компонент сервиса маршрутизации SMS, и маркированных пакетах [153].

Рассмотрим, каким образом происходит маркирование пакетов.

Приложение SM реализовано в стеке протокола передачи с использованием транспортного протокола. Каждая часть данных, которая находится на БЦВМ в защищенном исполнении, и ожидающая отправки, передается по отдельному соединению. Каждое соединение между БЦВМ, выполненных в защищенном исполнении, само заботится о надежной доставке передаваемых данных в силу использования протокола. Следовательно, система целиком полагается на надежность протокола.

Информация в бортовой сети инкапсулируется в формат дейтаграмм (пакетов). Процесс инкапсуляции создает дейтаграмму, которая состоит из заголовка и данных. Размер заголовка всегда кратен 32-битному слову, даже если для этого он должен дополниться нулями до нужной величины. Заголовок со-

держит всю необходимую для доставки инкапсулированных данных по бортовой сети информацию. Заголовок его пакета содержит достаточно много информации. Рисунок 4.15 иллюстрирует дейтаграмму и названия различных полей заголовка в ней.

На рисунке 4.15 структура заголовка представлена в виде нескольких уровней, однако на самом деле заголовок – просто последовательный поток данных длиной как минимум 20 байтов [153].

Процесс маркирования дейтаграмм маршрутизируемым сервисом состоит в формировании уникального поля «Опции» (Options).

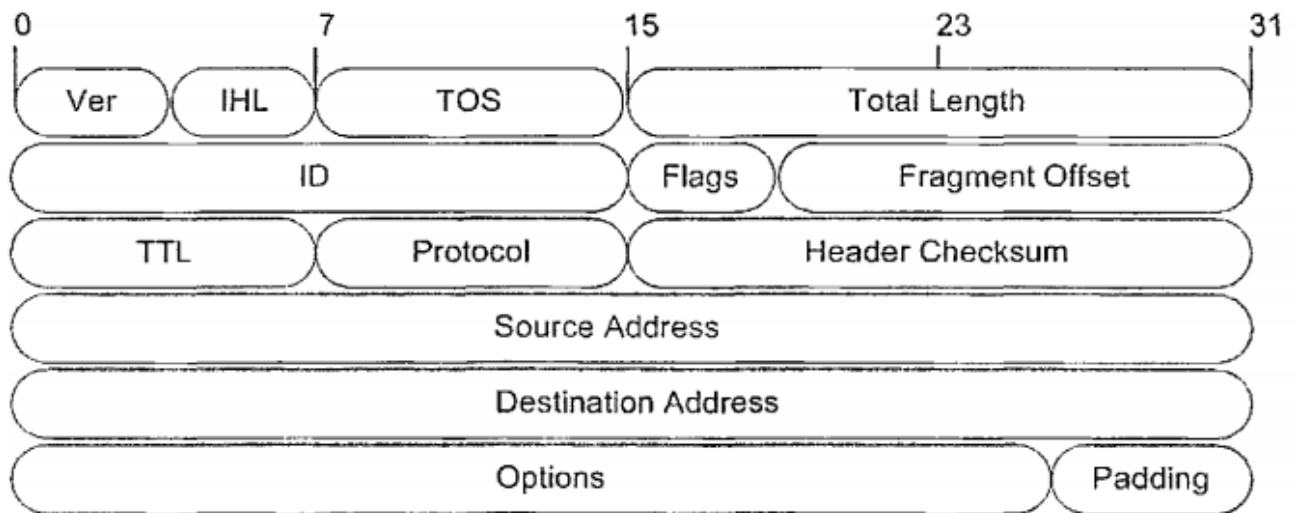


Рисунок 4.15 - Формат заголовка пакета

Разработчиками стандарта 8-битное поле опций было задумано как некоторый инструмент, который позволяет тестировать и отлаживать разнообразные сетевые приложения. Опции управляют фрагментацией и маршрутизацией сетевых пакетов. Протоколы не требуют от маршрутизаторов и оконечного оборудования обязательной установки или считывание полей опций – в обычной ситуации это происходит чрезвычайно редко.

Поле опций состоит из трех разделов, «копирование» (Copy), «класс опции» (Option Class) и «номер опции» (Option Number). Раздел «копирование» определяет порядок обработки опций в случае, если данные фрагментируются маршрутизатором. Раздел «класс опции» определяет назначение пакета, напри-

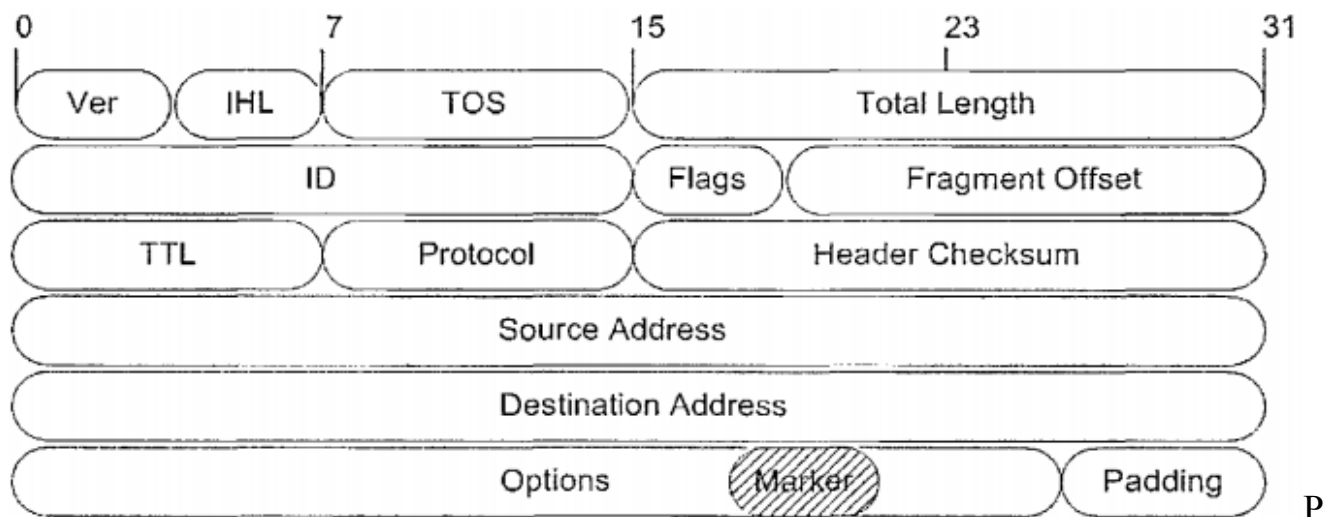
мер, отладка, измерения, управление бортовой сетью. Значение подраздела «номер опции» определяет назначение опции в рамках конкретного класса.

Опции безопасности применяются в приложениях, которые критичны к конфиденциальности передаваемых по сети данных. Опция регистрации маршрута пакета требует, чтобы маршрутизаторы записывали в поле опций, каким путем пакет перемещается по сети. Опция управления маршрутизацией позволяет источнику пакета данных самостоятельно выбирать его маршрут и бывает двух видов: строгая и приблизительная. Строгое управление маршрутизацией подразумевает, что пакет может перемещаться только через заданные в списке маршрутизаторы. Опция приблизительного управления сопровождается списком маршрутизаторов, через которые пакет должен обязательно пройти (таблица 4.5).

Т а б л и ц а 4.5 - Возможные значения подразделов «класс опции», «номер опции», а также длина и краткое описание опций.

Класс	Номер	Длина	Описание
0	2	11	Безопасность
0	7	-	Запись маршрута
0	9	-	Приблизительное управление маршрутизацией
0	3	-	Строгое управление маршрутизацией
2	4	-	Временная метка

Таким образом, поле опций позволяет маркировать пакеты, как принадлежащие сервису маршрутизации. Процесс маркирования пакета заключается в установлении уникальной последовательности битов в поле опций заголовка пакета (рисунок 4.16) [153].



исунок 4.16 - Маркирование пакета

Наличие маркера в пакетах позволяет СМ узнавать «свои» пакеты, независимо от используемого протокола передачи.

На представленном алгоритме динамической маршрутизации основывается один из режимов обеспечения устойчивости БЦВК от воздействия деструктивных ЭМИ. Реализация данной методики заключается во внесении в существующую архитектуру бортовой сети нескольких БЦВМ в защищенном исполнении, с SMS, корректирующих работу протоколов маршрутизации для маркированной информации. Также возможно использование уже работающих БЦВМ в защищенном исполнении бортовой сети путем установки на них приложения SMS [92, 153].

4.6 Выводы по главе

1. Предложен критериально-математический аппарат построения адаптивной системы обнаружения деструктивных ЭМВ на БЦВК, который включает следующие иерархические уровни, а именно: уровень формирования признаков деструктивных ЭМВ, уровень идентификации деструктивных ЭМВ, уровень обобщения и накопления опыта обнаружения деструктивных ЭМВ. Адаптивный характер уровней СОДЭМВ обусловлен использованием интеллектуальных средств нечеткой логики и нейронных сетей для решения задач классификации

и кластеризации деструктивных ЭМВ по их признакам, формируемых датчиками ЭМВ.

2. Предложены базовые принципы и процедура построения адаптивной СОДЭМВ. Методика проектирования адаптивной СОДЭМВ включает следующую последовательность этапов:

а) формирование матрицы адаптируемых экспертных оценок и с их учетом исходных систем нечетких продукционных правил вывода и структуры нейро-нечетких классификаторов;

б) идентификация известных ЭМВ на элементы и узлы БЦВК, а при расширении множества известных ЭМВ – решение задачи кластеризации с последующей адаптацией информационных полей нейронных и нейро-нечетких сетей;

в) кластеризация осуществляется как результат изменения известных ЭМВ на элементы и узлы БЦВК и сопровождается корректировкой или расширением системы нечетких продукционных правил на иерархических уровнях СОДЭМВ;

г) модификация системы нечетких продукционных правил и матриц экспертных оценок по результатам обучения и последующего анализа нейро-нечетких классификаторов иерархических уровней СОДЭМВ при расширении множества известных ЭМВ;

е) включение (в случае экономической целесообразности) нового механизма защиты в состав СОДЭМВ на основании анализа оценок стойкости БЦВК.

3. Включение в состав адаптивного иерархического уровня СОДЭМВ следующих интеллектуальных средств:

– систему нечетких продукционных правил, описывающих работу идентификатора с учетом экспертных оценок;

– нейро-нечеткую сеть, в структуре которой отражена система нечетких продукционных правил;

– четкую самообучаемую НС для решения задачи кластеризации входных векторов.

4. В качестве основных механизмов для реализации адаптивных свойств СОДЭМВ предложено использовать:

а) нечеткий логический вывод, который позволяет использовать опыт экспертов по ЭМС в виде системы нечетких продукционных правил для начальной настройки информационного поля (системы межнейронных связей) нечеткой НС;

б) способность нейронных сетей к классификации и кластеризации;

в) способность информационного поля нейронных сетей к накоплению опыта в процессе обучения.

5. Разработана система показателей устойчивости БЦВК к деструктивному воздействию ЭМИ.

6. Разработаны сценарии работы СОДЭМВ по обнаружению воздействия на БЦВК деструктивных ЭМИ:

1) на основе метода анализа параметров искажений информационного потока в условиях воздействия ЭМИ;

2) на основе метода анализа информации датчиков обнаружения ЭМВ.

7. Разработана процедура разделения трафика, реализуемая одним из режимов ИСАУ БЦВК при воздействии деструктивных ЭМИ. Основной идеей режима разделения трафика является разнесение передачи по нескольким физическим каналам отдельных частей передаваемых данных таким образом, чтобы сложность разрушения данных была максимальной. На основе данной процедуры реализован «сервис маршрутизации» передачи данных для бортовой сети. Выработаны основные компоненты, необходимые для устойчивого функционирования ИСАУ БЦВК. Даны оценки вероятностям ЭМВ на передаваемую информацию в случае применения «сервиса маршрутизации».

ГЛАВА 5 АППАРАТНО - ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ АНАЛИЗА И ОЦЕНКИ УСТОЙЧИВОСТИ БЦВК К ДЕСТРУКТИВНОМУ ВОЗДЕЙСТВИЮ ЭМИ

Реализация интеллектуальной системы анализа и оценки устойчивости БЦВК к деструктивному воздействию ЭМИ опирается на принципы подобия архитектуры и механизмов защиты бортового комплекса архитектуре и механизмам защиты биологических систем. Именно эти принципы подобия нашли свое применение в модели ИСАУ БЦВК.

Моделирование служит основным средством верификации, которое позволяет предотвратить ошибки проектирования структурно-сложных кибернетических систем, к которым в полной мере относится интеллектуальная система анализа и оценки устойчивости БЦВК к деструктивным воздействиям ЭМИ. В ИСАУ имеет место быть взаимосвязь событий: источник ЭМВ – угрозы ЭМВ – фактор (уязвимость) – угроза ЭМВ (действие) – последствия (деструктивное ЭМВ). При изменении множества известных ЭМВ и условий эксплуатации БЦВК может проявляться ряд новых уязвимостей, не указанных в исходной модели, и, соответственно, потенциальная возможность нарушения функционирования отдельных подсистем БЦВК.

В настоящей главе рассматриваются вопросы реализации и инструментальные средства для моделирования ИСАУ БЦВК к деструктивному воздействию ЭМИ.

5.1 Модель интеллектуальной системы анализа устойчивости элементов и узлов БЦВК к деструктивному воздействию СК ЭМИ

5.1.1 Модель системы обнаружения деструктивных ЭМВ

В отличие от известных [37, 157], предложенная модель учитывает наличие в структуре БЦВК ранее инсталлированной интеллектуальной системы анализа и оценки устойчивости БЦВК к деструктивному воздействию ЭМИ, которая включает СОДЭМВ, множество ДЭМВ, средства сигнатурного и статисти-

ческого анализа, взаимосвязанных, как с внешней средой, так и с аппаратно-программными компонентами самого БЦВК. Формируемый ДЭМВ вектор признаков ЭМВ (рисунок 5.1), например, может обрабатываться блоками статистической СОДЭМВ или сигнатурной СОДЭМВ и обобщаться посредством методики обнаружения деструктивных ЭМВ и оптимизации СОДЭМВ [72, 92, 133-135, 154].

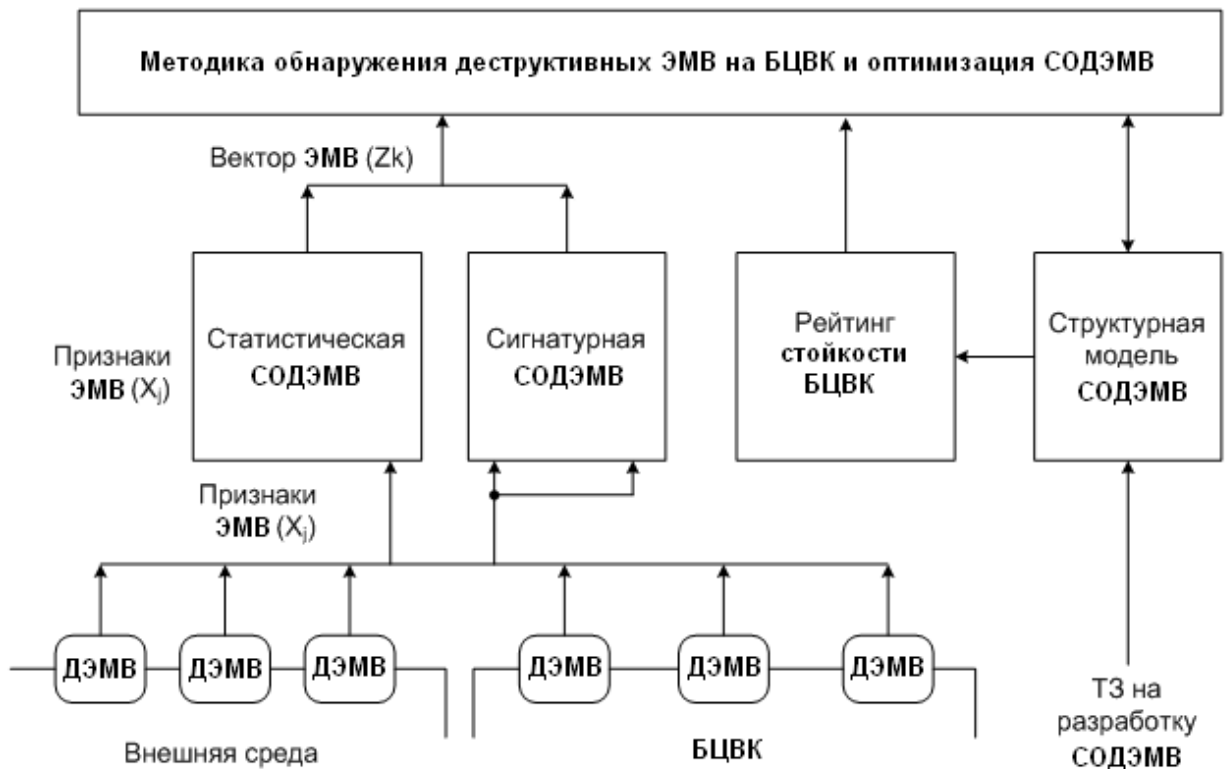


Рисунок 5.1 - Модель системы обнаружения деструктивных ЭМВ

Для того чтобы придать интеллектуальной системе анализа и оценки устойчивости БЦВК к деструктивному воздействию ЭМИ свойства автоматической и оперативной реакции на изменение вектора признаков электромагнитных воздействий в систему обнаружения деструктивных ЭМВ необходимо ввести адаптивные уровни идентификации ЭМВ и обобщение опыта обнаружения деструктивных ЭМВ на бортовой вычислительный комплекс [37, 45, 64]. Основным элементом модели интеллектуальной системы анализа и оценки устойчивости БЦВК к деструктивному воздействию ЭМИ является методика обнаружения деструктивных ЭМВ и оптимизации СОДЭМВ, которая координирует взаимо-

связь адаптивных уровней (в виде нейронных сетей, нейро-нечетких сетей, систем нечетких продукционных правил), структурной модели СОДЭМВ, инструментальных средств расчета показателей стойкости и рейтинга стойкости БЦВК (рисунок 5.2).

Важным качеством адаптивных уровней ИСАУ является возможность накопления опыта, который фиксируется в информационных полях нейронных и нейро-нечетких сетей системы обнаружения деструктивных ЭМВ.

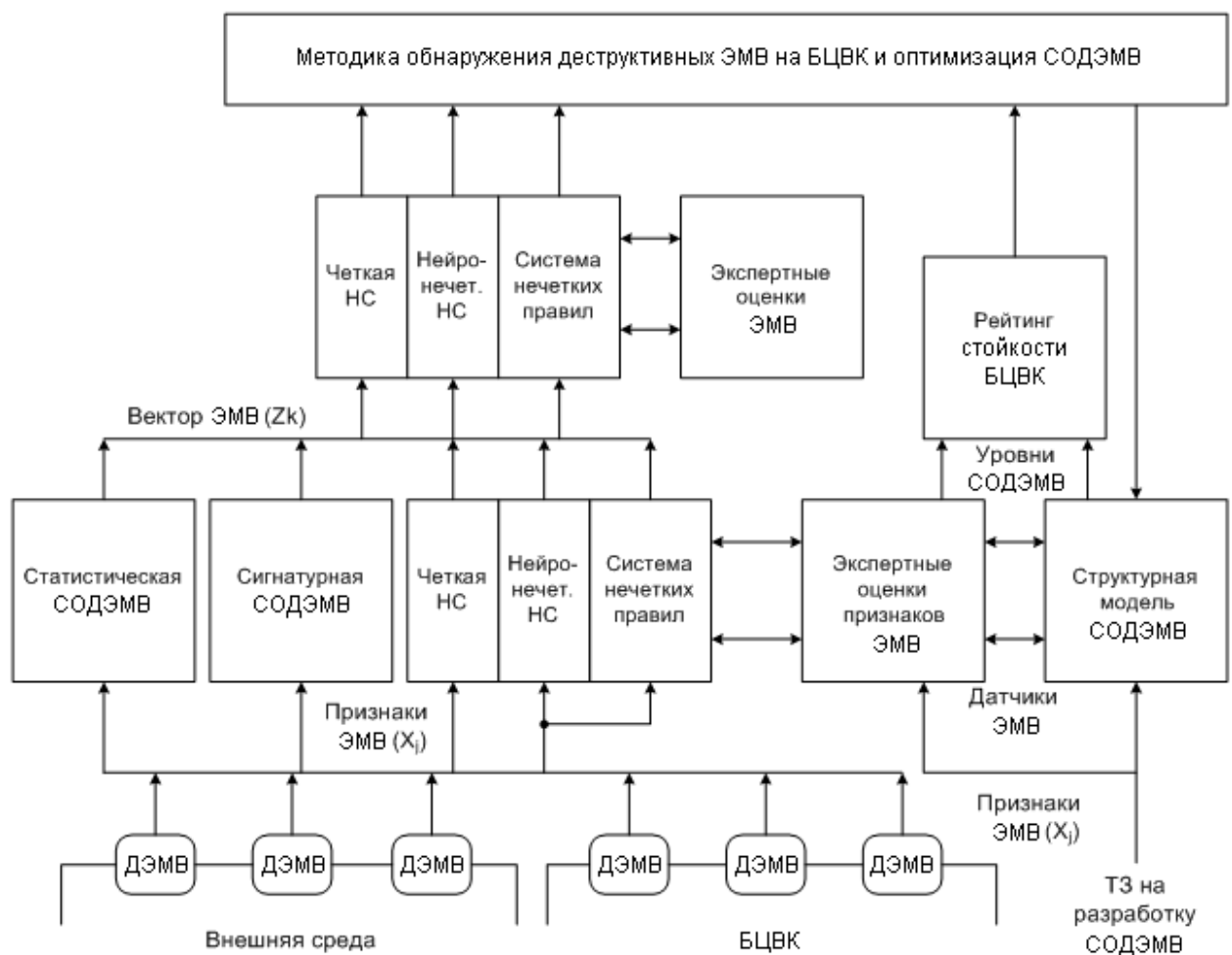


Рисунок 5.2 - Координация взаимосвязи адаптивных уровней ИСАУ БЦВК

В соответствии с заданием на проектирование СОДЭМВ формируют структуру СОДЭМВ в виде иерархии уровней датчиков ЭМВ, а опыт экспертов по ЭМС представляют матрицами экспертных оценок и системами нечетких продукционных правил для классификации деструктивных ЭМВ по их признакам. Системы нечетких продукционных правил представляются в виде нейро-

нечетких сетей, которые обучают на заданном подмножестве входных векторов признаков ЭМВ. Одновременно обучают классификаторы в виде четких НС таким образом, чтобы число кластеров равнялось числу правил в системе продукционных правил.

Также формируют классификатор уровня накопления опыта, обобщающий результаты работы статистической, сигнатурной и адаптивной СОДЭМВ.

5.1.2 Модель потока ЭМВ

Все известные электромагнитные воздействия, которыми может атаковаться бортовой вычислительный комплекс, разделяются на два класса: ЭМВ на трафик между «смежными» БЦВМ и ЭМВ непосредственно на БЦВМ в защищенном исполнении F_{si} и коммутационное оборудование. Понятие «смежности» определяется динамически для каждого сеанса передачи, например, «смежными» являются БЦВМ F_{St} и F_{St+1} , выбранные на i и $i+1$ этапе передачи, $t \in [1, n]$, $i \in [1, f]$.

Оценка вероятности реализации электромагнитных воздействий первого класса

Для оценки вероятности реализации ЭМВ первого класса представим, что оказывается ЭМ воздействие на единственный физический канал из всего множества каналов, задействованных на борту, и не осуществляется воздействие на остальные каналы, т.е. существует вероятность модификации и уничтожения информации, передаваемой только по этому каналу [133, 92, 153].

Вычислим оценку реализации ЭМВ первого класса R_{A1} , когда ЭМ воздействие оказывается на участок между БЦВМ F_{Sj} и F_{Sj+1} . При неизвестном пространственном расположении F_s считаем ЭМ воздействие успешным, если при работе сервиса SM бортовые вычислительные машины F_{Sj} и F_{Sj+1} были выбраны на i и $i+1$ этапе передачи, $j \in [1, F]$, $i \in [1, f]$.

$$R_{\lambda 1} = \begin{cases} \frac{2}{F_{S0}^{\hat{a}\hat{i}\hat{n}\hat{o}} \cdot (F_{S0}^{\hat{a}\hat{i}\hat{n}\hat{o}} - 1)}, f = 2 \\ \frac{2}{F_{S0}^{\hat{a}\hat{i}\hat{n}\hat{o}} (F_{S0}^{\hat{a}\hat{i}\hat{n}\hat{o}} - 1)} + \sum_{i=1}^{f-2} \left[\left(\frac{2}{F_{S0}^{\hat{a}\hat{i}\hat{n}\hat{o}} - i} \cdot \frac{1}{F_{S0}^{\hat{a}\hat{i}\hat{n}\hat{o}} - i - 1} \right) \cdot \left(\prod_{j=1}^i \frac{F_{S0}^{\hat{a}\hat{i}\hat{n}\hat{o}} - j - 1}{F_{S0}^{\hat{a}\hat{i}\hat{n}\hat{o}} - j + 1} \right) \right], f > 2 \end{cases} \quad (5.1)$$

В выражении (5.1) первая скобка определяет вероятность выбора БЦВМ в защищенном исполнении между которыми находится контролируемый участок на текущем этапе передачи, вторая скобка – вероятность того, что до текущего этапа передачи данные БЦВМ еще не были ни разу выбраны.

Формула (5.1) легко распространяется на случай k участков между БЦВМ в защищенном исполнении.

Оценка вероятности реализации электромагнитных воздействий второго класса

Второй, более широкий, класс ЭМВ представляется в виде ординарного потока событий, т.е. последовательности событий, наступающих одно за другим в случайные промежутки времени [133, 92, 153].

Обозначим, q – количество успешно реализованных ЭМВ на элементы и узлы бортового вычислительного комплекса в единицу времени (интенсивность). Тогда оценка реализации ЭМВ на m БЦВМ в защищенном исполнении за время t описывается распределением Пуассона. Распределение Пуассона возникает в теории потоков событий. Доказано, что для простейшего потока с постоянной интенсивностью q число событий, происшедших за время t , имеет распределение Пуассона с параметром $\lambda = q \cdot t$. Следовательно, вероятность того, что за время t не произойдет ни одного события, равна $(e^{-q \cdot t})$, т.е. функция распределения длины промежутка между событиями является экспоненциальной.

Случайная величина y имеет распределение Пуассона, если:

$$P(y = y_0) = \frac{\lambda^{y_0} \cdot e^{-\lambda}}{y_0!}, y_0 = 0, 1, 2, \dots, \quad (5.2)$$

где λ – параметр распределения Пуассона, и $P(y=y_0) = 0$.

Посчитаем вероятность того, что за время t на m БЦВМ в защищенном исполнении будет успешно реализованы ЭМВ (из n -доступных):

$$R_{A2}(m, t) = \frac{\lambda^m}{m!} e^{-\lambda} = \frac{(q \cdot t)^m}{m!} e^{-(q \cdot t)}. \quad (5.3)$$

Значение q возможно оценить с помощью СОДЭМВ. СОДЭМВ-сенсоры занимаются анализом использования вверенных им ресурсов и, в случае обнаружения каких-либо подозрительных или просто нетипичных событий, способны предпринимать некоторые самостоятельные действия по обнаружению, идентификации и устранению их причин. Сенсоры регистрируют различные попытки модификации и разрушения информации на контролируемых элементах и узлах БЦВК. Представим q как сумму интенсивностей конечного числа различных видов успешно реализованных ЭМВ. Таким образом,

$$q = \sum_{i=1}^k q_i = \sum_{i=1}^k p_i \cdot h_i, \quad (5.4)$$

где p_i – вероятность успешной реализации ЭМВ i -го вида,

h_i – количество ЭМВ i -го вида, $i \in [1, k]$.

Для данного алгоритма задаются следующие параметры: $Fs = \{Fs1, Fs2, Fs_j, Fsf\}$ – множество БЦВМ бортовой сети в защищенном исполнении, F – $|Fs|$ – количество БЦВМ в защищенном исполнении, t_a – время действия одного вида ЭМВ на БЦВМ в защищенном исполнении, j – период повтора ЭМВ, u_2 – период блокирования БЦВМ в защищенном исполнении, k – число видов ЭМВ.

Для программной реализации модели ЭМВ введем следующие функции и процедуры:

ТекВремя() – функция, возвращающая текущее время в формате «dd.mm.yyyy hh24:mi:ss»;

ГенСлуч(x) – функция, генерирующая псевдослучайное целое число с помощью операции рандомизации, принадлежащее интервалу $[1, x]$, $x \geq 1$;

РазБлок(F_j) – процедура, переводящая БЦВМ F_j в режим «доступен»;

$A_i(F_j)$ – функция распределения дискретной случайной величины «результат ЭМВ на БЦВМ F_j » с вероятностью принять значение 1 (ЭМВ успешно реализовано) равной p_i и вероятностью принять значение 0 (ЭМВ не оказало деструктивного воздействия на элементы и узлы БЦВК) равной $1-p_i$;

Пауза(t) – процедура, реализующая ожидание на время t ;

СостСерв(F_j) – функция, возвращающая статус БЦВМ F_j (доступна - 0; блокирована - 1);

Блок() – функция, переводящая БЦВМ F_j в режим «блокирована» и возвращающая текущее время в формате «dd.mm.yyyy hh24:mi:ss» переменную x .

Следующая блок-схема представляет алгоритм реализации модели воздействия ЭМИ на элементы и узлы БЦВК (рисунок 5.3).

С помощью операции рандомизации выбираются одна из БЦВМ бортовой сети в защищенном исполнении и ЭМВ одного из видов. Производится эксперимент $A_1(F_{SJ})$ – «ЭМВ на БЦВМ F_{SJ} », определяемый дискретной случайной величиной с распределением «вероятность принять значение 1 (успех) равна p_i , вероятность принять значение 0 (неудача) равна $1-p_i$ », $i \in [1, k]$. В случае успеха, БЦВМ блокируется и становится недоступным на время u_2 .

В отношении уязвимости к основным видам ЭМВ БЦВМ в защищенном исполнении ничем не отличается от обычной БЦВМ бортовой сети. Соответственно, можно ввести некоторый коэффициент уязвимости БЦВМ $\Psi_j \in F$, $j \in [1, n]$.

Тогда вероятность реализации ЭМВ i -го вида на БЦВМ F с коэффициентом уязвимости Ψ можно представить в виде:

$$p_i = \Psi \cdot p_{oi}, \quad (5.5)$$

где p_{oi} - вероятность успешной реализации ЭМВ i -го вида, зависящая только от используемых средств.

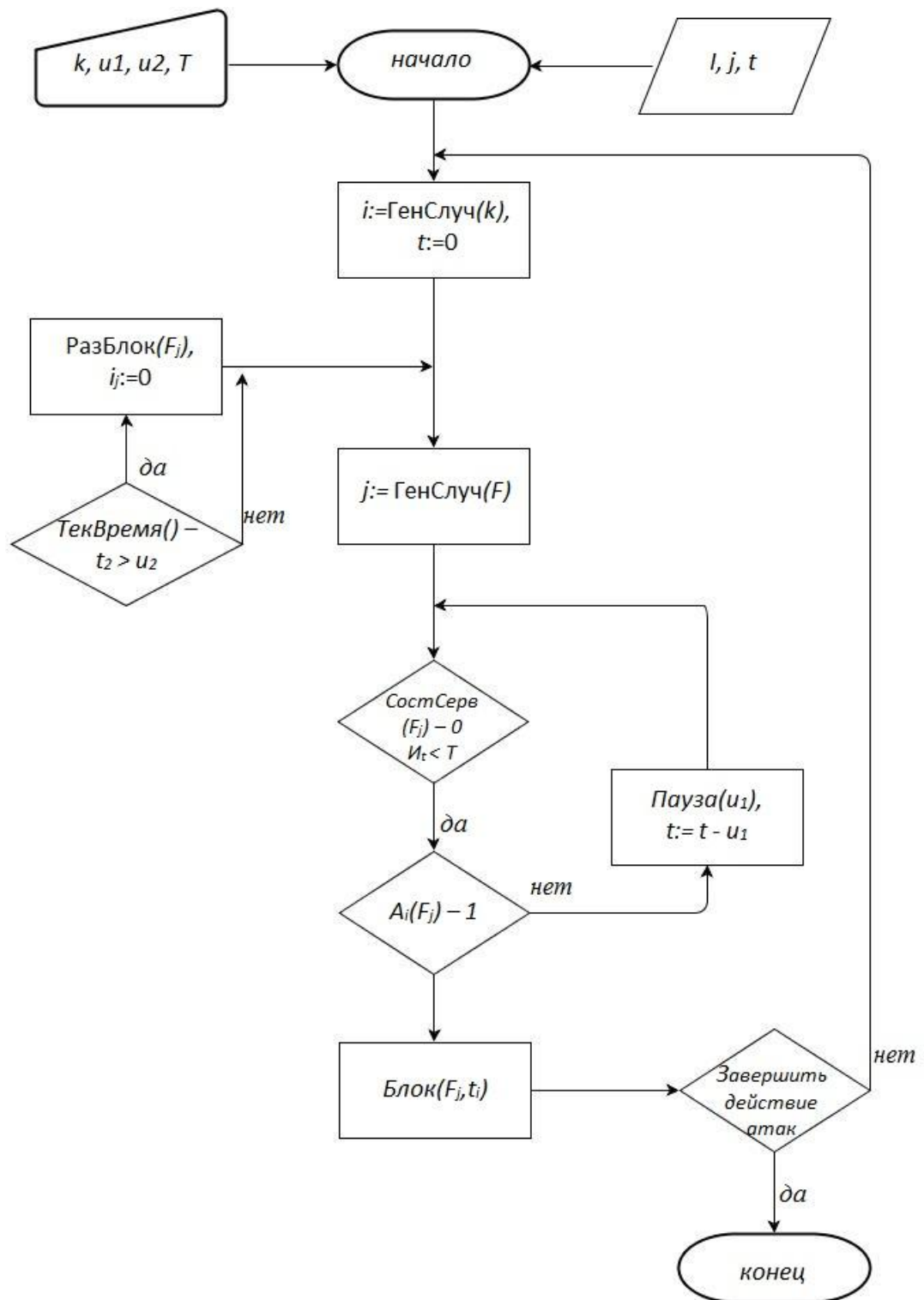


Рисунок 5.3 - Блок схема алгоритма моделирования ЭМВ на БЦВК

5.2 Аппаратно-программная реализация интеллектуальной системы анализа и оценки устойчивости БЦВК к деструктивному воздействию ЭМИ

Для представления процессов адаптации нейросетевых систем анализа и оценки устойчивости БЦВК будем использовать язык графического описания объектов, предложенный Дж. Деннисом и Д. Мисунасом [72, 154, 161]. Для чего рассмотрим основные понятия, используемые для описания нейросетевых систем.

Пакетная нейросетевая программа (ПНП) – функционально завершенная-совокупность взаимосвязанных командных пакетов.

Пул команд – многофункциональная безадресная память для размещения-ПНП – получает пакеты данных; формирует командные пакеты или пакеты данных.

Командный пакет (КП) – структурный компонент ПНП, образованный совокупностью специализированных полей и задающий как операцию нейросетевого базиса, так и номера командных пакетов-приемников результата.

Пакет данных (ПД) – контейнер – средство доставки значений данных от одного КП (источника) к другому КП (приемнику результата).

Командная ячейка – часть пула команд для размещения КП.

Нейросетевой базис включает в себя функции и компоненты, которые рассматриваются как язык представления нейронных сетей. Каждому из частей-базиса ставят в соответствие КП, из которых формируют функционально полные наборы КП и используют в качестве элементарных программных и структурных единиц [72, 154, 161].

В данном случае описание интеллектуальной системы анализа и оценки устойчивости БЦВК к деструктивному воздействию ЭМИ на языке графического описания объектов сводится к воспроизведению одной из стандартных топологий, которая содержит в качестве исполнительных элементов либо формальные нейроны, либо слой из формальных нейронов. Исходя из этого, программы по-

токов данных будут представляться в форме последовательности операторов, подчиняющихся определенному синтаксису языка, либо в виде функционально-завершенной совокупности КП, размещаемых в командных ячейках пула команд [72, 154, 157].

Для оптимизации процессов интеллектуальной системы анализа и оценки устойчивости БЦВК к деструктивному воздействию ЭМИ будем использовать стандартный нейросетевой подход: в зависимости от типа задачи выбирается одна из известных сетевых конфигураций и соответствующая ей парадигма обучения нейронной сети, а в качестве базового элемента – формальный нейрон, представленный командным пакетом. Информация о межнейронных связях сети записывается в коммуникационные поля командного пакета, а параметры нейронной сети, полученные в результате обучения – в функциональные поля той же совокупности КП.

5.2.1 Нейросетевая реализация интеллектуальной системы анализа и оценки устойчивости БЦВК к деструктивному воздействию ЭМИ

Нейросетевой командный пул строится на основе специализированных модулей памяти и ориентирован на управление потоком данных. Логика работы памяти обеспечивает устойчивость и защищенность хранимой информации: 1) операция записи данных производится не по конкретному адресу памяти, а по содержанию; 2) отсутствует операция считывания данных из запоминающего устройства (ЗУ) и непосредственный доступ к хранимой информации. Готовые к обработке данные, представленные в виде пакетов, извлекаются из памяти автоматически – без управления извне.

Нейросетевая реализация ИСАУ БЦВК в командном пуле представляются конечным множеством КП – а именно, пакетной нейросетевой программой.

Командные пакеты содержат следующий набор полей:

OP	F	Data _m ... Data	DST _n ...DST ₁	ACT
----	---	----------------------------	--------------------------------------	-----

- 1) командное поле (OP) определяют одну из функций нейросетевого базиса;
- 2) функциональное поле (F) содержит значения весов и порогов срабатывания формального нейрона или группы формальных нейронов;
- 3) операндные поля ($Data_m \dots Data$) предназначены для буферизации входной информации, поступающей в КП-приемник результата из КП-источников операндов, m - число операндных полей пакета;
- 4) коммуникационные поля ($DST_n \dots DST_1$) задают топологию связей между формальными нейронами, содержат адреса КП-приемников результата, n - число КП-приемников результата;
- 5) служебные (ACT) - вспомогательные поля, определяющие, как правило, контекст вычислений.

Командные пакеты (с укомплектованными операндными полями) передаются через коммуникационную среду в процессорный узел, где свободный процессорный элемент (аналог формального нейрона) выполняет преобразование содержимого КП и формирует пакеты данных по числу КП-приемников результата.

Пакет данных – контейнер, который переносит значения с выхода одного формального нейрона на вход другого формального нейрона, как правило, состоит из следующих полей:

RES	DST_{ij}	ACT
-----	------------	-----

- 1) поля результата (RES) содержит значение, сформированное в ФН-источнике, для передачи ФН-приемнику результата;
- 2) коммуникационного поля (DST_{ij}) задает связь между двумя формальными нейронами, по которой передается результат на i -й вход j -го ФН-приемника, $0 \leq i \leq r$, $0 \leq j \leq n$; здесь r – число формальных нейронов в слое нейронной сети, n - число входов отдельного ФН;
- 3) служебного (ACT) – вспомогательное поле.

Работа командного пула может быть описана следующим образом [72, 154, 157].

Исходное состояние. Многофункциональная память не производит операций, но содержит конечное множество КП с заполненными командными, коммуникационными и функциональными полями, то есть загруженную в пул обученную нейронную сеть. На входе командного пула находится входная очередь (или входной регистр), которая предназначена для буферизации поступающих ПД и формирует два флага: «Очередь пуста» и «Очередь заполнена». Задачей входной очереди является накапливание асинхронно поступающих ПД и инициирование загрузки пакета данных, находящегося в начале очереди, в пул команд, если первый флаг сброшен.

В процессе загрузки ПД из входной очереди в пул команд поле результата Res ПД заносится в одно из операндных полей $Data$, $0 \leq i \leq m$, КП-приемника результата, определяемое коммуникационным полем (DST_{ij}) и служебным полем (Act) ПД. В блоке памяти готовности данных устанавливается бит готовности, ассоциированный с операндным полем.

Извлечение КП. Если заполнены данными все операндные поля $Data_m \dots Data_1$ некоторого КП (установлены все связанные с ним биты готовности), то КП «выталкивается» из пула команд и производится очистка ассоциированных с ним битов готовности данных в блоке памяти готовности данных.

Пул представляет собой память, которая не имеет внешних шин записи/чтения, и следовательно исключает возможность записи по определенному адресу и считывания содержимого конкретной ячейки памяти. Доступной для загрузки является входная очередь, а для извлечения - выходная очередь пула. Т.е. командный пул является «непрозрачной» для внешнего управления памятью, в которую через входную очередь загружаются ПД, а из выходной очереди извлекаются готовые КП.

В качестве известного решения локального пула можно назвать командный пул мультипроцессорной системы DDDP с УПД [70]. Операндная память

адресуется по содержанию коммуникационного (DST_{ij}) и служебного (ACT#) полей ПД посредством механизма хэширования; командная память - только полем DST_i . Служебное поле ACT# необходимо для обеспечения корректной передачи результатов работы при одновременном вызове некоторой процедуры из различных частей программы или повторном прохождении циклических участков программы, при которых формируются КП с различными номерами активации и значениями операндов, но содержащие идентичные командные и коммуникационные поля.

Специфика организации нейросетевой реализации ИСАУ БЦВК требует внесения ряда изменений в командный пул и, прежде всего, введения модулей памяти для хранения функциональных параметров КП (FM) и механизма готовности данных (RCM), увеличения числа как операндных, так и коммуникационных полей (рисунок 5.4).

Командное поле в КП может отсутствовать, если все КП будут выполнять одну функцию – к примеру, функцию формального нейрона или слоя формальных нейронов.

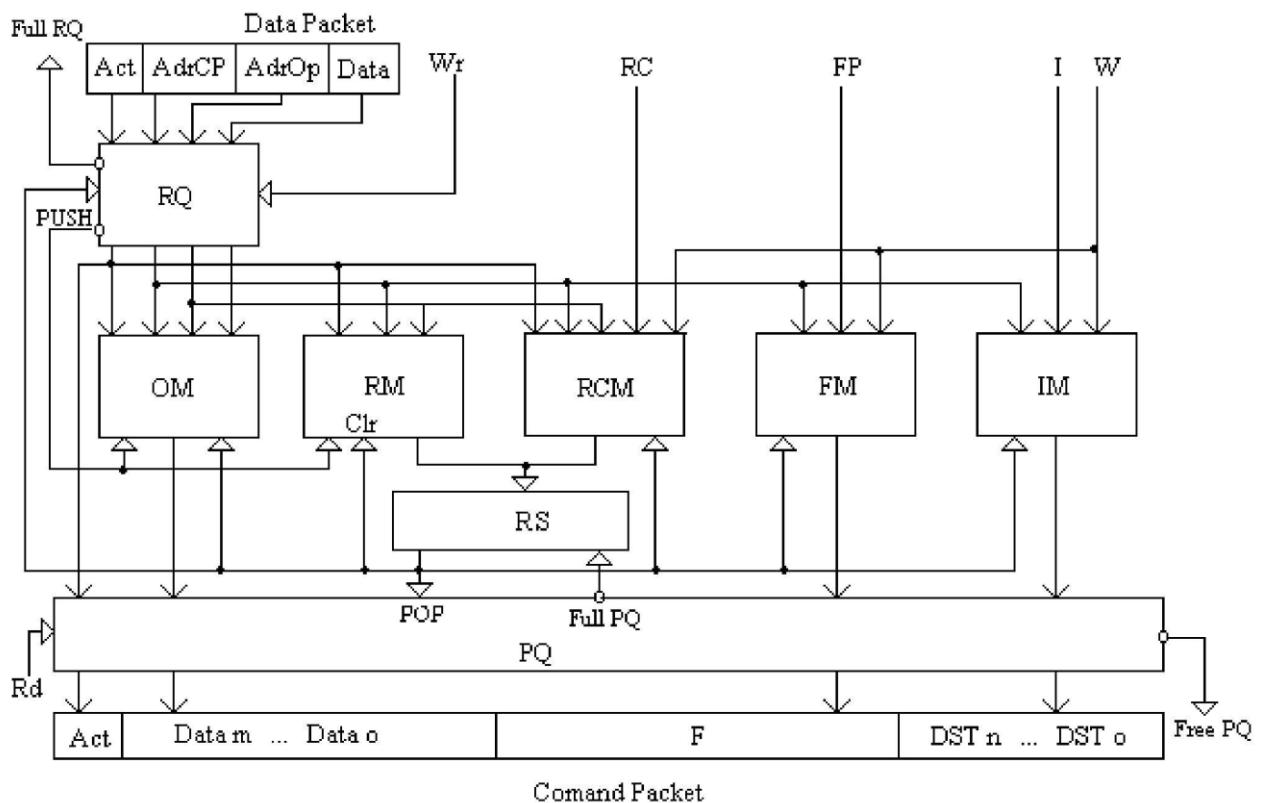


Рисунок 5.4 - Схема информационно устойчивого командного пула

Информационно устойчивый командный пул образован из следующих специализированных модулей памяти:

1. ОМ – память операндов предназначена для буферизации значений данных, передаваемых по межнейронным связям нейронной сети на входы формальных нейронов; в адресном сечении ОМ хранятся значения операндов, поступивших на входы конкретного формального нейрона (или слоя ФН) к некоторому моменту времени;

2. RM – память готовности КП к обработке, хранит булеву матрицу, отражающую динамику поступления операндов на входы формальных нейронов в сети; заполнение единицами некоторого адресного сечения матрицы соответствует моменту поступления всех операндов на входы некоторого формального нейрона сети; данный момент аппаратно отслеживается схемой готовности RS, формирующей сигнал POP извлечения КП из пула и сигнал CLR обнуления данного адресного сечения RM;

3. RCM – память управления готовностью позволяет явным образом указать, поступлением каких из операндов для данного формального нейрона можно пренебречь при формировании сигнала POP схемой готовности RS; булева матрица, хранимая в RCM, маскирует булеву матрицу, формируемую в RM;

4. FM – память функциональных параметров предназначена для длительного хранения значений весов и порогов срабатывания формальных нейронов;

5. IM – память команд хранит топологию нейронной сети; командные поля (в случае использования нескольких базовых функций) несут информацию о типе компонента сети, а коммуникационные поля определяют межкомпонентные связи; если командные пакеты реализуют одну базовую функцию (например, функцию формального нейрона), то IM содержит только коммуникационную информацию;

6. RQ – магазинная память, размещаемая на входе пула с целью буферизации ПД;

7. PQ – магазинная память, размещаемая на выходе пула для буферизации готовых к обработке КП.

Если в командный пул загружены одна или ряд нейронных сетей (ПНП), то пул будет находиться в состоянии покоя до тех пор, пока во входную очередь RQ не поступит хотя бы один ПД. Занесение ПД в RQ по внешнему сигналу Wr вызовет формирование внутреннего сигнала управления PUSH, который вызовет запись значения из поля Data ПД в операндное поле КП, адрес размещения которого в модуле ОМ определяется полями: служебным АСТ, адреса КП AdrCP и адреса операнда в командном пакете AdrOp. По тому же адресу в модуль памяти RM будет записана единица в булеву матрицу готовности. И в итоге? если в результате последней операции в данном адресном сечении модуля памяти готовности образуется двоичное слово, которое при наложении слова маски, считанного по тому же адресу из модуля RCM, сформирует определенный двоичный код, к примеру, содержащий единицы во всех разрядах, то схема готовности RS аппаратно сформирует сигнал POP извлечения КП из пула. Сигнал POP вызовет считывание из модулей памяти ОМ, FM, IM и размещение в выходной очереди PQ готового к обработке КП, обнуление адресного сечения (по AdrCP) в модуле памяти готовности и извлечение из входной очереди RQ очередного ПД, если флаг «Очередь пуста» сброшен. Выходная магазинная память сбросит сигнал «Очередь PQ пуста», инициирующий извлечение готового КП для обработки процессорным блоком по сигналу Rd, формируемому извне.

Командный пул (рисунок 5.4) в большей мере соответствует для размещения и функционирования уже обученной нейронной сети. В этом случае достаточно однократного занесения командной, функциональной информации и матрицы управления готовностью с функционально обособленных шин I (Instructions), FP (Functional Parameters) и RC (Readiness Control) по сигналу записи Wr в соответствующие модули памяти, после чего пул переводится в рабочий режим [72, 154, 157].

Если подразумевается размещение в пуле команд нейронной сети, которая подлежит обучению, то необходимо ввести коррективы во входные цепи модулей памяти RCM, FM и IM. Модули памяти функциональных параметров FM могут быть организованы так же, как модули памяти операндов OM и заполняться пакетами данных через очередь результатов RQ из-за следующих причин.

Процесс настройки функциональных параметров нейронной сети будет производиться размещенной в пуле обучающей ПНП, результатом ее работы будет формирование ПД, которые содержат в полях Data значения весов или порогов срабатывания формальных нейронов для обучаемой нейронной сети. Следовательно, одна нейронная сеть (обучающая) будет использовать поля функциональных параметров другой нейронной сети (обучаемой) в качестве своих операндных полей.

Командный пул представляет собой МРВС, размещенную в пределах функционально завершеного кристалла или секционированного базового блока. МРВС дает возможность обеспечить повышенную устойчивость пула с помощью замыкания потоков данных в пределах устройства и минимизации обмена информацией с внешней средой.

Главным недостатком существующих подходов к организации нейросетевых реализаций будет *разнесение во времени* процессов записи/чтения из памяти, передачи и обработки данных, приводящее к многочисленным непроизводительным временным затратам, и *в пространстве* устройств хранения и обработки информации. МРВС позволяют выполнить временное и пространственное совмещение процесса обработки информации с операциями записи/чтения, которые проводятся в многофункциональной памяти. Данный подход к технической реализации командного пула основан на особенностях МРВС, специфике выполнения операций в нейросетевом базисе и интеллектуальной памяти IRAM.

МРВС - это структуры, характеризующиеся многофункциональностью и регулярностью и как следствие максимально приспособленные к производст-

ву методами интегральной технологии. Многофункциональность обозначается возможностью реализации структурой неединичного набора функций.

Регулярность определяется повторяемостью связей и элементов структуры [160].

Интеллектуальная память IRAM дополняет базовые положения МРВС с помощью принципа монолитности исполнения вычислителя, это приводит к минимизации обмена информацией с внешней средой, пространственно-временному замыканию основных потоков преобразуемых данных внутри функционально завершеного кристалла [160], и, как следствие, снижает вероятность негативных эффектов от деструктивного воздействия ЭМИ. Управление вычислительным процессом за счет потоков данных обеспечивает инициализацию параллельной обработки данных в пределах МРВС в зависимости от порядка поступления значений данных, которые передаются посредством пакетов. Нейронная сеть является частным случаем МРВС, потому что в качестве базового часто повторяющегося в структуре элемента используется формальный нейрон, который реализует набор операций нейросетевого базиса, и имеет место повторяемость связей между формальными нейронами в сети. Так же, специфика нейронных сетей дает возможность строить надежные структурно-сложные системы даже из малонадежных элементов, а функциональная избыточность нейронной сети позволяет при разрушении части не вызывать потери системой своей функциональности [153].

Задачу разработки нейронной сети можно показать как отражение процесса нейросетевых вычислений в структуре многофункциональной памяти в соответствии с идеологией МРВС и интеллектуальной памяти. Многообразие реализуемых нейронной сетью функций, основные достоинства, в первую очередь, устойчивость к деструктивным воздействиям ЭМИ, зависят от системы связей между формальными нейронами. Другим достоинством нейронной сети является внутренний параллелизм, позволяющий при достаточно скромном быстродействии базового элемента решать относительно сложные, трудно формализуемые задачи в реальном времени [165, 256, 257]. Из этого следует, что при проектиро-

вании нейросетевой реализации ИСАУ БЦВК надо ориентироваться на принципы, позволяющие реализоваться присущему нейронным сетям самоуправлению вычислениями. Помимо этого, логика работы памяти в таких системах обеспечивает устойчивость передаваемой, хранимой и обрабатываемой информации: операция записи может производиться «по содержанию», а именно с использованием ассоциативного доступа к информации; нет операции считывания данных из ЗУ и, как следствие, исключен непосредственный доступ к хранимой информации.

5.2.2 Организация многофункциональной памяти

Рассмотрим организацию многофункциональной памяти с аппаратной реализацией базовых функций формального нейрона для выполнения распределенных вычислений под управлением потоком данных, нейронная сеть в которой представляется в виде пакетной нейросетевой программы, которая размещена в командных ячейках пула команд [159, 160].

В соответствии с рассматриваемым подходом не важен порядок поступления в операндные поля КП входных значений X_i , которые приводят к установке битов готовности R_i . Но такие архитектурные особенности как структура пула команд и используемый интерфейс могут повлиять на производительность вычислений. Таким образом, наличие входной очереди для фиксации поступающих в пул команд ПД задает последовательный характер заполнения полей X_i и дает возможность совместить занесение входных данных с обработкой информации именно в командном пуле. Умножение аргумента X_i на вес W_i и следующее накопление результата $X_i W_i$ в поле аккумулятора A дает возможность заменить в формате КП операндные поля X_i одним накопительным полем A (рисунок 5.5).

D ₁	D ₂	...			D _m
C	w ₀	w ₁	...		w _n
N	A	R ₁	R ₂	...	R _n

Рисунок 5.5 - Командный пакет для многослойной НС

Над полями готовых к обработке КП выполняются преобразования, аналогичные функции формального нейрона, формируются ПД в зависимости от числа КП-приемников результата. Специфика пула команд содержит построение «непрозрачной» для пользователя памяти, в которую через входную очередь загружаются пакеты данных, а, следовательно, из выходной очереди извлекаются готовые к обработке КП или ПД. Пул команд представляет собой информационно устойчивую память, которая не имеет внешних шин записи/чтения, а это исключает возможность записи информации по конкретному адресу и считывания содержимого определенной ячейки памяти.

Готовый КП через селекторную сеть будет передаваться к процессорным узлам, а результаты обработки в виде ПД через распределительную сеть будут передаваться в командные ячейки пула команд. При большом числе РУ, что характерно для нейронных сетей, растет сложность и временные задержки в сетях передачи пакетов. Согласно идеологии МРВС необходимо произвести обработку готовых КП непосредственно в пуле команд.

Для распараллеливания вычислений надо перейти к множеству локальных пулов команд, и это позволит сочетать последовательный характер обработки конкретных КП в пулах с распределением обработки информации по значительному числу вместе работающих локальных пулов.

Нейронная сеть формируется с помощью помещения КП в командных ячейках локальных пулов и заполнения командных, функциональных и коммуникационных полей либо на этапе обучения сети, либо (в случае уже обученной нейронной сети) на этапе программирования. В связи с тем, что нейронная сеть в виде ПНП помещается в командных ячейках локальных пулов, будет полезно при распределении КП отобразить двумерную совокупность формальных нейро-

нов многослойной сети на линейную последовательности локальных пулов так, чтобы КП, соответствующие формальным нейронам отдельного слоя, размещались в командных ячейках разных локальных пулов.

Топология нейронных сетей задается коммуникационными полями D_i , определяющими связи между формальными нейронами слоев НС, которые описываются в ходе программирования. Результаты обработки в виде ПД отправляются в ряд локальных пулов, что делает наличие распределительной сети обязательным.

Формальные нейроны W_i , которые отмечены в командном пакете признаком С (const), в режиме функционирования нейронной сети не должны изменяться, но в процессе настройки функциональных параметров (обучения сети) они будут выполнять роль операндных полей командных ячеек и будут подлежать модификации.

Нейронная сеть самоуправляется с помощью механизма частичной или полной готовности данных и передач результатов обработки КП-источников в операндные поля КП-приемников посредством передачи данных. Нейронные сети начинают функционировать в ходе загрузки передачи данных во входную очередь и дальше—в поля командных ячеек [72, 154, 157].

5.2.3 Оценка эффективности реализации процессов интеллектуальной системы анализа и оценки устойчивости БЦВК к деструктивному воздействию СК ЭМИ

Эффективность многофункционального командного пула обуславливается совмещением во времени процессов передачи, хранения и обработки информации. Рост функциональной устойчивости нейросетевой системы происходит посредством замыкания большей части информационного потока в пределах многофункционального пула, а повышение производительности связано с минимизацией пересылок информации через интерфейсы [106].

Для наглядности оценим временные затраты, которые связаны с циклом работы нейронной сети, размещенной:

- 1) в командных пулах с разнесенными в пространстве зонами хранения и обработки информации;
- 2) на базе многофункционального командного пула.

Для первого случая свойственна передача двух разновидностей пакетов по интерфейсам: пакетов данных и командных пакетов, а также послойная реализация функции нейронной сети [72, 154, 157]. Для последовательного занесения в пул команд ПД, которые относятся к отдельному формальному нейронному слою нейронной сети нужны затраты времени $n_{i-1}t_c$ (t_c – время передачи через интерфейс одного ПД, n_{i-1} – число формальных нейронов предыдущего слоя нейронной сети), а для слоя в целом – $n_{i-1}n_it_c$ (n_i – число формальных нейронов текущего слоя нейронной сети). По числу формальных нейронов данного слоя формируются КП для передачи по интерфейсу в зону обработки (затраты времени n_it_c). В операционной зоне для каждого формального нейрона вычисляются взвешенные сигналы $n_{i-1}t_m$ (t_m – время выполнения операции умножения) следующим накоплением результата $n_{i-1}t_a$ (t_a – время выполнения операции сложения), а для слоя нейронных сетей – $n_in_{i-1}(t_m + t_a)$.

Затраты во времени для слоя нейронной сети – $n_i(n_{i-1}t_c + t_c + n_{i-1}(t_m + t_a))$, а НС из k слоев

$$t_{NN} = n_k t_c + \sum_{i=1}^{k-1} n_i (n_{i-1} t_c + t_c + n_{i-1} (t_m + t_a)) \quad (5.6)$$

где первое слагаемое учитывает передачу по интерфейсу ПД с результатами вычислений из выходного слоя нейронной сети, который содержит n_k формальных нейронов.

В случае многофункционального пула операции передачи ПД по интерфейсу $n_{i-1}n_it_c$ совмещены с процессом обработки – $t_m + t_a$, отсутствует необходимость формирования и передачи КП через интерфейс в зону обработки, следовательно, общие затраты времени снижаются

$$t_{MNN} = n_k t_c + \sum_{i=1}^{k-1} n_i (n_{i-1} t_c + t_m + t_a) \quad (5.7)$$

Эффективность использования многофункционального пула можно оценить отношением выражений (5.6) и (5.7). Для наглядности (рисунок 5.6) положим, что число формальных нейронов в слоях нейронных сетей одинаково, исключая первое слагаемое, которое связано с выдачей результатов работы нейронной сети, в качестве параметра выбрано t_c , что является временем передачи пакета по интерфейсу.

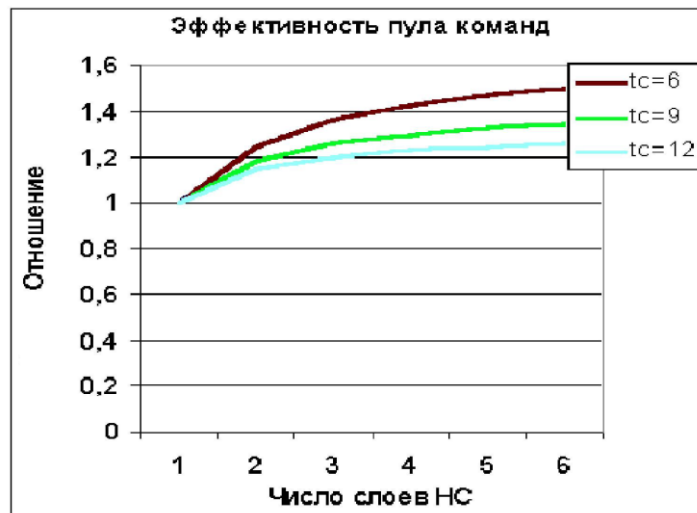


Рисунок 5.6 - Эффективность многофункционального пула по сравнению с пулом команд

5.3 Структурные решения нейросетевой реализации ИСАУ БЦВК

При описании ИСАУ БЦВК нейросетевыми пакетными программами возможна разная степень детализации: командный пакет может соответствовать одной из функций нейросетевого логического базиса, функции формального нейрона, слоя из формальных нейронов или нейронной сети в целом [161]. В связи с этим изменяются требования к проектированию базовых блоков и сложность технической реализации нейронной сети. Представление командными пакетами операций, которые соответствуют отдельным функциям формального нейрона, не целесообразно ввиду малой функциональной сложности и разнородности операций и возрастания потока ПД с промежуточными результатами вычислений.

Следовательно, необходимо рассматривать градации сложности командных пакетов, начиная с уровня формального нейрона, т.е. учитывая следующие соответствия: КП ФН, КП-слой ФН, КП НС [72, 154].

Возможные архитектурные решения нейросетевой ВС для соответствия КП-ФН в зависимости от характера выполнения операций показаны в таблице 5.1

Т а б л и ц а 5.1

	По входам ФН	По ФН	По слоям НС	Архитектурные особенности среды
1	Последоват.	Послед.	Последоват.	Последовательная в пуле распределенная обработка, один PU в пуле
2	Последоват.	Парал.	Последоват.	Параллельная в пуле распределенная обработка, PU по числу ФН в слое
3	Параллельно	Послед.	Последоват.	Последовательная в пуле распределенная обработка, один PU в пуле
4	Параллельно	Парал.	Последоват.	Параллельная в пуле распределенная обработка, PU по числу ФН в слое
5	Параллельно	Парал.	Параллельно	Параллельная распределенная обработка, PU по числу ФН в слое, конвейеризация обработки по слоям НС

Реализация функции формального нейрона на основе последовательной распределенной арифметики (SDA - Serial Distributed Arithmetic) дает наибольший выигрыш по аппаратным ресурсам, но требует больших временных затрат [251].

При использовании параллельной распределенной арифметики (PDA - Parallel Distributed Arithmetic - варианты 1 и 2 из таблицы 5.1) получаем компромиссное решение с точки зрения аппаратных затрат и времени реализации функции формального нейрона. В техническом решении такой результат работы формального нейрона формируется в локальном пуле (рисунок 5.7) путем последовательного суммирования взвешенных значений входов формального нейрона, последовательно или параллельно по ФН отдельного слоя сети и последовательно по слоям НС. Последовательный характер обработки по входам

формального нейрона определен использованием в качестве интерфейса для доставки пакетов данных кольцевой шины с последовательной передачей пакетов данных с выходов на входы локальных пулов. Получение пакетов данных в локальном пуле вызывает запуск цепочки операций чтение – модификация – запись с проверкой готовности командных пакетов, что равносильно выполнению операций нейросетевого логического базиса по взвешиванию отдельного входа и накопления поступивших взвешенных входов в командном пакете.

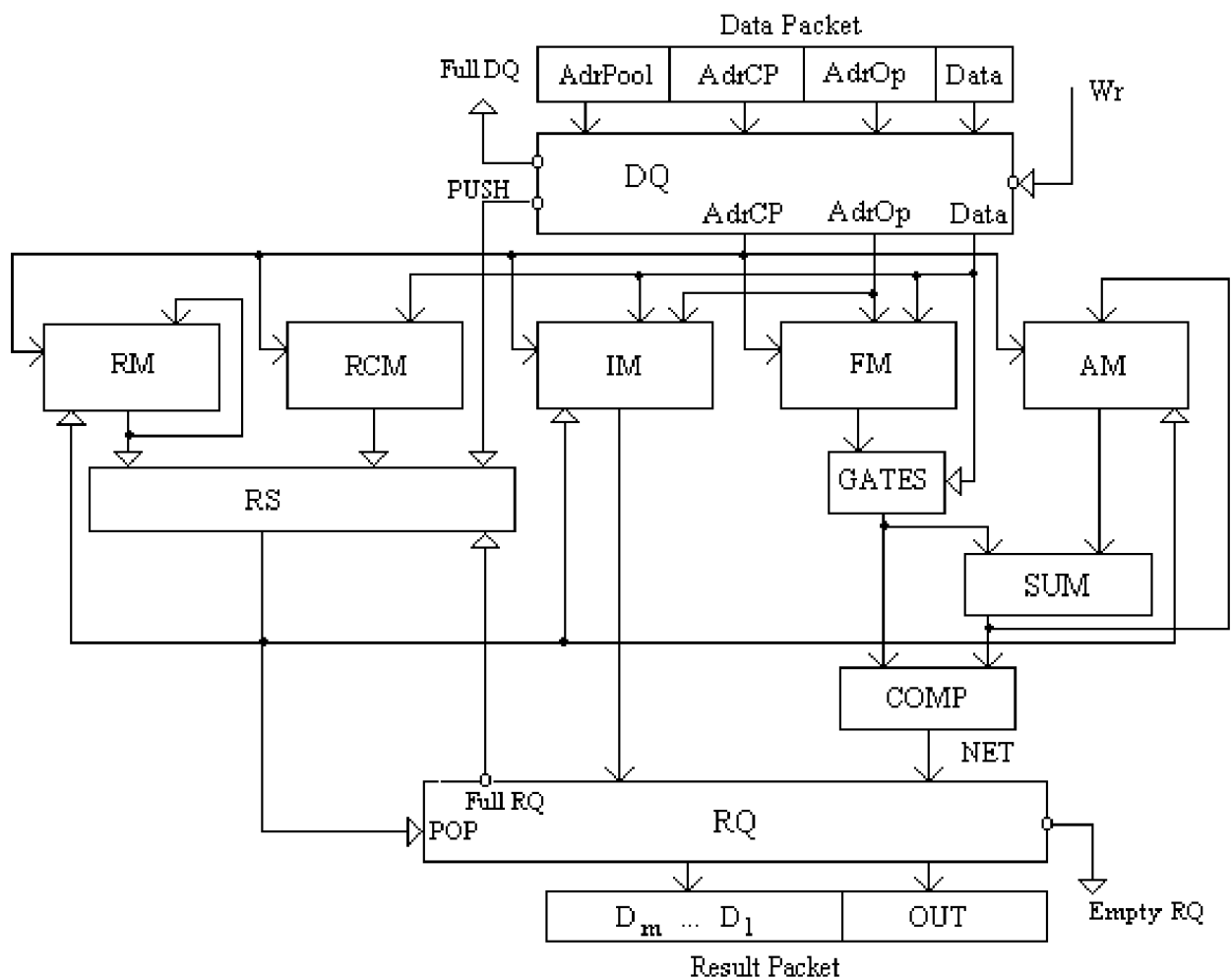


Рисунок 5.7 - Локальный пул команд

Последовательный или параллельный характер обработки данных по отдельным формальным нейронам слоя сети зависит от распределения командных пакетов нейросетевой пакетной программы по локальным пулам. Если все командные пакеты программы фиксированы в одном локальном пуле («вертикальное» размещение командных пакетов), то возможно только последователь-

ное выполнение функций отдельных формальных нейронов сети. Если же командные пакеты, соответствующие формальным нейронам одного слоя, распределены по различным локальным пулам («горизонтальное» размещение КП), то возможны варианты параллельной или параллельно-последовательной обработки. Во всех рассмотренных случаях сохраняется последовательный характер выполнения вычислений по слоям нейронной сети.

При параллельной обработке значений координат входного вектора в пределах локального пула (варианты 3 и 4 таблица 5.1) из-за одновременного выполнения операций взвешивания входного вектора и применения свертывающего дерева сумматоров возрастают аппаратные затраты. И когда производится переход от бинарного представления формального нейрона к формальному нейрону с вещественными значениями обрабатываемых данных, потребность в аппаратных ресурсах возрастает пропорционально количеству входов в основном из-за увеличения числа блоков умножения.

По оценкам [72, 154] использование восьми конвейерных умножителей 8x8 бит в дополнительном коде, выполненных по алгоритму Бута, который свертывает деревья сумматоров и компаратора с загружаемым 8-разрядным порогом требует значительного объема логических ресурсов: 44% от ПЛИС XC4036XLA и до 18% от ПЛИС XC4085XLA. Применение восьми параллельно-последовательных 8-разрядных умножителей, 16-разрядного аккумулятора частичных произведений с временным мультиплексированием приводит к снижению объема аппаратных затрат до 12% от логических ресурсов ПЛИС XC4036XLA и 5% от XC4085XLA на ФН. Т.е. на кристалле XC4085 размещается до двадцати 8-входовых ФН. Реализация формального нейрона, которая основывается на последовательной распределенной арифметике SDA, дает наибольший выигрышный результат по занимаемым ресурсам – около 3% от общих возможностей ПЛИС XC4085XLA, что равносильно размещению на одном кристалле примерно около 30 формальных нейронов (85 Кбайт/нейрон против 570 Кбайт/нейрон для случая параллельной арифметики).

Многослойная структура нейронной сети как раз и определяет последовательный характер обработки информации по слоям НС. В этой связи параллельность вычислений по слоям нейронной сети (пятый вариант из таблицы 5.1) может быть обеспечена только конвейеризацией вычислений, которая производится параллельно в локальных пулах команд над последовательно поступающими во времени входными векторами с фиксацией промежуточных векторов результатов.

Стоит отметить, что главным достоинством нейросетевой вычислительной среды, которая описывается командными пакетами на уровне соответствия КП-ФН, является независимость от топологии реализуемых сетей, так как коммуникационными полями командных пакетов задаются все связи между разными формальными нейронами сети. Обратной стороной подобной детализации является увеличенная загрузка цепей коммуникации, потому что каждый пакет данных подходит только отдельной связи ФН. То есть, PU образуют большое число малоинформативных пакетов данных, для передачи которых необходимы высокоскоростные интерфейсы. Частично данная проблема может быть решена за счет указания в адресном поле пакетов данных всех связей конкретного формального нейрона-источника с формальными нейронами-приемниками вместо единственной связи с конкретным формальным нейроном-приемником.

Адрес входа ФН - приемника 1	Адрес входа ФН - приемника n	Данные от ФН - источника
---------------------------------	-------	-----------------------------------	-----------------------------

Такое представление ПД – суперпакетом данных позволяет в n раз, где n - число формальных нейронов в слое, уменьшить количество передаваемых пакетов данных, но потребует усложнения цепей адресной селекции ФН.

Степень детализации КП-слой ФН. Следующий шаг, который дает возможность сократить количество пакетов данных в цепях коммуникации, это – переход к степени детализации КП-слой ФН. То есть командный пакет в качестве объекта описывает слой формальных нейронов, который производит обработку входного вектора X путем умножения на матрицу весовых коэффи-

циентов W с целью формирования выходного вектора $OUT = \varphi(XW)$. При этом можно вновь вернуться к простой форме пакетов данных, число которых в пакетной программе определяется количеством слоев представляемой НС.

Адрес входа слоя-приемника	Вектор данных от слоя-источника
----------------------------	---------------------------------

В рассматриваемом случае стоит особо обратить внимание на увеличение потребления аппаратных ресурсов нейросетевой вычислительной средой, так как при реализации нейронной сети с различным числом формальных нейронов в отдельных слоях НС в качестве ориентира для выделения аппаратных средств будет выбран слой с наибольшим количеством формальных нейронов.

Для перехода к схеме: параллельно по входам ФН – параллельно по ФН слоя – последовательно по слоям нейронной сети следует предугадать дальнейшее увеличение аппаратных затрат, потому что процессы взвешивания элементов входного вектора X потребуют увеличению числа функциональных блоков пропорционально числу входов ФН. Следовательно, базовый блок нейросетевой вычислительной среды будет представляться как двумерная систолическая матрица нейропроцессорных блоков – PN, «горизонтальное» измерение которой будет соответствовать числу ФН слоя нейронной сети, а «вертикальное» – количеству входов ФН.

При выборе архитектуры базового блока нейросетевой вычислительной среды, соответствующей схеме: параллельно по входам ФН – параллельно по ФН слоя – параллельно по слоям нейронной сети следует опираться на послойную передачу с фиксацией промежуточных результатов вычислений в процессе конвейеризации работы НС.

Степень детализации КП нейронная сеть. Максимально возможная степень сложности описания нейронной сети – это задание всех функциональных параметров и связей одним командным пакетом. Загрузка подобного командного пакета в базовый блок нейросетевой вычислительной среды может представляться как ее настройка на выполнение функции конкретной НС.

Поступление входного вектора в виде пакета данных запускает в базовом блоке вычисления, которые завершаются формированием пакетов данных с вектором результата:

Адрес приемника	Вектор данных от нейронной сети
-----------------	---------------------------------

Подобная организация работы нейронной сети не сопровождается передачей промежуточных результатов вычислений, то есть все потоки данных замкнуты внутри базового блока, и в основном исключена возможность оказания несанкционированного воздействия на ход процесса формирования результата.

5.3.1 Командные пулы уровня формального нейрона

При описании нейронных сетей, которые детализируются до уровня формального нейрона, необходима соответствующая аппаратно-программная реализация ИСАУ БЦВК. Степень детализации КП-ФН является минимально возможной для представления объектов-данных, передаваемых пакетами данных по межнейронным связям, а точнее, между конкретным выходом ФН-источника и определенным входом ФН-приемника результата [72, 154].

На рисунке 5.7 показана структура локального пула, который организован в соответствии с вышеперечисленными положениями и использующий механизм частичной готовности для отслеживания поступления заданной совокупности операндов, представленных бинарными значениями.

Локальный пул образован из следующих специализированных модулей памяти:

- RM (Readiness Memory) – память готовности командных пакетов к обработке - хранит булеву матрицу, которая отражает динамику поступления операндов на информационные входы ФН сети и фиксирует факт поступления операнда в локальный пул установкой единицы в соответствующем бите матрицы; заполнение единицами некоторого адресного сечения матрицы соответствует моменту поступления всех операндов на входы некоторого формального

нейрона; данный момент аппаратно отслеживается схемой готовности RS (Readiness Scheme), формирующей сигнал POP извлечения пакета из локального пула и сигнал обнуления данного адресного сечения RM;

- RCM (Readiness Control Memory) – память управления готовностью позволяет явным образом указать, поступлением каких из операндов для данного формального нейрона можно пренебречь при формировании сигнала POP схемой готовности RS; булева матрица, хранимая в RCM, маскирует булеву матрицу, формируемую в RM в процессе загрузки пакетов данных в локальный пул;

- IM (Instructions Memory) – память команд – хранит топологию нейронной сети; так как все командные пакеты нейронной сети реализуют одну базовую функцию формального нейрона, то IM содержит только коммуникационную информацию;

- FM (Functional Memory) – память функциональных параметров – предназначена для длительного хранения значений весовых коэффициентов и порогов срабатывания ФН, которые формируются в процессе обучения нейронной сети;

- AM (Accumulator Memory) – аккумуляторная память – предназначена для накопления значений произведений $W_i X_i$ весовых коэффициентов W_i , ассоциированных со всеми входными значениями X_i , которые поступают в локальный пул к определенному моменту времени;

- DQ (Data Queue) – магазинная память, размещаемая на входе локального пула для буферизации входных пакетов данных;

- RQ (Results Queue) – магазинная память, размещаемая на выходе локального пула команд для буферизации пакетов данных с результатами обработки.

Если в локальном пуле размещены командные пакеты, которые входят в состав одной или нескольких нейросетевых пакетных программ, то локальный пул будет находиться в состоянии покоя до тех пор, пока во входную очередь DQ не поступит хотя бы один из пакетов данных. Внесение пакета данных в DQ по внешнему сигналу W_r приведет к образованию внутреннего

сигнала управления PUSH, который вызовет добавление (если $X_i = 1$) очередного значения весового коэффициента W_i в аккумуляторную память АМ по адресу, определяемому коммутационным полем входного пакета данных, а именно: адресом командного пакета $AdrCP$ и адреса операнда в командном пакете $AdrOp$.

Причем в локальном пуле фиксируется не бинарное значение X_i , а выбранное из того же адресного сечения функциональной памяти FM значение весового коэффициента W_i , которое при передаче через блок вентилях GATES преобразуется операцией поразрядной конъюнкции $W_i X_i$ и складывается на сумматоре SUM с ранее накопленным значением, которое выбрано из того же адресного сечения аккумуляторной памяти АМ. Образованное на выходе сумматора новое значение суммы записывается по прежнему адресу в аккумуляторной памяти. Также одновременно выполняется установка бита готовности R_i соответствующего бинарному значению X_i в выбранном из памяти RM текущем значении слова готовности. Новое значение слова готовности маскируется выбранным из того же адресного сечения памяти управления готовностью CRM словом маски. Результат фиксируется по прежнему адресу в памяти готовности данных RM в качестве текущего слова готовности данных. Установка всех битов готовности в некотором адресном сечении памяти готовности данных отслеживается схемой готовности RS, которая иницирует выдачу в очередь RQ пакета данных, в коммуникационные поля которого заносится из памяти команд IM коммуникационная информация о командном пакете-приемниках результата, а в поле OUT - значение с выхода дискриминатора COMP, который выполняет сравнение накопленной в аккумуляторной памяти суммы всех поступивших к данному моменту произведений $X_i W_i$ с порогом срабатывания формального нейрона W_o , выбранного из функциональной памяти FM, и формирование бинарного результата OUT. После фиксации пакета данных в очереди RQ по сигналу POP командная ячейка переводится в исходное состояние путем обнуления соответствующего адресного сечения ак-

кумуляторной памяти и того же адресного сечения локальной памяти готовности данных. Выходная магазинная память формирует сигнал «Очередь RQ не пуста» для извлечения пакета данных из локального пула.

Вышеописанный процесс обработки информации производится непосредственно в командных ячейках локальных пулов и совпадает во времени с записью во входном стеке DQ вновь поступающих пакетов данных. Причем сам процесс обработки информации заключается в циклическом выполнении операций чтения, модификации и записи содержимого памяти готовности данных RM, аккумуляторной памяти AM и памяти функциональных параметров FM, завершение которого контролируется схемой готовности RS, переводящей командную ячейку в исходное состояние и разрешающей формирование пакетов данных с результатом преобразования.

Отметим, что организация пула команд как многофункциональной памяти, которая управляется потоками данных, приводит к децентрализации управления, то есть помимо распределенных вычислений имеет место быть и локальное распределенное управление.

Детализация описания нейронной сети уровня соответствия КП-ФН, когда коммуникационными полями командного пакета задаются все связи между отдельными формальными нейронами сети, приводит к повышенной нагрузке на интерфейс, в который практически одновременно поступает количество пакетов данных, равное числу связей между формальными нейронами соседних слоев нейронной сети. Уменьшить число пакетов данных в интерфейсе можно за счет описания в коммуникационном поле пакета данных всех связей конкретного ФН-источника.

Адрес входа ФН - приемника 1	...	Адрес входа ФН - приемника n	Данные от ФН – источника
---------------------------------	-----	---------------------------------	-----------------------------

Представления объекта-данного в виде суперпакета позволяет в n раз, где n - число формальных нейронов в принимающем слое, уменьшить количество передаваемых между двумя слоями пакетов данных.

Для иллюстрации последнего тезиса стоит рассмотреть архитектурное решение нейросетевой реализации ИСАУ БЦВК с локальными пулами команд (рисунок 5.8), в качестве распределительной сети суперпакетов данных в которой использован механизм кольцевой шины.

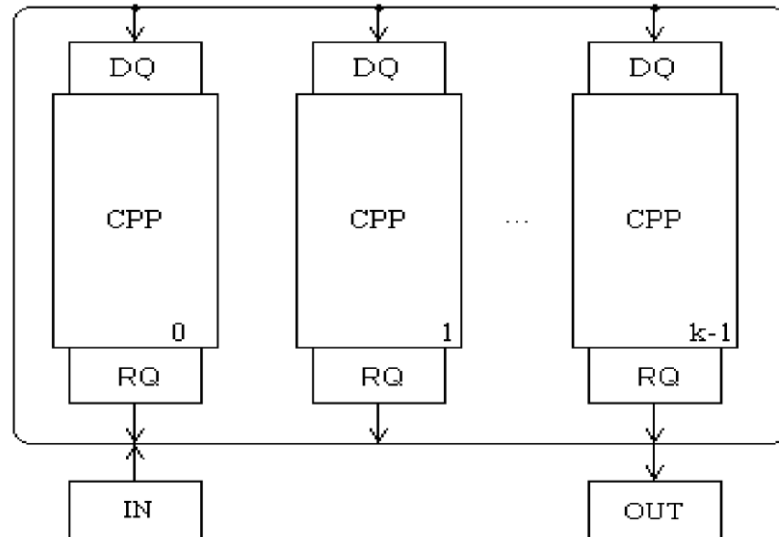


Рисунок 5.8 - Нейросетевая среда с уровнем детализации КП-ФН

При вводе исходные данные в виде пакетов данных поступают из устройства ввода IN на кольцевую шину в формате

D1	...	Dn	X
----	-----	----	---

и далее во входные цепи очередей данных DQ. Адресные селекторы каждой из очередей DQ производят сравнение полей «Адрес пула» - *AdrPool* в адресах командных пакетов-приемников - D_i с номером соответствующего локального пула. В случае совпадения формируются внутренние пакеты данных формата $0 \leq i \leq n$, и заносятся в соответствующие очереди DQ.

D_i	X
-------	---

Процесс вывода результатов преобразований аналогичен адресной рассылке исходных данных и отличается только тем, что совпадение полей

AdrPool в адресах командных пакетов-приемников D_i происходит не в адресных селекторах очередей DQ, а в адресных селекторах блоков вывода данных OUT.

«Узким» местом в данной структуре является адресное распределение пакетов результатов по очередям данных DQ локальных пулов команд с использованием механизма кольцевой шины [72, 154].

Выходом может являться применение в качестве распределительной сети координатного коммутатора, связывающего выходы очередей результатов с входами локальных пулов. Применение подобного коммутатора в интеллектуальной памяти IRAM [162] решает проблему развязки множества внутренних потоков многоразрядных данных при выполнении суперскалярных и векторных вычислений в монолитном функционально завершенном устройстве.

5.3.2 Командные пулы уровня слоя формальных нейронов

Для представления нейронных сетей, детализированных до уровня слоя формальных нейронов [72], следует отметить, что КП описывает операции умножения входного вектора X на матрицу весовых коэффициентов W и нелинейного преобразования φ над координатами выходного вектора $NET = XW$. При этом объекты-данные передаются в виде пакетов данных, число которых в интерфейсе ограничено и равно количеству слоев в представляемой нейронной сети, в формате:

Адрес входа слоя-приемника	Вектор данных от слоя – источника
-------------------------------	--------------------------------------

Рисунок 5.9 показывает вариант построения наращиваемой секции базового блока нейросетевой реализации ИСАУ БЦВК, который соответствует случаю обработки командных пакетов последовательно по входам ФН – параллельно по ФН слоям – последовательно по слоям НС. Базовый блок образован рангом нейропроцессорных узлов PN, которые взаимосвязаны общей магистралью и цепями адресной селекции DC. Наращивание функциональной мощно-

сти нейросетевого вычислителя возможно за счет увеличения числа ФН путем соединения секций базовых блоков «по горизонтали» при помощи системы интерфейсных шин адреса *Adr*, данных *Data* и управления *Ctrl*.

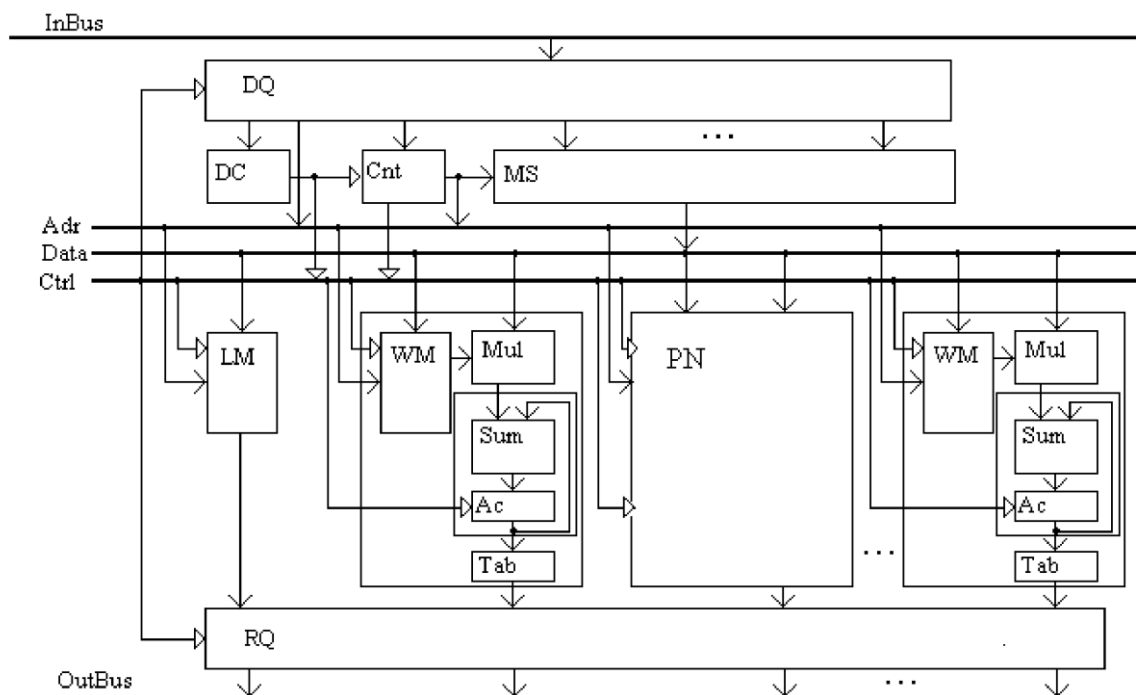


Рисунок 5.9 - Нейросетевая среда с уровнем детализации КП-слой ФН

Базовый блок может выполнять функцию локального пула команд в данных случаях: при параллельном выполнении операции слоя ФН, если число нейронов в слое нейронной сети не превышает количества нейропроцессорных узлов *PN*; при параллельно-последовательном вычислении выходного вектора слоя ФН [72, 154].

Базовый блок образован из следующих модулей памяти:

- **LM** (**Links Memory**) – память связей – хранит топологию нейронной сети; так как командные пакеты реализуют одну базовую функцию - слоя формальных нейронов, то **LM** содержит только коммуникационную информацию;

- **WM** (**Weights Memory**) – память весов – предназначена для длительного (на срок работы нейронной сети) хранения значений весовых коэффициентов и порогов срабатывания формальных нейронов, которые формируются в процессе обучения нейронной сети;

- DQ (Data Queue) – магазинная память, размещаемая на входе пула команд
- для буферизации входных пакетов данных;
- RQ (Results Queue) – магазинная память, размещаемая на выходе пула – для буферизации пакетов данных с результатами обработки.

Если в базовом блоке размещены командные пакеты, которые входят в состав одной или нескольких нейросетевых пакетных программ, то пул команд не будет выполнять преобразований информации пока во входную магазинную память не поступит хотя бы один пакет данных с входной шины данных INBUS в формате

Adr. Neural Network	Adr. Layer	N	XI	...	XN
---------------------	------------	---	----	-----	----

Занесение пакета данных в DQ приводит к активации цепей адресной селекции DC. Если поля адреса Adr. Neural Network, Adr. Layer не соответствуют размещенным в базовом блоке командным пакетам, то образуется внутренний сигнал извлечения ПД из входной очереди. В противном случае запускается цикл обработки пакетов данных во всех PN данного базового блока. Сигнал адресной селекции вызывает обнуление аккумуляторов AC, извлечение из модулей WM значений порогов срабатывания (смещений) W_{i0} , где i – номер PN, и их фиксацию в AC. Далее поле N пакета данных, которое задает размерность входного вектора X , загружается в счетчик Cnt, задающий номер входа нейронов слоя нейронной сети. Выходная шина счетчика Cnt управляет мультиплексором MS, который осуществляет последовательную коммутацию полей $X_1 \dots X_N$ магазинной памяти на шину Data. Процесс реализации функции формального нейрона происходит путем повторения цикла накопления результата. В соответствии со значением кода адреса, задаваемого на шине Adr полями Adr. Neural Network, Adr. Layer и N, производится выборка значения очередного весового коэффициента W_{ij} , где j – номер входа формального нейрона, умножение W_{ij} на значение поля X_j в умножителях Mul и добавление значе-

ний произведения $X_j W_{ij}$ в накапливающие сумматоры, образованные из комбинационных сумматоров Sum и аккумуляторов AC. После добавления значений произведения $X_j W_{ij}$ в аккумуляторы AC производится операция декремента счетчика Cnt и повторение цикла накопления результата до тех пор, пока счетчик Cnt не обнулится. Обнуление Cnt разрешает работу модуля памяти связей LM и табличных преобразователей Tab, реализующих функцию активации формального нейрона. В результате модуль выходнойомагазиннойопамятиоRQ фиксирует пакет данных в вышеприведенном формате, который поступает на выходную шину данных OUTBUS.

Процесс обработки информации в базовом блоке нейросетевой вычислительной среды производится параллельно во всех PN и совмещен во времени с фиксацией во входной очереди DQ вновь поступающих пакетов данных. Хотя сам процесс обработки информации заключается в циклическом выполнении вышеописанной последовательности операций и завершается по сигналу счетчика Cnt. Следует отметить, что в базовом блоке отсутствует модуль памяти и логической схемы готовности данных, которые необходимы для отслеживания поступления необходимого количества операндов на входы формального нейрона. Эта функция аппаратно реализуется счетчиком Cnt.

Рассмотренное техническое решение рационально с учетом аппаратных затрат в пересчете на ФН нейронной сети, каждый из которых содержит по одному умножителю, сумматору и аккумулятору; обладает функциональной гибкостью за счет возможности наращивания по «горизонтали» отдельными базовыми блоками, и по «вертикали» – изменяя размерность входного вектора X; характеризуется последовательной обработкой элементов входного вектора X.

Дальнейшее снижение аппаратных затрат в нейросетевой вычислительной среде с уровнем детализации КП-слой ФН может быть достигнуто за счет упрощения узла синаптического взвешивания входных значений формальных нейронов, представленных логарифмической моделью (рисунок 5.10).

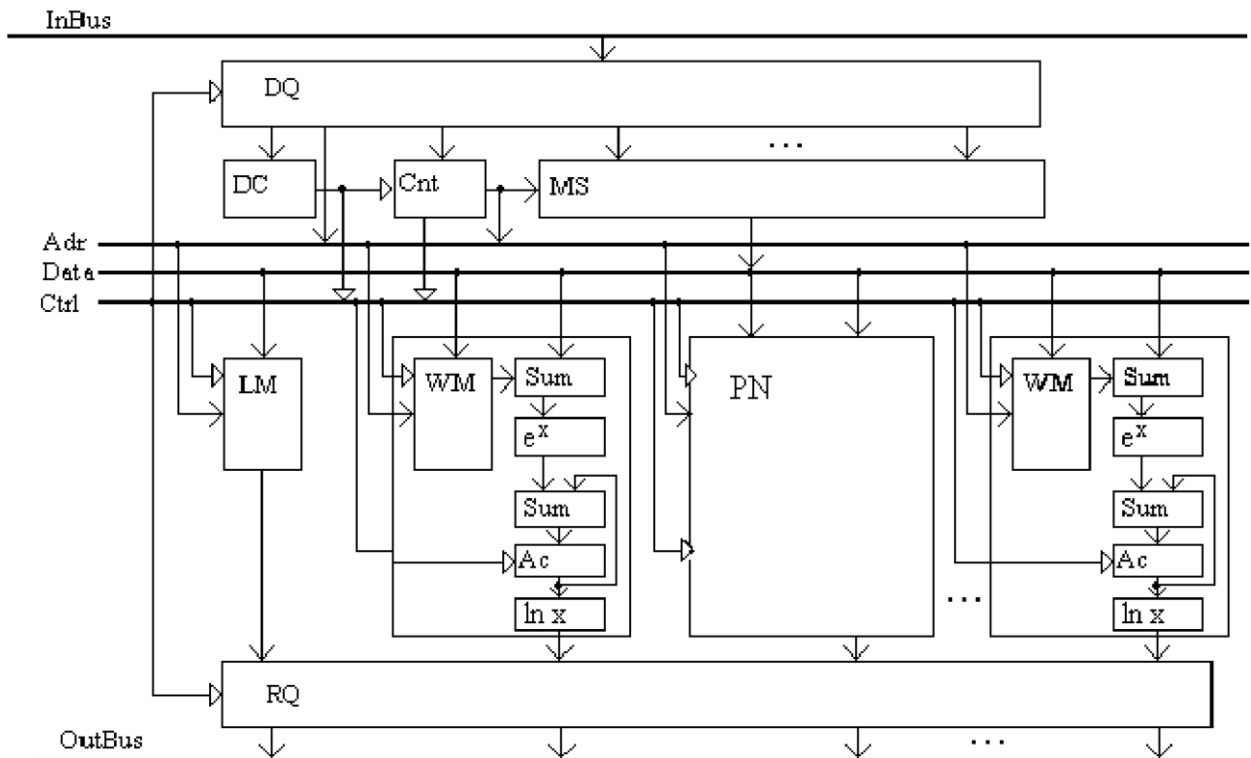


Рисунок 5.10 - Нейросетевая среда с логарифмическим взвешиванием входов

Для взвешивания входных сигналов вместо операции умножения самих значений используется операция сложения логарифмов значений, что равносильно замене блока умножения менее ресурсоемкими сумматором и табличным функциональным преобразователем. Согласно логарифмической модели формального нейрона при выполнении операции синаптического взвешивания задействованы два нелинейных преобразователя. Первый из них $\varphi(x) = a \ln bx, a < 1, b > 1, x > 0$ (на рисунке 5.10 соответствующий блок обозначен $\ln x$) размещен на выходе нейропроцессорного блока PN (выход аккумулятора AC) и выполняет в нейронной сети функцию масштабирования выходных значений формальных нейронов.

Второй преобразователь реализует функцию $\psi^{-1}(x) = pe^{mx}, p < 1, m > 1$, (на рисунке 5.10 соответствующий блок обозначен e^x), с помощью которой в модели решаются две задачи: потенцирование значений логарифма взвешенных значений перед их суммированием в теле формального нейрона и дополнитель-

ное нелинейное преобразование, $\eta(x) = kx^{ma}$, $k = pb^{ma}$, $ma < 1$, которое в рассматриваемой модели формальных нейронов играет роль функции активации. Т.е. функция $\eta(x)$, неявно реализуемая в синапсах при суперпозиции функций $\psi^{-1}(\varphi(x))$ за счет соответствующего подбора коэффициентов, переносит основное нелинейное преобразование с выхода на входы формального нейрона.

При переходе к схеме: параллельно по входам формального нейрона – параллельно по ФН слоям – последовательно по слоям НС следует увеличение аппаратных затрат, так как процессы взвешивания элементов входного вектора X потребуют увеличению числа вышеперечисленных функциональных блоков пропорционально числу входов формального нейрона.

В данном случае базовый блок нейросетевой вычислительной среды будет иметь вид двумерной систолической матрицы PN, «горизонтальное» измерение которой будет соответствовать числу формальных нейронов слоя нейронной сети, а «вертикальное» – количеству входов формального нейрона.

При выборе архитектуры базового блока нейросетевой реализации ИСАУ БЦВК, соответствующей схеме: параллельно по входам ФН - параллельно по ФН слоям – параллельно по слоям нейронной сети следует полагаться на последовательную передачу с фиксацией промежуточных результатов вычислений в процессе конвейеризации работы нейронной сети.

Следовательно, объединение функций хранения и обработки информации в многофункциональных пулах упрощает структуру нейросетевой реализации ИСАУ БЦВК за счет исключения части коммуникационных цепей, которые предназначены для передачи готовых к обработке командных пакетов от локальных пулов команд к процессорным узлам, и снижает загрузку интерфейса между базовыми блоками. Реализация нейросетевой вычислительной среды из базовых блоков, которые поддерживают распределенный характер вычислений, и размещение нейросетевой вычислительной среды в пределах функционально завершенного блока дает возможность снять проблему большой разрядности внешних параллельных шин для передачи, коммутации многоразрядны-

х данных, которые возникают при увеличении числа локальных пулов команд, организуемых в регулярных структурах многоблочной памяти с произвольной выборкой.

Уменьшение потоков данных между базовыми блоками нейросетевой реализации ИСАУ БЦВК позволяет использовать простейшие виды интерфейсов для передачи пакетов данных и существенно сократить негативное воздействие мощных ЭМИ на каналы передачи данных и управления БЦВК. Последовательный характер реализации функции адаптивного сумматора позволяет совместить операции загрузки пакетов данных в пулы команд с реализацией функций формального нейрона - накопления суммы взвешенных входных сигналов формального нейрона в командных ячейках пула, упрощает формат командного пакета и заменяет большое число операндных полей командного пакета (по числу входов формального нейрона) одним полем накопления суммы взвешенных входных сигналов формального нейрона.

По мере повышения функциональной мощности командных пакетов следует заметить снижение объема передачи пакетов данных и функциональная специализация базовых блоков нейросетевой вычислительной среды. И наоборот, снижение функциональной мощности командных пакетов приводит к универсальности используемых базовых блоков, интенсификации трафика передачи сообщений, что предъявляет повышенные требования к скоростным возможностям коммуникационных цепей БЦВК.

Наличие современной технологической базы – необходимое условие для создания функционально мощных базовых блоков – делает целесообразным использование командных пакетов, соответствующих уровню детализации КП-слой ФН, КП-НС. Для реализации нейросетевой вычислительной среды на базе СБИС с программируемой структурой следует ограничиться уровнем сложности КП-ФН или КП-слой ФН, а минимизацию информационного потока обеспечивать путем размещения нейронной сети (пакетной программы) в пределах БЦВМ с целью замыкания передачи промежуточных результатов между слоями или формальными нейронами НС в рамках отдельных СБИС.

5.4 Аппаратно-программные средства интеллектуальной системы обеспечения устойчивости БЦВК к деструктивному воздействию ЭМИ

Биосистемная аналогия в разработке информационно-телекоммуникационных систем основывается на специфике внутриклеточных механизмов и, прежде всего, информационных свойствах ДНК. Высокая устойчивость органической жизни к различного рода деструктивным воздействиям обеспечивается формационной избыточностью и комплементарностью представления данных, равномерностью распределения масс и уравновешенностью системы водородных связей вдоль молекулы ДНК. Информационная избыточность и комплементарность представления данных наиболее просто реализуются за счет парафазного представления информации в полях передаваемых сообщений (в первую очередь, коммуникационных полях пакетов данных).

Определенной моделью равномерного распределения масс по коду ДНК можно считать равное число 0 и 1 в коде, которое приходится на единицу длины сообщения, например в байте, слове, и так далее. Парафазное кодирование полей сообщения удовлетворяет указанной модели распределения масс, так как каждому символу x_i , i - порядковый номер символа в сообщении будет соответствовать пара символов $x_i, \overline{x_i}$, в которой суммарное количество 0 и 1 одинаково.

Небольшим приближением к системе уравновешенных водородных связей в молекуле ДНК можно считать равное число четных и нечетных групп двоичных символов, которые используются для представления значений в полях сообщений. В последнем случае можно использовать парафазное кодирование данных, которое обеспечивает равное число четных и нечетных групп в полях пакетов данных.

Для продолжения аналогии с молекулой ДНК, которая одновременно является и формой представления, и самой информацией, можно рассматривать сообщения, передаваемые по интерфейсу нейросетевой вычислительной среды в виде пакетов команд и данных, в том же двуединстве формы и содержания.

Каждый двоичный символ $x_i \in \{0,1\}$ подобного сообщения будет представляться в парафазном виде $\overline{x_i}, x_i$, где i - порядковый номер символа в сообщении, и кодироваться симметричными группами двоичных символов, например, $x_i = 01$ и $\overline{x_i} = 10$, или $x_i = 00$ и $\overline{x_i} = 11$. Подобное кодирование соответствует всем отмеченным особенностям устойчивого представления информации в молекуле ДНК, а именно: избыточностью и комплементарностью представления данных, равномерностью распределения масс и уравнированностью связей.

Двуединство формы и содержания сообщений выражается в том, что, с одной стороны, информация заключена в форму пакета данных, который однозначно определяет его принадлежность данной системе («свой» ПД) без введения дополнительных идентифицирующих полей, так как достаточно исследовать любой фрагмент кода пакета на комплементарность, равномерность распределения масс и уравнированность связей; с другой стороны, используемая система кодирования поместила в форму полей ПД конкретное информационное наполнение, защищенное теми же избыточностью, комплементарностью, равномерностью распределения масс и уравниванностью связей. В частности, изменение конкретного разряда в каждой отдельной группе $x_i, \overline{x_i}$ (или во всех группах одновременно) достаточно просто аппаратно выявляется и самокорректируется вследствие того, что нарушается, как равенство 0 и 1 в соответствующей группе, так и равенство четных и нечетных последовательностей в пределах группы.

Согласно рассматриваемому подходу ИСАУ БЦВК реализуется в виде единой иерархической адаптивной системы с внутренне присущими функциями обеспечения устойчивости. Проектирование конкретной ИСАУ БЦВК осуществляется программной настройкой командных пулов, в процессе которой формируется заданный спецификацией на проектирование и взаимосвязанный интерфейсом набор функциональных устройств; при эксплуатации БЦВК функции отдельных устройств могут изменяться путем адаптации; функции

обеспечения устойчивости элементов и узлов БЦВК к деструктивному воздействию ЭМИ распределены по командным пулам и реализуются на всех уровнях иерархии системы; обмен информацией между функциональными устройствами организуется через интерфейс в виде закодированных сообщений, а устойчивое функционирование комплекса осуществляется путем проверки передаваемых по интерфейсу сообщений по критерию «свой-чужой» с помощью аппаратно-программной реализации ИСАУ на основе адаптивных нейросетевых средств.

Адаптивные свойства ИСАУ БЦВК базируются на механизмах нейронных сетей, а обучающим фактором являются присутствующие в данных скрытые закономерности и информационная избыточность. Начальная настройка НС производится на наборе известных ЭМ воздействий, составляющих обучающую выборку входных векторов. Нейронная сеть производит классификацию известных ЭМ воздействий, формируя кластеры, соответствующие реальной кластеризации векторов в обучающей выборке через адаптивный подбор числа нейронов-прототипов. Процесс адаптации заключается в сравнении очередного вектора ЭМ воздействий с функциональными параметрами нейронов-прототипов, в результате чего входной вектор либо будет отнесен к одному из известных классов ЭМ воздействий (по критерию близости к функциональным параметрам одного из нейронов-прототипов), либо будет произведено расширение классификации за счет добавления нового нейрона-прототипа с параметрами предъявленного вектора.

Адаптивные нейросетевые средства могут быть распределены по базовым блокам ИСАУ БЦВК, либо локализованной в одном из базовых блоков ИСАУ. В последнем случае ИСАУ можно обучить, предъявляя в качестве векторов обучающей выборки выходные коды аппаратных схем контроля, проверяющих нарушение комплементарности представления данных, равномерности распределения масс и уравновешенности связей в различных сочетаниях и с различными объемами искажений. В рабочем режиме ИСАУ сформированная при обучении система кластеров либо отнесет поступивший со схем контроля вектор ошибок к уже известным нарушениям в передаваемых по интерфей-

су сообщениях (классифицирует вид и степень искажения сообщения и проведет коррекцию своих функциональных параметров), либо создаст новый кластер (нейрон-прототип с параметрами новой угрозы).

С точки зрения технической реализации (рисунок 5.11) структура командных пулов претерпевает минимальные изменения, связанные с необходимостью формирования входного вектора для адаптивных нейросетевых средств и выполнения операции параллельного сравнения поступившего входного вектора с функциональными параметрами нейронов-прототипов.

По сравнению с базовым блоком, изображенным на рисунке 5.10, модернизируются выходные цепи мультиплексора MS за счет размещения аппаратных схем контроля IV (Input Vector), призванной выделить распределенную по полям пакетов данных системную информацию о комплементарности, равномерности распределения масс и уравновешенности системы связей.

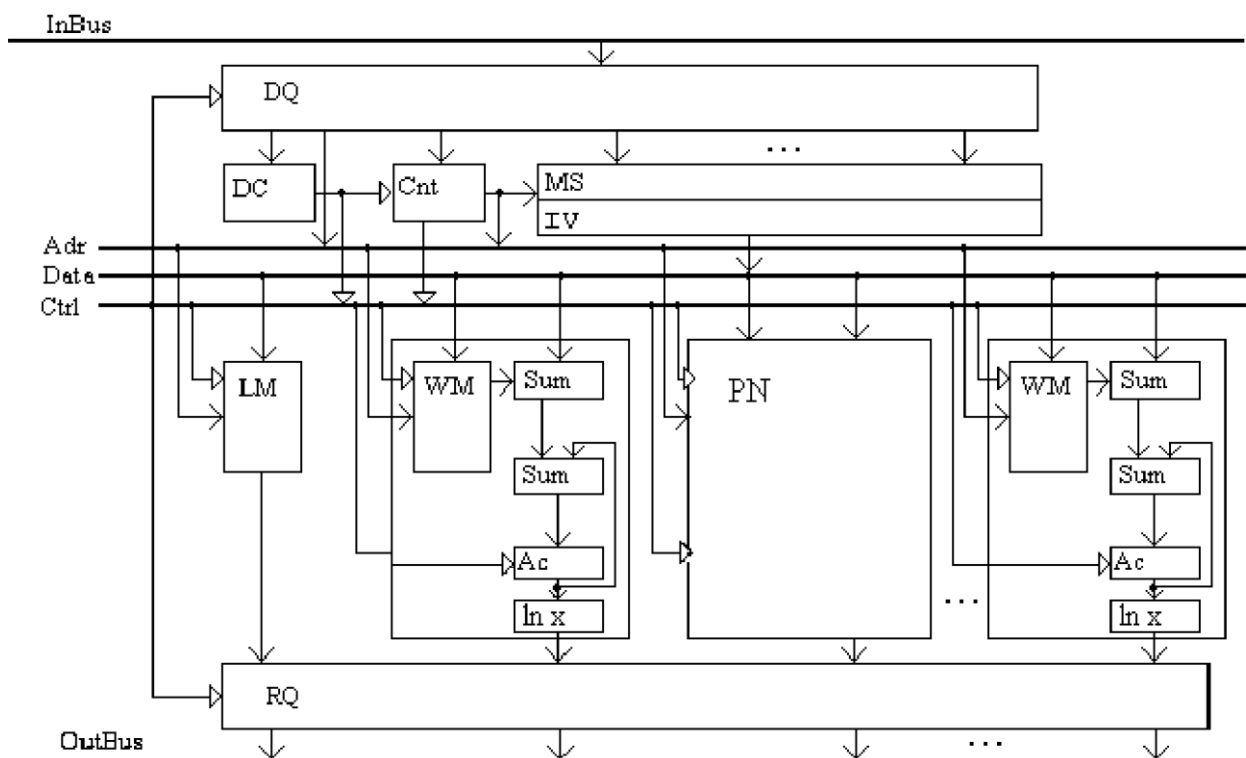


Рисунок 5.11 - Адаптивная система, размещенная в командном пуле

Кроме того, в структуре нейропроцессорного узла PN следует отключить функциональный преобразователь e^x , так как при выполнении операции

сравнения поступившего входного вектора с функциональными параметрами нейронов-прототипов (первый сумматор Sum) отпадает необходимость в умножении входного вектора на вектор весовых коэффициентов. В рассматриваемой структуре PN второй сумматор Sum совместно с аккумулятором Ac используется для накопления значений несовпадений входного вектора с функциональными параметрами каждого из нейронов-прототипов так, что после просмотра всех полей входного вектора на выходах PN сформируется вектор несовпадений, определяющий степень близости входного вектора к каждому из нейронов-прототипов.

5.5 Программная реализация режимов ИСАУ БЦВК при воздействии деструктивных СК ЭМИ

Для конкретики рассмотрим один из режимов ИСАУ БЦВК при воздействии деструктивных ЭМИ, заключающегося в реализации процедуры разделения трафика – разнесении передачи по нескольким физическим каналам отдельных частей передаваемых данных, обеспечивая максимальную сложность разрушения данных (глава 4, п. 4.5). Характерной особенностью данного режима является то, что он является полностью привязанным к свойствам среды передачи и топологии бортовой сети, полагаясь на наличие структурной избыточности, которая свойственна для исследуемых БЦВК, предназначенных для использования в составе подвижных автоматизированных вычислительных комплексах, состоящих из унифицированных вычислителей, объединенных высокопроизводительной оптической средой передачи информации в соответствии со стандартом IEEE Std 802.3, 1000Base-T и 1000Base-LX.

Предлагается следующая схема программного комплекса, содержащая четыре основных блока (рисунок 5.12) [133, 92, 153].

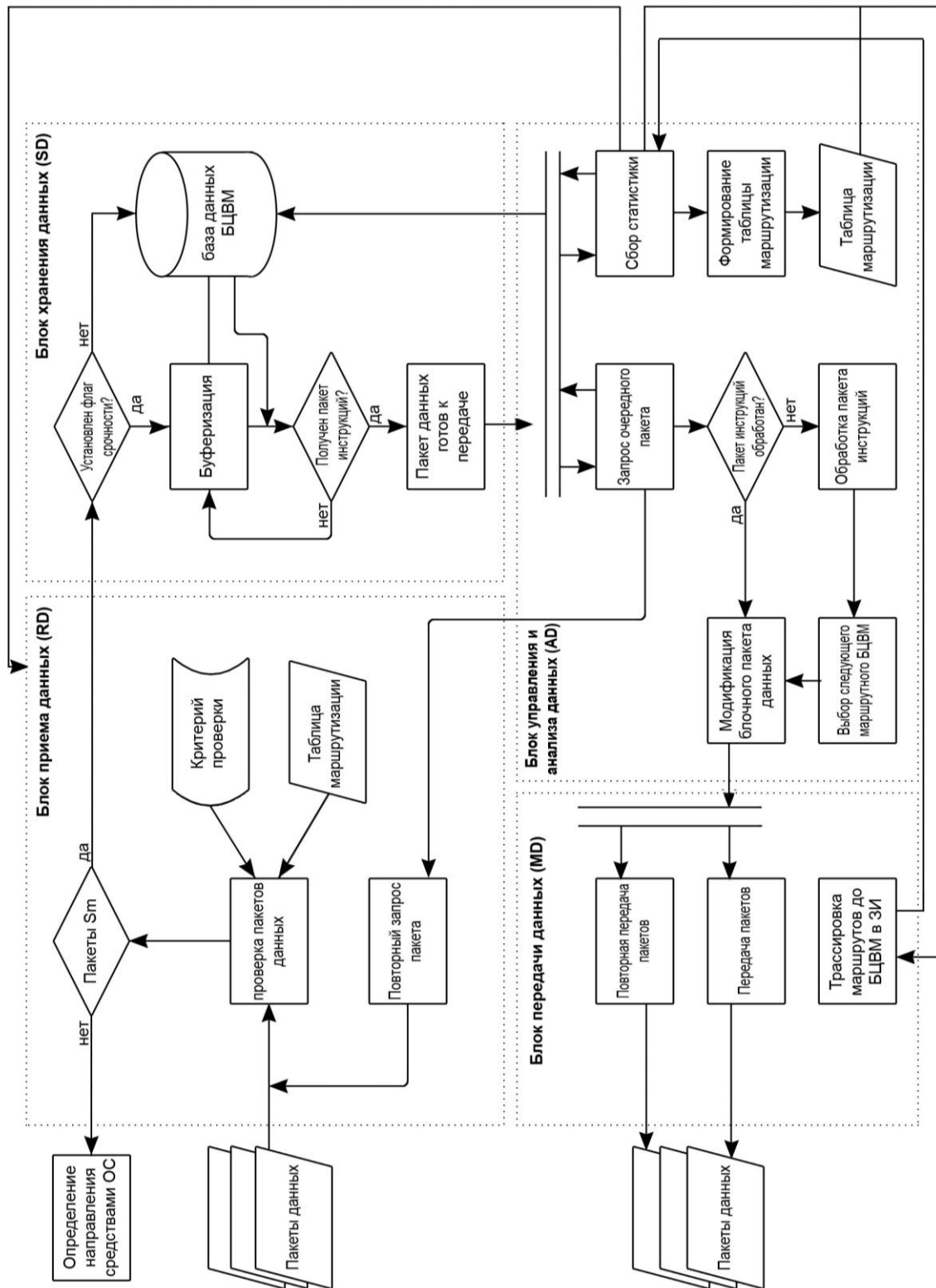


Рисунок 5.12 - Блок-схема программного комплекса

Каждый блок выполняет определенное функциональное назначение.

1. Блок *RD* – Блок приема данных, выделяет из потока пакетов пакеты с маркером *SM* и передает эти пакеты блоку *SD*.

2. Блок *SD* – База данных, содержит сведения о пакетах *SM*, обработанных БЦВМ, F_{Si} , $i \in [1, F]$. В случае необходимости буферизирует пакеты данных.

3. Блок *AD* – Блок управления и анализа данных, анализирует пакеты данных и инструкций, принятые от блока *SD*, добавляет информацию о текущей БЦВМ, F_{Si} , $i \in [1, F]$ в пакет инструкций. Передает блоку *MD* команды на передачу данных и трассировку БЦВМ, формирует таблицу маршрутизации $M_I \in F_{SI}$, $i \in [1, F]$. Получает от имитатора блока *SD* информацию о работоспособных БЦВМ в сети.

4. Блок *MD* – Блок передачи данных, отправляет очередной пакет на один из выбранных БЦВМ или в пункт назначения.

SM – приложение, позволяющее передавать данные специфичным маршрутом, оно состоит из управляемой части *SMC* и управляющей части *SMS*. В роли маршрутизаторов для *SM* выступает некоторое множество БЦВМ в защищенном исполнении.

Для моделирования *SMS* необходимо запустить два процесса сценария (с параметрами $-s$ и $-a$).

Режим « $-s$ » выполняет следующие функции:

- 1) ожидает соединения от передатчика на порт 1500;
- 2) принимает файл данных и файл инструкции;
- 3) сохраняет файл в директорию «send» для дальнейшей отправки, а также архивирует копию файла.

Режим « $-a$ » выполняет следующие функции:

- 1) через заданный интервал времени проверяет директорию «send»;
- 2) в случае появления в этой директории очередного файла, анализирует его файл инструкций;
- 3) после анализа файла инструкций, а также файла *hosts.hst*, выбирает следующий эмулятор передатчика;
- 4) инициирует соединение на порт 1500 с выбранным передатчиком и отправляет файл.

На основании блок-схемы сервиса маршрутизации предложено следующее модульное описание для SM (рисунок 5.13):

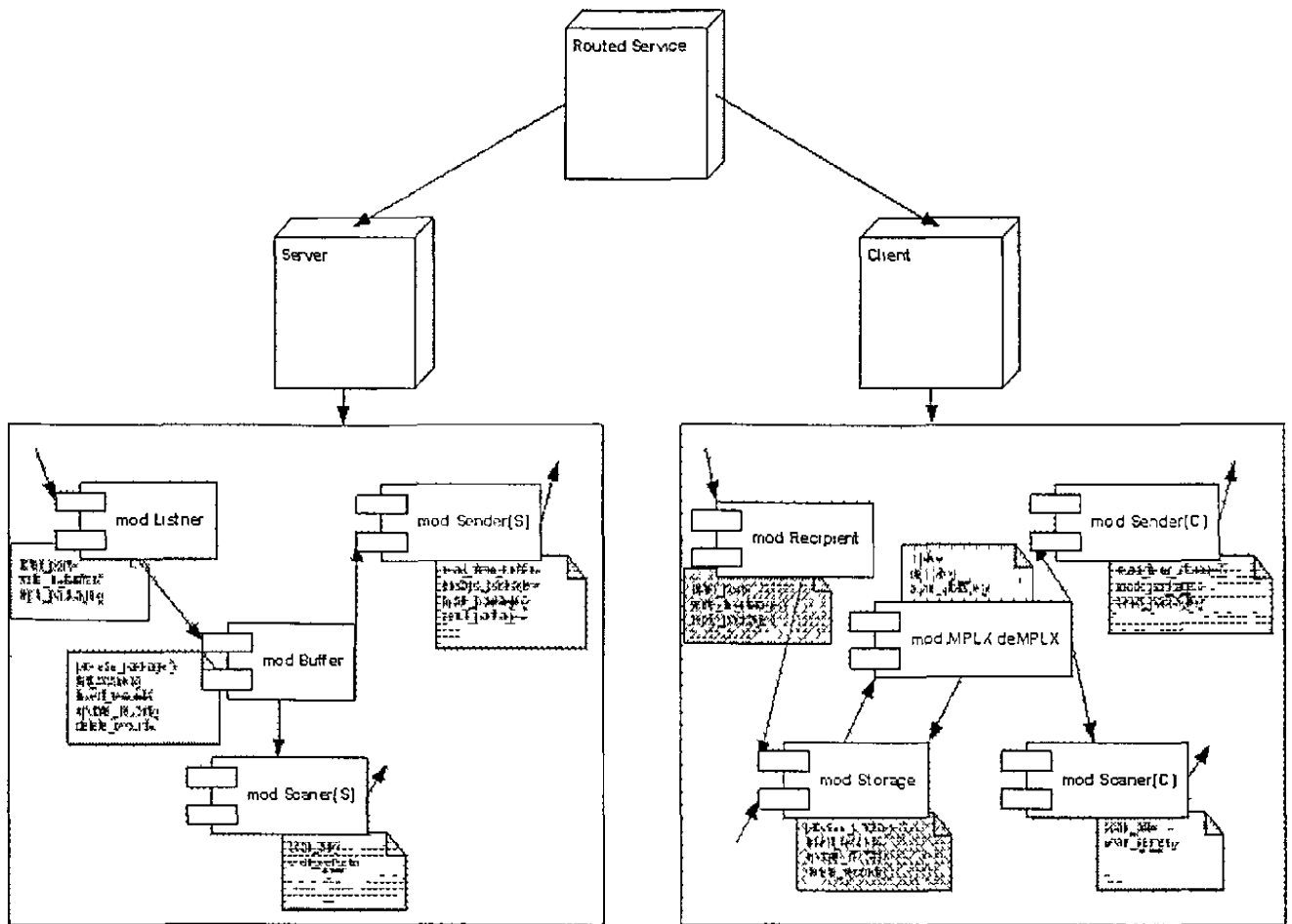


Рисунок 5.13 - Архитектура S_M

Приведем описание модулей SM:

1) Routed Service

Сервис маршрутизации (SM) – данный сервис передает выбранные данные по бортовой сети, используя алгоритм маршрутизации, отличный от действующих в сети. Использует термины:

- БЦВМ в защищенном исполнении бортовой сети (F_{SI}) – БЦВМ, на которых установлены SMS – управляемые узлы-модули, на которых установлено SMC, инициирующие процесс передачи данных с помощью SM, или осуществляющие прием таких данных и представляющие их получателю.

2) Server

Управляющая часть *S*, содержит модули сервиса, выполняющиеся на БЦВМ в защищенном исполнении.

- `mod.Listner`

Из потока пакетов выделяет пакеты с маркером *S*. Передает эти пакеты `mod.Buffer`.

- `mod.Sender(S)`

Отправляет очередной пакет из `mod.Buffer` со статусом «готов к отправке» на одну из БЦВМ, ориентируясь на таблицу маршрутизации *M* и собственный алгоритм *A*. К отправляемому пакету добавляется новый заголовок.

- `mod.Buffer`

Представляет собой некоторое хранилище для пакетов, ожидающих отправки. `mod.Buffer` является БД. В момент получения очередного пакета от `mod.Listner`, происходит разбор пакета и запись информации по таблицам БД (например, поля "отправитель", "адресат", "время жизни", "приоритет", "данные"). В момент обращения `mod.Sender(S)` к `mod.Buffer` за очередным пакетом для отправки – просто извлекается некоторая запись из БД.

- `mod.Scaner(S)`

Периодически опрашивает все БЦВМ и формирует таблицу маршрутизации *M*. Периодически получает от `mod.Buffer` информацию о новых работоспособных БЦВМ, появившихся в бортовой сети.

3) Client

Управляемая часть *S*, содержит модули сервиса, выполняющиеся на узлах БЦВК.

- `mod.Recipient`

Из потока пакетов, выделяет пакеты с маркером *S*. Передает эти пакеты `mod.MPLX-deMPLX`.

- `mod.Sender(C)`

Отправляет очередной пакет, поступивший от `mod.MPLX-deMPLX`, на одну из БЦВМ в защищенном исполнении, ориентируясь на таблицу маршрутизации *M* и собственный алгоритм *A*.

- `mod.MPLX-deMPLX`

Мультиплексирует отправляемые данные (если это требуется, если установлен флаг "разделения данных"), демупльтиплексирует полученные данные, хранящиеся в `mod. Storage` (если это требуется).

- `mod. Storage`

Хранит данные на отправку и данные, полученные от других узлов.

- `mod.Scaner(C)`

Периодически опрашивает все БЦВМ, и формирует таблицу маршрутизации *M*.

Для решения второй задачи использовались библиотеки `winpcap` и `packet`. Библиотека `winpcap` предоставляет языкам программирования, таким как C++, vbscript, java, .net, возможности мониторинга трафика, анализа протоколов, формирования сетевых пакетов и др. `Packetx` – это ActiveX – компонент, позволяющий интегрировать в программу функции работы с библиотекой `winpcap` [133, 92, 153]. С помощью данных библиотек были реализованы `mod.Listner` и `mod.Sender(S)`. Функции `mod.Sender(S)`:

- 1) выбирает следующий передатчик для отправки из файла `rservice.hst`;
- 2) формирует сетевой пакет, определяемый параметрами из файла `rservice.ip` (по умолчанию - протокол UDP, порт 7 echo);
- 3) маркирует данный пакет как принадлежащий «сервису маршрутизации», изменяя некоторые биты заголовка (поле опции);
- 4) передает сформированный пакет указанному интерфейсу.

Процесс маркирования пакета заключается в установлении уникальной последовательности битов в поле опций заголовка пакета (рисунок 5.14).

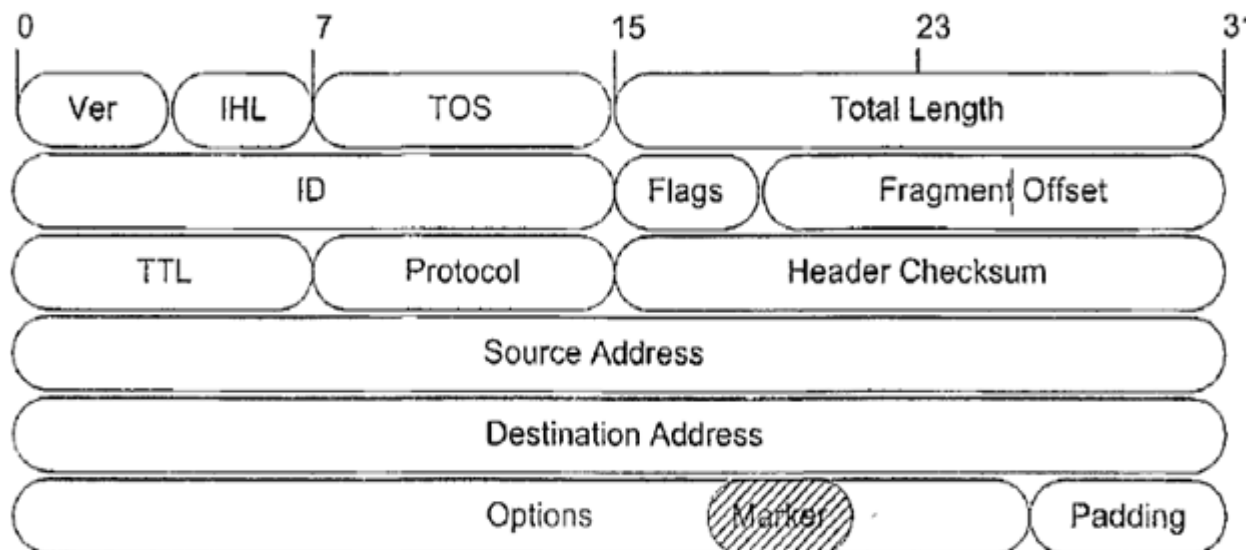


Рисунок 5.14 - Маркированный пакет

Функции mod.Listner:

- 1) анализирует выбранный сетевой интерфейс;
- 2) подсчитывает общее кол-во пришедших пакетов, а также пакетов «сервиса»;
- 3) выводит статистику в excel-файл.

5.6 Выводы по главе

1. Для реализации ИСАУ БЦВК разработаны архитектурные решения командных пулов, адаптивная модель ИСАУ БЦВК, инструментальные средства и методика их применения для оптимизации процессов ИСАУ БЦВК по критерию «стоимость/защищенность». Нейросетевая реализация ИСАУ базируется на принципах подобия архитектуры и механизмов защиты биологических систем.

2. Адаптивность ИСАУ обеспечивается использованием элементной базы, способной к обучению, и, прежде всего, нейронных сетей. Нейросетевые системы согласно принципу биосистемной аналогии следует представлять в виде описания структурированных информационных полей иммунного и рецепторного уровней. Показано, что в качестве языковых программных средств описания нейросетевых систем целесообразно использовать язык пакетных нейросетевых про-

грамм. В этом случае НС представляется в виде совокупности взаимосвязанных командных пакетов - ПНП, которая помещается в командных пулах. При описании НС пакетными нейросетевыми программами возможна различная степень детализации: командный пакет может соответствовать одной из функций нейросетевого логического базиса, функции формального нейрона, слоя из формальных нейронов или нейронной сети в целом.

3. Командные пулы организуется в виде многофункциональной регулярной вычислительной структуры (МРВС), в которой размещены пакетные нейросетевые программы. В качестве средства формализации выбран язык графического описания объектов, а в качестве механизма управления вычислениями - способ управления потоком данных. Логика работы памяти обеспечивает устойчивость хранимой информации: 1) операция записи данных производится не по конкретному адресу памяти, а по содержанию; 2) отсутствует операция считывания данных из ЗУ и, следовательно, непосредственный доступ к хранимой информации. Готовые к обработке данные, представленные в виде пакетов, извлекаются из памяти автоматически - без управления извне.

4. Установлено, что объединение функций хранения и обработки информации в многофункциональных пулах упрощает их структуру за счет исключения части коммуникационных цепей, предназначенной для передачи готовых к обработке командных пакетов от локальных пулов команд к процессорным узлам, и снижает загрузку интерфейса. Минимизация потоков данных между командными пулами позволяет использовать простейшие виды интерфейсов для передачи пакетов данных. По мере повышения функциональной мощности командных пакетов наблюдается снижение объема передачи пакетов и функциональная специализация командных пулов. И, наоборот, снижение функциональной мощности командных пакетов приводит к универсальности командных пулов, интенсификации трафика передачи сообщений, что предъявляет повышенные требования к скоростным возможностям интерфейса.

5. Показано, что наличие современной технологической базы делает целесообразным использование командных пакетов, соответствующих уровню дета-

лизации КП-слой ФН, КП-НС. Для реализации командных пулов на базе СБИС с программируемой структурой следует ограничиться уровнем сложности КП-ФН или КП-слой ФН, а минимизацию информационного обмена обеспечивать путем размещения пакетной нейросетевой программы в пределах базового блока (ряда базовых блоков) для замыкания информационных потоков между слоями или формальными нейронами НС в рамках отдельных СБИС.

6. Для реализации в командных пулах адаптивных свойств используются механизмы нейронных и нейронечетких сетей, причем адаптивные нейросетевые средства могут быть распределенными по базовым блокам, либо локализованными в отдельном базовом блоке ИСАУ БЦВК.

7. Предложена программная реализация режимов работы ИСАУ БЦВК, создан прототип системы «сервис маршрутизации», а также реализованы модули `mod.Listner` и `mod.Sender(S)` приложения «сервис маршрутизации». Повышение стойкости информации в бортовых сетях при использовании «сервиса маршрутизации» достигается за счет повышения защиты ее целостности и доступности. Целостность передаваемой информации обеспечивается уменьшением вероятности реализации ЭМВ на контролируемых участках следования трафика в случае применения маршрутизируемого сервиса. Доступность обосновывается стойкостью системы к блокированию одной или нескольких БЦВМ, выполненных в защищенном исполнении. В случае сбоя в работе одной или нескольких БЦВМ в защищенном исполнении сервис моментально перестраивает маршрут следования трафика до того времени, пока работоспособность БЦВМ не восстановится. Следует также еще одно важное качество разработанного приложения - каждая из БЦВМ в защищенном исполнении может динамически вносить изменения в маршрут следования трафика.

ГЛАВА 6 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВОЗДЕЙСТВИЯ ПРЕДНАМЕРЕННЫХ СВЕРХКОРОТКИХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ НА ЭЛЕМЕНТЫ И УЗЛЫ БЦВК

6.1 Научно-методическое обеспечение проведения экспериментальных исследований на воздействие преднамеренных сверхкоротких электромагнитных излучений на элементы и узлы БЦВК

6.1.1 Выбор и обоснование объектов и условий для проведения экспериментальных исследований на воздействие СК ЭМИ

Объектом исследования являются бортовые цифровые вычислительные комплексы, включая БЦВМ и каналы передачи данных и управления, которые занимают особое место в системах управления и контроля всего используемого оборудования на борту. Сегодня они все в большей степени оснащаются электронными элементами, чувствительными к электромагнитным воздействиям. Именно поэтому они на уровне доступа являются наиболее вероятным объектом атаки с применением средств преднамеренных электромагнитных воздействий.

До настоящего времени устойчивость БЦВК к воздействию СК ЭМИ в открытых источниках практически не обсуждалась. Имеются отдельные публикации результатов по испытаниям и оценке результатов, выбору состава и количественных значений показателей стойкости БЦВК в условиях воздействия СКИ ЭМП [91]. При этом существующие результаты исследований, как правило, носят ограниченный, частный характер в части их использования и не позволяют на системной основе проводить анализ и оценку устойчивости БЦВК к воздействию ЭМП. Кроме того, до настоящего времени нет четкого понимания, когда применять термин «стойкость» и когда «устойчивость». Поэтому в работе предлагается применение термина «стойкость» только для тех БЦВК, для которых недопустимы отказы, приводящие к невыполнению заданных уровней безотказности и безопасности. А для БЦВК временное

ухудшение качества функционирования, которых допустимо, предложить вместо термина «стойкость» использовать термин «устойчивость».

Основываясь на данных, приведенных в главе 3, можно сделать вывод, что при анализе механизмов воздействия СК ЭМИ на процесс передачи данных в бортовых сетях целесообразно также рассматривать спецификации Ethernet, в которых в качестве физической среды передачи используется неэкранированная витая пара как потенциальный объект воздействия. При этом, наиболее распространенными технологиями на уровне доступа на сегодняшний день являются Fast Ethernet и Gigabit Ethernet и их соответствующие кабельные спецификации 100Base-TX, 1000Base-T. В качестве среды передачи повсеместно используется неэкранированная витая пара категорий 5е и 6. Поэтому в работе проводятся исследования механизмов искажения данных в сетях Ethernet, проходящие по кабельным линиям связи вследствие формирования периодически повторяющихся импульсных помех при воздействии СК ЭМИ [60].

С учетом этого, экспериментальным исследованиям на воздействие мощных СК ЭМП подвергалась серия бортовых цифровых вычислительных комплексов - БЦВК (разработчик – ОАО «НИИ «Аргон»).

Изделия предназначены для использования в составе подвижных автоматизированных вычислительных комплексах, состоящих из унифицированных вычислителей, объединенных высокопроизводительной оптической средой передачи информации в соответствии со стандартом IEEE Std 802.3 1000Base-LX.

Исследования проводились в следующем объеме:

- определение параметров воздействующих СК ЭМП;
- воздействие на УОВ сверхкороткими электромагнитными импульсами;
- определение работоспособности УОВ до воздействия, при воздействии и после воздействия СК ЭМП.

Объем испытаний определялся составом изделий и их программного обеспечения, приведенных ниже:

- проверка выполнения требований к информационной памяти;
- проверка выполнения требований к модулю адаптера контроля и управления;

- проверка выполнения требований к модулю коммутатора;
- проверка выполнения требований к модулю оптических конверторов;
- проверка выполнения требований к модулю унифицированных системных интерфейсов;
- проверка выполнения требований к адаптеру бортовой сети;
- проверка выполнения требований к модулю адаптера МКИО;
- проверка требований по трехминутной готовности;
- проверка выполнения требований к электропитанию вычислительных средств.

Испытания проводились в испытательном зале ФГУП «ВНИИОФИ» в нормальных климатических условиях:

- | | |
|-----------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|
| - температура окружающего воздуха | $(25 \pm 10)^\circ \text{C}$; |
| - относительная влажность воздуха | не более 90 %; |
| - атмосферное давление | $(84,0 \div 106,6) \text{ кПа}$
$(630 \div 800 \text{ мм. рт.ст.})$; |
| - напряжение питания сети | $(220 \pm 22) \text{ В}$; |
| - частота сети | $(50 \pm 1) \text{ Гц}$. |

6.1.2 Выбор и обоснование экспериментальной базы для проведения экспериментальных исследований на воздействие СКИ ЭМП

Экспериментальные оценки соответствия БЦВК требованиям по устойчивости к воздействию полей, токов и напряжений СКИ ЭМИ проводились с использованием аттестованных моделирующих установок и специальных устройств.

Для экспериментальных исследований воздействия СКИ ЭМП выбранных изделий использовались следующие средства воспроизведения и измерения параметров СКИ ЭМП, разработанные в ФГУП «ВНИИОФИ»:

- излучатель СКИ ЭМП в составе: бездисперсионной 4-х ТЕМ рупорной фазированной антенной системы; фидера – разветвителя для согласования генератора и антенной системы (АФС) (рисунок 6.1);

- измеритель параметров воздействия СКИ ЭМП на основе полоскового измерительного преобразователя (ИППЛ-Л) (рисунок 6.2).



Рисунок 6.1 - Излучатель СКИ ЭМП в составе: генератор и антенно-фидерная система (АФС)



Рисунок 6.2 - Измерительный преобразователь ИППЛ-Л

Для экспериментальных исследований воздействия СКИ ЭМП выбранного УОВ использовались также средства воспроизведения и измерения параметров СКИ ЭМП рассмотренные ниже:

- осциллограф цифровой запоминающий Tektronix DPO71604;
- безэховая камера из состава государственного специального эталона ГЭТ 148-93 единиц максимальных значений напряженностей импульсных электрического и магнитного полей (ГСЭ);
- экранированная кабина из состава ГЭТ 148-93;
- генераторный комплекс с антенной ГИН120 предназначен для формирования импульсов электрического поля с высокой амплитудой и регулируемой частотой повторения. Параметры его приведены в таблице 6.1.

Для исследований допускается применять другие средства измерений, аналогичные указанным, обеспечивающие измерения соответствующих параметров с требуемой точностью.

Т а б л и ц а 6.1 – Параметры генераторного комплекса

Амплитуда напряжения выходных импульсов высоковольтного блока	120 кВ
Импеданс нагрузки	50 Ом
Фронт нарастания импульсов	0,1 нс
Длительность импульсов по уровню 0,5	0,5 нс
Частота следования импульсов, регулируемая	0,05 ÷ 1 кГц
Запуск	внутренний/ внешний
Параметры внешнего запуска полярность амплитуда длительность Питание	положительная 5 ÷ 10 В / 50 Ом 0,1 ÷ 0,3 мкс Сеть 220 В 50 Гц

При проведении испытаний объектов использовались также:

- полеобразующая система ПС-1 из состава государственного специального эталона (ГСЭ) ГЭТ 148-93 единиц максимальных значений напряженностей импульсных электрического и магнитного полей;
- полеобразующая система ПС-2 из состава ГСЭ.

6.1.3. Программа и методики проведения экспериментальных исследований устойчивости БЦВК к воздействию мощных СКИ ЭМП.

А) Программа проведения экспериментальных исследований устойчивости БЦВК к воздействию мощных СКИ ЭМП [101].

СКИ ЭМП являются одним из видов преднамеренных силовых электромагнитных воздействий, под которыми понимаются создаваемые с использованием излучателей электромагнитного поля воздействия, вызывающие нарушение работоспособного состояния электронных устройств. Эти воздействия могут осуществляться открыто или скрытно («закамуфлированным» под действие электромагнитных помех), дистанционным (по эфиру) или контактным (по сети) способами с целью вызвать отказ электронных систем.

Программа экспериментальных исследований разработана с целью нормативного обеспечения исследовательских испытаний элементов и узлов

БЦВК, в том числе БЦВМ, на устойчивость к воздействию сверхкоротких импульсов электромагнитного поля.

В настоящей программе экспериментальных исследований регламентированы общие требования к устройствам БЦВК по стойкости к СКИ ЭМП, установлены параметры испытательных воздействий, виды испытаний и степени жёсткости воздействий, методы и средства испытаний, определены порядок проведения испытаний и критерии оценки стойкости изделий в соответствии с требованиями нормативных документов.

Оцениваемые характеристики и расчетные соотношения

Цель исследований, условия, режимы, порядок, место проведения испытаний, виды и этапы испытаний:

- определение работоспособности бортового комплекса до и при воздействии сверхкоротких электромагнитных импульсов;
- определение параметров воздействующих СКИ ЭМП, приводящих к нарушениям в работе объектов исследований.

Образец изделия, предоставляемый на испытания, прошел проверку в объеме входного контроля.

Перечень этапов исследований, количественные и качественные характеристики и последовательность их проведения приведены в таблице 6.2.

Т а б л и ц а 6.2 - Этапы исследований

№ этапа	Наименование исследования	Исследуемые характеристики
1	Определение параметров воздействующих СКИ ЭМП	Амплитуда импульсов напряженности электрического поля, длительность фронта импульсов между уровнями 0,1- 0,9 от амплитуды, длительность импульсов поля на уровне 0,5 от амплитуды, частота следования импульсов.
2	Исследование воздействия СКИ ЭМП на БЦВМ	Диагностика функционирования БЦВМ. Определение параметров воздействующих СКИ ЭМП, приводящих к нарушениям работы БЦВМ.
3	Определение основных характеристик БЦВК при и после воздействия СКИ ЭМП	Функциональные сбои и нарушения в работе.

Б) Методики экспериментальных исследований к воздействию СК ЭМИ

Испытания проводились путем воздействия на составные части БЦВК полей, токов и напряжений с уровнями, соответствующими нормами испытаний, с контролем и регистрацией параметров, определяющих стойкость аппаратуры и фиксируемых в программе-методике испытаний.

Норма на амплитуду напряженности испытательного поля (тока, напряжения) определялась по формуле

$$E_{ни}, H_{ни}(I_{ни}) = (1 - \delta)^{-1} E_{тр}, H_{тр}(I_{тр}), \quad (6.1)$$

где $E_{тр}, H_{тр}(I_{тр})$ - значения амплитуды напряженности электрического, магнитного полей (тока, напряжения), указанные в нормативной документации на элементы и узлы БЦВК;

δ - относительная погрешность измерения параметров воздействующих электрического, магнитного полей (тока, напряжения).

Величина δ не должна превышать следующих значений суммарной погрешности воспроизведения амплитуды электромагнитных факторов:

- для электромагнитных полей – не более $\pm 20\%$;
- для тока и напряжения – не более $\pm 30\%$.

Перед испытаниями проводились измерения и регистрация параметров аппаратуры в рабочих режимах, оговоренных в программе - методике, которые принимались за исходные и с ними сравнивали данные последующих измерений. При этом выбирался такой режим, при котором аппаратура наиболее чувствительна к воздействующим электромагнитным факторам. После размещения испытываемого образца в рабочем объеме испытательного стенда, его соединяли кабельными линиями с регистрирующей аппаратурой, размещенной вне зоны воздействия или защищенной от него.

Измерительные средства, используемые при проведении испытаний, обеспечивали измерение и регистрацию параметров, оговоренных в программе и методике, с погрешностью, установленной в программе-методике. Порядок испытаний и нормируемые параметры воздействий поражающих

факторов СКИ ЭМИ регламентировались нормативными и методическими документами.

Очередность воздействий, виды и значения параметров СКИ ЭМИ по степеням жесткости установлены ГОСТ.

При проведении испытаний изделия уровень воздействий плавно или ступенчато увеличивают до требуемых значений, соответствующих степеням жесткости. Контроль работоспособности изделия осуществлялся до воздействия, при воздействии и после воздействия на изделие СКИ ЭМИ.

Определение параметров воздействующих СКИ ЭМИ.

Определение амплитуды СКИ ЭМИ

При проведении экспериментальных исследований к входу излучателя СКИ ЭМИ через соединительный высоковольтный кабель подсоединяется генератор высоковольтных импульсов ГИН-20-1 [109].

Определение амплитуды воздействующих СКИ ЭМИ проводится в дальней зоне излучателя на расстоянии $Y=4$ м в соответствии с рисунком 6.3 [109].

Для этого измеритель параметров воздействия СКИ ЭМИ – ИППЛ-Л через линию связи подсоединяется к входу стробоскопического осциллографа DPO 71604. Проводится регистрация импульсов на экране осциллографа. При помощи маркеров осциллографа определяется амплитуда $U_{\text{иппл-л}}$ импульсов на выходе ИППЛ-Л. Амплитуда импульсов напряженности электрического поля $E_{\text{изл}}$ определяется по формуле

$$E_{\text{изл.СШП ЭМИ}} = U_{\text{иппл-л}} / K_{\text{пр}}, \quad (6.2)$$

где $K_{\text{пр}}$ – коэффициент преобразования ИППЛ-Л.

Определение амплитуды воздействующих СКИ ЭМП при использовании возбуждающего генератора импульсов ГИВЧ-0,5/10 и воспроизводимых излучателем длинноволновых СКИ ЭМП проводится аналогично.

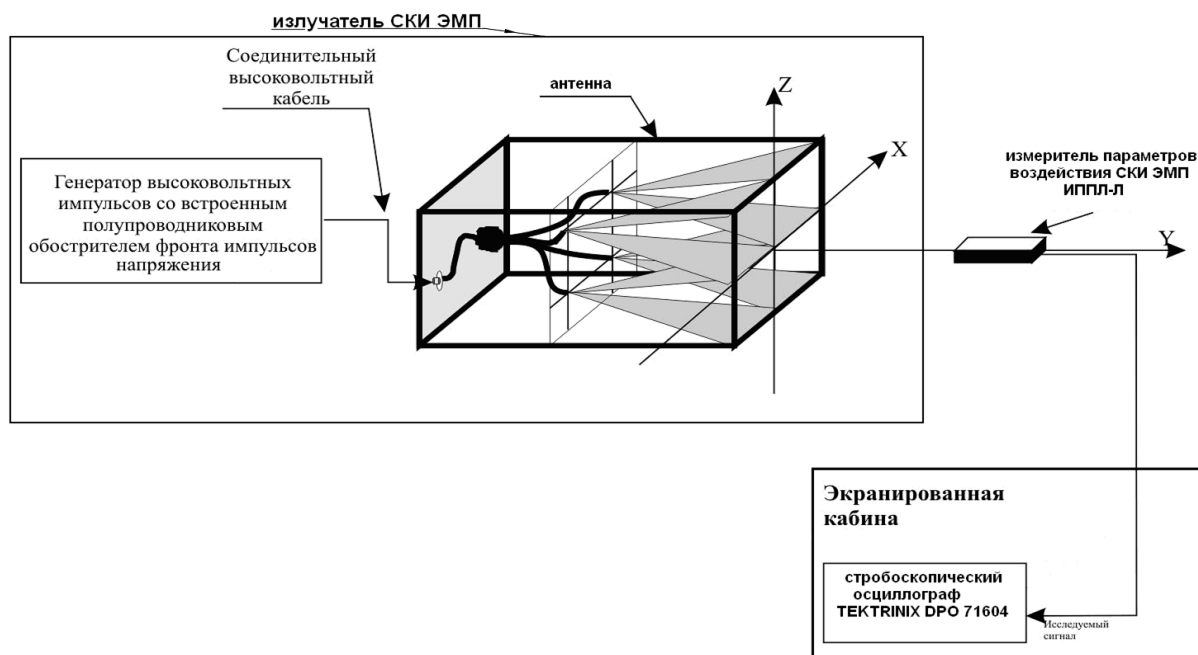


Рисунок 6.3 - Схема определения параметров воздействующих СКИ ЭМИ

Определение длительности фронта СКИ ЭМИ

Длительность фронта воздействующих СКИ ЭМИ между уровнями 0,1-0,9 от амплитуды измерялась в дальней зоне излучателя на расстоянии $Y=4$ м. Проводилась регистрация импульсов на экране осциллографа и при помощи маркеров осциллографа определялась длительность фронта СКИ ЭМИ между уровнями 0,1-0,9 от амплитуды.

Определение длительности фронта воздействующих СКИ ЭМИ при использовании возбуждающего генератора импульсов ГИВЧ-0,5/10 и воспроизводимых излучателем длинноволновых СКИ ЭМП проводилась аналогично.

Определение длительности СКИ ЭМИ

Измерялась длительность воздействующих СКИ ЭМИ аналогично предыдущему пункту.

При помощи маркеров осциллографа определялась длительность СКИ ЭМИ на уровне 0,5 от амплитуды.

Определение длительности воздействующих СКИ ЭМИ при использовании возбуждающего генератора импульсов ГИВЧ-0,5/10 и воспроизводимых излучателем длинноволновых СКИ ЭМИ проводилась аналогично.

Определение частоты следования СКИ ЭМИ

Измерительный преобразователь ИППЛ-Л через линию связи подсоединялся ко входу цифрового осциллографа Tektronix DPO 71604. Проводилась регистрация импульсов на экране осциллографа. Маркерами осциллографа определялся период $T_{\text{имп}}$ следования импульсов. Частота следования СКИ ЭМП определялась по формуле: $f_{\text{имп}} = 1/T_{\text{мин}}$.

Определение частоты следования воздействующих СКИ ЭМИ при использовании возбуждающего генератора импульсов ГИВЧ-0,5/10 и воспроизводимых излучателем длинноволновых СКИ ЭМИ проводилось аналогично.

Перед подачей энергии от имитаторов СКИ ЭМИ проводилась предварительная проверка работоспособности изделия.

Изменение частоты импульсов производилось в порядке увеличения частоты. Рекомендуемый ряд частот 1 кГц; 1 МГц. Время воздействия СКИ ЭМИ каждой частоты из ряда было не менее 100 с.

На испытания были предоставлены следующие технические документы на испытываемое изделие и контрольно-проверочную аппаратуру: технические условия на испытываемое изделие, руководство по эксплуатации, руководство оператора на программные средства и используемые при испытаниях для управления режимами работы БЦВК.

Испытания на стойкость к воздействию однократных и многократных СКИ ЭМИ проводились в соответствии с временной диаграммой испытаний, представленной на рисунке 6.4.

Требования к БЦВК в условиях воздействия импульсных ЭМИ.

Основные требования к БЦВК в условиях воздействия мощных импульсных ЭМИ задаются в техническом задании на этапе проектирования. Как показывает практика, в ТЗ в основном задаются требования оперативно-тактического и организационного характера, требования по ЭМС, требования по надежности, формулируется состав и назначение бортового комплекса.

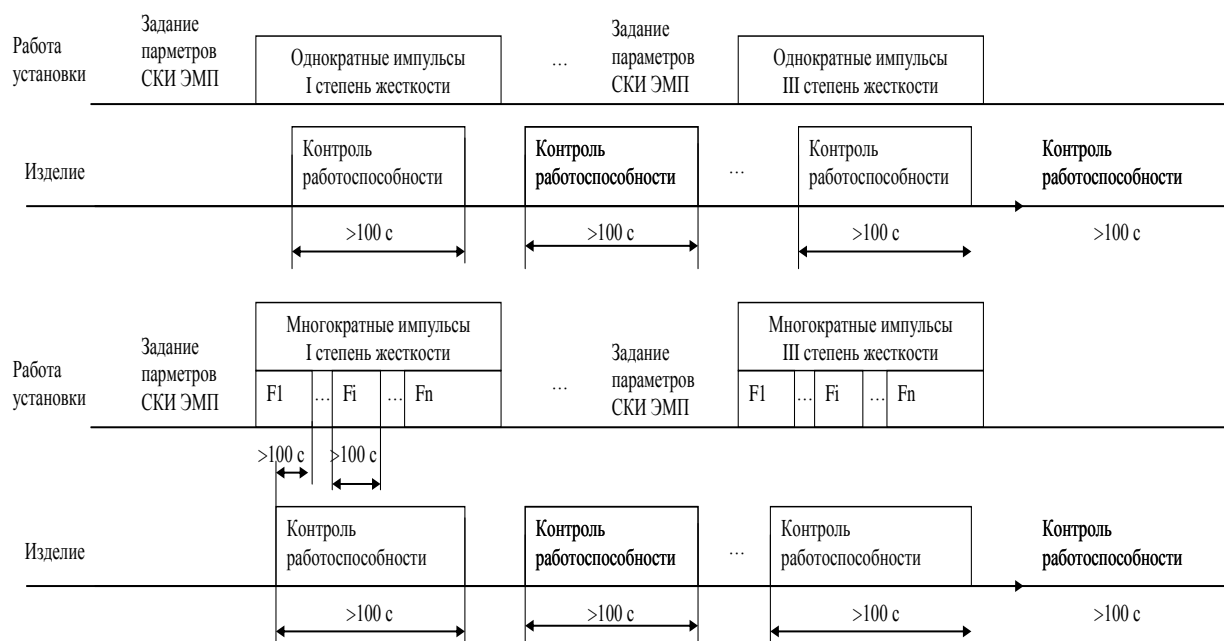


Рисунок 6.4 - Временная диаграмма испытаний

6.1.4 Обоснование требований предъявляемых к образцу, методам и средствам его испытаний на воздействие СКИ ЭМИ

Практически не рассматривается очень важная группа требований по параметрам электромагнитной обстановки. Это понятие введено международной электротехнической комиссией (МЭК) в 1985г. Электромагнитная обстановка представляет собой «совокупность электромагнитных явлений, существующих в данном месте», то есть включает в себя все виды электромагнитных «помех»: электростатические разряды, низкочастотные и высокочастотные кондуктивные и излучаемые помехи, а также поля, создаваемые ЭМИ ЯВ и другими источниками не ядерного происхождения, такими как СКИ ЭМП, включая преднамеренные электромагнитные воздействия.

Анализ нормативных документов, выполненный в главе 1, показал, что элементы и узлы БЦВК должны отвечать требованиям по стойкости к различным видам электромагнитных воздействий.

Так должна быть предусмотрена защита в условиях:

- внешних и взаимных помех;
- воздействия импульсного электромагнитного поля с учетом величины

экранировки ЭМП корпусом объекта;

- воздействия токов и напряжений по требованиям МЭК, с учётом защищающих свойств объекта-носителя;

- преднамеренных электромагнитных воздействий.

Электромагнитная обстановка и параметры внешних электромагнитных воздействий для бортового оборудования изложены в КТ-160D [105].

Согласно требованиям КТ-160D оборудование должно быть разработано, изготовлено и установлено в бортовом комплексе таким образом, чтобы была обеспечена его работоспособность в ожидаемых и прогнозируемых условиях. Для БЦВМ основными источниками электромагнитного воздействия являются токи в бортовой кабельной сети и поля излучения от РПС и РЛС.

Анализ стандартов МЭК и существующих излучателей ЭМИ показывает, что основные требования к БЦВК, средствам метрологического обеспечения испытаний элементов и узлов БЦВК на устойчивость к СКИ ЭМИ должны разрабатываться исходя из импульсов ЭМИ со следующими параметрами: напряженность электрического поля в диапазоне от 1 кВ/м до 150 кВ/м; длительность фронта импульса – от 0,1 нс до 0,5 нс; длительность импульса – доли и единицы наносекунд; частота повторения импульсов – от 1 кГц до 1 МГц.

Проведенный анализ существующей экспериментальной базы для оценки стойкости БЦВК к воздействию СКИ ЭМИ показал, что наиболее подходящим инструментом для испытаний элементов БЦВК на стойкость к воздействию СКИ ЭМИ являются излучатели на базе антенных решеток из ТЕМ рупоров и отечественных полупроводниковых генераторов. По имеющимся отечественным и зарубежным данным уровни воздействия ЭМИ различных источников могут достигать амплитуд 50- 250 кВ/м.

Анализ приведенных данных показывает, что сверхкороткие импульсы обладают высокой эффективностью воздействия на технические средства. Эти обстоятельства имеют принципиальное значение при оценке наведенных токов и напряжений в различных элементах БЦВК, так как приводят к необходимости уточнения расчетных моделей и требований к средствам защиты.

В условиях воздействия этих полей элементы и узлы БЦВК должны удовлетворять требованиям по стойкости, сохранять характеристики в пределах установленных норм во время и после воздействия, выполнять свои функции по назначению. При этом необходимо учитывать, что результаты воздействия различных источников ЭМП, функционирующих на одних и тех же частотах с одинаковыми уровнями воздействия, могут существенно отличаться из-за частотной или амплитудной (импульсной) модуляции сигналов, их длительности и скважности.

В дальнейшем эти требования задаются в техническом задании на разработку БЦВК с учетом их классификации, назначения и условий эксплуатации, хранения и применения. При этом они взаимно увязываются с требованиями и классификацией радиоэлектронной аппаратуры и оборудования, входящих в состав носителя [131].

Исходя из современных технических возможностей и проведенного анализа, определим требования к метрологическим характеристикам излучателей [137, 138] для испытаний БЦВК на устойчивость к воздействию сверхкоротких ЭМИ:

- напряженность электрического поля в рабочей зоне – 1-100 кВ/м;
- длительность импульса по уровню 0,5 от амплитуды – 100 пс-25 нс;
- длительность фронта импульса по уровням 0,1-0,9 от амплитуды -100-500 пс;
- частота повторения от однократных от 1 кГц до 1МГц.

6.2 Экспериментальные исследования воздействия СКИ ЭМИ на элементы и узлы БЦВК

6.2.1 Критерии оценки устойчивости БЦВК при воздействии СКИ ЭМИ

Для всех видов испытаний на помехозащищенность от внешних электромагнитных воздействий применялась единая и согласованная испытательная, измерительная и нормативная базы. Испытания каналов передачи данных и управления на стойкость к воздействию СКИ ЭМИ в этом смысле

не является исключением.

Общие международные требования и правовые вопросы обеспечения электромагнитной совместимости электронных и электротехнических изделий изложены в директиве Европейской комиссии 89/336/ЕЕС от 3 мая 1989 г., дополненной впоследствии директивами 91/263/ЕЕС, 92/31/ЕЕС, 93/68/ЕЕС и 93/97/ЕЕС. Указанные директивы регламентируют ЭМС изделий только гражданского применения.

77-м техническим комитетом Международной электротехнической комиссии, подкомитета CIS/G Международного специального комитета по радиопомехам (CISPR) и 210-м техническим комитетом Европейской организации по стандартизации в электротехнике (CENELEC), разработаны стандарты, не противоречащие директиве 89/336/ЕЕС, регламентирующие технические требования и методы испытаний для внешних электромагнитных воздействий. Действующие российские стандарты полностью соответствуют стандартам МЭК.

В действующих российских стандартах сформулированы не только количественные технические требования необходимой помехозащищенности технических средств, при перечисленных выше воздействиях, но указаны и критерии оценки работоспособности изделий при испытаниях на помехозащищенность.

Определены критерии А, В, С оценки работоспособности изделий при испытаниях на помехозащищенность [109].

По принятым критериям следует отметить следующее:

- они, практически, носят универсальный характер, т.е. пригодны для оценки всех видов элементов бортовых систем и всех видов внешних электромагнитных воздействий на БЦВК, включая воздействие типа СКИЭМИ;

- в существующих стандартах применение того или иного критерия поставлено в зависимость от вида воздействия (например, для воздействия вида высокочастотного модулированного электромагнитного поля применяется критерий А, а для электростатических разрядов на корпус - критерий В) и не

зависит от важности функций, выполняемых испытываемыми изделиями.

Между тем, когда речь идет о воздействиях типа СКИ ЭМИ, назначение того или иного критерия должно будет существенно зависеть от важности предназначения изделия - выбор критерия всегда связан с экономикой, поскольку затраты на разработку и изготовление изделия, отвечающего критерию А, существенно выше затрат на изделие, отвечающее критерию В. А затраты на изделие, отвечающее критерию В, существенно выше затрат на изделие, отвечающее критерию С.

Во всех действующих в настоящее время стандартах на методы испытаний невосприимчивости изделий к внешним электромагнитным воздействиям, значения параметров воздействий подразделяются на несколько степеней жесткости (обычно на 4-5), в зависимости от значения некоторого параметра, характеризующего интенсивность воздействия.

Например, стандартом, регламентирующим методы испытаний на невосприимчивость к СКИ ЭМИ, предусмотрены следующие степени жесткости в зависимости от значения напряженности электрической составляющей: I степень-1В/м, II степень – 3 В/м, III степень – 10 В/м, степень X – специальная степень, которая может быть указана в технической документации на изделие.

Очевидно, что при стандартизации методов испытаний от воздействий типа СКИ ЭМИ также целесообразно подразделить воздействия на группы жесткости и назначить их в зависимости от важности назначения и условий применения изделия.

6.2.2 Результаты исследований устойчивости различных БЦВМ в условиях воздействия СКИ ЭМИ

6.2.2.1. Экспериментальные исследования [91, 94, 138, 196] на воздействие мощных сверхкоротких импульсных электромагнитных излучений опытного образца зав. № 001, как наиболее критичного к воздействию СК ЭМИ в составе:

- унифицированный отказоустойчивый вычислитель (УОВ) ЕА2180;
- сервер ЕА 2180.01;
- устройство управления ЕА2180.02 (УУ).

Испытания проводились согласно «Программе и методике испытаний блока БЦВМ (УОВ) на устойчивость к воздействию сверхкоротких электромагнитных импульсов» по схеме, изображенной на рисунке 6.5.

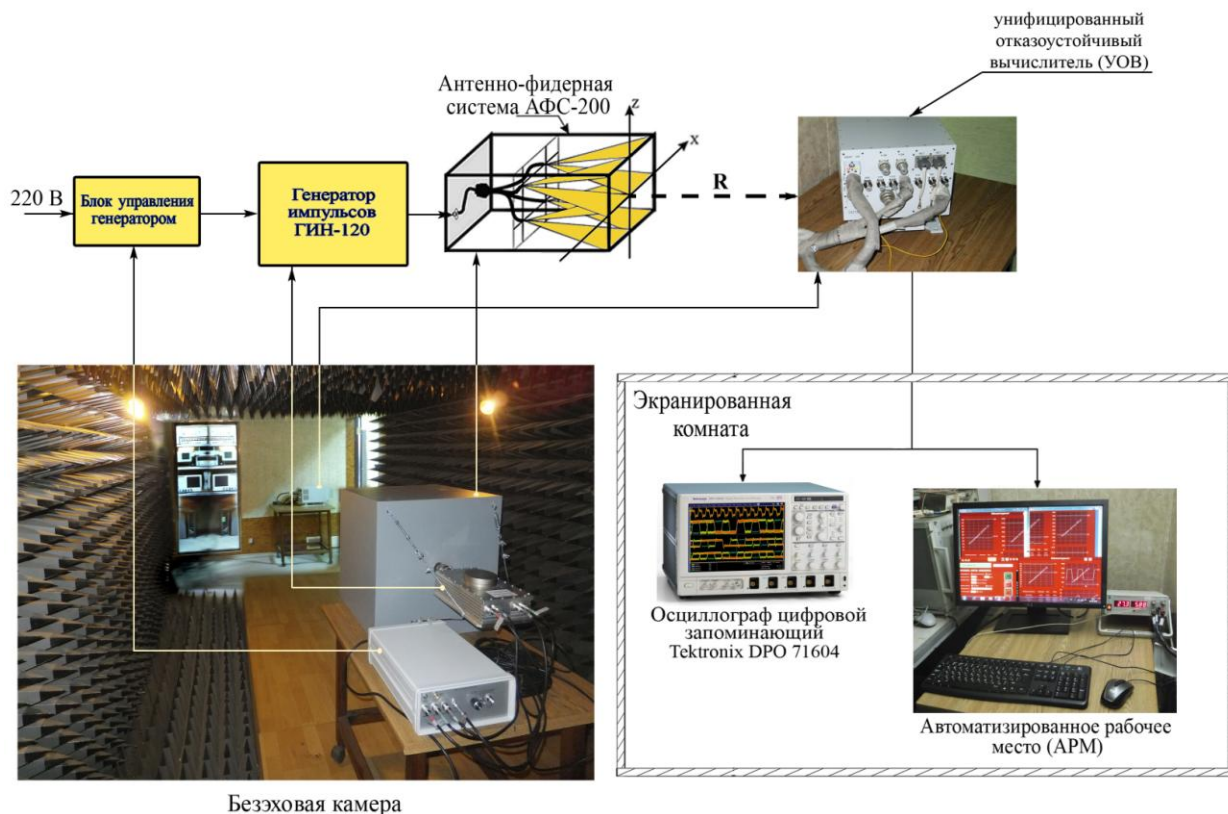


Рисунок 6.5 - Схема проведения эксперимента

Испытания проводились с целью:

- определения функционирования унифицированного отказоустойчивого вычислителя ЕА2180 при воздействии СК ЭМИ;
- проверки основных эксплуатационных характеристик УОВ во время и после воздействия СКИ ЭМП;
- определения критических параметров СКИ ЭМП, приводящих к нарушениям в работе УОВ [179, 183].

С целью оценки предельных уровней устойчивости функционирования, УОВ, с подключенными кабельными линиями, подвергся воздействию на повышенных уровнях СКИ ЭМП до наступления сбоев в работе изделия. Блок расположен на деревянном столе непосредственно напротив излучающей установки, расположенной в безэховой камере. Объект находится в заземленном состоянии.

Для установки начального уровня напряженности поля 10 кВ/м, воздействующего на объект, излучающую установку расположили на расстоянии $R=3,8$ м относительно испытываемого блока. Для обеспечения требуемой напряженности излучения, экранированные стенки расположили относительно друг друга на расстоянии 13 см (рисунок 6.6). Типовая осциллограмма полученного импульса напряженности электрического поля на выходе установки СК ЭМИ показана на рисунке 6.7. При увеличении размера зазора между экранированными стенками на уровне 67,5 кВ/м происходит отказ компьютерной мыши, положение блока относительно излучающей установки указано на рисунке 6.8.



Рисунок 6.6 – Расположение испытываемого блока относительно безэховой и экранированной камер



Рисунок 6.7-Типовая осциллограмма импульса напряженности электрического поля 10 кВ/м на выходе установки СК ЭМИ



а)



б)

Рисунок 6.8 – Расположение излучающей установки в безэховой камере (а) и расположение экранированных стенок, для регулировки мощности излучения (б)

Результаты исследований воздействия СК ЭМИ на УОВ EA2180 с частотой следования импульсов 1000 Гц приведены в таблице 6.3.

Т а б л и ц а 6.3 - Результаты экспериментальных исследований

Расположение блока	Результаты воздействия
	<p>Излучение воздействует на боковую стенку блока. <u>Вертикальная поляризация антенны.</u> При расстоянии от источника излучения до блока УОВ $R=3,8$ м и $E=67,5$ кВ/м происходит отказ компьютерной «мыши». Осциллограмма импульса напряженности электрического поля приведена на рисунке 13.</p>
	<p>При использовании фольги и экранирующей ткани на разъемах и кабелях (расположение блока см. №1). <u>Вертикальная поляризация антенны.</u> - при $R=1$ м, $E=200$ кВ/м происходит периодическое пропадание изображения на экране монитора АРМ; - при $R=1,5$ м – периодическое пропадание изображения экрана монитора АРМ начинается через 2-3 с после включения излучающей установки; - при $R=2,5$ м сбоев в работе УОВ не обнаружено; - при $R=1,87$ м, $E=148$ кВ/м возникает эффект периодического пропадания изображения экрана монитора АРМ. Граничный уровень восприимчивости аппаратуры к воздействию. <u>Горизонтальная поляризация антенны.</u> При $R=1,8$ м, $E=140,4$ кВ/м возникает однократное пропадание изображения на экране монитора АРМ, далее без изменений (рис.14). Также возникает сбой внешнего вентилятора, после снятия воздействия продолжает функционировать в нормальном режиме. После установки в районе вентилятора экранирующего материала - сбоев работоспособности системы блока не обнаружено, кроме отключения вентилятора.</p>
	<p><u>Вертикальная поляризация антенны.</u> - при $R=3,8$ м, $E=67,5$ кВ/м – гаснет экран монитора АРМ; - на расстоянии $R=2$ м – сбоев в работе УОВ не обнаружено.</p>
	<p>Излучение воздействует перпендикулярно плоскости вращения вентилятора блока. <u>Горизонтальная поляризация антенны.</u> При расстоянии $R=1,1$ м происходит отключение внешнего вентилятора.</p>
	<p><u>Горизонтальная поляризация антенны.</u> При $R=1,1$ м – сбоев в работе УОВ не обнаружено. При $R=1$ м, $E=200$ кВ/м- происходит периодическое мерцание экрана монитора АРМ. При воздействии излучения перпендикулярно боковой стенке блока, $R=1,28$ м, $E=219,8$ кВ/м (рисунок 15)- сначала происходит отключение внешнего вентилятора и через 5 с - внутреннего. После отключения воздействующего излучения через 5 с работоспособность вентиляторов восстанавливается.</p>

Осциллограммы на выходе установки СК ЭМИ при различных уровнях напряженности электрического поля изображены на рисунках 6.9- 6.11.

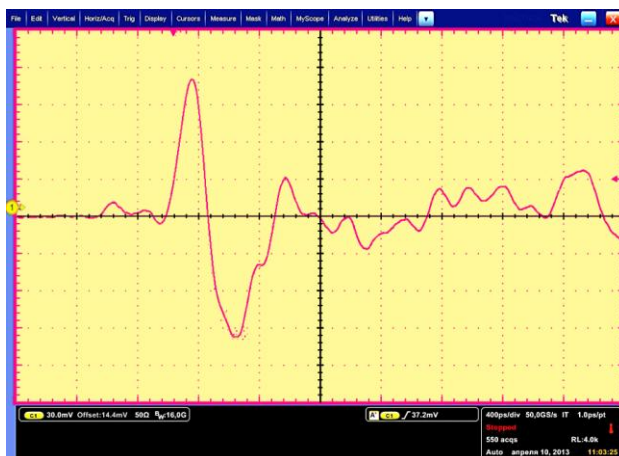


Рисунок 6.9 – Осциллограмма импульса напряженности электрического поля 67,5 кВ/м на выходе установки СК ЭМИ



Рисунок 6.10 – Осциллограмма импульса напряженностью поля 140,4 кВ/м на расстоянии 1,8 м



Рисунок 6.11 – Осциллограмма импульса сигнала напряженностью поля 219,8 кВ/м на расстоянии 1,28 м.

Анализ полученных результатов

БЦВК, как объект проектирования, представляет собой сложную как в схемотехническом, конструкторско-технологическом, так и в плане устойчивости систему, подвергающуюся широкому спектру воздействий мощных электромагнитных факторов.

В результате экспериментальных исследований УОВ в соответствии с разработанной методикой в условиях воздействия СКИ ЭМП установлено, что УОВ нормально функционирует по заданному критерию устойчивости при напряженности электрического поля от 1 до 30 кВ/м, частоте следования импульсов 1кГц.

Это свидетельствует о высоком уровне устойчивости и правильности конструктивных решений по защите УОВ от воздействия СКИ ЭМП.

С целью оценки предельных уровней устойчивости функционирования проводились экспериментальные исследования УОВ с подключенными кабельными линиями на повышенных уровнях воздействия СКИ ЭМП до наступления сбоев в работе изделия. При этом установлено, что в УОВ возникли устойчивые сбои, как во время тестирования системы, так и в рабочем режиме при воздействии электрического поля напряженностью более 200 кВ/м, частотой следования импульсов 1кГц.

Анализ полученных экспериментальных данных и механизмов воздействия СКИ ЭМП на УОВ показывает, что сбои, системные отказы и нарушение функционирования возникают в основном за счет недостаточной эффективности экранирования бортовой кабельной сети БЦВК, которые, в свою очередь, являются, как правило, при испытаниях и в процессе эксплуатации.

В целях уменьшения воздействия электромагнитных помех рекомендуется увеличить эффективность экранирования бортовой кабельной сети и разъемов УОВ. В условиях дополнительного экранирования кабельных линий УОВ сохраняла нормальное функционирование при напряженности электрического поля 140,4 кВ/м, частоте следования импульсов 1кГц.

В целом при всех уровнях излучения перезагрузок системы блока или сбоя в самотестировании УОВ не происходило. Процессы обратимые, в процессе воздействия не восстанавливаются. После снятия излучения процессы восстанавливаются и продолжают функционирование в нормальном режиме.

Экспериментально полученный коэффициент запаса по устойчивости функционирования оценивается в диапазоне значений 2-7 в зависимости от уровня защищенности кабельных линий УОВ.

6.2.2.2 Экспериментальные исследования на воздействие СК ЭМИ.

1. Бортовые вычислительные комплексы:

- БЦВМ М20 – двухканальная вычислительная машина;
- многофункциональный бортовой вычислительный комплекс БВК ЕА-102.

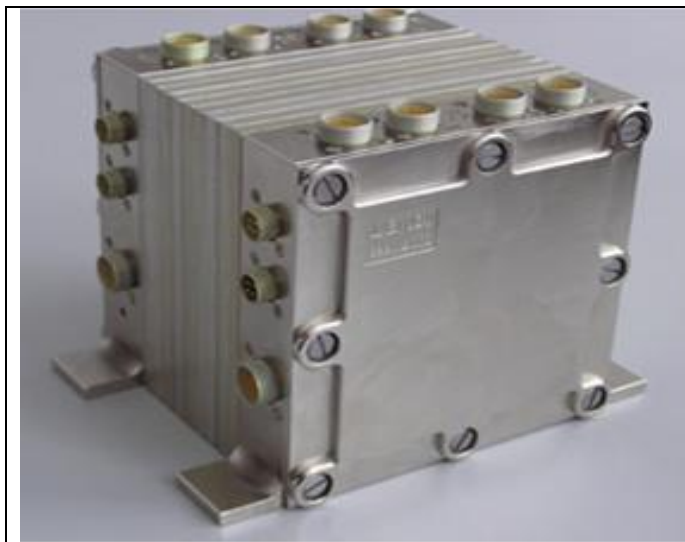
2. Кабельные линии бортовой кабельной сети [130].

БЦВМ авиационных и космических комплексов показаны на рисунке 6.12.

Осциллограмма воздействующего сверхкороткого импульса напряженности ЭМП показана на рисунке 6.13.

БЦВМ устанавливались и подключались к сети электропитания, линиям ввода-вывода, контурам защитного и сигнального заземления в соответствии с технической документацией на БЦВМ. Контроль работоспособности БЦВМ осуществлялся до воздействия, при воздействии и после воздействия СКИ ЭМП. Параметры испытательных импульсов поля, виды испытаний, степени жёсткости воздействий, методы и средства испытаний, критерии оценки стойкости БЦВМ соответствовали требованиям международных и национальных стандартов по СКИ ЭМП.

Напряженность электромагнитного поля плавно или ступенчато увеличивалась по мере уменьшения расстояния между антенной излучателя и объектом испытаний. В момент наступления сбоя или отказа в БЦВМ для вертикальной или горизонтальной поляризации воздействующего поля регистрировались форма и амплитуда электрического поля.



БЦВМ М20 – двухканальная вычислительная машина

Предназначена для применения в бортовом комплексе управления КА.

Разработчик ФГУП “НИИ “Аргон”.

Каждый канал имеет характеристики:

Микропроцессор - 1890BM1T (24–66)

МГц; емкость ОЗУ, Мбайт - 2;

емкость ЭППЗУ, Мбайт - 4;

скорость обмена по системной шине, Мбайт/с - 16;

скорость межмашинного

обмена, Мбит/с - 12;

скорость межпроцессорного

обмена, Мбайт/с - 12



Многофункциональный БВК ЕА-102

Используется в качестве рабочего места оператора в БВС авиационных и мобильных объектов.

Разработчик: ФГУП “НИИ “Аргон”.

Стандартная конфигурация: системный блок, ЖК-монитор, клавиатура, принтер, табло текущего времени.

Микропроцессор: К6-П, 400 МГц

Емкость ОЗУ: 32-128 МБ

Емкость флэш-памяти - 13 ГБ

Рисунок 6.12 - Бортовые цифровые вычислительные комплексы

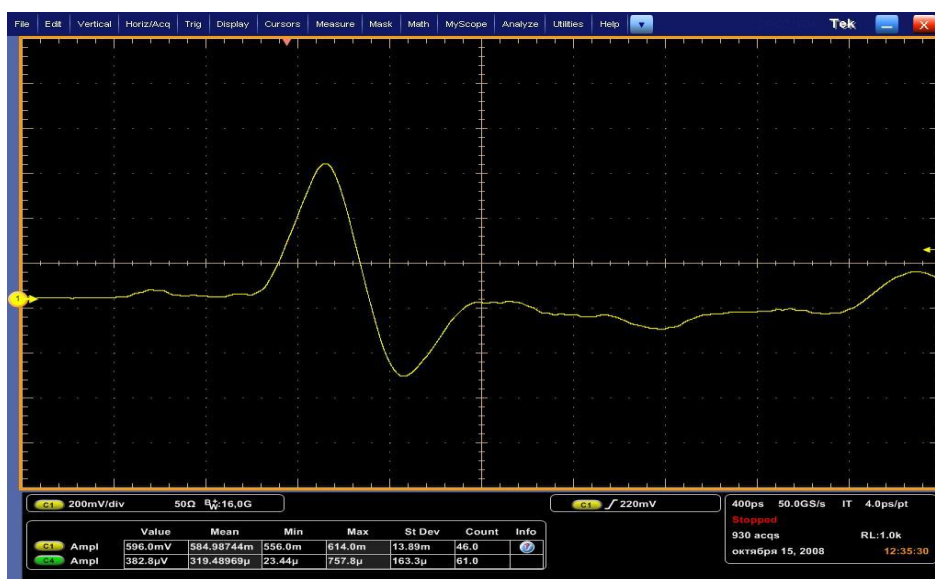


Рисунок 6.13 - Осциллограмма воздействующего СК ЭМИ напряженности электрического поля. Расстояние от излучателя 3 м. Длительность фронта 0,19 нс, длительность импульса 0,27 нс, амплитуда напряженности электрического поля 3,5 кВ/м.

Результаты экспериментальных исследований воздействия сверхкоротких импульсных полей на БЦВМ М20 и бортовой вычислительный комплекс ЕА-102 показаны на рисунках 6.14 и 6.15.

	<p>БЦВМ М20 Проведение экспериментальных исследований воздействия СКИ ЭМП.</p> <p>Схема нагружения: генератор, рупорная антенна, БЦВМ и экранированная кабина. БЦВМ устойчива к воздействию электромагнитных полей в диапазоне (0,3-30) кВ/м, частотой 1кГц для вертикальной и горизонтальной поляризации поля.</p>
	<p>БЦВМ М20 в условиях воздействия СКИ ЭМП напряженностью 80 кВ/м. Произошли сбои в работе при загрузке параметров. Длительность импульса 0,27 нс, частота повторения 1кГц.</p>
	<p>БЦВМ М20 в условиях воздействия СКИ ЭМП напряженностью 150 кВ/м. Поставлен экран на кабельные разъемы. БЦВМ нормально функционировала при загрузке параметров. Длительность импульса 0,27 нс, частота повторения 1кГц.</p>
	<p>БЦВМ М20 в условиях воздействия СКИ ЭМП напряженностью 2 кВ/м. Произошли сбои в работе при загрузке параметров. Прекращение выполнения программ, требующие их перезагрузки. Длительность импульса 0,27 нс, частота повторения 1 МГц.</p>

Рисунок 6.14 - Экспериментальные исследования воздействия сверхкоротких импульсных полей на БЦВМ 20

	<p>БВК ЕА-102 Проведение экспериментальных исследований воздействия СКИ ЭМП. Схема нагружения: генератор, рупорная антенна, БЦВМ и экранированная кабина.</p> <p>БЦВМ устойчива к воздействию электромагнитных полей в диапазоне: (1-20) кВ/м, частотой 1кГц; 2 кВ/м частотой 1МГц.</p>
	<p>БВК ЕА-102 Тестирование. Нормальный режим работы. Длительность импульса 0,27 нс. Напряженность электрического поля 20 кВ/м.</p>
	<p>БВК ЕА-102 Сбои процесса передачи информации, требующие сброса и повторного запуска программы тестирования. Прекращение процесса передачи информации, хаотические посылки сигналов помехи. Длительность импульса 0,27 нс. Напряженность электрического поля 30 кВ/м, частота повторения 1 кГц. Вертикальная поляризация.</p>
	<p>БВК ЕА-102 Сбои процесса передачи информации, требующие сброса и повторного запуска программы тестирования. Прекращение процесса передачи информации, хаотические посылки сигналов помехи. Напряженность электрического поля 50 кВ/м. Длительность импульса 0,27 нс, частота повторения 1 кГц. Вертикальная поляризация.</p>

Рисунок 6.15 - Экспериментальные исследования воздействия сверхкоротких импульсных полей на бортовой вычислительный комплекс БВК ЕА-102

Проверка работоспособности БЦВМ проводилась для следующих условий:

- БЦВМ подвергались воздействию СКИ ЭМП без кабельных линий. Контроль работоспособности проводился после воздействия СКИ ЭМП;
- БЦВМ подвергались воздействию СКИ ЭМП с подключенными штатными кабельными линиями и с дополнительной экранировкой кабельных линий.

Результаты исследования устойчивости БЦВМ М20 на соответствии с требованиями ГОСТ Р 52962 -2007:

- *к преднамеренным однократным силовым электромагнитным воздействиям в соответствии с требованиями ГОСТ Р 52962 -2007.*

В результате исследований устойчивости БЦВМ М20 к воздействию сверхкоротких импульсных электромагнитных полей было установлено, при воздействии однократных наносекундных импульсов электрического поля напряженностью (1–10) кВ/м и длительностью 100 пс БЦВМ с подключенными кабельными линиями не имели сбоев, отказов и нормально функционировали. Время воздействия поля в экспериментах – 1 мин.

- *к преднамеренным многократным силовым электромагнитным воздействиям в соответствии с требованиями ГОСТ Р 52962 – 2007.*

В результате исследований устойчивости БЦВМ М20 к воздействию сверхкоротких многократных периодических наносекундных импульсов электромагнитного поля напряженностью (0,3 – 30) кВ/м с частотой повторения 1кГц и напряженностью (0,02- 0,2) кВ/м с частотой повторения 1МГц и длительностью импульса 270 пс было установлено, что БЦВМ М20 с подключенными кабельными линиями не имели сбоев, отказов и нормально функционировали.

Результаты исследования стойкости БЦВМ к многократным преднамеренным силовым электромагнитным воздействиям с повышенными уровнями.

Исследования стойкости БЦВМ М20 проводилось на уровнях электромагнитного поля напряженностью более 30 кВ/м при воздействии многократных периодических наносекундных импульсов электромагнитного поля длительностью 0,27 нс, с частотой повторения 1кГц и на уровнях более 0,2 кВ/м с частотой повторения 1МГц.

В результате исследований БЦВМ М20 к воздействию сверхкоротких импульсных электромагнитных полей было установлено следующее:

- при отключенных кабельных линиях определен уровень стойкости БЦВМ М20 и БЦВК к воздействию импульсных электрических полей:

- 150 кВ/м при частоте повторения 1кГц;
- 2 кВ/м при частоте повторения 1МГц.

БЦВМ М20 нормально функционировала после воздействия СКИ ЭМП для вертикальной и горизонтальной поляризации воздействующего поля.

- с подключенными штатными кабельными линиями сбои и отказы в работе БЦВМ М20 возникали при воздействии импульсных электрических полей:

- напряженностью 80 кВ/м при частоте повторения 1кГц;
- 2 кВ/м при частоте повторения 1МГц.

Сбои происходили при тестировании системы, как во время перезагрузки, так и в рабочем режиме.

Отмечено влияние поляризации поля на работу БЦВМ М20 при частоте повторения импульсов 1кГц. Сбои возникали при вертикальной поляризации электрического поля. При горизонтальной поляризации эффектов не обнаружено.

С подключенными штатными кабельными линиями сбои и отказы в работе БЦВК возникали при воздействии:

- импульсных электрических полей напряженностью электрического поля в диапазоне (20-50) кВ/м при частоте повторения 1кГц;

- 2 кВ/м при частоте повторения 1МГц. Причиной широкого диапазона воздействия поля явилась зависимость сбоев от вида поляризации и от наличия неоднородностей в экране корпуса БЦВМ.

С дополнительной экранировкой кабельных линий БЦВМ М20 и БЦВК сохраняли работоспособность при воздействии вертикальной и горизонтальной поляризации воздействующего поля:

- импульсных электрических полей 150 кВ/м при частоте повторения 1кГц;
- 2 кВ/м при частоте повторения 1МГц.

За критерий оценки устойчивости БЦВМ М20 принимались амплитудно-временные параметры электромагнитного импульса и частота их следования в условиях выполнения штатных тестов без сбоев.

Все БЦВМ выдержали испытания в соответствии с ГОСТ Р 52962-2007, коэффициент запаса по стойкости экспериментально исследованных БЦВМ при дополнительной экранировке входных кабельных линий составил величину 5.

6.2.3 Результаты исследований стойкости каналов передачи данных и управления БЦВК в условиях воздействия СКИ ЭМП

Исследование стойкости каналов передачи данных и управления БЦВК в условиях воздействия СКИ ЭМП проводилось путем проведения косвенных испытаний бортовой сети и средств защиты на стойкость к воздействию импульсных токов и напряжений СКИ ЭМИ следующим образом:

- посредством разряда импульсов тока в защитные экраны кабелей и токопроводящие корпуса испытываемой аппаратуры;
- посредством подачи импульсов напряжения в цепь «жила – защитный экран» кабеля;
- посредством подачи импульсов напряжения в цепь «жила – жила» кабеля или непосредственно на входы испытываемой аппаратуры.

Испытания производились многомодульными ГИТ, позволяющими воспроизводить на участках кабельных линий импульсные токи с различными амплитудно-временными параметрами.

Оценка показателей стойкости и защищенности бортовой сети производилась на основании результатов испытаний.

Если аппаратура в процессе и после воздействия полей, токов и напряжений с уровнями, соответствующими нормам испытаний сохраняет свои параметры в пределах норм, установленных в нормативной документации, то стойкость и защищенность аппаратуры соответствует заданными требованиям. При неудовлетворительных результатах испытаний производилась доработка аппаратуры путем применения дополнительных средств

защиты и проводились повторные испытания.

Если каждый из испытанных блоков сохранил работоспособность при воздействии полей, токами и напряжениями с уровнями, указанными в программе-методике и показатели стойкости аппаратуры не менее значений, указанных в нормативной документации, то аппаратура считалась соответствующей заданным требованиям.

При проведении эксперимента осуществлялась диагностика потерь кадров Ethernet при передаче данных [66]. В эксперименте 1 к бортовому коммутатору подключался вычислитель В 3 с предустановленным ПО Fluke Networks witch Port Monitor для сбора статистики ошибок на портах ввода/вывода рисунка 6.16.

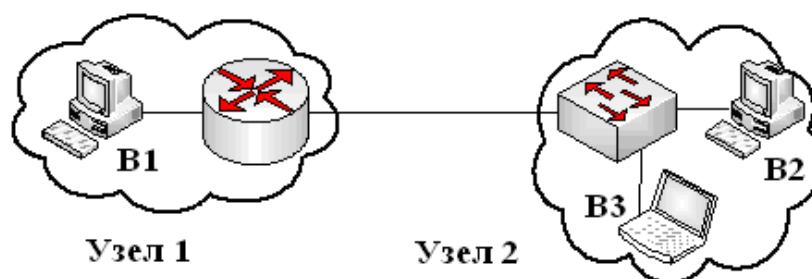


Рисунок 6.16 - Схема размещения оборудования для измерений потерь кадров Ethernet в эксперименте 1

В обоих экспериментах для контроля ошибок на сетевых интерфейсах БЦВК на вычислителях В 1 и В 2 (рисунок 6.16) использовался анализатор сетевого трафика Fluke Networks OptiView Protocol Expert, включающий специализированный драйвер для получения статистики с микроконтроллера сетевого адаптера.

Для генерации сетевого трафика и фиксации ошибочных кадров использовались программно-аппаратные средства, представленные в таблице 6.4.

Перед проведением каждого эксперимента фрагмент витой пары проверялся с помощью кабельных анализаторов Fluke Networks DTX 1200 на соответствие параметрам ISO, IEEE, EIA/TIA для витой пары категории 5е. Проверка осуществлялась для того, чтобы исключить вероятность накопления остаточных токов в линии связи, что могло бы повлиять на точность измерений [66].

Т а б л и ц а 6.4 - Контролируемые величины и средства контроля

Процедура контроля	Средство диагностики
Контроль физических параметров линии связи	Fluke Networks Cable Analyzer Series DTX 1200
Генератор сетевого трафика	LAN Tornado RFC 2544 Jperf 2.0.2 Генератор кадров на RAW-интерфейсах
Мониторинг ошибок CRC на канальном уровне	Comm View 6.1 Fluke Networks OptiView Protocol Expert
Мониторинг ошибок на портах коммутатора	Fluke Networks Switch Port Monitor v.1.2

Результаты проверки считались положительными, если на диагностическом устройстве кабельного тестера загоралась индикация “PASS”. При отрицательном результате тестирования включается индикация “FAIL”.

Для сравнения экспериментальных данных с результатами имитационного моделирования оценивались параметры, приведенные в таблице 6.5.

Т а б л и ц а 6.5

Цель исследования	Исследуемые параметры
1. Сравнение с результатами имитационного моделирования	Количество кадров, принятых с ошибкой CRC. Количество кадров, отброшенных сетевым интерфейсом ввиду искажения служебных полей.
2. Анализ пороговых значений функционирования сети Fast и Gigabit Ethernet (протокол SNMP)	Факт блокирования передачи данных без разрушения сетевого соединения. Факт разрушения сетевого соединения.

Параметры воздействия выбирались, исходя из данных, представленных в ГОСТ Р 52863-07, а также согласно предварительным расчетам, выполненным на основе вероятностной оценки и имитационного моделирования. Частота следования импульсов $F_{\text{сл}}$ задавалась 1000, 5000 и 10 000 Гц.

Параметры сетевого трафика (длина кадра Ethernet и межкадровых интервалов) выбирались согласно RFC 2544 и задавались двумя режимами: фиксированная длина (64, 512, 1518) и случайная длина кадра (от 64 до 1518) байт. Сбор статистики осуществлялся путем опроса микроконтроллера сетевого интерфейса после завершения воздействия СК ЭМИ [66].

В обоих экспериментах с вычислителями В1 на В2 отправлялись 10 000 пакетов в течение двух мин., одновременно витая пара подвергалась воздействию СК ЭМИ. С целью снижения статистической погрешности проводился повтор каждого измерения десять раз. Статистическая обработка результатов эксперимента осуществлялась на основе коэффициента достоверности Стьюдента. В ходе проведения исследований проводилось измерение параметров наведенных токов и напряжений, формирующихся в кабеле, выполненном на 4-парных витых парах.

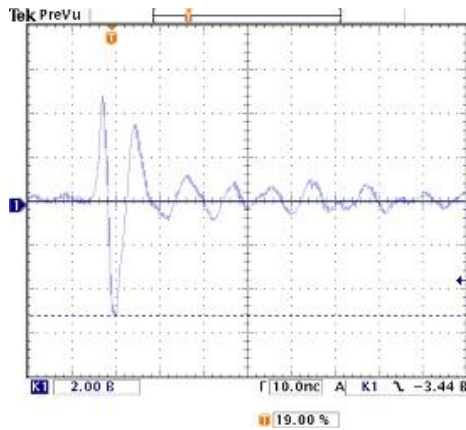
В результате проведения эксперимента установлено, что амплитуда наводок на линиях кабеля, при которых происходит разрушение сетевого соединения, составляет: при емкостной инжекции в линию связи 6 В, при индуктивной инжекции в линию связи 12 В.

На рисунках 6.17, 6.18 представлены характерные осциллограммы форм импульсных помех, наведенных в кабельной линии при соединении двух сетевых интерфейсов (технология Fast Ethernet спецификация 100Base-TX).

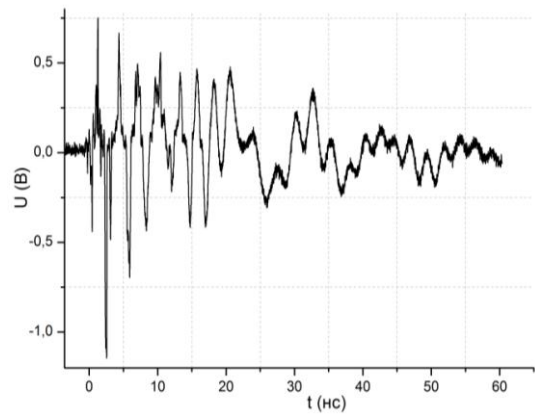
По оси Y измеряется напряжение, а по оси X – время. Напряжение измеряется как разностный сигнал между двумя проводами внутри одной (TX) из четырех витых пар, присутствующих в кабеле UTP.

На рисунке 6.18 показано искажение исходного сигнала при воздействии СК ЭМИ по линиям связи [66]. По результатам экспериментальных исследований были сделаны следующие выводы [66].

1. Среди различных способов инжекции СК ЭМИ в физическую среду передачи данных наибольшую опасность для передаваемой информации представляют наведенные импульсные помехи, возникающие в результате емкостной инжекции в линию связи. Согласно результатам натурного эксперимента, это приводит к большему количеству потерянных кадров.

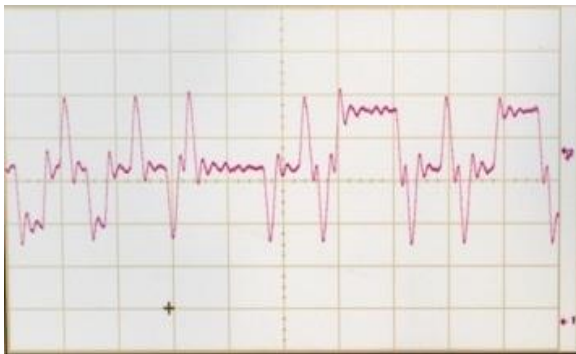


а)

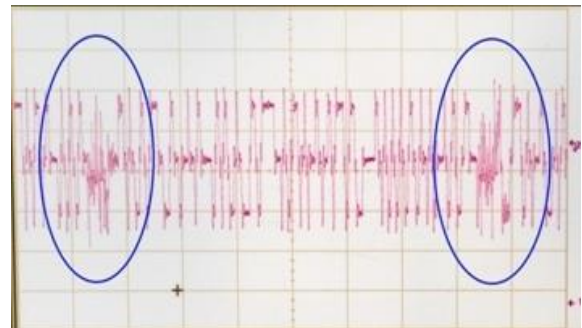


б)

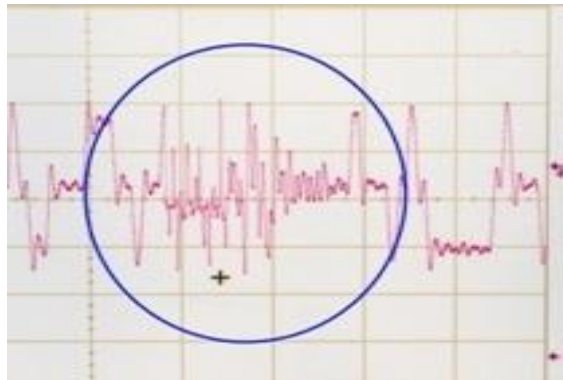
Рисунок 6.17 - Сигнал наводки на сетевом кабеле при воздействии СК ЭМИ:
а) индуктивная связь; б) емкостная связь



а)



б)



в)

Рисунок 6.18 - Сигналы на входе сетевого интерфейса 100Base-TX:
а) без воздействия СК ЭМИ; б, в) с воздействием СК ЭМИ

2. Искажение формы наводимого импульса напряжения на нагрузке сетевого интерфейса в значительной мере определяется физическими параметрами устройства инжекции (согласованностью инжектора и генератора СК ЭМИ). В частности, было выявлено, что большая часть энергии импульса теряется из-за несоответствий импедансов между источником, кабелем и нагрузкой.

3. В экранированной витой паре при отсутствии заземления экранирующей оболочки экран не обеспечивает защиту от СК ЭМИ.

4. В ходе проведенных экспериментальных исследований установлено, что воздействие СК ЭМИ с частотой повторения импульсов до 1 МГц при амплитуде до 400 В/м оказывает деструктивное воздействие на процесс передачи данных в сетях Fast и Gigabit Ethernet. Разрушение сетевого соединения наступает при уровне СКИ-наводок на нагрузку сетевого интерфейса до 6 В при емкостной инжекции и 12 В при индуктивной инжекции и длительности помеховых импульсов до 200 нс.

Анализ полученных экспериментальных данных и механизмов воздействия СКИ ЭМП на УОВ подтвердил адекватность разработанных моделей взаимодействия мощных ЭМИ с элементами БЦВК для интеллектуального анализа и оценки устойчивости их к деструктивному воздействию СК ЭМИ, и показал, что сбои, системные отказы и нарушение функционирования возникают в основном за счет недостаточной эффективности экранирования бортовой кабельной сети БЦВК, которые в свою очередь, выявляются, как правило, при испытаниях и в процессе эксплуатации.

6.3 Методы обеспечения устойчивости бортовых вычислительных комплексов в условиях воздействия электромагнитных полей

6.3.1 Обобщенные рекомендации для защиты БЦВК

Проблема устойчивости радиоэлектронной аппаратуры бортовых систем управления, включающих средства вычислительной техники, средства связи и целый комплекс специального оборудования, является одной из сложнейших задач, решаемых при проектировании таких систем.

Сложность задачи многократно увеличивается при размещении БСУ в ограниченном пространстве на борту космического, авиационного либо мобильного объекта, сбои и отказы аппаратуры в котором, как правило, не допускаются, так как приводят к необратимым последствиям. В связи с этим,

оценка стойкости БЦВК к воздействию электромагнитных полей является исключительно актуальной, поскольку БЦВК – это сердце объекта, во многом определяющее тактико-технические характеристики объекта. Тем более, что за последнее десятилетие быстро выросла оснащённость БЦВК, а устойчивость этих вычислительных систем к электромагнитным воздействиям с учётом роста уровня интеграции элементной базы, стремительно падает.

На практике разработчиками БЦВК не всегда своевременно принимаются меры к обеспечению их стойкости в заданной (в общем случае непрогнозируемой) электромагнитной обстановке. Отсутствие «системного» подхода к решению вопросов ЭМС и стойкости радиоэлектронных средств может привести к отрицательным результатам и значительным дополнительным затратам времени и средств по доработке аппаратуры. Понятие «системный» в данном случае применено потому, что защита технических средств должна строиться на основе их анализа как системы.

Очевидно, что защита может быть значительно эффективней при небольшом увеличении стоимости БЦВК, если бы угроза воздействия мощных ЭМИ учитывалась на стадии эскизного проектирования. Так как на начальной стадии проектирования технических средств, разработки облика системы методы защиты от ЭМП просты, не дорогие и не требуют больших затрат. Когда объект создан, а требования по защите не выполнены, то затраты на защиту могут достигать 20 % от стоимости разработки образца.

Одним из общих подходов защиты является установка некоторого электромагнитного барьера между источником и рецептором помех. Для источников вне системы, барьер может применяться на уровне систем. Для источников внутри системы электромагнитная совместимость требует два барьера: один около источника, чтобы управлять эмиссией, и один в рецепторе, чтобы управлять восприимчивостью. Барьеры на пути распространения электромагнитных волн реализуются в виде экранов, которые используются для уменьшения возмущающих электромагнитных колебаний от внешних источников на внутренние цепи электроники и, наоборот, ограничивают по-

мехоэмиссию от внутренних цепей до уровней, заданных требованиями ЭМС для данного типа оборудования. Экраны должны обладать целостностью, поскольку любая неоднородность в виде, например, какой-либо апертуры приведет к нарушению однородности и нарушению управления ситуацией.

Устройства защиты интерфейсов используются для ослабления кондуктивных электромагнитных возмущений от окружающей среды в цепи внутренней (относительно экрана) области, и наоборот, ограничивают кондуктивную помехоэмиссию от внутренних источников помех в окружающую среду. Это предполагает, что необходимо применять двунаправленные устройства защиты.

Таким образом, только совместное применение экранов и устройств защиты интерфейсов могут обеспечить электромагнитную устойчивость БЦВК и их защиту. Использование в конкретных БЦВК тех или иных мер защиты в значительной степени зависит от допустимых уровней помех в их цепях: чем выше этот уровень, тем меньшая степень защиты и меньшие затраты на её реализацию.

Назначением мер защиты БЦВК от воздействия ЭМП является обеспечение их работы в пределах допусковой области изменения параметров, заданных по условиям сохранения работоспособности комплекса. При выборе мер защиты БЦВК от неблагоприятного действия ЭМИ необходимо принимать во внимание, что угроза нарушения работоспособности комплекса создается, как правило, не ЭМП, а ее взаимодействием с антеннами, линиями передачи и проводниками аппаратуры, в которых происходит преобразование поля ЭМП в помеховые напряжения и токи. Это преобразование представляет собой сложное явление, зависящее от:

- характеристик ЭМП;
- типа БЦВМ и конкретных условий ее применения (уровня допустимых помех в цепях БЦВМ, непрерывного или импульсного режима их работы, допустимости или недопустимости кратковременного ухудшения работы БЦВМ и т.д.);

- схемно-конструкторского исполнения БЦВК и его расположения в пространстве (габаритных характеристик, протяженности линий передачи, диапазона рабочих частот, схемы заземления, наличия экранирования, ориентации антенны и линии передачи к направлению прихода ЭМП и т.п.).

В общем виде защита БЦВК от воздействия ЭМП основывается:

- на использовании режима общей изоляции, когда отключаются все внешние связи от экранированного объема, в котором размещается БЦВК. Указанный метод, приемлемый для защиты многих видов аппаратуры (передвижные РЛС, аппаратура связи и управления, используемая на самолетах, и т.п.);

- на использовании методов, позволяющих ослабить уровень помех в каналах передачи данных и управления;

- на применении элементов и узлов БЦВК, обладающих повышенной стойкостью к действию ЭМП.

Основным требованием, предъявляемым к защитному элементу, является обеспечение его минимального влияния на работу защищаемой цепи (устройства, аппаратуры) при отсутствии ЭМП. Это особенно важно для широкополосных устройств и цифровых систем повышенного быстродействия. Вносимые средствами защиты электрические параметры, в том числе "паразитные", не должны искажать технические показатели работоспособности технических средств, например, быстродействие. Обеспечить высокое качество функционирования БЦВК в условиях воздействия ЭМП можно, только применяя специальные меры защиты.

6.3.2. Практические рекомендации по результатам экспериментальных исследований БЦВК

По результатам экспериментальных исследований БЦВК обоснованы следующие практические рекомендации:

1. В целях уменьшения электромагнитных помех целесообразно задавать требования к экранам кабельных линий и проверять эффективность экранирова-

ния бортовой кабельной сети экспериментальным путем, в связи с тем, что сбои в работе БЦВК при воздействии СКИ ЭМП происходили из-за недостаточной эффективности экранирования кабельных линий и наличия неоднородностей в экранах.

2. Проводить расчеты экранов на этапе проектирования.

3. Для исключения электромагнитных помех на входах аппаратуры рекомендуется бортовую кабельную сеть выполнять экранированными кабельными линиями и экранировать места соединений кабельных линий с БЦВМ.

4. Приборы бортового вычислительного комплекса часто устанавливаются и совместно используются с радиостанциями различного назначения. Поэтому обеспечение устойчивой работы вычислительного комплекса совместно с радиосредствами является одной из отправных точек при выставлении требований на приборы или систему в целом [18, 100, 144, 238, 102].

Кроме того, следует также отметить следующее:

- применение экранированных объемов для размещения БЦВК значительно снижает эффективность СКИ-воздействия и позволяет исключить влияние СКИ-полей на функционирование цифровой аппаратуры до уровней воздействия не менее 20...25 кВ/м на поверхности защитного экрана;

- при применении метода блокирования поступления искаженной информации путем применения схемы обнаружения воздействия СКИ ЭМИ время передачи заданного объема информации увеличивалось на 2 мин. При этом допускался временный отказ («зависание») БЦВМ, требующий для восстановления работоспособности системной перезагрузки. Были полностью исключены необратимые отказы БЦВМ или длительные сбои в работе БЦВК. Время на восстановление работоспособности бортовой сети без применения вышеуказанных методов увеличивалось от 10 до 20 мин.

- при применении внешних детекторов обнаружения сигналов воздействия СКИ ЭМИ поступала команда на временное отключение БЦВМ и маршрутизаторов исследуемого БЦВК. Таким образом, полностью исключались необратимые отказы БЦВМ. Время на восстановление функционирования бортовой сети после прекращения воздействия составляло порядка 30 сек.

Комплексное применение вышеуказанных методов защиты позволяет полностью исключить необратимые отказы элементов БЦВК.

Основным отличием предложенных методов защиты от классических, описывающих традиционные способы защиты от воздействия на БЦВК, является учет эффектов, связанных с анализом воздействия СКИ ЭМИ на процессы, происходящие при обработке поступающей информации, нарушении ее целостности. При этом своевременное обнаружение искажения информации, связанное с воздействием СКИ ЭМИ и принятие своевременных мер защиты позволяет не только сохранить полностью работоспособность элементов бортовой сети, но с допустимой задержкой в передаче не потерять обрабатываемую информацию.

Анализ предложенных методов защиты от воздействия СКИ ЭМИ показывает, что для решения задачи минимизации влияния СКИ ЭМИ на качество функционирования БЦВК необходимо:

- на этапе разработки конструкции изделий, обеспечить минимально возможные уровни наводок в критических цепях;
- программное обеспечение должно включать программы анализирующие процесс обработки информации с учетом характерных признаков воздействующего влияния СКИ ЭМИ, а базы данных должны хранить соответствующую информацию об известных источниках генерации импульсов СКИ ЭМИ;
- использование внешних детекторов значительно упростит схему обнаружения эффектов воздействия СКИ ЭМИ и позволит исключить случаи выхода из строя элементов БЦВК.

6.3.3 Требования, предъявляемые к средствам защиты от СК ЭМИ

Основные требования, предъявляемые к средствам защиты от СК ЭМИ:

- обеспечение минимального влияния на работу комплекса при отсутствии ЭМП;
- реакция на высокую скорость нарастания тока и напряжения;

- соответствующие статистические и динамические характеристики, а также достаточная токовая пропускная способность.

С топологической точки зрения может быть рассмотрено два подхода:

- общая защита одного или нескольких устройств БЦВК;
- отдельная защита каждого устройства или защита целого комплекса, включающего в себя несколько устройств.

При выборе структуры сигнала также необходимо учитывать, что:

- к уменьшению степени влияния ЭМП приводит обеспечение жесткой временной привязки последовательности единичных сигналов;
- вероятность ошибок, вызываемых импульсными помехами, в системе связи с фазовой модуляцией в два раза меньше, чем при когерентном приеме сигналов с амплитудной и частотной модуляциями (при одной и той же мощности полезного сигнала).

Одним из направлений повышения стойкости БЦВК к воздействию ЭМП является *использование алгоритмических методов*. Например, в разрабатываемых БЦВК может быть реализована программа с неполным алгоритмом декодирования, отказывающаяся от декодирования любой достаточно сомнительной последовательности единичных сигналов (может применяться, когда ошибка декодирования недопустима).

Формируемые команды от блоков управления внешними устройствами обнаружения СКИ ЭМИ должны отвечать следующим требованиям к разрабатываемым средствам защиты инфокоммуникационных систем от деструктивного воздействия СКИ ЭМИ:

- Обеспечивать поступление команд операционным системам или другим средствам программного управления элементов бортовых систем о запуске процессов приостановки вычислительных операций или завершения работы.
- Обеспечивать запуск программ по созданию резервных копий массивов информации, находящихся в обработке.
- Обеспечивать возможность управления маршрутизаторами или управляемыми коммутаторами по выбору резервных маршрутов доставки информа-

ции, перенаправлению информационных потоков.

- Обеспечивать кросс-платформенность применения, учитывать особенности функционирования средств программного управления всех элементов сети.

Кроме того, рекомендуются следующие требования к разрабатываемым программным комплексам, реализацию алгоритма работы современных сетевых устройств по передачи и обработки потоков цифровых информационных сигналов в соответствии с современными телекоммуникационными протоколами сетевого обмена:

- Структура функциональной схемы разрабатываемого программного обеспечения (ПО) должна включать блоки, реализующие алгоритм, позволяющий определять частоту возникновения фактов искажения информационных единиц (пакетов, кадров) в тракте передачи цифровой информации.

- Разрабатываемое ПО должно иметь информационную базу данных для накопления и хранения информации о характеристиках современных генераторов СКИ ЭМИ. В том числе в базе данных должна храниться информация о таких параметрах, как частота и длительность импульсов известных источников СКИ ЭМИ.

- Разрабатываемое ПО должно позволять проводить сравнительный анализ таких параметров, как частоты возникновения искажений в информационном тракте БЦВК и частоты следования импульсов, формируемых современными генераторами СКИ ЭМИ.

- При выявлении факта воздействия СКИ, ПО должно предлагать варианты для принятия решений по управлению дальнейшей работы БЦВК.

- ПО должно обеспечивать возможность по формированию и передачи на центральную шину обмена данными команд управления о прекращении дальнейшей работы вычислительного комплекса (сервера, маршрутизатора).

- ПО должно обеспечивать возможность по формированию команд управления о запуске системных программ, как правило, включенных в структуру операционных систем по созданию и сохранению образов (копий программных кодов) запущенных вычислительных процессов. Это необходимо

для оптимизации процедуры восстановления и корректности загрузки операционной системы во время очередного запуска вычислительного комплекса после остановки по причине наличия искажений в информационном тракте или сбое в работе отдельных элементов БЦВК из-за воздействия источников СКИ ЭМИ.

- ПО должно разрабатываться с учетом кросс-платформенного применения и унификации вырабатываемых команд управления и учитывать особенности функционирования каждой операционной системы (MS Windows Server, Linux, Unix, IOS, Free BSD) или системного программного обеспечения, используемого для управления функционированием БЦВМ, маршрутизаторов, коммутаторов, межсетевых экранов и других телекоммуникационных элементов БЦВК.

Кроме предложенных требований к разрабатываемым средствам защиты от деструктивного воздействия СКИ ЭМИ необходимо учитывать также, что применение специальных схемных решений, выбора параметров используемых сигналов и методов их обработки может оказаться наиболее эффективным методом обеспечения устойчивости, т.к. не потребует применения средств защиты от помех по всем путям их распространения.

6.4 Модельные эксперименты по оценке эффективности функционирования ИСАУ БЦВК к деструктивному воздействию ЭМИ

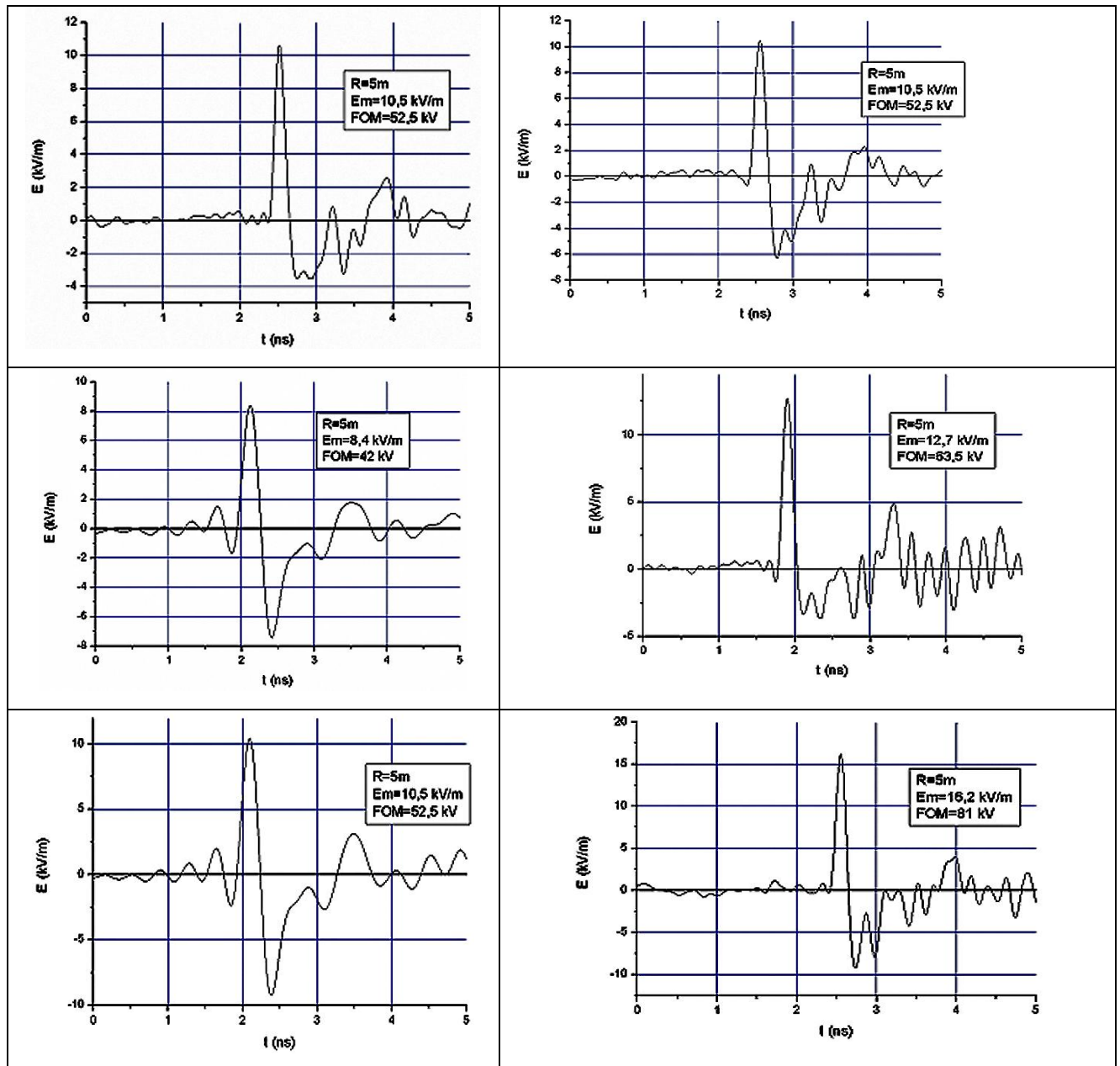
В модельных экспериментах рассматривались следующие режимы работы СОДЭМВ по обнаружению воздействия на БЦВК деструктивных ЭМИ:

- 1) на основе анализа параметров искажений информационного потока в условиях воздействия ЭМИ;
- 2) на основе анализа информации датчиков обнаружения ЭМВ.

Адаптивные свойства ИСАУ БЦВК базировались на механизмах нейронных сетей, а обучающим фактором являлись присутствующие в данных скрытые закономерности и информационная избыточность. Начальная настройка НС производится на наборе известных ЭМ воздействий, составляющих обу-

чающую выборку входных векторов. В проведенных модельных экспериментах для этих целей использовался следующий набор известных ЭМ воздействий (таблица 6.6). Нейронная сеть производит классификацию известных ЭМ воздействий, формирует кластеры, который соответствуют реальной кластеризации векторов в обучающей выборке через адаптивный подбор числа нейронов-прототипов.

Т а б л и ц а 6.6 - Осциллограммы модельных ЭМ воздействий



Процесс адаптации состоит в сравнении очередного вектора ЭМ воздействий с функциональными параметрами нейронов-прототипов, в результате чего входной вектор либо будет отнесен к одному из известных классов

ЭМ воздействий (по критерию близости к функциональным параметрам одного из нейронов-прототипов), либо будет произведено расширение классификации за счет добавления нового нейрона-прототипа с параметрами предъявленного вектора.

Нейронная сеть производит классификацию известных ЭМ воздействий, формирует кластеры, который соответствуют реальной кластеризации векторов в обучающей выборке через адаптивный подбор числа нейронов-прототипов. Процесс адаптации состоит в сравнении очередного вектора ЭМ воздействий с функциональными параметрами нейронов-прототипов, в результате чего входной вектор либо будет отнесен к одному из известных классов ЭМ воздействий (по критерию близости к функциональным параметрам одного из нейронов-прототипов), либо будет произведено расширение классификации за счет добавления нового нейрона-прототипа с параметрами предъявленного вектора.

В рабочем режиме ИСАУ сформированная при обучении система кластеров либо отнесет поступивший со схем контроля вектор ошибок к уже известным нарушениям в передаваемых по интерфейсу сообщениях (классифицирует вид и степень искажения сообщения и проведет коррекцию своих функциональных параметров), либо создаст новый кластер (нейрон-прототип с параметрами новой угрозы).

При загрузке данных с узла на F_{S1} параллельно создавался пакет инструкций для текущего сеанса передачи. В пакет инструкций записывалась следующая информация: 1) осуществить доставку из F_{S1} в F_{S7} ; 2) в течение текущей передачи использовать от одной до трех БЦВМ, выполненных в защищенном исполнении, из набора F_{S2} , F_{S3} , F_{S4} , F_{S5} , F_{S6} . Каждая из БЦВМ, участвующая в текущей передаче, добавлял в пакет инструкций информацию о себе.

Данная топология бортовой сети подвергалась имитации ЭМ воздействия на БЦВМ F_{S4} и на шину 45. В проведенных модельных экспериментах использовался следующий набор известных ЭМ воздействий (таблица 6.7).

Специально написанное приложение обрабатывало результаты испытаний, по которым осуществлялось построение графов маршрутов (рисунок 6.23). Вес ребра характеризует количество прохождений трафика между БЦВМ - вершинами данного ребра без учета направления следования.

В процессе передачи с помощью S_M данные проходят через некоторое число БЦВМ (активных элементов бортовой сети), равное f .

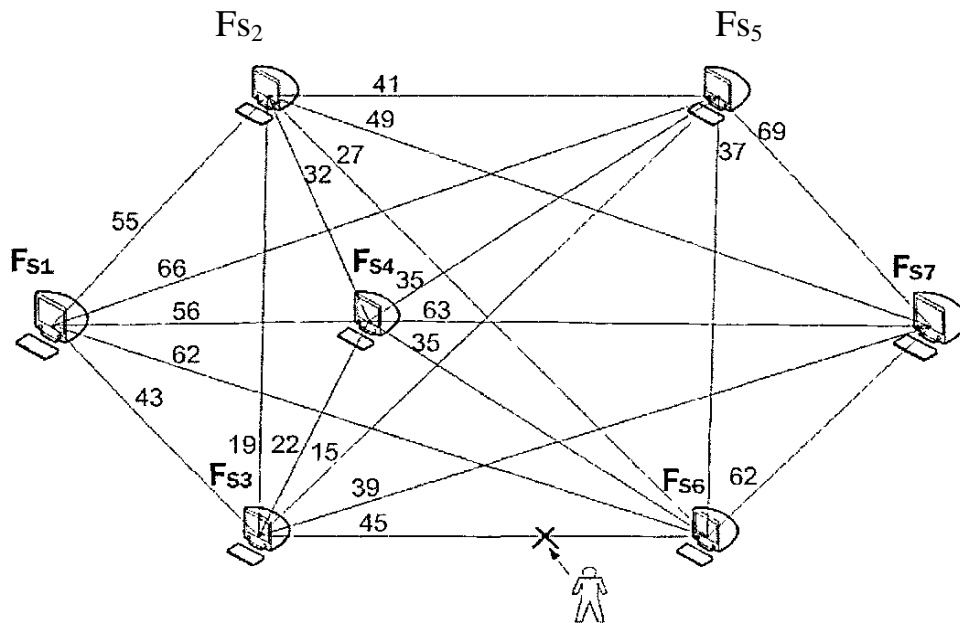
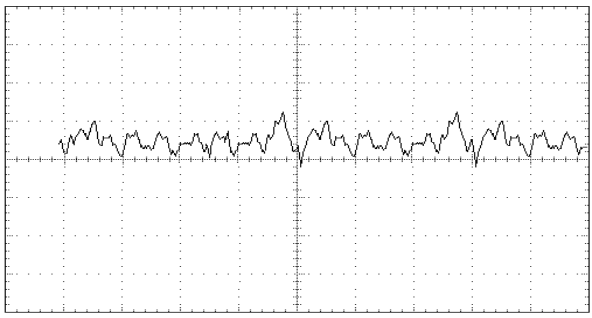
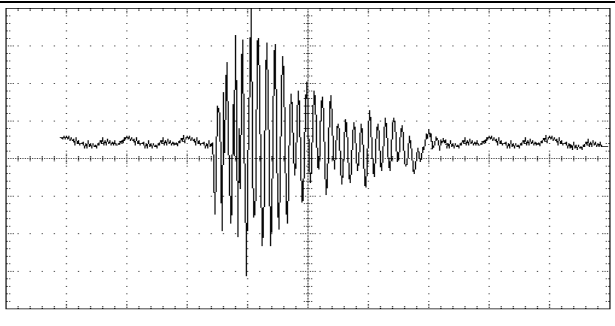
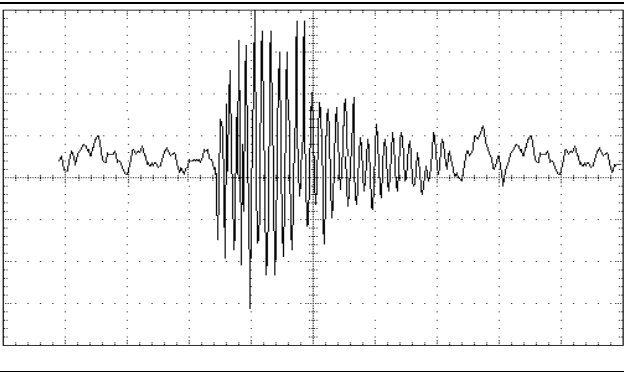
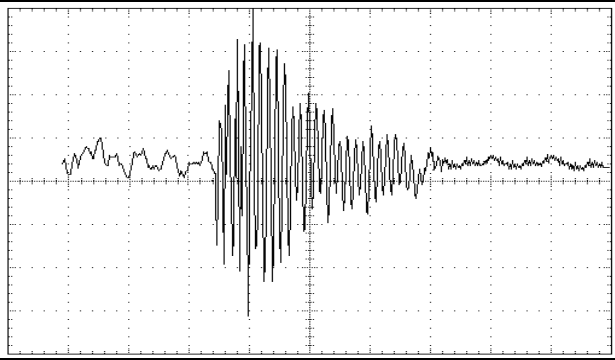
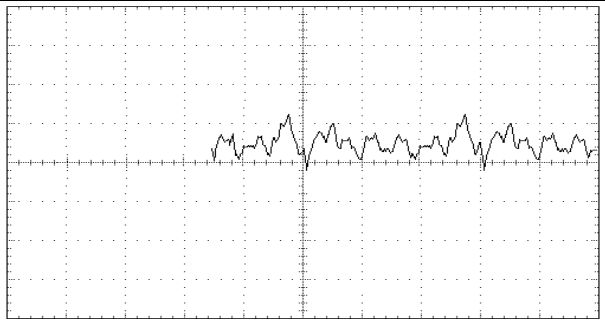


Рисунок 6.23 - Результаты апробации S_m в сети с 7 БЦВМ, выполненные в защищенном исполнении

Выбор каждой следующей БЦВМ происходит динамически. Учитывая процедуру определения таблиц маршрутизации для S_{Ms} , выбор каждой следующей БЦВМ описывается гипергеометрическим распределением.

На рассмотренном в предыдущем разделе алгоритме динамической маршрутизации базируется методика защиты информации от воздействия деструктивных ЭМИ при передаче в бортовых сетях в условиях воздействия преднамеренных ЭМ воздействий. Реализация данной методики заключается во внесении в существующую архитектуру бортовой сети нескольких БЦВМ, выполненных в защищенном исполнении, с S_{Ms} корректирующих работу протоколов маршрутизации для маркированной информации.

Т а б л и ц а 6.7 - Осциллограмма наведенных импульсных помех

а) передаваемые данные	
б) без передачи данных по каналу 45	
в) при передаче данных по каналу 45 (спецификация 1000Base-T)	
г) при передаче данных по каналу 45 и использовании «маршрутизируемого сервиса»	
д) использование «маршрутизируемого сервиса» и перенаправление данных по трассе 66, 69	

Маршрутизируемый сервис основывается на двух компонентах: БЦВМ (активных элементов бортовой сети), выполненных в защищенном исполнении,

на которых установлена управляющая часть маршрутизируемого сервиса S_{Ms} , и маркированных пакетах.

Самое основное преимущество системы «маршрутизируемый сервис», которое стоит отметить, – стойкость системы к ЭМ воздействию. Благодаря предлагаемому алгоритму динамической маршрутизации система не ожидает восстановления работоспособности недоступных БЦВМ и других элементов бортовой сети, а динамически перестраивает маршрут следования трафика. Каждая из БЦВМ «самостоятельно» выбирает следующий элемент бортовой сети для передачи данных.

Осциллограмма наведенных импульсных помех в рассматриваемом примере представлена в таблице 6.7.

По условиям эксперимента число используемых БЦВМ, выполненных в защищенном исполнении, f в каждом сеансе передачи равновероятно выбиралось от одного до трех. Это означает, что до момента прибытия в F_{S7} пакет мог побывать на одной, двух или трех БЦВМ, выполненных в защищенном исполнении.

При загрузке данных с узла на F_{S1} параллельно создавался пакет инструкций для текущего сеанса передачи. В пакет инструкций записывалась следующая информация:

- 1) осуществить доставку из F_{S1} в F_{S7} ;
- 2) в течение текущей передачи использовать от одного до трех БЦВМ из набора $F_{S2}, F_{S3}, F_{S4}, F_{S5}, F_{S6}$. Каждая из БЦВМ, участвующая в текущей передаче, добавляла в пакет инструкций информацию о себе.

После проведения сеансов передачи получен следующий эффект:

- 1) процент потерь пакетов в момент, когда БЦВМ недоступна M_5 – 15%.
- 2) процент искаженных пакетов M_3M_6 – 16%.

Полученные оценки реализации ЭМ воздействий показывают, что применение приложения «маршрутизируемый сервис» позволяет повысить стойкость передачи информации в бортовых сетях. Повышение стойкости информации в бортовых сетях при использовании Sm достигается за счет повышения защиты ее целостности и доступности.

Целостность передаваемой информации обеспечивается уменьшением вероятности реализации ЭМ воздействий на контролируемых участках следования трафика в случае применения маршрутизируемого сервиса. Доступность обосновывается стойкостью системы к блокированию одной или нескольких БЦВМ, выполненных в защищенном исполнении. В случае сбоя в работе одной или нескольких БЦВМ, выполненных в защищенном исполнении, маршрутизируемый сервис моментально перестраивает маршрут следования трафика до того времени, пока работоспособность БЦВМ не восстановится. Следует также еще одно важное качество - каждая из БЦВМ, выполненных в защищенном исполнении, может динамически вносить изменения в маршрут следования трафика.

Рассчитаем вероятность реализации ЭМ воздействия, например, на контролируемом участке $F_{S3}F_{S6}$. Данную оценку можно вычислить по формуле

$$R_A = \frac{N_K}{N} \quad (6.1)$$

где N_K - количество исходов (сеансов), содержащих контролируемый участок, N - общее количество исходов (сеансов) в испытании.

$$R_A = \frac{45}{282} = 0,1596.$$

Напомним, что по условиям эксперимента число используемых БЦВМ, выполненных в защищенном исполнении, f в каждом сеансе передачи равновероятно выбиралось от одного до трех. Это означает, что до момента прибытия в F_{S7} пакет мог побывать на одной, двух или трех БЦВМ, выполненных в защищенном исполнении. Формула (6.1) может дать теоретическую оценку для R_A в том случае, если f не меняется в течение всего эксперимента. Вычислим теоретическую оценку $R_{A теор}$ для $f=2$ (среднее целое из значений в эксперименте). Коэффициенты $F_{SI} = F$, все БЦВМ были работоспособны во время испытаний. Общее число БЦВМ, выполненных в защищенном исполнении, $F = 6$, F_{SI} не учитывается, так как она выступала в роли отправителя.

$$R_{AT} = \frac{2}{6} \cdot \frac{1}{5} + \frac{4}{6} \cdot \frac{2}{5} \cdot \frac{1}{4} = 0,1333. \quad (6.2)$$

Вывод о соответствии теоретических представлений и практических результатов работы S_M был сделан после проведения большого числа испытаний.

Главное преимущество системы «маршрутизируемый сервис», которое стоит отметить, подводя итог исследованию деструктивных ЭМ воздействий на БЦВК - стойкость системы к ЭМ воздействию.

В связи с потребностью проведения большого числа испытаний для оценки среднеквадратичного отклонения также реализован программный прототип «маршрутизируемого сервиса», позволяющий генерировать топологии сетей, задавать контролируемые участки и осуществлять сеансы передачи. Логика его работы заключается в следующем.

Шаг 1. В текущей топологии задается один контролируемый участок.

Шаг 2. Для каждой топологии для вычисления оценки R_{Acp} проводится пробная серия экспериментов, включающая 30 экспериментов по 10000 испытаний (сеансов передачи).

Шаг 3. По результатам оценки R_{Acp} вычисляется $N_{кр}$ (P_d , ε) критическое значение необходимого количества испытаний в эксперименте. Доверительная вероятность принимается равной $P_d=0,95$, доверительный интервал $\varepsilon=0,001$.

Шаг 4. Проводится эксперимент, состоящий из $N_{кр}$ сеансов передачи. По результатам эксперимента вычисляется R_{Anp} .

Шаг 5. Если колебание значения оценки R_{Anp} относительно теоретической оценки R_{Am} меньше заданной точности, то экспериментальная оценка R_{Anp} принимается достоверной.

В результате пробной серии экспериментов получена оценка реализации ЭМ воздействий на контролируемом участке R_{Ai} . Данная оценка рассчитана по формуле

$$R_{Ai} = \frac{N_K}{N} \quad (6.3)$$

где N_K – количество исходов (сеансов), содержащих контролируемый участок, N – общее количество исходов (сеансов) в эксперименте, i – номер эксперимента.

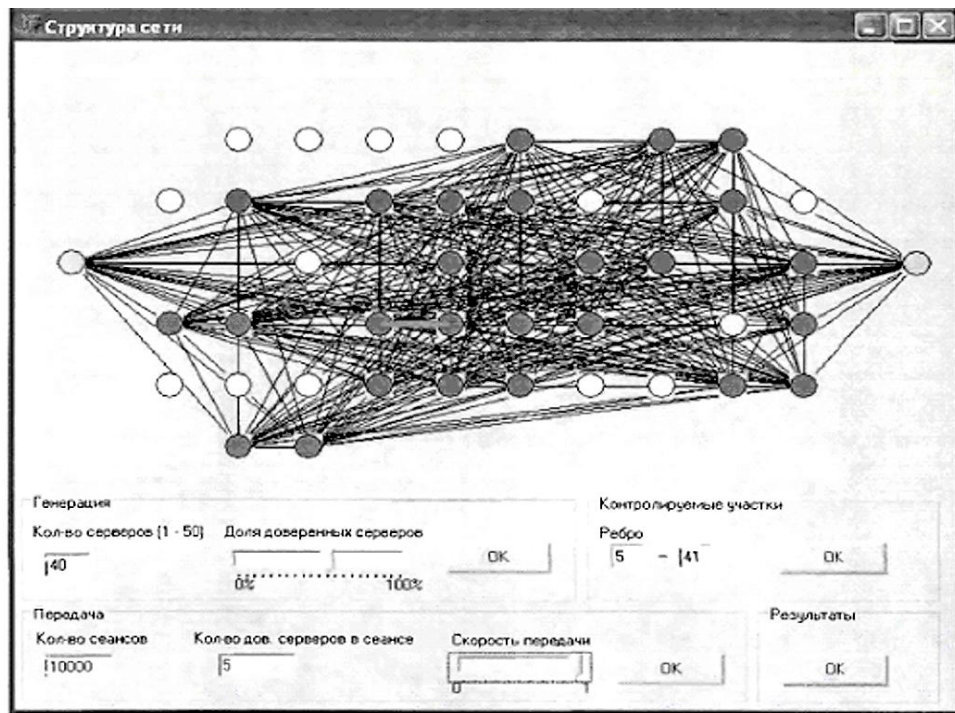


Рисунок 6.24 - Интерфейс программной среды имитации функционирования бортовой сети

Результаты 30 экспериментов представлены в сводную таблицу (таблице 6.8).

Т а б л и ц а 6.8 - Сводная таблица по результатам эксперимента

i	N_i	Топология А		Топология Б	
		N_{ki}	R_{Ai}	N_{ki}	R_{Ai}
1	1000	869	0,0869	119	0,019
2	1000	865	0,0865	145	0,0145
3	1000	884	0,0884	120	0,0120
4	1000	828	0,0828	118	0,0118
5	1000	876	0,0876	142	0,0142
6	1000	910	0,0910	129	0,0129
7	1000	857	0,0857	148	0,0148
8	1000	946	0,0946	124	0,0124
9	1000	880	0,0880	138	0,0138
10	1000	871	0,0871	122	0,0122
11	1000	895	0,0895	119	0,0119
12	1000	901	0,0901	148	0,0148
13	1000	921	0,0921	111	0,0111
14	1000	867	0,0867	137	0,0137

15	1000	960	0,0960	127	0,0127
16	1000	858	0,0858	127	0,0127
17	1000	872	0,0872	109	0,0109
18	1000	891	0,0891	118	0,0118
19	1000	881	0,0881	117	0,0117
20	1000	909	0,0909	122	0,0122
21	1000	854	0,0854	129	0,0129
22	1000	923	0,0923	125	0,0125
23	1000	911	0,0911	116	0,0116
24	1000	882	0,0882	113	0,0113
25	1000	926	0,0926	117	0,0117
26	1000	874	0,0874	131	0,0131
27	1000	870	0,0870	103	0,0103
28	1000	877	0,0877	133	0,0133
29	1000	924	0,0924	129	0,0129
30	1000	871	0,0871	113	0,0113

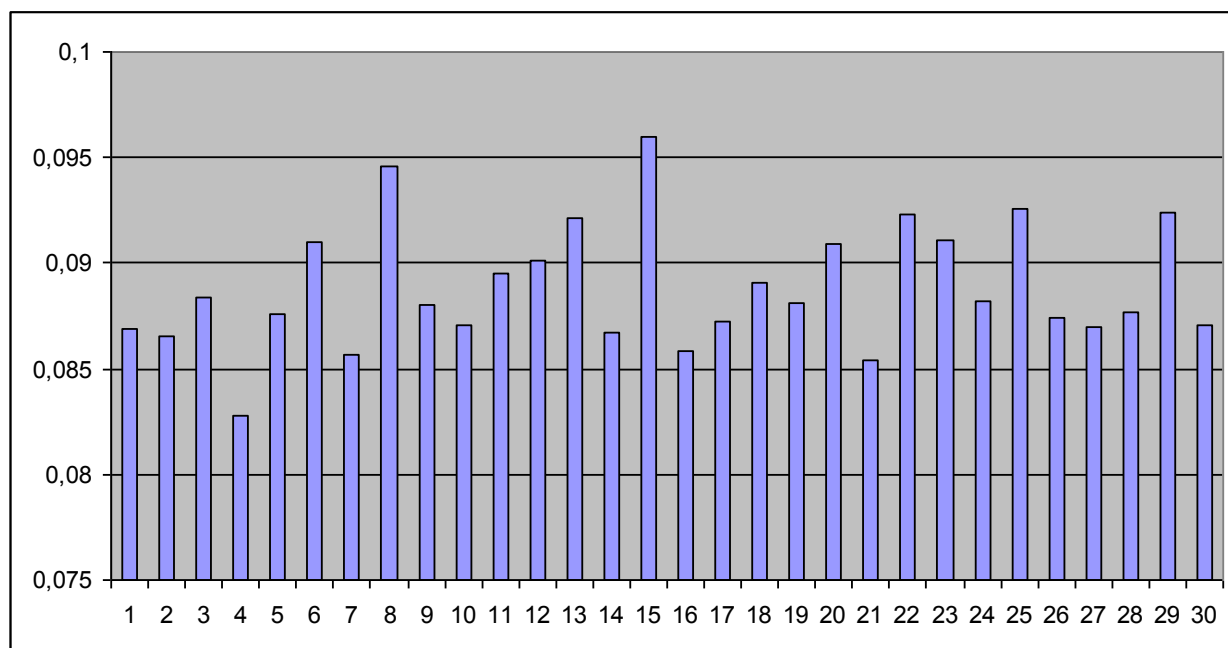


Рисунок 6.25 - Диаграмма значений R_{Ai} (испытания на топологии А)

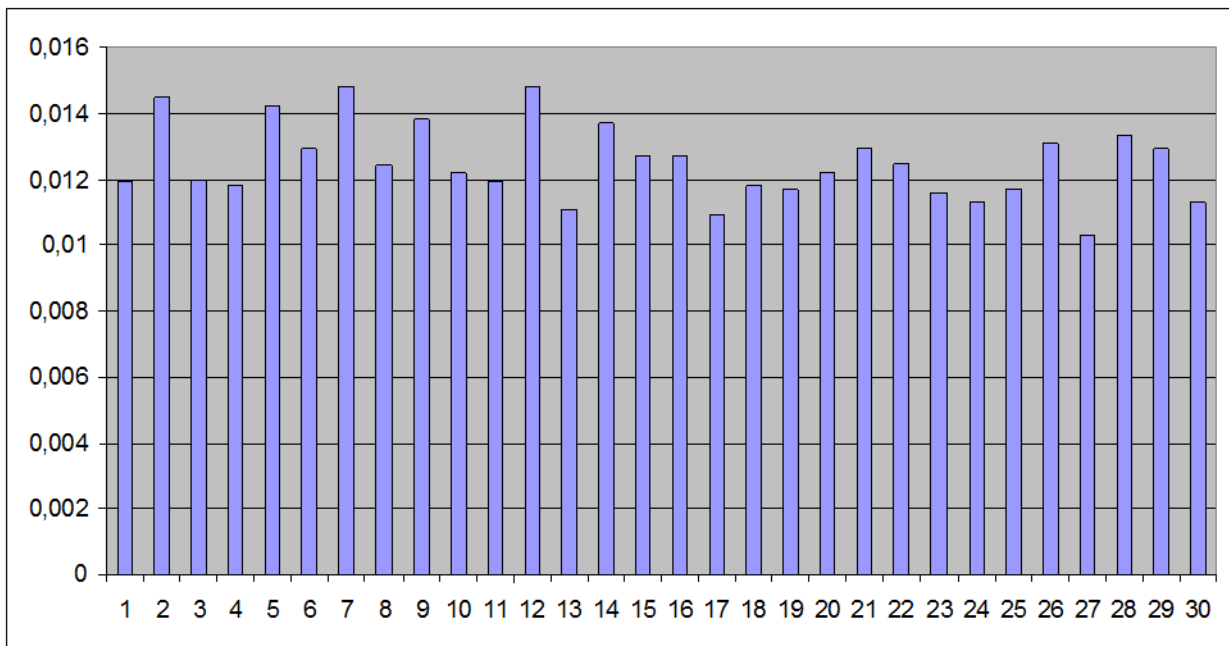


Рисунок 6.26 - Диаграмма значений R_{Ai} (испытания на топологии Б)

Средняя оценка реализации ЭМ воздействия на контролируемом участке будет равна для топологии А:

$$R_{AcpA} = \frac{\sum_{i=1}^{30} R_{Ai}}{10} = 0,0888 \quad (6.4)$$

для топологии Б:

$$R_{AcpB} = \frac{\sum_{i=1}^{30} R_{Ai}}{10} = 0,0125 \quad (6.5)$$

Критическое значение необходимого количества испытаний в эксперименте вычислено согласно следствию из центральной предельной теоремы

$$N_{Kp} = \frac{R_{Acp} \cdot (1 - R_{Acp})}{\varepsilon^2} \cdot \left(F^{-1}(P_\delta) \right)^2 \quad (6.6)$$

где F^{-1} – обратная функция Лапласа.

Из формулы (6.6), учитывая оценки (6.4) и (6.5), а также $\varepsilon = 0,001$ и табличное значение $(F^{-1}(0,95))^2 = 3,84$, вычислены значения N_{KpA} и N_{KpB} : $N_{KpA} = 310712$, $N_{KpB} = 47400$.

R_{Anp} вычислена по формуле (6.3) по результатам экспериментов с количеством испытаний N_{KpA} и N_{KpB}

$$R_{Anp A} = \frac{N_{\kappa}}{N_{Kp A}} = \frac{27855}{310712} \approx 0,0896,$$

$$R_{Anp B} = \frac{N_{\kappa}}{N_{Kp B}} = \frac{582}{47400} \approx 0,0123.$$

Вычислим оценку реализации ЭМ воздействий на контролируемом участке, приняв допущение, что все БЦВМ работоспособны во время испытаний (параметры $|F_{Si}^{docm}| = F$)

$$R_{Am A} = \frac{2}{10 \cdot 9} + \sum_{i=1}^3 \left[\left(\frac{2}{10-i} \cdot \frac{1}{10-i-1} \right) \cdot \prod_{j=1}^i \left(\frac{10-j-1}{10-j+1} \right) \right] = 0,0889 \quad (7.19)$$

$$R_{Am B} = \frac{2}{26 \cdot 25} + \sum_{i=1}^3 \left[\left(\frac{2}{26-i} \cdot \frac{1}{26-i-1} \right) \cdot \prod_{j=1}^{i-1} \left(\frac{26-j-1}{26-j+1} \right) \right] = 0,0123 \quad (7.20)$$

Колебание значения оценок $R_{Anp A}$ и $R_{Anp B}$ относительно теоретических оценок $R_{Am A}$ и $R_{Am B}$ меньше заданной точности $\varepsilon = 0,001$, поэтому можно сделать вывод о соответствии практических результатов теоретическим представлениям работы сервиса S_M с доверительной вероятностью 0,95.

Результаты экспериментальных исследований подтвердили применимость разработанной методики.

6.5 Выводы по главе

1. Анализ стандартов МЭК и возможностей существующих отечественных излучателей СКИ ЭМП показывает, что основные требования к БЦВК, средствам метрологического обеспечения испытаний БЦВК на стойкость к преднамеренным ЭМИ должны разрабатываться, исходя из ЭМП со следующими параметрами:

- напряженность электрического поля в диапазоне от 1 кВ/м до 150 кВ/м; длительность фронта импульса – от 0,1 нс до 0,5 нс;

- длительность импульса – доли и единицы наносекунд; частота повторения импульсов – от 1 кГц до 1 МГц.

Требования разработаны с целью научно-методического обеспечения исследовательских испытаний составных частей БЦВК на стойкость к воздействию сверхкороткого импульсного электромагнитного поля.

2. Показано, что при проведении испытаний БЦВК на воздействие СКИ ЭМП необходимо проводить определение следующих параметров излучения: амплитуду, длительность фронта импульса по уровням 0,1-0,9 от амплитуды и длительность импульсов на уровне 0,5 от амплитуды на выходе возбуждающего генератора импульсов антенной системы.

Для выполнения поставленных задач наиболее подходит полосковый измерительный преобразователь типа ИППЛ-Л, который является наиболее точным средством измерений, так как он имеет ступенчатую переходную характеристику, позволяющую осуществлять преобразование сигнала электрического поля в сигнал напряжения той же формы с минимальными искажениями.

3. Определены требования к характеристикам излучателей для испытаний БЦВК.

Выбраны излучатели сверхкоротких ЭМИ, на основе полупроводниковых генераторов, производства ЗАО «ФИД Техника». Максимальная частота повторения до 50 МГц, возможность внешнего запуска, максимальное выходное напряжение генератора до 200 кВ. В качестве АФС используются следующие типы: антенна с рефлектором и решетка из ТЕМ-рупоров.

5. Разработаны требования к БЦВК в условиях воздействия СК ЭМИ, установлены параметры испытательных воздействий, виды испытаний.

Методы и средства испытаний, критерии оценки стойкости БЦВК требуют дальнейших исследований. В частности, в известных работах не учитывается влияние на результаты испытаний поляризация поля и частоты следования импульсов. В стандартах в качестве показателей устойчивости к воздействию ЭМИ выбраны максимальные значения амплитудно-временных характеристик импульсного ЭМП. В основном рассматриваются методы испытаний для

оценки соответствия требований, заданных в ТЗ и записанных в нормативных документах.

6. Проведены экспериментальные исследования воздействия СКИ ЭМИ на различные типы БЦВК, включая БЦВМ и каналы передачи данных и управления, которые показали, что данные воздействия вызывают нарушения в работе практически всех из перечисленных изделий. Без разработки и применения специальных методов и средств защиты, учитывающих особенности поражающего действия СК ЭМП, работа данной аппаратуры будет невозможной.

7. Анализ полученных экспериментальных данных и механизмов воздействия СКИ ЭМП на УОВ подтвердил адекватность разработанных моделей взаимодействия мощных ЭМИ с элементами БЦВК для интеллектуального анализа и оценки устойчивости их к деструктивному воздействию СК ЭМИ, и показал, что сбои, системные отказы и нарушение функционирования возникают в основном за счет недостаточной эффективности экранирования бортовой кабельной сети БЦВК, которые в свою очередь, выявляются, как правило, при испытаниях и в процессе эксплуатации.

8. По результатам проведенных исследований разработаны рекомендации по совершенствованию методов и средств защиты БЦВК от воздействия СКИ ЭМП.

9. Обоснованы практические рекомендации по результатам экспериментальных исследований БЦВК, в частности предложено в целях уменьшения электромагнитных помех задавать требования к экранам кабельных линий в связи с тем, что сбои в работе БЦВК при воздействии СКИ ЭМП происходили из-за недостаточной эффективности экранирования кабельных линий и наличия неоднородностей в экранах.

10. Проведен анализ эффективности существующих и перспективных средств защиты слаботочных элементов БЦВК при воздействии наносекундных импульсных перенапряжений. Показано, что существующие защитные средства в части быстродействия практически не позволяют обеспечить эффективную

защиту БЦВК от действия данных поражающих факторов, поэтому необходима разработка целевым назначением принципиально новых методов и средств защитных устройств.

11. Разработаны системные методы защиты БЦВК от СКИ ЭМИ с использованием структурно-функциональных и алгоритмических подходов к построению системы защиты от воздействия импульсного ЭМИ.

12. Сформулированы требования к разрабатываемым программным комплексам, обеспечивающим реализацию алгоритма работы современных сетевых устройств по передаче и обработке потоков цифровых информационных сигналов в соответствии с современными телекоммуникационными протоколами сетевого обмена.

13. Разработана программа по обеспечению устойчивости БЦВК к воздействию СК ЭМИ, в соответствии с которой, предложенный в работе научно-методический аппарат и методы экспериментальных исследований позволяют адекватно оценить стойкость БЦВК при воздействии преднамеренных импульсных сверхкоротких электромагнитных импульсов.

14. Полученные оценки реализации ЭМВ показывают, что применение приложения «сервис маршрутизации» позволяет повысить стойкость передачи информации в бортовых сетях. В случае сбоя в работе одной или нескольких БЦВМ в защищенном исполнении, сервис моментально перестраивает маршрут следования трафика до того времени, пока работоспособность БЦВМ не восстановится. Следует также еще одно важное качество - каждая из БЦВМ в защищенном исполнении может динамически вносить изменения в маршрут следования трафика.

15. Результаты экспериментальных исследований подтвердили применимость разработанной методики. Колебание значения оценок $R_{\text{Апр } A}$ и $R_{\text{Апр } B}$ относительно теоретических оценок $R_{\text{АМ } A}$ и $R_{\text{АМ } B}$ меньше заданной точности $\epsilon = 0,001$ поэтому можно сделать вывод о соответствии практических результатов теоретическим представлениям работы сервиса S_M с доверительной вероятностью 0,95.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основным результатом, определяющим научную и практическую значимость работы, является решение проблемы создания перспективных помехоустойчивых бортовых вычислительных комплексов на основе:

- разработки новой методологии оценки устойчивости БЦВК с использованием современных методов и моделей интеллектуальной системы анализа и оценки устойчивого функционирования БЦВК в условиях преднамеренного воздействия СКИ ЭМИ,

- разработки системных методов обеспечения устойчивости БЦВК к электромагнитным воздействиям, позволяющих реализацию минимальной уязвимости (защиты) БЦВК, минимизацию временных затрат на восстановление БЦВК после сбоев вызванных этим электромагнитным воздействием, что дает возможность обеспечить эффективное функционирование бортовых систем управления в условиях воздействия СК ЭМИ.

В ходе выполнения настоящей диссертационной работы автором получены следующие основные результаты:

1. Проведен аналитический обзор исследований по теме диссертации, выполненных ранее отечественными и зарубежными авторами. Показано, что существует потенциальная угроза проведения поражающих электромагнитных атак с использованием источников СК ЭМИ. В связи с этим в России и за рубежом ведется активная деятельность по разработке стандартов и рекомендаций по защите информационных и телекоммуникационных объектов от ПД ЭМВ, а также их обнаружению.

2. Проведен аналитический обзор методов и средств оценки влияния СК ЭМИ на информационные и телекоммуникационные системы, в том числе БЦВК, который показал, что существующие методы априорной оценки их устойчивости к воздействию СК ЭМИ в основном носят общий постановочный характер или в целом недостоверны из-за несовершенства имеющегося математического аппарата. Кроме того, не всегда можно получить достоверные

данные одними аналитическими методами из-за многообразия способов построения и действия БЦВК, из-за сложности учета реальных электромагнитных связей с окружающим пространством, а также отсутствием эффективных механизмов, обеспечивающих возможность определения и исправления периодических искажений в потоке обрабатываемой информации БЦВК в реальном режиме времени. В связи с этим:

- назрела необходимость пересмотра традиционных подходов к обеспечению работоспособности БЦВК при воздействии на его элементы СК ЭМИ в рамках новой методологической системы, позволяющей не только оценивать уровень устойчивости бортовых цифровых вычислительных комплексов к деструктивному воздействию СК ЭМИ, но и обеспечивать требуемый уровень устойчивости путем реализации перспективных эффективных мер;

- для достоверной оценки устойчивости БЦВК к воздействию СК ЭМИ требуется разработка принципиально новых расчетных методов и моделей анализа и оценки воздействия полей ЭМИ с возможностью их интеграции в рамках единого комплекса, позволяющего проводить интеллектуальный анализ и оценку параметров искажений информационного потока в системе для предотвращения деструктивного действия СК ЭМИ на БЦВК и его элементы.

3. Разработана методология интеллектуального анализа данных в задачах оценки устойчивости БЦВК к деструктивному воздействию СК ЭМИ, в частности:

- обосновано, что для разработки адаптивных средств обнаружения деструктивных ЭМВ на элементы и узлы БЦВК необходимо использовать интеллектуальные механизмы нейронных сетей, нечеткой логики и гибридных, в частности, нейро-нечетких систем, а также методы генетических алгоритмов и эволюционные процессы наследования, развития, адаптации и отбора;

- предложено, при разработке адаптивных средств обнаружения деструктивных ЭМВ на БЦВК использовать такие свойства нейронных сетей (НС), как: возможность классификации признаков воздействий, представление системой нечетких продукционных правил соответствия «признаки воздействия - ЭМВ»,

адаптивность НС и системы нечетких продукционных правил, «прозрачность» для анализа системы нечетких продукционных правил и структуры межнейронных связей нечетких нейронных сетей.

4. Разработаны модели взаимодействия мощных импульсных электромагнитных полей с элементами БЦВК, а именно:

- обоснована математическая модель потерь кадров в каналах передачи данных современных БЦВК на основе технологий Fast, Gigabit Ethernet при воздействии периодических импульсных помех, обобщающая существующую методику расчета вероятностей возникновения ошибок на варианты:

- 3-символьного кодирования MLT-3;

- 5-символьного кодирования PAM-5.

При расчетах учтены избыточность кодирования, вероятности появления символов, возможность коррекции ошибок;

- обоснована необходимость задания в математической модели длины кадра и межкадрового интервала для случая передачи данных в бортовых сетях на основе технологии Gigabit Ethernet, где длина кадра и межкадрового интервала различны в произвольный момент времени. Показано, что учет длин кадров и интервалов между ними сводится к учету среднего значения длины кадра в бортовой сети;

- обосновано, что опасность воздействия СК ЭМИ для микропроцессорных управляющих устройств БЦВК определяется не только амплитудой, фронтом импульса и энергией, но и эффективностью его воздействия по энергии и напряжению.

5. Сформулированы базовые принципы построения ИСАУ БЦВК на основе адаптивной многоуровневой системы обнаружения деструктивных электромагнитных воздействий на элементы и узлы БЦВК, являющейся ядром интеллектуальной системы. При этом нижний уровень решает проблемы оперативной идентификации ЭМВ, а верхний - накопления опыта по обнаружению последствий деструктивных ЭМВ на БЦВК путем использования датчиков, ЭМВ, распределенных по структуре ИСАУ, в частности:

- разработаны принципы построения интеллектуальной системы с использованием адаптивных средств для обнаружения деструктивных ЭМВ на элементы и узлы БЦВК;
- разработана модель интеллектуальной системы анализа устойчивости, согласно которой система обнаружения деструктивных электромагнитных воздействий (СОДЭМВ) на элементы и узлы БЦВК рассматривается как иерархия адаптивной защиты, организованной в виде уровня идентификации деструктивных ЭМВ и уровня накопления опыта по обнаружению ЭМВ на БЦВК. Нижний уровень решает проблемы оперативной идентификации ЭМВ, а верхний – накопления опыта по обнаружению последствий деструктивных ЭМВ на БЦВК путем использования датчиков ЭМВ, распределенных по структуре ИСАУ;
- разработана методика проектирования интеллектуальной системы анализа и оценки устойчивости БЦВК к деструктивному воздействию СК ЭМИ;
- разработаны сценарии работы СОДЭМВ по обнаружению воздействия на БЦВК деструктивных СК ЭМИ;
- разработана система показателей и методика оценки устойчивости БЦВК к деструктивному воздействию ЭМИ, которые позволяют:
 - оптимизировать соотношение «стоимость/эффективность» защиты за счет размещения на иерархических уровнях ИСАУ только необходимых ДЭМВ;
 - отслеживать в динамике наиболее задействованные датчики ЭМВ при изменении известных ЭМВ;
 - формировать спецификацию на отсутствующие датчики ЭМВ;
 - оценивать устойчивость БЦВК к деструктивному воздействию ЭМИ через величины относительного ущерба и интегральные показатели активности распределенных по структуре ИСАУ датчиков ЭМВ.

6. Разработана имитационная модель фрагмента сети Ethernet, позволяющая проводить компьютерные эксперименты по воздействию на физическую среду передачи, используя параметры СК ЭМИ, которые проблематично или пока невозможно воссоздать физически. Для этого выбран пакет MATLAB/ Simulink.

По результатам моделирования определен перечень параметров СК ЭМИ,

в наибольшей степени влияющих на искажение и блокирование передачи данных в сетях Ethernet.

7. Рассмотрено влияние СК ЭМИ на передачу тестового сетевого трафика в сети Ethernet. По результатам экспериментов получены зависимости количества ошибочных кадров от параметров воздействующих периодических импульсных помех.

8. На основе анализа результатов математического моделирования и натурных экспериментов установлено:

- вероятность потерь кадров Ethernet зависит от частоты следования импульсов, длины передаваемых кадров и амплитуды воздействия;

- наибольшую опасность при передаче данных представляют воздействия по проводным линиям связи с использованием емкостной связи, так как при этом форма наведенных периодически повторяющихся импульсов практически не изменяется по сравнению с формой импульса на выходе генератора, тем самым в значительной степени искажая информационные символы;

- отсутствие кодирования с коррекцией ошибок в технологиях Fast и Gigabit Ethernet приводит к существенно большей уязвимости процесса передачи данных при воздействии СК ЭМИ.

9. Разработаны требования к разрабатываемым программным комплексам, обеспечивающим реализацию алгоритма работы современных сетевых устройств по передаче и обработке потоков цифровых информационных сигналов в соответствии с современными телекоммуникационными протоколами сетевого обмена.

10. Разработана процедура динамической маршрутизации трафика. На основе данного алгоритма реализован «маршрутизируемый сервис» передачи данных для бортовой сети. Выработаны основные компоненты, необходимые для функционирования ИСАУ БЦВК. Даны оценки вероятностям ЭМ атак на передаваемую информацию в случае применения «маршрутизируемого сервиса».

11. Полученные оценки реализации ЭМ атак показывают, что применение приложения «маршрутизируемый сервис» позволяет повысить стойкость передачи информации в бортовых сетях. Повышение стойкости информации в

бортовых сетях при использовании Sm достигается за счет повышения защиты ее целостности и доступности. Целостность передаваемой информации обеспечивается уменьшением вероятности реализации ЭМ атак на контролируемых участках следования трафика в случае применения маршрутизируемого сервиса. Доступность обосновывается стойкостью системы к блокированию одной или нескольких БЦВМ, выполненных в защищенном исполнении. В случае сбоя в работе одной или нескольких БЦВМ, выполненных в защищенном исполнении, маршрутизируемый сервис моментально перестраивает маршрут следования трафика до того времени, пока работоспособность БЦВМ не восстановится. Следует также еще одно важное качество разработанного приложения - каждая из БЦВМ, выполненных в защищенном исполнении, может динамически вносить изменения в маршрут следования трафика.

12. В результате программной реализации разработанных методов, был создан прототип системы «маршрутизируемый сервис», а также реализованы модули `mod.Listner` и `mod.Sender(S)` приложения «маршрутизируемы сервис».

13. Результаты экспериментальных исследований подтвердили применимость разработанной методики. Колебание значения оценок $R_{Aпр\ A}$ и $R_{Aпр\ B}$ относительно теоретических оценок $R_{AM\ A}$ и $R_{AM\ B}$ меньше заданной точности $\varepsilon = 0,001$ поэтому можно сделать вывод о соответствии практических результатов теоретическим представлениям работы сервиса S_M с доверительной вероятностью 0,95.

14. Разработано научно-методическое обеспечение проведения экспериментальных исследований на воздействие преднамеренных сверхкоротких электромагнитных излучений на элементы и узлы БЦВК, в частности:

- определены требования к метрологическим, эксплуатационным и конструктивным характеристикам излучателей для испытаний БЦВК, обоснованы требования к характеристикам мощных излучателей СК импульсов, в частности, установлено, что методы оценки устойчивости БЦВК и требования к средствам защиты их от СК ЭМИ должны разрабатываться, исходя из следующих параметров излучателей:

- напряженность электрического поля в диапазоне от 1 до 200 кВ/м;
- длительность фронта импульса от 100 до 500пс;
- длительность импульса от сотен пикосекунд до единиц наносекунд;
- частота повторения импульсов от 0,1 до 1000Гц.

- разработаны требования к БЦВК в условиях воздействия СК ЭМИ, установлены параметры испытательных воздействий, виды испытаний;

- разработаны методы и средства испытаний, порядок проведения испытаний и критерии оценки стойкости БЦВК.

15. Получены новые экспериментальные данные воздействия СКИ ЭМИ на различные типы БЦВК, включая БЦВМ и каналы передачи данных и управления, при этом получены закономерности возникновения ошибок кадров в зависимости от параметров наведенных СК ЭМИ в физической среде Ethernet и параметров сетевого трафика (для высокоскоростных технологий Ethernet).

16. Анализ полученных экспериментальных данных и механизмов воздействия СКИ ЭМП на УОВ подтвердил адекватность разработанных моделей взаимодействия мощных ЭМИ с элементами БЦВК для интеллектуального анализа и оценки устойчивости их к деструктивному воздействию СК ЭМИ, и показал, что сбои, системные отказы и нарушение функционирования возникают в основном за счет недостаточной эффективности экранирования бортовой кабельной сети БЦВК, которые в свою очередь, выявляются, как правило, при испытаниях и в процессе эксплуатации.

17. Проведен анализ эффективности существующих и перспективных средств защиты слаботочных элементов БЦВК при воздействии наносекундных импульсных перенапряжений. Показано, что существующие защитные средства в части быстродействия практически не позволяют обеспечить эффективную защиту БЦВК от действия данных поражающих факторов, поэтому необходима разработка целевым назначением принципиально новых методов и средств защиты.

18. Разработаны системные методы защиты ИС от СКИ ЭМИ с использованием структурно-функциональных и алгоритмических подходов к построению системы защиты ИС от воздействия импульсного ЭМИ на них. В частности, спо-

соб защиты ИС на основе анализа параметров искажений информационного потока в условиях воздействия СКИ ЭМИ и способ защиты ИС на основе применения внешних средств обнаружения СК ЭМИ, позволяющий, оптимизировать соотношение «стоимость/эффективность» защиты за счет размещения на иерархических уровнях ИСАУ только необходимых датчиков ЭМВ и оценивать устойчивость БЦВК к деструктивному воздействию ЭМИ через величины относительного ущерба и интегральные показатели активности распределенных по структуре ИСАУ датчиков ЭМВ.

19. Разработаны конкретные рекомендации по совершенствованию методов и средств защиты БЦВК от воздействия СКИ ЭМП, так установлено:

- что в экранированной витой паре (UTP) при отсутствии заземления экранирующей оболочки экран не обеспечивает защиту от СК ЭМИ, а только ухудшает соотношение «сигнал — шум» в линии связи;

- предложен метод по защите сетей Ethernet от воздействия СК ЭМИ, который базируется на принципах защиты передаваемой информации, а не защиты оборудования приема/передачи. Показано, что отсутствие кодирования с коррекцией ошибок в технологиях Fast и Gigabit Ethernet приводит к существенно большей уязвимости процесса передачи данных при воздействии СК ЭМИ.

20. Разработана программа по обеспечению устойчивости БЦВК к воздействию СК ЭМИ, в соответствии с которой, предложенный в работе научно-методический аппарат и методы экспериментальных исследований позволяют достоверно оценить стойкость БЦВК при воздействии преднамеренных импульсных сверхкоротких электромагнитных импульсов.

Таким образом, разработана новая методология, направленная на решение актуальной проблемы обеспечения устойчивости функционирования бортовых вычислительных управляющих комплексов в условиях воздействия СК ЭМИ, позволяющая проводить интеллектуальный анализ и оценку параметров искажений информационного потока в системе для предотвращения деструктивного действия

СК ЭМИ на БЦВК, включая минимизацию временных затрат на восстановление БЦВК после сбоев вызванных этими воздействиями.

Личный вклад автора

Характеризуя работу и полученные результаты в целом, следует заключить, что в диссертации осуществлено теоретическое обобщение и решение научной проблемы создания перспективных помехоустойчивых бортовых вычислительных комплексов на основе разработки новой методологии оценки устойчивости БЦВК с использованием современных методов и моделей интеллектуальной системы анализа и оценки устойчивого функционирования БЦВК в условиях преднамеренного воздействия СКИ ЭМИ.

Основные результаты теоретических и экспериментальных исследований получены автором самостоятельно и соответствуют пунктам 3, 11 и 12 паспорта специальности 05.12.13 – Системы, сети и устройства телекоммуникаций.

В частности, автором предложены: обобщенное рассмотрение методов и средств оценки влияния СК ЭМИ на информационные и телекоммуникационные системы; разработаны модели взаимодействия мощных импульсных электромагнитных полей с элементами БЦВК; разработана методология интеллектуального анализа данных в задачах оценки устойчивости БЦВК к деструктивному воздействию СК ЭМИ и принципы построения интеллектуальной системы; разработано научно-методическое обеспечение проведения экспериментальных исследований на воздействие преднамеренных сверхкоротких электромагнитных излучений на элементы и узлы БЦВК; разработаны рекомендации по совершенствованию методов и средств защиты БЦВК от воздействия СКИ ЭМП.

Автор разрабатывал методики и принимал непосредственное участие в экспериментальных исследованиях всех БЦВК, приведенных в работе.

В работах, опубликованных в соавторстве, соискателю принадлежит основная роль при постановке и решении задач, а также обобщении полученных результатов.

Основные результаты работы нашли в многочисленных публикациях различного уровня и апробированы на научно-технических конференциях.

Использование результатов работы

Разработанные технические решения могут быть использованы для нужд МО, ФСО, ФСБ и других структур при создании объектов специального назначения функционирующих в условиях возможного воздействия электромагнитного терроризма и электромагнитного оружия.

Кроме того, результаты диссертации рекомендуется использовать:

- в научно-исследовательских учреждениях, которые занимаются проектированием технических средств устойчивых к электромагнитным излучениям в широком диапазоне частот;
- при разработке методик нагружения при испытаниях оборудования и информационных систем и обосновании требований к средствам защиты;
- для использования при разработке рабочих проектов отечественных и международных стандартов в области ЭМС и информационной безопасности по методам оценки воздействия СК ЭМИ на технические средства.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

АСУ	- автоматизированная система управления
АСЗИ	- автоматизированная система в защищенном исполнении
АТ	- компьютер на микропроцессоре INTEL
БВС	- бортовая вычислительная система
БСУ	- бортовые системы управления
БЦВМ	- бортовая цифровая вычислительная машина
БЦВК	- бортовой цифровой вычислительный комплекс
ВУ	- внешнее устройство
ИС	- информационная система
ИСАУ	- интеллектуальная система анализа устойчивости
ИУМП	- интегральное уравнение магнитного поля
ИУЭП	- интегральное уравнение электрического поля
Конвертор	- высокоскоростной PCI контроллер Ethernet
КРВО	- метод конечных разностей во временной области (FDTD – Finite Difference in Time Domain);
ЛВС	- локальная вычислительная сеть
МИЭМП	- мощные импульсные электромагнитные поля
МЭК	- международная электротехническая комиссия
ОВВТ	- образцы вооружения и военной техники
ОС	- операционная система
ПД ЭМВ	- поражающее действие электромагнитных воздействий
ПК	- персональный компьютер
ПМ	- процессорный модуль
ПО	- программное обеспечение
ПФ	- поражающий фактор
РПС	- радиопередающее средство
РПУ	- радиоприемное устройство
РТС	- радиотехническая система

РЭА	- радиоэлектронная аппаратура
РЭС	- радиоэлектронные средства
СИ	- средства измерений
СК ЭМИ	- сверхкороткий электромагнитный импульс
СОД ЭМВ	- система обнаружения деструктивных ЭМВ
СПО	- специальное программное обеспечение
СШП ЭМИ	- сверхширокополосный электромагнитный импульс
ТКС	- телекоммуникационная система
ТС	- технические средства
ФСТЭК	- Федеральная служба по техническому и экспортному контролю
ЭМИ	- электромагнитный импульс
ЭМП	- электромагнитное поле
ЭМС	- электромагнитная совместимость
ЯВ	- ядерный взрыв

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Акбашев Б.Б. Определение состава и видов электромагнитных воздействий на технические средства /Б.Б.Акбашев, С.И.Комягин, В.А.Михайлов // Сб. науч. тр. МИЭМ / под ред. Кечиева Л.Н. – М.: МИЭМ, 2008. – С.26-28.
2. Акбашев Б.Б. Теоретические и экспериментальные методы оценки устойчивости терминалов к воздействию сверхширокополосных электромагнитных импульсов: дис...канд. техн. наук: 05.12.13 / Беслан Борисович Акбашев. – М., 2005.-155 с.
3. Акбашев Б.Б., Михайлов В.А. Требования стандартов по параметрам мощных импульсных электромагнитных полей / Б.Б.Акбашев, В.А.Михайлов // Сб. науч. тр. МИЭМ / под ред. Кечиева Л.Н. – М.: МИЭМ, 2008. – С.7-12.
4. Акбашев Б.Б. Защита объектов телекоммуникаций от электромагнитных воздействий / Б.Б.Акбашев, Н.В.Балюк, Л.Н.Кечиев. –М.: Грифон. – 2014.–471с.
5. Акбашев Б.Б. Расчетные методы оценки стойкости телекоммуникационных систем к электромагнитным воздействиям / Б.Б.Акбашев // Сб. науч. тр. МИЭМ / под ред. Кечиева Л.Н. – М.: МИЭМ, 2008. – С.25-26.
6. Акбашев Б.Б. Требования стандартов по параметрам мощных импульсных электромагнитных полей (МИЭМП) / Акбашев Б.Б. // Сб. науч. тр. МИЭМ / под ред. Кечиева Л.Н. – М.: МИЭМ, 2007. – С. 7-12.
7. Балюк Н.В. Электромагнитная совместимость. Устойчивость к воздействию импульсных электромагнитных явлений большой энергии / Н.В.Балюк // Технологии ЭМС. - 2003. – № 2(5). – С. 37 – 42.
8. Балюк Н.В. Электромагнитная совместимость. Устойчивость к ЭМИ высотного ядерного взрыва: учеб. пособие / Н.В.Балюк, В.В.Воскобович, Л.Н.Кечиев и др. – М.: МИЭМ, 2003. – Кн.1. – 32 с.
9. Балюк Н.В. Метод расчета взаимодействия импульсного электромагнитного поля с объектом сложной конфигурации / Н.В.Балюк, А.Н.Зеленин // Технологии ЭМС. – 2006. – №2(17). – С. 54-58.

- 10.Балюк Н.В. Мощный электромагнитный импульс: воздействие на электронные средства и методы защиты / Н.В.Балюк, Л.Н.Кечиев, П.В.Степанов - М.: ООО «Группа ИДТ», 2009. – 478 с.
- 11.Балюк Н.В. Метод расчета воздействия импульсных электромагнитных полей на проволочные структуры / Н.В.Балюк, Д.И.Крохалев, О.А.Фарафонов // Технологии ЭМС. – 2004. – №2.(9) – С. 13-21.
- 12.Балюк Н.В. Оценка воздействия сверхширокополосных импульсов электромагнитного поля на протяженные проводники / Н.В.Балюк, Д.И.Крохалев, О.А.Фарафонов. С. 325-328.
- 13.Балюк Н.В. Эффективность воздействия электромагнитных импульсов на протяженный проводник / Н.В.Балюк, Д.И.Крохалев, С.П.Якушин // Сб. науч. тр. / под ред. Кечиева Л.Н. – М.:МИЭМ, 2004. – С. 19-22.
- 14.Барсуков В.С. Безопасность: технологии, средства, услуги / В. С. Барсуков. - М.: Кудиц-образ, 2001. – 496 с.
- 15.Барсуков В.С. Комплексная защита от электромагнитного терроризма /В.С.Барсуков // Системы безопасности связи и телекоммуникаций. – 2000. – №32. – С.94-98.
- 16.Белоконь И.Н. Оценка защищенности информационных инфраструктур от воздействия сверхкороткоимпульсных электромагнитных излучений техногенного происхождения / И.Н.Белоконь, А.Н.Гончаров, С.Н.Долбня и др. // Технологии ЭМС. – 2010. – № 1. – С.58-66.
- 17.Богданов В. Н. Система национальных стандартов по защите информации от преднамеренных электромагнитных воздействий / В.Н.Богданов, М.И.Жуковский, Н.Б.Сафронов // Технологии ЭМС. – 2009 – № 1. – С.23-27.
- 18.Бородай П.Н., Мырова Л.О., Сахаров К.Ю. Средства обеспечения стойкости информационных систем к воздействию излучений СШП ЭМИ / П.Н.Бородай, Л.О.Мырова, К.Ю.Сахаров // Технологии ЭМС. –2006. – №2(17). – С.59-70.
- 19.Бородай П.Н., Тяпин М.С., Мырова Л.О., Сахаров К.Ю. Средства обеспечения стойкости информационных систем к воздействию излучений СШП ЭМИ /

- П.Н.Бородай, М.С.Тяпин, Л.О.Мырова, К.Ю.Сахаров // Технологии ЭМС. – 2006. – № 2 (17). – С.59-70.
- 20.Бочков М. В. Применение генетических алгоритмов оптимизации в задачах информационного противодействия сетевым атакам / М.В.Бочков, С.А.Крупский, И.Б.Саенко // Управление и информационные технологии: сб. док. всерос. науч. конф. – СПб.: ЛЭ ТИ, 2003. – Т.2. – С.13-16.
- 21.Бочков М.В. Реализация методов обнаружения программных атак и противодействия программному подавлению в компьютерных сетях на основе нейронных сетей и генетических алгоритмов оптимизации /М.В.Бочков // Сб. докл. VI Межд. конф. по мягким вычислениям и измерениям SCM'2003. – СПб.: СПГЭТУ, 2003. – Т. 1. – С.376 - 378.
- 22.Бочков М.В. Активный аудит действий пользователей в защищенной сети / М.В.Бочков, В.А.Логинов, И.Б.Саенко // Защита информации. Конфидент. – 2002 . – № 4-5. – С.94-98.
- 23.Булеков В.П. Новый принцип имитации деструктивного воздействия сверхмощных электромагнитных импульсов на электронную аппаратуру через кабельные линии (принцип «интегрального импульса») / В. П. Булеков, С. Б. Резников, В. Г. Болдырев и др. // Компоненты и технологии. — 2006. — № 10. — С. 174–176.
- 24.Бутин В.И., Михайлов В.А. Обеспечение ЭМС и оценка стойкости технических средств в условиях воздействия импульсных электромагнитных помех: учеб. пособие / В.И.Бутин, В.А.Михайлов. – М.: МИЭМ, 2009. – 100 с.
- 25.Ведмидский А. А. Разработка методов оценки стойкости телекоммуникационных систем к воздействию сверхширокополосных электромагнитных импульсов: дис.... канд. техн. наук 05.12.13 / Александр Александрович Ведмидский. – М., 2003. – 181 с.
- 26.Ведмидский А. А. Разработка методов решения и программ расчета токов и напряжений в кабельных линиях/ А.А.Ведмицкий // Сб. научн. тр. МИЭМ / под ред. Л. И. Кечиева. – М.: МИЭМ, 2003.

- 27.Веселов В.В. Комплекс мониторинга информационных систем на основе нейросетевых технологий / В.В.Веселов, О.А.Елманов, И.Н.Карелов // Нейрокомпьютеры: разработка и применение. – 2001. – №12.
- 28.Патент №2138931 RU. Способ изготовления двусторонней печатной платы и двусторонняя печатная плата / В.А.Михайлов и др. (RU). – №98118270; заявл. 09.10.1998; опубл. 27.09.1999.
- 29.Патент № 2132598 RU. Радиоэлектронный блок / В.А.Михайлов и др. (RU). – № 98115412; заявл. 20.08.1998; опубл. 27.06.1999.
- 30.Власов Ф.С. Центр инновационных исследований и разработок НИИ "Аргон" / Ф.С.Власов, В.А.Михайлов, В.И.Штейнберг // Радиопромышленность. – 2009. – Вып. 2. – С.35-43.
- 31.Воскобович В.В. Актуальность и современное состояние проблемы защиты технических средств от сверхширокополосных импульсов большой мощности / В.В.Воскобович // Технологии ЭМС. – 2002. – №3. – С.17-24.
- 32.Воскобович В.В. Методы обеспечения стойкости перспективных систем радиорелейной, тропосферной и спутниковой связи к воздействию мощных импульсных электромагнитных помех: дис.... канд. техн. наук: 05.12.13 / Владимир Викторович Воскобович. – М., 2002. – 175 с.
- 33.Воскобович В.В. Воздействие сверхширокополосного импульсного электромагнитного излучения на персональные компьютеры / В.В.Воскобович, Л.О.Мырова // Сб. докл. Российской научно-техн. конф. по ЭМС. – СПб. – 2004. – С.383-392.
- 34.Воскобович В.В. Некоторые вопросы создания систем связи, устойчивых к воздействию МЭМП / В.В.Воскобович, Л.О.Мырова // Технологии ЭМС. – 2002. – №2.
- 35.Газизов Т.Р. Анализ имеющихся за рубежом теоретических и экспериментальных результатов, связанных с разработкой и использованием генераторов преднамеренных электромагнитных воздействий (ЭМВ), методов и средств защиты от их деструктивного воздействия, устойчивости к ЭМВ элементов

- электронной инфраструктуры объектов: аналитическая справка / Т.Р.Газизов, Т.Т. Газизов. - Томск: ТУСУР, 2007. – 97 с.
- 36.Гизатуллин З.М. Технология прогнозирования и повышения электромагнитной совместимости цифровых электронных средств при внешних высокочастотных импульсных электромагнитных воздействиях / З.М.Гизатуллин // Технологии ЭМС. — 2010. — № 3 (34). — С.22–29.
- 37.Гизатуллин З.М. Помехоустойчивость средств вычислительной техники внутри здания при широкополосных электромагнитных воздействиях: монография / З.М.Гизатуллин. – Казань: Изд-во Казан. Гос. тех. ун-та, 2012. – 254 с.
- 38.ГОСТ Р52863-2007. Защита информации Автоматизированные системы в защищенном исполнении. Испытания на устойчивость к преднамеренным силовым электромагнитным воздействиям. Общие требования. – М: Стандартинформ. – 2007. – 34 с.
- 39.Гостехкомиссия при Президенте РФ. Сборник руководящих документов по защите информации от несанкционированного доступа. Концепция защиты средств вычислительной техники и автоматизированных систем от несанкционированного доступа к информации. - М. 1998. – С.15-22.
- 40.Гостехкомиссия при Президенте РФ. Сборник руководящих документов по защите информации от несанкционированного доступа. Автоматизированные системы. Защита от несанкционированного доступа к информации. Классификация автоматизированных систем и требования к защите информации. – М. 1998. – С.23-52.
- 41.Гостехкомиссия при Президенте РФ. Сборник руководящих документов по защите информации от несанкционированного доступа. Сборник руководящих документов по защите информации от несанкционированного доступа. Средства вычислительной техники. Защита от несанкционированного доступа к информации. Показатели защищенности от несанкционированного доступа к информации. – М. 1998. – С.53-72.
- 42.Грачев Н.Н. Защита человека от опасных излучений / Н.Н.Грачев, Л.О.Мырова. – М.: Бином, 2005. – 320 с.

43. Данилов А.Ю. Подход к созданию современного центра проектирования для разрабатывающего предприятия / А.Ю.Данилов, В.А.Михайлов, В.И.Рыкалов, А.П.Чуев // Радиопромышленность. – 2009. – Вып. 2. – С.52-56.
44. Душутин И.В. Мультихромосомные генетические алгоритмы оптимизации структуры автоматизированных информационных систем: дис.... канд. техн. наук / И. В. Душутин. — М. — 1998. — 156 с.
45. Жижелев Л. В. К оценке эффективности защиты информации в телекоммуникационных системах посредством нечетких множеств / Л.В.Жижелев, Л.П.Панфилов, Ю.К.Язов, Р.В.Батищев // Изв. вузов. Приборостроение. – 2003. – Т.46. – №7. – С.22-29.
46. Здухов Л.Н. Методика оценки вероятности сбоев цифровых устройств при воздействии сверхкоротких электромагнитных импульсов / Л.Н. Здухов, А.П.Исаев, Ю.В.Парфенов, Б.А.Титов // Журнал радиоэлектроники. – 2011. – № 5. – С.6–16.
47. Здухов Л.Н. Вероятностный анализ устойчивости канала передачи данных к действию периодически повторяющейся импульсной помехи / Л.Н. Здухов, Ю.В.Парфенов, Б.А.Титов // Технологии ЭМС.– 2009. – № 1 (28). – С.48–53.
48. Здухов Л.Н. Исследование возможности проникновения мощных импульсных помех по цепям электропитания и заземления / Л.Н.Здухов, Ю.В.Парфенов, С.Р.Петров и др. // Науч. тр. ин-та теплофизики экстремальных состояний ОИВТ РАН. – М.: – 2000. – Вып.3 – С.153-160.
49. Зеленин А.Н. Метод FDTD / А.Н.Зеленин, В.А.Михайлов // Сб. науч. тр. МИЭМ / под ред. Кечиева Л.Н. – М.: МИЭМ, 2008. – С.28-31.
50. Евтихиев Н.Н. Вопросы исследования воздействия сверхкоротких электромагнитных импульсов на микросхемы памяти / Н.Н.Евтихиев, М.Ю.Едлин, Э.А.Засовин, А.К.Черепанов // Технологии ЭМС. – 2008. – №4(27). – С.53-57.
51. Ивахненко А.Г. Самоорганизация дважды многорядных нейронных сетей для фильтрации помех и оценки неизвестных аргументов / А.Г.Ивахненко, Г.А.Ивахненко, Е.А.Савченко, Т.Гергей // Нейрокомпьютеры: разработка и применение. – 2001 – № 12.

- 52.Ивахненко А.Г. Нейрокомпьютеры в информационных и экспертных системах / А.Г.Ивахненко, Е.А.Савченко, Г.А.Ивахненко // Нейрокомпьютеры: разработка и применение. - .2003. – № 2.
- 53.Ирвин Дж. Передача данных в сетях: инженерный подход / Дж.Ирвин, Д.Харль. – СПб.: БХВ-Петербург, 2003. – 434 с.
- 54.Карпычсв В.Ю. Цена информационной безопасности / В.Ю.Карпычев, В.А.Минаев // Системы безопасности. – 2003. – №5. – С.128-130.
- 55.Кеммерер Р. Обнаружение вторжений: краткая история и обзор / Р.Кеммерер, Дж.Виджна // Открытые системы. – 2002. – № 7-8.
- 56.Кечиев Л.Н. Защита электронных средств от воздействия статического электричества / Л.Н.Кечиев, Е.Д.Пожидаев. – М.: Издательский Дом «Технологии», 2005.–352 с.
- 57.Кечиев Л.Н. Предотвращение катастроф электромагнитного характера в информационных системах / Л.Н.Кечиев, П.В.Степанов, О.Н.Арчаков // Технологии ЭМС. – 2005. – №4(15). – С.7-19.
- 58.Кечиев Л. Н. Проектирование электронных средств в распределенной информационной среде / Л.Н.Кечиев, С.Р.Тумковский, С.Р.Путилов и др. // Сб. науч. тр. МИЭМ. – М.:МИЭМ, 2002. – С. 114-121.
- 59.Кечиев Л.Н. Электромагнитная совместимость и информационная безопасность в системах телекоммуникаций / Л.Н. Кечиев, П.В.Степанов. – М.: Издательский Дом «Технологии», 2005. – 320 с.
- 60.Киричек Р. В. Анализ надежности сетей Ethernet / Р.В. Киричек // 60-я Научно-техническая конференция профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов: материалы. — СПб.: СПбГУТ. – 2008. – С.25-26.
- 61.Киричек Р.В. Вопросы устойчивости активного сетевого оборудования к воздействию сверхкоротких электромагнитных импульсов / С.В. Данилин, Р.В. Киричек // Технологии ЭМС. – 2009. – № 1. – С. 54-57.
- 62.Киричек Р.В. Исследование влияния электромагнитных импульсов на локальные вычислительные сети Ethernet / Р.В.Киричек // 61-я Научно-техническая

- конференция профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов: материалы. – СПб.: СПбГУТ. – 2009. – С.42.
- 63.Киричек Р.В. Механизмы и последствия преднамеренного электромагнитного воздействия на сети Ethernet при передаче различных типов трафика / Р.В. Киричек // Актуальные проблемы организации и технологии защиты информации сб. тр. Межвузовской научно-практической конференции с международным участием. – СПб.: СПбГУ ИТМО, 2011. – С.173-177.
- 64.Киричек Р.В. Электромагнитное нападение как новый вид угрозы информационной безопасности / С. В. Данилин, Р.В.Киричек // Актуальные достижения европейской науки: сб. докл. II Международной научно-практической конференции. – София, 2011. – С.54-58.
- 65.Киричек Р.В. Система национальных стандартов по защите информации от преднамеренных электромагнитных воздействий / Р.В. Киричек // Обеспечение доверия и безопасности при использовании ИКТ: сб. докл. 10-ой международной конференции. – М.: АДЭ. – 2011.
- 66.Киричек Р.В. Применение статистических методов для обнаружения электромагнитных воздействий на сети передачи данных / Р.В. Киричек // 65-я Научно-техническая конференция СПбНТОРЭС им. А. С. Попова: сб. тр. – СПб. – 2010. – С.124-125.
- 67.Киричек Р.В. Моделирование воздействия сверхкоротких электромагнитных импульсов на физическую среду Fast Ethernet / Р.В. Киричек // XLVI Всероссийская конференция по проблемам математики, информатики, физики и химии: тезисы докладов. – М.: РУДН. – 2010. – С.25-26.
- 68.Комягин С.И. Беспилотные летательные аппараты в условиях электромагнитного воздействия / С.И.Комягин, В.А.Михайлов // Сб. науч. тр. МИЭМ / под ред. Л.Н.Кечиева. – М.:МИЭМ, 2008. – С.60-64.
- 69.Корнев А.Н. Экспериментальная оценка устойчивости устройств телекоммуникационных сетей при деструктивном воздействии сверхкороткоимпульсного электромагнитного излучения: дис. ... канд. техн. наук: 05.12.13 / Корнев Андрей Николаевич. – М., 2010. – 126 с.

70. Компьютеры на СБИС / Т.Мотоока, Стомита и др. – М.: Мир, 1988. – Кн.1.
71. Костин Л.А. Экспертные системы в задачах обнаружения и противодействия компьютерным атакам в глобальных вычислительных сетях / Л.А.Костин // Региональная информатика: матер. IX СПб межд. конф. – СПб., 2004. – С.135-136.
72. Костин А.А. Модель и методика проектирования адаптивной системы обнаружения компьютерных атак с использованием нейросетевых средств: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.19 / Андрей Александрович Костин. – СПб., 2006. – 108 с.
73. Костин Л.Л. Повышение избыточности информационных полей адаптивных классификаторов системы информационной безопасности / Л.Л.Костин // Специальная техника. – 2006. – № 1 – С.60-63.
74. Костин Д.Д. Методика анализа защищенности информации, обрабатываемой в автоматизированных системах / Д.Д.Костин, Р.В.Максимов // Региональная информатика: матер. IX СПб межд. конф. – СПб.: 2004. – С. 136.
75. Костин А. А. О иерархии адаптивных средств обнаружении компьютерных атак на ЛВС / А.А.Костин, Г.Ф.Нестерук, Р.Ш.Фахрутдинов // Фундаментальные исследования в технических университетах: матер. IX всерос. конф. по проблемам науки и высшей школы, 18-19 мая 2005 г. – СПб: Изд-во Политех. ун-та, 2005. – С.169-170.
76. Кравченко В.И. Грозозащита радиоэлектронных средств: справочник / В.И.Кравченко. – М.: Радио и связь, 1991. – 264 с.
77. Кравченко В.И. Радиоэлектронные средства и мощные электромагнитные помехи / В.И.Кравченко, Е.А.Болотов, Н.И.Латунова. – М.: Радио и связь, 1987 – 256 с.
78. Крохалев Д.И. Методы расчета импульсных электромагнитных процессов: метод. пособие / Д.И.Крохалев. – М.: МИЭМ, 2007. – 52 с.
79. Крохалев Д.И. Оценка воздействия сверхширокополосных импульсных электромагнитных полей на системы обработки информации / Д.И.Крохалев, В.А.Михайлов // Сб. науч. тр. МИЭМ / под ред. Л.Н.Кечиева. – МИЭМ.: МИЭМ, 2008. – С.100-105.

80. Круглов В.В. Нечеткая игровая модель с единичным экспериментом / В.В.Круглов // Нейрокомпьютеры: разработка и применение. – 2003. – № 8-9.
81. Куприянов М.С., Нестерук Г.Ф., Пузанков Д.В. Реализация мягких вычислений в распределенных системах / М.С.Куприянов, Г.Ф.Нестерук, Д.В. Пузанков // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ»: Серия «Информатика, управление и компьютерные технологии». – СПб.: СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2002. – Вып.1. – С.34-39.
82. Курочкин В.Ф. Исследование воздействия сверхширокополосных электромагнитных импульсов на кабельные коммуникации систем связи: дис.... канд. техн. наук: 05.12.13 / Владимир Федорович Курочкин. – М., 2007. – 217 с.
83. Ларионенко А.В. Разработка требований к средствам защиты локальных вычислительных сетей от деструктивного воздействия сверхкороткоимпульсного электромагнитного излучения: дис. ... канд. техн. наук: 05.12.13 / А.В.Ларионенко. – М., 2010. – 137 с.
84. Ларионенко А.В. Разработка требований по защите вычислительных комплексов от воздействия сверхкоротких электромагнитных импульсов / А.В.Ларионенко // Сб. тр. научно-технической конф студентов, аспирантов и молодых специалистов МИЭМ. – М.:МИЭМ, 2010. – С.181- 183.
85. Ларионенко А.В. Основные результаты исследований по проблеме защиты элементов локальных вычислительных сетей от СШП ЭМИ / А.В.Ларионенко // Информационные и телекоммуникационные технологии. – 2009. – № 4. – С.33- 39.
86. Логинов В.А. Методика активного аудита действий субъектов доступа в корпоративных вычислительных сетях на основе аппарата нечетких множеств / В.А.Логинов // Сб. докл. VI Междунар. конф. SCM'2003. – СПб.: СПбГЭТУ, 2003. т. 1. С. 240-243.
87. Лукацкий А.В. Обнаружение атак / А.В.Лукацкий. – 2-е изд. – СПб.: БХВ-Петербург, 2003. – 608 с.
88. Макарихин Н.В. Методология, средства диагностики и поиска ошибок в технологии Ethernet / Н.Ф. Макарихин // Матер. V Международной научно-технической школы-конф. – М.: МИРЭА. – 2008. – С.243-249.

- 89.Мелик-Гайназян И.В. Информационные процессы и реальность / И.В.-Мелик-Гайназян. – М.: Наука, 1998. – 192 с.
- 90.Милославская Н.Г. Уязвимость и методы защиты в глобальной сети Internet / Н.Г.Милославская, Ю.А.Тимофеев, А.И.Толстой. – М.: МИФИ, 1997.
- 91.Михайлов В.А. Анализ функционирования бортовых вычислительных комплексов в условиях воздействия сверхкоротких электромагнитных полей / В.А.Михайлов, Л.О. Мырова, Т.Л.Рязановский и др. // Электросвязь. –2013. – № 6 – С.31-33.
92. Михайлов В.А. Разработка сценариев обнаружения воздействия деструктивных электромагнитных импульсов на бортовые цифровые вычислительные комплексы / В.А.Михайлов, Л.О.Мырова, А.В. Царегородцев // Электросвязь.– 2013. –№ 6. –С.26-30.
- 93.Михайлов В.А. Функциональные сбои персонального компьютера при воздействии электромагнитных импульсов сверхкороткой длительности /В.А.Михайлов // Сб. науч. тр. / под ред. Л.Н.Кечиева. – М.: МИЭМ, 2008. – С.152-157.
- 94.Михайлов В.А. Использование технологий оперативной аналитической обработки данных для построения сложных аналитических систем /В.А.Михайлов // Энергосистема и активные адаптивные электрические сети: проектирование, эксплуатация, образование: сб. науч. тр. Международной НТК. – М., 2011. – С.338-342.
- 95.Михайлов В.А. Устойчивость информационных и телекоммуникационных систем в условиях развития перспективных технологий использования наносекундных электромагнитных импульсов / В.А.Михайлов, Л.О.Мырова // Информационные и телекоммуникационные технологии. – 2012. – № 13. – С.69-73.
- 96.Михайлов В.А. Разработка модели воздействия деструктивных ЭМИ на элементы и узлы БЦВК / В.А.Михайлов, Л.О.Мырова, А.В.Царегородцев // Журнал радиоэлектроники: электронный журнал. – 2012. – № 11. URL: [jre.cplire. ru / jre/nov12/6/ text.html](http://jre.cplire.ru/jre/nov12/6/text.html) .
- 97.Михайлов В.А. Разработка модели воздействия деструктивных ЭМИ на элементы и узлы БЦВК / В.А.Михайлов, Л.О.Мырова, А.В.Царегородцев // Радио-

- локация и радиосвязь: сб. науч. тр. 6-й Всероссийской НТК. – М., 2012. – Т. 2. – С.163-168.
98. Михайлов В.А. Анализ воздействия деструктивных ЭМИ на каналы передачи данных современных бортовых систем управления / В.А.Михайлов, Л.О.Мырова, А.В.Царегородцев // Радиолокация и радиосвязь: сб. науч. тр. 6-й Всероссийской научно-технической конф. – М., 2012. – Т. 2. – С. 158-162.
 99. Михайлов В.А. Устойчивость современных бортовых систем управления к воздействию перспективных сверхкоротких электромагнитных импульсов / В.А.Михайлов // Электросвязь. – 2013. – № 3 – С. 51-53.
 100. Михайлов В.А. Актуальные вопросы повышения стойкости бортовых цифровых вычислительных машин к электромагнитным воздействиям / В.А. Михайлов // ЭМС и электромагнитная безопасность. ЭМС-2008: сб. докладов 10 НТК. – СПб.: ВИТУ, 2008. – С. 358-360.
 101. Михайлов В.А. Методическое обеспечение испытаний БЦВМ на стойкость к воздействию сверхширокополосных электромагнитных импульсов / В.А.Михайлов // ЭМС и электромагнитная безопасность. ЭМС-2008: сб. докл. 10 НТК. – СПб.: ВИТУ, 2008. – С. 553-556.
 102. Михайлов В.А. Вопросы электромагнитной совместимости бортовых вычислительных средств в интеллектуальных комплексах автоматизации и связи / В.А.Михайлов // Информационные и телекоммуникационные технологии в интеллектуальных системах: сб. тр. 6 Международной конференции. – Греция, 2008.– С. 43- 48..
 103. Михайлов В.А. Особенности защиты информационных и телекоммуникационных систем от воздействия мощных электромагнитных излучений/ В.А.Михайлов // Инновации в условиях развития информационно-коммуникационных технологий: труды научно-практической конференции ИНФО-2008. – Сочи, 2009. – С. 41-47.
 104. Михайлов В.В. Использование технологий оперативной аналитической обработки данных для построения сложных аналитических систем / В.А. Михай-

- лов // Электромагнитная совместимость и электромагнитная экология: сб. докл. 8-го Международного симпозиума. – СПб.: ВИТУ, 2009. – С.240-243.
105. Квалификационные требования КТ-160D. Условия эксплуатации и окружающей среды для бортового авиационного оборудования. Требования, нормы и методы испытаний. – М.: АР МАК, 2004. – 324 с.
 106. Михайлов В.А. Оценка эффективности функционирования ИСАУ БЦВК деструктивному воздействию ЭМИ на основе алгоритмов маршрутизации / В.А.Михайлов, Л.О.Мырова, А.В.Царегородцев // Успехи современной радиоэлектроники. – 2014. – № 2. – С.50-57.
 107. Акбашев Б.Б. Защита объектов информатизации от мощных электромагнитных воздействий: проблемы и решения / Б.Б.Акбашев, Н.В.Балюк, Л.Н.Кечиев // Инновационные информационные технологии: материалы международной научно-практической конференции. – Прага, 23-26 апреля 2013 Т.3. – М.: МИЭМ НИУ ВШЭ, 2013. – С.172-179.
 108. Михайлов В.А. «ДОРА» - Новые технологии разработки аэрокосмических БЦВМ / В.А.Михайлов // Аэрокосмический курьер. – 1999. – №2. – С. 72-73.
 109. Михайлов В.А. Обеспечение стойкости бортовых цифровых вычислительных машин к воздействию сверхкоротких электромагнитных импульсов: дис. ... канд. техн. наук: 05.12.04 / Виктор Алексеевич Михайлов. – М., 2009. – 144 с.
 110. Михайлов В.А. Гонка без финиша / В.А.Михайлов, В.И.Штейнберг // Радиопромышленность.–2009.–Вып. 2.–С. 19-35.
 111. Михайлов В.А. Оптимизация размещения ЭРЭ на платах в отсутствии конвективного охлаждения / В.А.Михайлов, В.Ф.Мишин, А.В.Шустов // Радиопромышленность. – 2010. – Вып. 1. – С. 26-34.
 112. Михайлова В.Р., Попов С.О., Соколова Е.С. Вычислительные средства перспективных терминалов связи / В.Р.Михайлова, С.О.Попов, Е.С.Соколова // Радиопромышленность. – 2010. – Вып. 2.
 113. Михайлов В.А. Последний старт «Аргон-16» / В.А.Михайлов, В.И. Штейнберг // Аэрокосмический курьер. – 2011. – № 6. – С. 52-53.

114. Михайлов В.А. Новые страницы в истории БЦВМ комплекса «Аргон» / В.А.Михайлов // Радиопромышленность. – 2013. – Вып.4. – С.5-10.
115. Михайлов В.А. Опыт разработки вычислительных средств для авиационных терминалов связи с использованием СБИС СНК 1867ВЦ8Ф / В.А.Михайлов, С.О. Попов, В.И.Штейнберг // Радиопромышленность. – 2013. – Вып. 4. – С. 11-17.
116. Михайлов В.А. Создание современных бортовых вычислительных комплексов устойчивых к воздействию сверхкоротких электромагнитных импульсов / В.А.Михайлов // Научные технологии. – 2014. – № 1. – Т.15. – С.6-12.
117. Михайлов В.А. Анализ работы интеллектуальной системы оценки устойчивости БЦВК при воздействии деструктивных ЭМИ/ В.А.Михайлов, Л.О.Мырова, А.В. Царегородцев // Научные технологии. – 2014. – № 1. – Т.15. – С.84-89.
118. Михайлов В.А. Цифровая платформа - основа стратегии унификации нового поколения космических аппаратов / В.А.Михайлов, Ф.С.Власов, С.Ф.Власов // Научные технологии. – 2014. – № 1. – Т.15. – С.29-36.
119. Михайлов В.А. Высокопроизводительный мультиядерный модуль-сервер общего назначения для мобильных информационно-управляющих систем и автоматизированных систем управления / В.А.Михайлов, В.А.Белов, Л.И.Драгомощенко, А.А.Соловьев // Научные технологии. – 2014. – № 1. – Т.15. – С.22-28.
120. Михайлов В.А. Бортовая вычислительная техника – своя / В.А.Михайлов // Новый оборонный заказ. Стратегии. – 2013. – Вып. 2. – С. 25.
121. Михайлов В.А. Разработка промышленной технологии создания унифицированного отказоустойчивого вычислителя для комплекса бортового оборудования: отчет по ОКР «Кластер» / В.А.Михайлов и др. – М.: ОАО «НИИ «Аргон», 2013. – Книги 1, 2. – 500 с.
122. Михайлов В.А. Обеспечение ЭМС и устойчивости печатных плат БЦВМ в условиях воздействия импульсных электромагнитных помех / В.А.Михайлов // Технологии ЭМС. – 2008. – № 2(25). – С.33-40.
123. Михайлов В.А. Особенности применения метода сравнительного анализа при подтверждении стойкости РЭА к воздействию сверхвысокочастотного импульс-

- ного электромагнитного излучения / В.А.Михайлов, В.И. Бутин // Технологии ЭМС. – 2008. – № 4(27). – С.43-47.
124. Михайлов В.А. Технические решения по обеспечению помехоустойчивости аппаратуры к воздействию электромагнитных помех / В.А.Михайлов, В.И. Бутин // ЭМС и проектирование электронных средств: сб. науч. тр. / под ред. Л.Н. Кечиева –М.: МИЭМ, 2009.– С.5-11.
 125. Михайлов В.А. Средства измерений параметров и управления режимами в аппаратуре регулирования и контроля электроснабжения космических аппаратов / В.А.Михайлов, Ф.С.Власов, А.К. Тищенко, В.Н.Поспелов // Технологии ЭМС. – 2008. – № 4(27). – С.24-33.
 126. Методы интеллектуального анализа в задачах оценки устойчивости ИКС к деструктивному воздействию ЭМИ / В.А.Михайлов, В.В.Воскобович, Л.О. Мырова, А.В. Царегородцев // Технологии ЭМС. – 2012. – № 2(41). – С.79-90.
 127. Михайлов В.А. Системный подход к созданию методологии анализа и оценки устойчивости ИКС к деструктивному воздействию мощных ЭМИ / В.А.Михайлов, Л.О.Мырова, А.В.Царегородцев, В.В.Воскобович // Технологии ЭМС. – 2012. – № 1(40). – С.51-59.
 128. Михайлов В.А. Определение критериальных параметров импульсного электромагнитного воздействия / В.А.Михайлов, В.Е.Осташев // ЭМС и проектирование электронных средств: сб. науч. тр. / под ред. Л.Н. Кечиева. – М.: МИЭМ, 2012. – С.62-70.
 129. Михайлов В.А. Оценка параметров излучения сверхкоротких импульсов в заданной полосе частот / В.А.Михайлов, В.Е.Осташев // ЭМС и проектирование электронных средств: сб. науч. тр. / под ред. Л.Н. Кечиева. – М.: МИЭМ, 2012. – С.70-76.
 130. Михайлов В.А. Оценка стойкости бортовых вычислительных машин в условиях воздействия сверхкоротких электромагнитных полей / В.А. Михайлов, К.Ю. Сахаров, В.А.Туркин и др. //Технологии ЭМС. – 2008. – № 4(27). – С.12-19.

131. Михайлов В.А. Построения высоконадежных бортовых вычислительных комплексов / В.А.Михайлов, В.А. Шпиев, В.И.Штейнберг // Технологии ЭМС. – 2008. – № 4(27). – С. 20-23.
132. Михайлов В.А., Штейнберг В.И. Гонка без финиша / В.А.Михайлов, В.И.Штейнберг // Технологии ЭМС. – 2008. – № 4(27). – С.3 -11.
133. Михайлов В.А. Интеллектуальная система анализа и оценки устойчивости БЦВК к деструктивному воздействию ЭМИ / В.А.Михайлов, Л.О.Мырова, А.В.Царегородцев // Электросвязь. – 2012. – № 7. – С. 36-40.
134. Михайлов В.А. Модель интеллектуальной системы анализа и оценки устойчивости ВЦВК к деструктивному воздействию ЭМИ / В.А.Михайлов, Л.О. Мырова, А.В.Царегородцев // Системы и средства связи, телевидения и радиовещания – 2012. – № 1, 2. – С.124-128.
135. Михайлов В.А. Структура интеллектуальной системы анализа и оценки устойчивости ВЦВК к деструктивному воздействию ЭМИ / В.А.Михайлов, Л.О. Мырова, А.В.Царегородцев // Системы и средства связи, телевидения и радиовещания. – 2012. – № 1, 2. – С.116-120
136. Михайлов В.А. Устойчивость каналов передачи данных бортовой системы управления современных беспилотных летательных аппаратов к воздействию сверхкоротких электромагнитных импульсов / В.А.Михайлов, Т.Л.Рязановский, И.А.Фомина // Системы и средства связи, телевидения и радиовещания. – 2013. – № 1, 2. – С. 72-76.
137. Михеев О.В. Средства измерений и методы испытаний телекоммуникационных систем в условиях воздействия электромагнитных импульсов с субнаносекундной длительностью фронта: дис... канд. техн. наук: 05.12.13 / Олег Викторович Михеев. – М., 2006. – 152 с.
138. Михеев О.В. Средства измерений для испытаний радиоэлектронной аппаратуры на стойкость к воздействию сверхкоротких электромагнитных импульсов / О.В.Михеев, В.А.Туркин, К.Ю.Сахаров, А.А. Соколов // Технологии ЭМС. – 2006. – №2(17). – С.17-21.

139. Мырова Л.О. Современные проблемы обеспечения помехоустойчивости быстродействующих цифровых электронных средств / Л.О.Мырова, В.А. Михайлов // Системы и средства связи, телевидения и радиовещания. – 2013. – №1,2. – С.70-72.
140. Михайлов В.А. Обеспечение помехоустойчивости средств связи нового поколения / В.А.Михайлов, Л.О.Мырова // Информационные технологии в науке, технике и образовании: труды 8-й межд. научно-технической конференции. – Абхазия, 2012. – С. 254-260.
141. Михайлов В.А. Проблема повышения эффективности использования интеллектуальных ресурсов в интересах развития новых информационных технологий / В.А.Михайлов, И.А.Лазарев, В.В. Воскобович // Информационные ресурсы России. – 2011. – № 6, (124). – С. 18-23.
142. Мырова Л.О. Критерии и критериальные параметры импульсного электромагнитного воздействия / Л.О.Мырова, В.А.Михайлов // Сб. тр. 8-го Международного симпозиума по электромагнитной совместимости и электромагнитной экологии. – СПб., 2009. – С. 356-360.
143. Мырова Л.О. Энергетика излучения сверхкоротких импульсов в заданной полосе частот / Л.О.Мырова, В.А.Михайлов // Сб. трудов 8-го Международного симпозиума по электромагнитной совместимости и электромагнитной экологии. – СПб., 2009. – С. 352-356.
144. Рикетс Л.У. Электромагнитный импульс и методы защиты: пер. с англ. / под ред. Н.А.Ухина. – М.: Атомиздат, 1979. – 327 с.
145. Мырова Л.О. Анализ стойкости систем связи к воздействию излучений /Л.О. Мырова, В.Д.Попов, В.И.Верхотуров. – М.: Радио и связь. – 1993. – 268с.
146. Мырова Л.О. Воздействие сверхширокополосного импульсного электромагнитного излучения на технические средства / Л.О.Мырова, В.В.Воскобович // Технологии ЭМС. – 2004. – №3.
147. Мырова Л.О., Чепиженко А.З. Обеспечение стойкости аппаратуры связи к ионизирующим и электромагнитным излучениям. – М.: Радио и связь. – 1988. – 296 с.

148. МЭК 61000-4-32 Электромагнитная совместимость. Устойчивость к электромагнитному импульсу высотного ядерного взрыва. Методы и средства измерений. Имитаторы ЭМИ, 2002.
149. МЭК 61000-2-13. Электромагнитная совместимость. Устойчивость к СШП-ЭМИ, 2004.
150. МЭК 61000-2-11. Электромагнитная совместимость. Устойчивость к электромагнитному импульсу высотного ядерного взрыва. Классификация ЭМИ - обстановки и условий воздействия ЭМИ, 1999.
151. МЭК 61000-2-10. Электромагнитная совместимость. Устойчивость к электромагнитному импульсу высотного ядерного взрыва. Описание ЭМИ - обстановки. Наведенные помехи, 1998.
152. МЭК 61000-2-9. Электромагнитная совместимость. Устойчивость к электромагнитному импульсу высотного ядерного взрыва. Описание ЭМИ-обстановки. Излученные помехи, 1995.
153. Никонов В.И. Методика защиты информации в беспроводных сетях на основе динамической маршрутизации трафика: дис. ... канд. техн. наук / В. И. Никонов. — Томск, 2010. — 119 с.
154. Нестерук Г.Ф. Методы проектирования систем защиты информации в нейросетевых вычислительных средах: дис. ... д-ра техн. наук: 05.13.19 / Геннадий Филиппович Нестерук. — СПб., 2004. — 373 с.
155. Нестерук Г. Ф. К обучению нейро-нечетких средств классификации компьютерных атак на ЛВС / Г.Ф.Нестерук, В.П.Грибачев, С.И.Воскресенский, А.А.Костин // SCM'2005: сб. докл. междунар. конф. по мягким вычислениям и измерениям 27-29 июня 2005. — СПб: СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2005. — Т.1. — С.253-257.
156. Нестерук Г. Ф. Методика обнаружения компьютерных атак на ЛВС с применением механизмов нечеткой логики и нейронных сетей / Г.Ф.Нестерук, А.А.Костин, Ф.Г.Нестерук // SCM'2005: Сборник докладов Международной конференции по мягким вычислениям и измерениям 27-29 июня 2005 г. — СПб: СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2005. — Т. 1. — С.268-71.

157. Нестерук Ф.Г. Разработка модели адаптивной системы защиты информации на базе нейро-нечетких сетей: дис. ... канд. техн. наук: 05.13019 / Филипп Геннадьевич Нестерук. – СПб., 2005. – 164 с.
158. Нестерук Г.Ф. Информационная безопасность и интеллектуальные средства защиты информационных ресурсов. (Иммунология систем информационных технологий) / Г.Ф.Нестерук, Л.Г.Осовецкий, А.Ф.Харченко. – СПб.: Изд-во СПбГУЭФ, 2003. – 364 с.
159. Нестерук Г.Ф. Организация параллельной обработки данных в многофункциональной памяти / Г.Ф.Нестерук, Ф.Г.Нестерук // Омский научный вестник. – 2000. – Вып.10. – С.100-104.
160. Нестерук Ф.Г. Безопасное хранение данных в нейросетевых информационных системах / Ф.Г.Нестерук // Изв. вузов. Приборостроение. – 2003. – Т.46. – № 7. – С. 52-57.
161. Нестерук Г.Ф. О разработке языковых средств для программирования нейросетевых структур / Г.Ф.Нестерук, М.С.Куприянов, Ф.Г.Нестерук // Сб. докл. V междунар. конф. SCM'2002. – СПб., 2002. – Т.2. – С.52-55.
162. Нестерук Ф.Г. К моделированию адаптивной системы информационной безопасности / Ф.Г.Нестерук, Л.Г.Осовецкий, Г.Ф.Нестерук, С.И.Воскресенский // Перспективные информационные технологии и интеллектуальные системы. – 2004. – № 4. – С.25-31.
163. Нестерук Ф.Г., Нестерук Г.Ф., Осовецкий Л.Г. Основы организации адаптивных систем защиты информации / Ф.Г.Нестерук, Г.Ф.Нестерук, Л.Г.Осовецкий: учеб. пособие. – СПб.: СПбГУ ИТМО, 2008. – 112 с.
164. Нестерук Г. Ф. Организация иерархической защиты информации на основе интеллектуальных средств нейро-нечеткой классификации / Г.Ф.Нестерук, А.А.Молдовян, А.А.Костин, Ф.Г.Нестерук // Вопросы защиты информации. – 2005. – № 3 (70). – С.16-26.
165. Нестерук Г.Ф. О применении нейронечетких сетей в адаптивных системах информационной защиты / Г.Ф.Нестерук, Л.Г.Осовецкий, Ф.Г.Нестерук // Нейроинформатика-2005: матер. VII всерос. научно- техн. конф.. - М.:

- МИФИ (ТУ), 2005. – Ч.1. – С.163-171.
166. Нестерук Г.Ф., Куприянов М.С., Нестерук Л.Г. О реализации интеллектуальных систем в нечетком и нейросетевом базисах / Г.Ф.Нестерук, М.С.Куприянов, Л.Г. Нестерук // Сб. докл. VI Междунар. конф. SCM'2003. – СПб.: СПГЭТУ, 2003. – Т. 1. – С.330-333.
 167. Нестерук Г.Ф. Адаптивная модель нейросетевых систем информационной безопасности / Г.Ф.Нестерук, Л.Г.Осовецкий, Ф.Г.Нестерук // Перспективные информационные технологии и интеллектуальные системы.–2003.– № 3.
 168. Олифер В.Г. Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы / В.Г. Олифер, Н.А. Олифер. – СПб.: Питер, 2011. – 944 с.
 169. Осовецкий Л.Г. Иммунология сложных вычислительных систем / Л.Г.Осовецкий, Г.Ф.Нестерук, М.С.Куприянов, Ф.Г.Нестерук // Изв. вузов. Приборостроение. – 2003. – Т.46. – № 7. – С.34-40.
 170. Ольшевский А. Н. Разработка методического обеспечения оценки устойчивости систем видеонаблюдения при внешних мощных электромагнитных воздействиях: дис. ... канд. техн. наук: 05.12.04 / Александр Николаевич Ольшевский. – М., 2007. – 149 с.
 171. Разработка технологии создания специального, отказоустойчивого, высокопроизводительного, модифицируемого бортового вычислительного комплекса специального назначения со встроенной гигабитной волоконно-оптической средой передачи информации для авиационных и мобильных объектов автоматизации и управления: отчет по ОКР «Волопас» / В.А.Михайлов и др. – М.: ОАО «НИИ «Аргон», 2013. – Книги 1-5. – 550 с.
 172. Осипов В.Ю. Концептуальные положения программного подавления вычислительных систем / В.Ю.Осипов // Защита информации. Конфидент. – 2002. – № 4-5. – С.89–93.
 173. Осовецкий Л.Г. Иммунология сложных вычислительных систем / Л.Г.Осовецкий, Г.Ф.Нестерук, М.С.Куприянов, Ф.Г.Нестерук // Защита и безопасность вычислительных технологий: тр. 8-го междунар. НПС. – СПб, 2002. – С.18-25.

174. Павлов А.М. Принципы организации бортовых вычислительных систем перспективных летательных аппаратов / А.М.Павлов // Мир компьютерной автоматизации. – М., 2001. – №4.
175. Пантелеев С.В. Решение задач идентификации динамических объектов с использование нейронных сетей / С.В.Пантелеев // Сб. докл. VI Международной конф. SCM'2003. – СПб.: СПГЭТУ, 2003. – Т. 1. – С.334-336.
176. Патент 2179739 РФ, МПК G 06 F 15/00. Устройство для обработки информации. / Г.Ф. Нестерук, Ф. Г. Нестерук. - № 2000108883/09; Заявл. 10.04.2000; Оpubл. 20.02.2002. Бюл. №5. Приоритет от 10.04.2000. – 4 с.
177. Подосенов С.А. Импульсная электродинамика широкополосных радиосистем и поля связанных структур / С.А.Подосенов, А.А.Потапов, А.А.Соколов. – М.: Радиотехника, 2003. – 720 с.
178. Прогнозирование ожидаемой тактики применения электромагнитного воздействия и определение перечня возможных угроз объектам управления / Е.В.Покаместов, В.В.Воскобович, И.К.Новиков, Д.А.Дектярев // Сб. докл. Российской научно-технической конференции по ЭМС. – СПб, 2004. – С.284-290.
179. Протокол испытаний опытного образца унифицированного отказоустойчивого вычислителя EA2180. ОАО «НИИ «Аргон». – М., 2013.
180. Применение ПЛИС XI LI NX для построения нейронных сетей. – Scan Eng.Telecom, 1999.
181. Симонина О.А. Модели расчета показателей QoS в сетях следующего поколения: дис.... канд. техн. наук / О.А. Симонина. – СПб., 2005. – 132 с.
182. Соколов А.А. О метрологическом обеспечении измерений напряженности импульсных электрических и магнитных полей / А.А.Соколов // Вопросы излучения и измерения нестационарных электромагнитных полей: сб. статей. Научные труды ВНИИОФИ. – М., 1980. – С.31-47.
183. Сахаров К.Ю. Излучатели сверхкоротких электромагнитных импульсов для испытаний технических средств / К.Ю.Сахаров, А.А.Соколов, В.А.Туркин, О.В.Михеев // Технологии ЭМС. – 2006. – №2. – С.10-16.

184. Салливен Джон П. Террористическое и нетрадиционное оружие: справочник «Оружие мира» / Джон П. Салливен. – М.: Моркнига, 2008. – 224 с.
185. Сахаров К.Ю. Излучатели сверхкоротких электромагнитных импульсов и методы измерений их параметров: монография / К.Ю.Сахаров. – М., 2006.
186. Сахаров К.Ю. Исследование функционирования локальной вычислительной сети в условиях воздействия сверхкоротких электромагнитных импульсов / К.Ю.Сахаров, А.А.Соколов, О.В.Михеев и др. // Технологии ЭМС. – 2006. – № 3. – С.36–46.
187. Соколов А.А. Излучение и измерение импульсных электромагнитных полей / А.А.Соколов. С.А.Подосеев. – М.: Спутник, 2000. – 249 с.
188. Сухоруков С.А. Защита компьютеризированных систем критических объектов от кибернетических атак с помощью преднамеренных маломощных импульсных электромагнитных воздействий /С.А.Сухоруков // Технологии ЭМС. – 2011. – № 4. – С.53–58.
189. Сухоруков С.А. Основные положения проектов стандартов по средствам защиты от преднамеренных силовых электромагнитных воздействий по ГОСТ Р 52863-2007 и средствам их обнаружения / С.А.Сухоруков // Технологии ЭМС. – 2011. – №3(38). – С.26-35.
190. Сухоруков С.А. Исследование функционирования СВТИ на устойчивость к преднамеренным силовым электромагнитным воздействиям: Ч. 4. Высоковольтные однократные наносекундные импульсы напряжения. Степень жесткости испытаний I / С.А. Сухоруков, В.В.Горячевский // Технологии ЭМС. – 2011. – № 3 (38). – С.36.
191. Сухоруков С.А. Исследование функционирования СВТИ при испытаниях на устойчивость к намеренному силовому воздействию методами электромагнитного терроризма. Однократные наносекундные импульсы электромагнитного терроризма: Ч. 1 / С.А.Сухоруков, В.В.Горячевский // Технологии ЭМС. – 2008. – № 1. – С.3–11.
192. Сухоруков С.А. Исследование функционирования СВТИ при испытаниях на устойчивость к намеренному силовому воздействию методами электромагнит-

- ного терроризма. Однократные наносекундные импульсы электромагнитного терроризма: Ч. 2 / С.А. Сухоруков // Технологии ЭМС.– 2008. – № 1. – С.12–15.
193. Сухоруков С.А. Исследование функционирования СВТИ при испытаниях на устойчивость к намеренному силовому воздействию методами электромагнитного терроризма: Ч.3. Низковольтные однократные миллисекундные импульсы напряжения. Степень жесткости испытаний I / С.А. Сухоруков // Технологии ЭМС. – 2009. – № 3. – С.7-17.
194. Сахаров К.Ю. Исследование функционирования персональных компьютеров в условиях воздействия сверхкоротких электромагнитных импульсов / К.Ю.Сахаров, О.В.Михеев, В.А.Туркин и др.. – Технология ЭМС. – 2006. - №2(17). – С. 44-49.
195. Туркин В. А. Разработка излучателей сверхкоротких электромагнитных импульсов для испытаний радиотехнической аппаратуры: ... канд. техн. наук: 05.12.04 / Туркин Владимир Анатольевич. – М., 2006. – 163 с.
196. Туркин В.А. Генератор мощных электромагнитных импульсов с субнаносекундным фронтом / В.А.Туркин, С.В.Альбетков, К.Ю.Сахаров // ПТЭ, 1993. – №6. – С.125-128.
197. Тяпин М.С. Экспериментальные исследования радиотехнических устройств на воздействие широкополосных электромагнитных импульсов и разработка рекомендаций по обеспечению их стойкости: дис. ... канд. техн. наук: 05.12.04 / Михаил Серафимович Тяпин. - М., 2007. – 207 с.
198. Уильямс Т. ЭМС для разработчиков продукции / Т.Уильямс. – М.: Издательский Дом «Технологии», 2003. – 540 с.
199. Уильямс Т. ЭМС для систем и установок / Т.Уильямс, К.Армстронг. – М.: Издательский Дом «Технологии», 2004. – 508 с.
200. Усков А.А. Адаптивная нечеткая нейронная сеть для решения задач оптимизации функционалов / А.А.Усков // Нейрокомпьютеры: разработка и применение. – 2003. – № 12.
201. Федеральный закон Российской Федерации от 6 марта 2006 г. №35 - ФЗ «О противодействии терроризму».

202. Царегородцев А.В. Методы, модели и алгоритмы синтеза защищенных информационных систем / А.В.Царегородцев. – М.: Изд-во ВГНА Минфина России, 2009. – 208 с.
203. Электромагнитный терроризм на рубеже тысячелетий / под ред. Т.Р. Газизова. - Томск: Томский государственный университет, 2002. - 206 с.
204. Экспресс-отчет по испытаниям активного сетевого оборудования с адаптерами HP NC522SFP+ 10 GbE на устойчивость к преднамеренным электромагнитным воздействиям. – СПб.: ФГУП «ЦентрИнформ», 2011. – 28 с.
205. Элементы топологической теории экранирования / Л.Н.Кечиев и др. // Проектирование телекоммуникационных и информационных средств и систем: сб. науч. тр. – М.: МИЭМ, 2007. – С. 125-130.
206. Якушин С.П. Методы и средства оценки воздействия электромагнитного импульса большой энергии на телекоммуникационные сети: дис. ... канд. техн. наук / С.П. Якушин. – М., 2004. – 146 с.
207. Якушин С.П., Ведмидский А.А. Анализ метода расчета взаимодействия ЭМИ с элементами УТК / С.П.Якушин, А.А.Ведмидский // Сб. науч. тр. МИЭМ / под ред. Л.Н.Кечиева. – М.: МИЭМ. – 2004. – С.221-223.
208. Ackerman W.B. Data flow languages / W.B.Ackerman // Proc. of the NCC, Montvale. - NJ, AFIPS. 1979. P. 1087—1095.
209. Amoroso E. Intrusion Detection. An Introduction to Internet Surveillance, Correlation, Trace Back, Traps, and Response. Intrusion. Net Books, 1999.
210. Amoroso E. Intrusion Detection. An Introduction to Internet Surveillance, Correlation, Trace Back, Traps, and Response. Intrusion. Net Books, 1999.
211. Analysis of High-Power RF Interference on Digital Circuits David Yang, R. Kollman Electromagnetics. — Vol. 26. — 2006. — № 1. — P. 87–102.
212. Arvind A. Critique of multiprocessing von Neumann style / A.Arvind A // Proc. of 10th Annual Int. Symp. on Computer Architecture. 1983. – P. 426-436.
213. Backus J. Can programming be liberated from the von Neumann style? A functional style and its algebra of programs / J.Backus // Communications of the ACM. – 1978. – №21(8). – P. 613-641.

214. Boling R., Kohlberg I. Effects of Unwanted Electromagnetic Signals on Message Signaling, presented at USNC-URSI National Radio Science Meeting, Boulder, Colorado, January 8–12, 2002.
215. Borisov R. A computer code for estimating pulsed electromagnetic disturbance penetrating into building power and earthing circuits Proceedings of the 14th International Symposium on Electromagnetic Compatibility / R. Borisov and at all. — Zurich, 2001. — P. 433–439.
216. Brauer F. Susceptibility of IT network systems to interferences by HPEM, Electromagnetic Compatibility / F. Brauer, F.Sabath, J.Haseborg and at all. — EMC. — IEEE International Symposium. — 2009. — P. 237–242.
217. Dennis J. A preliminary architecture for basic data flow processor / J.Dennis, D.Misunas // Proc. of 2nd annual Int. Symp. on Computer Architecture. — N.Y.1975. — P. 126 -132.
218. EMC Zurich Symposium - Munich in September 2007 (Tutorial on IEMI).
219. Fortov V. About potential possibility of commitment of large-scale terrorist acts by using electro technical devices International Symposium High Power Electromagnetics EuroEM / V.Fortov, V.Loborev , Y.Parfenov and at all. — Edinburgh, 2000. — P. 1143–1149.
220. Fortov V. Estimation of pulse electromagnetic disturbances penetrating into computers through building power and earthing circuits / V.Fortov, Y. Parfenov, W.Radasky and at all. — Metatech Corporation, Meta-R-176, 2000. — P. 11–17.
221. Fuller R. Neural Fuzzy Systems. - Abo: Abo Akademi University, 1995.
222. Fuller R. Neural Fuzzy Systems. - Abo: Abo Akademi University, 1995.
223. Gallant S.I. Neural Network learning and Expert Systems. MIT Press, Cambridge, MA, 1993.
224. Gilbert Held Ethernet Networks: Design, Implementation, Operation, Management. — Wiley. — 2003. — P. 610.
225. Hidenori Sekiguchi The Malfunction and Immunity limit of Information technology equipment under HPEM environments / Hidenori Sekiguchi, Shinji Seto, Ikuya

Minematsul // 20th International Zurich Symposium on Electromagnetic Compatibility. – EMC. – Zurich. – 2009.

226. Hoad R. An Investigation into the radiated susceptibility of IT Networks / R. Hoad, N.Carter, D.Herke // Conference Proceedings of EMC Europe. — 2004. — Eindhoven. The Netherlands.
227. Hoad R. Progress in IEC SC 77C high-power electromagnetics publications in 2009 / R. Hoad W.Radasky // Electromagnetic Compatibility (APEMC), 2010 Asia-Pacific Symposium on 2010. – P. 762–765.
228. IEC/TR 61000-1-5: 2004. Electromagnetic compatibility (EMC). – Part 1–5: General — High power electromagnetic (HPEM) effects on civil systems. – 43 p.
229. IEC/TR 61000-3-7(2008) Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 3–7: Limits — Assessment of emission limits for the connection of fluctuating installations to MV, HV and EHV power systems. – 65 p.
230. Ultra-wideband transmitter research / Lehr J.M., Baum et. All. – IEEE Transactions on Plasma Science, Vol. 26. No. 3.
231. IEC/TS 61000-5-8: 2009 Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 5–8: Installation and mitigation guidelines - HEMP protection methods for the distributed infrastructure. – 27 p.
232. IEC/TS 61000-5-9: 2009 Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 5–9: Installation and mitigation guidelines - System-level susceptibility assessments for HEMP and HPEM. – 66 p.
233. IEEE P1642 D5 Draft. Recommended Practice for Protecting Public Accessible Computer Systems from Intentional EMI, 2010.
234. Jang J.-S.R. ANFIS: Adaptive Network-based Fuzzy Inference Systems / J.Jang // IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, 23(3), 1993.
235. Jeffrey I. Hardware invariant protocol disruptive interference for 100BaseTX Ethernet communications / I. Jeffrey, C.Gilmore, G.Siemens. – IEEE Trans. Electromagn. Compat. – Vol.46. – № 3. – US. – P. 412–422.

236. Jeffrey I., Behzad Kordi Hardware Invariant Protocol Disruptive Interference / I. Jeffrey, Joe LoVetri // International Symposium on Electromagnetic Compatibility, 2004. – Vol.2. – P.703–707.
237. Kirichek R. Improvement of Russian regulatory system on protection against electromagnetic attacks / R.Kirichek, V.Chvanov // 9th International Symposium on EMC: proceedings. — Wroclaw (Poland), 2010. – P.567-571.
238. Kohlberg I. A stochastic process and chaos interpretation of HPE and HPM effects on electronic systems / I. Kohlberg // Electromagnetic Compatibility (APEMC), 2010 Asia-Pacific Symposium. – 2010. – P.770–773.
239. Kohlberg I. Some Mathematical Considerations Regarding the Calculation of Permanent Damage of Devices Due to EMP Pulses. 1976. – Technical rept. – P. 37.
240. Kohlberg I. Adverse electromagnetic effects on large networks Antennas and Propagation (APSURSI) / I. Kohlberg, C.Baum, D.Gir // 2011 IEEE International Symposium. – 2011. – P. 599–602.
241. Kohlberg I. Some Theoretical Considerations Regarding the Susceptibility of Information Systems to Unwanted Electromagnetic Signals / I. Kohlberg, R.Carter // Proceedings of the 14th International Zurich Symposium on Electromagnetic Compatibility, Zurich, Switzerland. – 2001. – P.41–46.
242. Kohlberg I. Functional and Communication Theory Models in Susceptibility Analysis / I. Kohlberg, R. L Gardner // Conference Paper, IEEE-APS/URSI International Symposium, Columbus, Ohio, 2003.
243. Kohlberg I. Systems Topology for Electromagnetic Effects on Local Area Networks and Information Systems / I. Kohlberg, R.L.Gardner // Proceedings of the International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications (ICEAA 01), Torino, Italy. – 2001. – P.83–86.
244. Kohlberg I., Hemmady S. Principles of statistical physics as applied to EMC Electromagnetics in Advanced Applications (ICEAA) / I. Kohlberg // 2010 International Conference. — 2010. — P.685–688.
245. Kohlberg ., McMillan R.W., von Laven S.A. Computation of IEMI fields through layered media using the radiation principle / I. Kohlberg // Electromagnetics in Ad-

- vanced Applications, 2009. ICEAA '09. International Conference. — 2009. — P. 894–897.
246. Kohlberg I., Toton E. Advanced Concepts for Evaluating Susceptibility and Survivability of Large Infrastructure Networks against IEMI / I. Kohlberg. — Electromagnetics in Advanced Applications. — ICEAA 2007. — International Conference. — P.760–763.
247. Kurochkin B.F., Myrova L.O., Tyapin M.S. Defending information systems from the sources of super wideband electromagnetic radiation, Proceedings of International Conference «Information and Telecommunication Technologies in Intelligent Systems», Catania, Italia, May 27- June 03, 2006, p.9-23
248. Lahart M.J., Fazi C., Kohlberg I. Complex Modes of a Dielectric Covered Ground Plane / M. J. Lahart and at all // Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals, The Third International Conference. — 2006. — P. 272–275.
249. Loborev V.M. The modern research problems / V.M. Loborev // Plenary Lecture, AMEREM Conference. Albuquerque, NM, 1996.
250. Mansson D., Nilsson T., Thottappillil R. and at all. Propagation of UWB transients in low-voltage installation power cables / D.Mansson and at all // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. — 2007. — Vol. 49. — № 3. — P. 314–321.
251. Mayers G.J. Advances in computer architecture. 2nd edition. - JONH WILLEY & SONS. 1982.
252. Messier M., Radasky W., Madrid M. Testing of personal computers to IEC standard waveforms / M. Messier // Metatech Corporation, Meta-R-174, 2000. — P. 22–28.
253. Misunas D.P. A computer architecture for data-flow computation // Laboratory for Computer Science. MIT. – Cambridge. MA. 1978.
254. Mojert C., Nitsch D., Friedhoff H., Maack J., Camp M. UWB and EMP susceptibility of modern computer networks / C. Mojert and at all // in Proc. EMC Zurich. — 2001. — P. 47–52.
255. Negneyitsky M. Artificial intelligence: a guide to intelligent systems. Addison-Wesley, 2002.

256. Nesteruk G.Ph., Kupriyanov M.C. Neural-fuzzy systems with fuzzy links // Proc. of the VI-th Int. Conference SCM'2003. – СПб.: СПбЭТУ, 2003. т. 1. С. 341-344.
257. Nesteruk Ph., Kharchenko A., Nesteruk G. Information safety in electronic business: adaptive model of systems safety of information technologies // Proc. of Int. Conf. "Information technology in business" (St. Petersburg, October 8-10, 2003) - St. Petersburg, 2003. P. 124-128.
258. Parfenov Y.V., Kohlberg I., Radasky W.A., Titov B.A., Zdoukhov L.N. The probabilistic analysis of immunity of a data transmission channel to the influence of periodically repeating voltage pulses / Y.V. Parfenov and at all // Electromagnetic Compatibility and 19th International Zurich Symposium on Electromagnetic Compatibility. — APEMC 2008. Asia-Pacific Symposium. — P.283–286.
259. Parfenov Y.V., Zdoukhov L.N., Radasky W.A. and Ianoz M. Conducted IEMI Threats for Commercial Buildings / Y.V. Parfenov and at all // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. — 2004. — Vol.46. — № 3. — P. 404.
260. Porras P.A., Ilgun K., and Kemmerer R. A. State transition analysis: A rule-based intrusion detection approach. // IEEE Trans. on Software Engineering, 1995. SE-21. P. 181 – 199.
261. Potrykus H.G., Kohlberg I. Resistance to extended IEMI by physical/correlated wireless random and non-random networks / H. G. Potrykus // Electromagnetic Compatibility. — EMC-Zurich. — 2006 17th International Zurich Symposium. — P.176–179.
262. Radasky W.A. Protection of commercial installations from the high-frequency electromagnetic threats of HEMP and IEMI using IEC standards / W.A. Radasky // Proceedings 2010 Asia-Pacific Symposium on Electromagnetic Compatibility (APEMC). - 2010. - P.758-761.
263. Radasky W.A., Messier M.A., Wik M.W. Intentional electromagnetic interference (EMI) - Test data and implications / W.A. Radasky and at all // Proc. of the 14th Int. Zurich Symp. on EMC. Zurich. - 2001. - P.29–36.

264. Radasky W.A., Messier M.A., Wik M.W. Intentional electromagnetic interference (EMI) — Test data and implications / W.A. Radasky and at all // Proc. of the 14th Int. Zurich Symp. on EMC. Zurich. — 2001. — P.29–36.
265. Radasky W., Kozlov A., Louzganov S., Parfenov Y.V., Povareskin M., Polischouk V., Shurupov A., Zdoukhov L. Research of Power Line Insulators Flash-over at Joint Effect of High Voltage Disturbance and Line Operating Voltage / W.A. Radasky and at all // Proc. of 16th International Zurich Symposium on EMC, Zurich — 2005. — P. 385.
266. Savage E., Radasky W., Smith K., Madrid M. Pulse Testing of Network Interface Cards for Upset and Damage / E. Savage and at all // 2008 Asia-Pacific Symposium on Electromagnetic Compatibility & 19th International Zurich Symposium on Electromagnetic Compatibility. Singapore. -2008.- P. 287–290.
267. Tan K. The Application of Neural Networks to UNIX Computer Security //Proc. of the IEEE International Conf. on Neural Networks, 1995. V.1. P. 476-481.
268. Tetsuya Tominaga, Carpenter D.J., Hidenori Sekiguchi, Shinji Seto, Yasunao Suzuki, Mitsuo Hattori. Protecting Telecommunication Devices against High Power Electromagnetic Effects: The Work of ITU-T SG5 Q15 / Tetsuya Tominaga and at all // 2009 International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Kyoto, 2009.
269. Tetsuya Tominaga, Ryuichi Kobayashi, Hidenori Sekiguchi, Shinji Seto. Standardization Related to Electromagnetic Security / Tetsuya Tominaga and at all // NTT Technical Review. - Vol. 6. - № 10. - 2008.
270. URSI resolution on Criminal activities using electromagnetic tools. - The Radio Science Bulletin. - 1999. - № 290. - P. 62–63.
271. Willinger W. Traffic Modeling for High-Speed Networks: Theory Versus Practice. To appear in: Stochastic Networks / F.P. Kelly and R.J. Williams (Eds). The IMA Volumes in Mathematics and Its Applications, Springer-Verlog, 1994.
272. Генераторы видеоимпульсов с формой, близкой к гауссовой кривой [Электронный ресурс] / Режим доступа:
http://trimcom.ru/index.php?level=russian_nextchild_of_1177748805&time=1177749180, свободный. — Загл. с экрана.

273. Грозозащита и помехозащита длинных симметричных линий связи (витой пары, Ethernet) [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://www.rts.ua/rus/forpro/615/0/27/>, свободный. — Загл. с экрана.
274. Информационно-аналитический отчет о деятельности международных организаций по стандартизации телекоммуникаций МСЭ-Т и ETSI [Электронный ресурс] / 2009. - № 12(60). - Режим доступа: http://www.zniis.ru/istandart/Report_ITU_12_2009.pdf, свободный. - Загл. с экрана.
275. К.81 (11/2009) High-power electromagnetic immunity guide for telecommunication systems [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://www.itu.int/itu-t/recommendations/index.aspx?ser=K>, свободный. - Загл. с экрана.
276. Коэн Ф. 50 способов обойти систему обнаружения атак / Пер. с англ. А. В. Лукацкого (http://infosec.ru/pub/pub/13_09.htm).