

**Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии
Метрологическая ассоциация промышленников и предпринимателей
Технический комитет по стандартизации
ТК 30 «Электромагнитная совместимость»
Московский институт электроники и математики НИУ ВШЭ
Компания «ДИПОЛЬ»
ЗАО Научно-испытательный центр «САМТЭС»
TESEQ**

**II Всероссийская
научно-техническая конференция**

**ТЕХНОЛОГИИ, ИЗМЕРЕНИЯ И ИСПЫТАНИЯ
В ОБЛАСТИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ**

ТехноЭМС 2015

ТРУДЫ КОНФЕРЕНЦИИ

**г. Москва
1– 2 апреля 2015 г.**

УДК 621.396.61

ББК 32.811.7

Т 38

Т 384

Технологии, измерения и испытания в области электромагнитной совместимости. Труды II Всероссийской НТК «Техно-ЭМС 2015», Москва 1–2 апреля 2015 /Под ред. А.С. Кривова, Л.Н. Кечиева – М.: Грифон, 2015. – 121 с.

ISBN 978-5-98862-231-4

В сборнике приведены материалы II Всероссийской конференции «Техно-ЭМС 2015», посвященной технологии, измерениям и испытаниям в области электромагнитной совместимости.

Сборник предназначен для специалистов в области проектирования технических средств, электромагнитной совместимости, а также занимающихся испытаниями и измерениями в этой области.

Редакционная коллегия:

д.т.н., проф. Кривов А.С.

д.т.н. Смирнов А.П.

д.т.н., проф. Кечиев Л.Н.

Информационная поддержка:

Журнал «Технологии ЭМС»

Журнал «Приборы»

УДК 621.396.61

ББК 32.811.7

© А.С. Кривов, Л.Н. Кечиев
составление, редактирование

ISBN 978-5-98862-231-4

Статьи рецензируются. Статьи опубликованы в авторской редакции. Мнение членов редакционной коллегии может не совпадать с точкой зрения авторов публикаций. Перепечатка материалов допускается только с письменного разрешения редакции. Рукописи не возвращаются.

ОГЛАВЛЕНИЕ

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Чаусов В.Н., Файзрахманов Н.И. Техническое регулирование электромагнитной совместимости и других требований к электрической и электронной продукции в ЕАЭС..... | 5 |
| Кривов А.С. Основные тенденции развития защиты электронных устройств от электростатических разрядов при производстве, монтаже, транспортировании..... | 7 |
| Тухас В.А. Разработка нового испытательного оборудования и средств измерений в области электромагнитной совместимости в свете тенденций развития международной и отечественной нормативной базы..... | 10 |
| Муравьев О.А. Измерительный комплекс для проведения испытаний на устойчивость к радиочастотным электромагнитным полям..... | 13 |
| Муравьев О.А., Ярец В.В. Передвижная испытательная лаборатория для измерения электромагнитных помех от железнодорожного подвижного состава и систем на соответствие требованиям технических регламентов Таможенного союза..... | 18 |
| Сахаров К.Ю., Подосенов С.А., Сухов А.В., Туркин В.А., Михеев О.В., Алешко А.И. Метрологическое обеспечение измерений импульсных электромагнитных полей в пикосекундном диапазоне..... | 22 |
| Шаммасов Р.Р. Обзор методов испытаний трехкоординатных рамочных антенн (ТРА) на основе действующих стандартов..... | 26 |
| Мещеряков В.Е. Совершенствование методов расчета молниезащиты..... | 29 |
| Шишигин Д.С. Программное обеспечение для задач молниезащиты, заземления, ЭМС..... | 32 |
| Бутин В.И., Кундышев П.Я. Метод исследования помехоустойчивости аппаратуры беспилотного летательного аппарата с ограниченным ресурсом..... | 35 |
| Смирнов Ю.Н. Особенности проведения испытаний на устойчивость к электромагнитному полю с расширенным диапазоном и большим уровнем напряженности поля..... | 39 |
| Акбашев Б.Б., Балюк Н.В., Кечиев Л.Н. Воспроизведение полей электромагнитных импульсов и их действие на объекты..... | 40 |
| Кечиев Л.Н., Крючков Н.М., Кузнецов В.В. Использование свободного ПО QUCS для организации учебного процесса по курсу «Электромагнитная совместимость РЭС»..... | 44 |
| Кечиев Л.Н., Михеев В.А. Функциональная безопасность электронных систем, связанная с ЭМС, и задачи их проектирования..... | 46 |
| Кечиев Л.Н., Шатов Д.С. Использование средств моделирования при разработке распределенной системы питания цифровых модулей..... | 52 |
| Кузнецов В.В. Упрощенная модель воздействия ЭСР на полевой транзистор, смонтированный на печатной плате..... | 55 |
| Довгун В. П., Сташков И.А. Проблемы обеспечения электромагнитной совместимости в тяговых сетях переменного тока..... | 57 |
| Союстова А.О. Экспертиза электромагнитной безопасности морских объектов приоритетных областей судостроительной отрасли..... | 59 |
| Жегов Н.А., Кириллов В.Ю., Клыков А.В., Томилин М.М. Эффективность экранирования бортовых кабелей летательных аппаратов. Сравнение методов исследования..... | 63 |

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Кириллов В.Ю., Томилин М.М. Исследование средств антистатической защиты бортовых кабелей космических аппаратов от магнитосферной плазмы..... | 65 |
| Соколов С.А. Воздействие ударов молнии на полностью диэлектрический оптический кабель..... | 67 |
| Харченко И.А. Электромагнитная совместимость коммутационной аппаратуры с перспективными бортовыми системами электропитания летательных аппаратов..... | 70 |
| Дементьев А.Н., Назаров Ю.Б., Смирнов М.Е. Интегральное уравнение для полосковой рамочной антенны, расположенной на диэлектрическом цилиндре..... | 74 |
| Исаков С.В. Сазонов Н.И. Отработка современной технологии сертификационных испытаний гражданских воздушных судов (ВС) на стойкость к воздействию внешних электромагнитных полей высокой интенсивности (HIRF)..... | 78 |
| Смирнов А.П., Басалаев К.К. Развитие требований к характеристикам электромагнитной совместимости общепромышленной и авиационной продукции и современные технические средства для их оценки..... | 81 |
| Лазарев Д.В. Технология и мобильный комплекс нового поколения для мониторинга электромагнитных полей морских объектов в верхней полусфере..... | 87 |
| Лазарев Д.В. Технология расчётной оценки стойкости радиоэлектронных устройств к сверхкоротким электромагнитным излучениям большой мощности..... | 90 |
| Вацков П.Ю. Особенности нормирования параметров ЭМС модулей бортовой аппаратуры малых космических аппаратов..... | 93 |
| Сарылов О.В., Сарылов В.Н. Электромагнитная обстановка в районе размещения белоярской АЭС. Потенциальное влияние ЭМО на безопасность..... | 94 |
| Сарылов В.Н., Сарылов О.В. Обеспечение электромагнитной совместимости систем контроля и управления атомных станций на этапах жизненного цикла..... | 105 |
| Кузнецов К.А. Оптимизация процесса испытаний на помехоэмиссию и устойчивость к излучаемым помехам с использованием трехосевой конфигурации безэховой экранированной камеры..... | 114 |
| Басалаев К.К. Альтернативные методы оценки эмиссии и испытаний на устойчивость малогабаритных объектов с использованием ГТЕМ-камер..... | 116 |
| Соковишин М.А. Сертификационные и предквалификационные испытания на ЭМС. Реализация различных концепций в современном измерительном оборудовании..... | 119 |
| Хамадулин Э.Ф. Развитие испытательной базы для оценки показателей ЭМС в натуральных и лабораторных условиях..... | 120 |

Чаусов В.Н.

**Председатель технического комитета по стандартизации Республики Беларусь
ТК ВУ 19 «Электротехника и электроника»
Минск, Республика Беларусь, тел. +375 17 262-88-54,
факс +375 17 262-15-20, E-Mail: ychausov@belgiss.by**

Файзрахманов Н.И.

**Председатель технического комитета по стандартизации
ТК 30 «Электромагнитная совместимость технических средств»,
г. Москва, Россия, тел. раб.+7 (499) 253-99-55, тел. моб.+7 (903) 177 35 27,
E-Mail: nikolay_f@bk.ru**

ТЕХНИЧЕСКОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ И ДРУГИХ ТРЕБОВАНИЙ К ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ И ЭЛЕКТРОННОЙ ПРОДУКЦИИ В ЕАЭС

Раздел I. Актуальные вопросы технического регулирования электрической и электронной продукции в Евразийском экономическом союзе и Евросоюзе.

1. Переход от традиционного подтверждения соответствия обязательным для исполнения требованиям на основе соответствия требованиям стандартов к соответствию техническим регламентам ТС и ЕАЭС.

2. Принятые технические регламенты Таможенного союза в области электротехники и электроник. Проблемные вопросы и перспективы развития технического регулирования.

2.1. Технический регламент Таможенного союза ТР ТС 004/2011 «О безопасности низковольтного оборудования» и нормативные документы, обеспечивающие его действие. Проект изменений № 1, вносимых в ТР ТС 004/2011.

2.2. Технический регламент Таможенного союза ТР ТС 020/2011 «Электромагнитная совместимость технических средств» и нормативные документы, обеспечивающие его действие. Проект изменений № 1, вносимых в ТР ТС 020/2011.

2.3. Итоги заседания объединённой рабочей группы, по подготовке изменений № 1, вносимых в ТР ТС 004/2011 «О безопасности низковольтного оборудования» и ТР ТС 020/2011 «Электромагнитная совместимость технических средств».

2.4. Другие технические регламенты Таможенного союза, в область применения которых входит электротехническая продукция. Проблема дублирования требований и пути её разрешения.

2.5. О разработке и актуализации перечней международных и региональных стандартов, а в случае их отсутствия – национальных (государственных) стандартов государств – членов Таможенного союза, обеспечивающих соблюдение требований технического регламента Таможенного союза и необходимых для осуществления оценки (подтверждения) соответствия.

3. Вновь принятые Директивы и регламенты Евросоюза, касающиеся электротехнической продукции.

3.1. Директива 2014/30/EU, заменяющая Директиву 2004/108/EC, касающуюся сближения законодательства государств-членов ЕС в области электромагнитной совместимости.

3.2. Директива 2014/35/EU, заменяющая Директиву 2004/108/EC по сближению законодательства государств-членов ЕС, касающегося низковольтного оборудования.

3.3. Директива 2009/125/EC, вводящая систему установления требований к экологическому проектированию энергопотребляющей продукции (требования к энергоэффективности), и вновь принятые исполнительные меры (регламенты ЕС), реализующие данную Директиву в отношении конкретных групп продукции.

3.4. Директива 2010/30/EU, вводящая систему установления требований к информированию потребителя о характеристиках энергопотребляющей продукции (маркировка энергоэффек-

тивности), и вновь принятые исполнительные меры (регламенты ЕС), реализующие данную Директиву в отношении конкретных групп продукции.

3.4. Директива 2011/65/EU RoHS 2, заменившая Директиву 2002/95/EC RoHS 1, касающуюся ограничения использования определенных опасных веществ в электрическом и электронном оборудовании.

3.4. Директива 2012/19/EU WEEE 2, заменившая Директиву 2002/96/EC WEEE 1, касающуюся обращения с отходами электрических и электронных изделий.

4. Разрабатываемые технические регламенты Евразийского экономического союза в области электротехники и электроники.

4.1. Проект ТР ТС «О требованиях к энергетической эффективности электрических энергопотребляющих устройств». Итоги публичного обсуждения и необходимость в скорейшем принятии технического регламента.

4.2. Проект ТР ТС «О требованиях к энергетической эффективности электрических энергопотребляющих устройств». Итоги внутригосударственного согласования, обстоятельства и причины приостановки разработки проекта.

4.3. Проект ТР ЕАЭС «Об ограничении применения опасных веществ в изделиях электротехники и радиоэлектроники». Особенности предмета технического регулирования и подтверждения соответствия. Завершающая стадия разработки проекта.

5. Потенциально опасная электротехническая продукция и связанные с ней аспекты, не охваченные техническим регулированием в Евразийском экономическом союзе. Проекты технических регламентов ЕАЭС, предлагаемые к разработке.

Раздел II. Подтверждение соответствия и другие вопросы практического применения ТР ТС 020/2011 «Электромагнитная совместимость технических средств».

1. Базовые различия между системами оценки соответствия Европейского союза и Евразийского экономического союза;

2. Вопросы практического применения положений ТР ТС 020/2011 (и ТР ТС 004/2011), связанных с процедурами подтверждения соответствия технических средств;

3. Идентификация продукции, попадающей в сферу действия ТР ТС 020/2011;

4. Существующая практика аккредитации на право проведения подтверждения соответствия требованиям ТР ТС 020/2011 (и 004/2011).

Кривов А.С.
ЗАО «НПФ «Диполь», г. Москва, Россия,
тел./факс +7(495)65-20-02, e-mail ask@dipaul.ru

ОСНОВНЫЕ ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ ЗАЩИТЫ ЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ ОТ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИХ РАЗРЯДОВ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ, МОНТАЖЕ, ТРАНСПОРТИРОВАНИИ

Электростатический разряд – импульсный перенос электрического заряда, - один распространенных видов воздействий электромагнитной обстановки на техническое средство. Соответствующие испытания технических средств на устойчивость к электростатическим разрядам (ЭСР) предусмотрены Техническим регламентом ТС и различаются уровнем воздействий и способом реализации, которые достаточно детально описаны в стандартах методов испытаний устройств на ЭМС, например, ГОСТ Р 51317.4.2-2010 (IEC 61000-4-2-2008).

Разрушительные воздействия ЭСР происходят не только тогда, когда готовое техническое средство используется его приобретателем по назначению. Существует целая область деятельности которая занимается предотвращением и обеспечением устойчивости к ЭСР компонентов составных частей и изделий на этапах изготовления, транспортирования, монтажа. Антистатической защитой производств начали заниматься параллельно с созданием электронной промышленности. Уровень критических параметров импульса разряда на чувствительные компоненты на порядок ниже, чем на готовые технические средства. Это создает множество проблем при организации, оснащении электронных производств, которые решаются на основе выработанных за последние десятилетия мероприятий, большая часть которых описана в системе стандартов МЭК 61340, внедренной в РФ как система ГОСТ Р 53734. Таким образом, существует область деятельности специалистов в области электроники, занимающихся электростатическими разрядами, которая не попадает под действие обязательных требований технического регламента по ЭМС. Ущерб от воздействия ЭСР на предприятиях электроники и приборостроения огромен. По данным зарубежных специалистов ЭСР являются причиной более 55% отказов электронных устройств, на устранение последствий которых ежегодно затрачивается несколько миллиардов долларов.

Перечень необходимых мероприятий по защите чувствительных устройств, номенклатура средств защиты и уровень требований к испытаниям последние несколько лет растут лавинообразно параллельно с развитием технологий электронного приборостроения, прежде всего, внедрения микро- и нанoeлектронных изделий. В настоящее время невозможно с технической и экономической точки зрения создать универсальные подходы для защиты всех классов чувствительных к ЭСР изделий. Критический уровень воздействия ЭСР для современных компонентов различаются от 10 до 2000 В. Исключить угрозу таких ЭСР на производствах - очень сложная научно-техническая и организационная задача. Поэтому в начале 2000х годов принята новая методология борьбы с электростатическими разрядами на электронных производствах, приборостроительных предприятиях, сборочных и ремонтных участках предприятий. Современная методология борьбы с электростатическими разрядами представлена в виде системы стандартов серии МЭК 61340 (ГОСТ Р 53734).

В основе всей системы мер по антистатической защите лежит анализ и принятие решений на основе текущей электростатической обстановки и критических уровней ЭСР на конкретных производствах, участках, рабочих местах. Высокая чувствительность современной электроники к ЭСР, многообразие потенциальных источников ЭСР, их изменчивость в технологических процессах, высокая стоимость средств контроля и защиты делает эту задачу сложной и перманентной. Современная система мер электростатической защиты построена как эффективный и непрерывный процесс управления электростатической обстановкой на предприятии по показателям состояния средств защиты. Программа управления ЭСР представляет собой совокупность организационных мероприятий, специалистов с наделенным полномочиями, требований и методов испытаний, проверки соответствия средств защиты. Традиционные и новые средства антистатической защиты необходимо испытывать при приемке и периодически в ходе применения. Как программа в целом, так и методы испытаний средств защиты определены национальными стандартами серии ГОСТ Р

53734. Общая схема деятельности по защите электроники от электростатических разрядов представлены в базовых стандартах: ГОСТ Р 53734.5.1 – 2009 (МЭК 61340-5-1:2007) Электростатика. Раздел 5-1: Защита электронных устройств от электростатики. Основные требования и ГОСТ Р 53734.5.2 – 2009 (МЭК 61340-5-2:2007) Электростатика. Раздел 5-2: Защита электронных устройств от электростатики. Руководство по применению.

Изучение и внедрение общетехнических стандартов, описывающих систему понятий и определений, модели электростатических разрядов позволяют оценить потенциальную опасность электростатических воздействий на продукцию, определить общую политику предприятия по электростатической защите, сформировать план мероприятий в этой области. Требования и методы испытаний средств антистатической защиты составляют две группы стандартов:

методы испытаний материалов (ГОСТ Р 53734.2.-2.3) определяют общие процедуры контроля материалов различных элементов защиты (напольных покрытий, рабочих поверхностей, тканей). В соответствии с программой управления ЭСР контроль осуществляется на различных этапах применения;

методы испытаний средств защиты (обувь, пол – по отдельности и в комбинации, антистатические браслеты, одежда, ионизаторы) описаны в стандартах ГОСТ Р 53734.4.1-4.10. Эти стандарты содержат методы испытаний при приемке средств защиты у изготовителя и при проведении проверок их соответствия в процессе применения на предприятии. Последние представляют собой упрощенные методики, которые необходимы для контроля сохранности свойств средств защиты (от износа, загрязнения и др. факторов). В соответствии с программой управления ЭСР эти проверки должны быть регулярными.

Стандарты методов испытаний серии ГОСТ Р 53734 содержат указания о требованиях к процедурам измерений при испытаниях продукции изготовителем, при приемке продукции у поставщика, а также об упрощенных процедурах проверки состояния на предприятии, применяющем средства защиты. В докладе содержатся анализ стандартных методов испытаний и рекомендации специалистам предприятий.

Основные тенденции развития требований, методов и средств антистатической защиты связаны с развитием потребностей изготовителей электронной аппаратуры и новыми проблемами проектантов в прикладных областях, использующих электронные изделия. В будущем можно ожидать пересмотра большого количества стандартов серии МЭК 61340. Долговременный характер носят тенденции развития методов и средств защиты от ЭСР, которые связаны со снижением порога потенциала ЭСР для новых высокочувствительных элементов до десятков вольт. В настоящее время указанная тенденция проявляется в развитии методов испытаний упаковки и самих компонентов на устойчивость к ЭСР. Если сейчас, чаще всего, мы используем модель человеческого тела (МЧТ по ГОСТ Р 53734.3.1), а иногда механическую модель (ММ по ГОСТ Р 53734.3.2), то уже запланирована разработка стандарта по модели ЭСР с заряженного устройства (ЗУ). В докладе приведены отличия моделей ЭСР по стандартам ЭМС и антистатической защиты.

Другим важным направлением развития деятельности по антистатической защите электронных производств является её распространение на автоматизированную сборку электронных устройств. Концепция мероприятий в этой области обсуждается уже три года и пока не завершена. Это не мешает появлению новых технических решений по антистатической защите технологического оборудования на основе применения специальных материалов, новых средств контроля параметров ЭСР с целью анализа возможных последствий.

Инициаторами целой группы новых работ по защите от ЭСР выступают предприятия, специализирующиеся на оснащении офисных и торговых помещений, чистых помещений, организаций здравоохранения. Эти направления сейчас активно обсуждаются специалистами по антистатической защите с привлечением специалистов по проектированию соответствующих объектов.

В настоящее время нет принципиальных трудностей в реализации современной системы стандартов по антистатической защите. Однако имеются организационные проблемы. Существуют риски приобретения некачественных средств защиты и неправильного их использования. На начальном этапе внедрения стандартов ГОСТ Р 53734 рекомендуется помощь консультантов для обучения и подготовки рекомендаций для конкретных предприятий. Решение о применении или исключении рекомендуемых средств электростатической защиты могут применяться на основе четких представлений об их задачах и возможностях. Непонимание базовых принципов защиты от ЭСР для современных компонентов электронных устройств может приводить к ошибочным реше-

ниям, повышающим риск опасных ЭСР. Так, например, в Роскосмосе был разработан ОСТ 92-1615-2013 «Микросхемы интегральные и приборы полупроводниковые. Общие требования по защите от статического электричества», который представляет собой доработанный отраслевой стандарт 1974 года. Он, хотя и содержит ссылки на национальные стандарты серии ГОСТ Р МЭК 53734, но, вследствие большого количества конкретных требований, искажающих принципиальные положения организации работ, и ошибок методологии антистатической защиты современных электронных и приборостроительных производств, способствует увеличению риска опасных ЭСР.

Повышение качества и надежности электронных устройств на основе современного подхода к антистатической защите производств имеет большие перспективы. Разработанная в виде стандартов ГОСТ Р 53734 новая система требований к защите электронных устройств от ЭСР на этапах их создания и транспортирования нуждается в освоении и внедрении на электронных производствах, в дальнейшем развитии технических средств контроля и испытаний.

Тухас В.А.
ООО НПП «Прорыв», г. Петрозаводск, Россия
Тел.: (8142) 76 13 49, факс: (8142) 76 88 52, E-mail: chief@proryvnpp.ru

РАЗРАБОТКА НОВОГО ИСПЫТАТЕЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ И СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ В ОБЛАСТИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ В СВЕТЕ ТЕНДЕНЦИЙ РАЗВИТИЯ МЕЖДУНАРОДНОЙ И ОТЕЧЕСТВЕННОЙ НОРМАТИВНОЙ БАЗЫ

Тенденции развития международной и отечественной нормативной базы в области ЭМС определяются, в первую очередь, особенностями развития самих технических средств (ТС), к которым следует отнести миниатюризацию элементной базы, использование микропроцессорных устройств с уменьшением уровней и длительностей сигналов для передачи информации (с временами срабатывания единицы и доли наносекунд).

Эти особенности приводят к возрастанию чувствительности ТС к электромагнитным помехам.

В то же время, повышение энерговооруженности технологических процессов приводит как к увеличению уровня помех, так и к появлению новых видов помех.

На этом фоне наблюдается ужесточение требований электромагнитной совместимости, которые находят свое выражение в развитии испытаний на ЭМС (стандартизации в области ЭМС). К ним относятся: появление новых видов испытательных воздействий с более высокими скоростями нарастания напряжения и длительностями воздействующих импульсов, соразмерных с длительностями информационных сигналов, увеличение частоты испытательных воздействий, увеличение рабочих токов ТС на которых нормируется их помехоэмиссия.

В ряде случаев меняется философия самих ЭМС-испытаний: при выборе видов и уровней испытательных воздействий превалирующим становятся характеристики ЭМО (учитываются риски изменения ЭМО) при которых будет применяться ТС, а не требования стандартов на тип однородной продукции (См. например, ИЕС 60601-1-2:2014, Ed.4 (медицинская техника)). И, как следствие, испытания ТС проводятся при более высоких испытательных воздействиях.

Особенностью испытательного оборудования НПП «Прорыв», в большинстве случаев, являются жесткие, стандартизированные уровни испытательных воздействий в соответствии с требованиями на данный вид испытаний. Функция плавного изменения уровня воздействия, на наш взгляд, является избыточной, поскольку измерения устойчивости элементной базы ТС дают разброс значений от 30% до 100% и выше.

С учетом указанных тенденций научно-производственное предприятие «Прорыв» в настоящее время разрабатывает и поставляет заказчикам испытательные генераторы и программно-аппаратные комплексы для следующих видов испытаний:

1. Испытания на устойчивость к электростатическому разряду:

ТС; смарт-карт; космических аппаратов (КА) для проверки качества электромагнитной экранировки электронных блоков, бортовой кабельной сети, а также КА в целом от помех, создаваемых электростатическими разрядами; микросхем и полупроводниковых элементов.

2. Испытания ТС на устойчивость по требованиям общих стандартов ЭМС.

3. Испытания автомобильной техники.

4. Испытания ТС на устойчивость к искажениям и переходным процессам в цепях питания переменного и постоянного тока.

5. Испытания ТС на устойчивость к магнитному полю промышленной частоты, импульсному и затухающему магнитному полю.

6. Испытания ТС на устойчивость к колебательным затухающим помехам.

7. Испытания элементной базы на устойчивость к электромагнитным помехам.

Преимуществами испытательного оборудования НПП «Прорыв» наши заказчики считают сопровождение и модернизация оборудования под новые требования на всех этапах жизненного цикла, наилучший показатель на рынке по критерию «цена владения» и расширение функциональных возможностей под требования Заказчика уже поставленного оборудования.

В настоящее время международная и отечественная нормативная база в области электромагнитной совместимости получила новый импульс в рамках проблемы обеспечения информационно-технологического аспекта энергетической безопасности в электроэнергетике. Вектор развития средств измерения показателей качества электроэнергии (Проект стандарта ИЕС 61000-4-30/Ed3/, дата введения 2016 год) определяется задачами прогноза и предупреждения возникновения неисправностей в энергосистеме, включая обнаружение, локализацию и идентификацию источников помех в энергосистеме для обеспечения превентивных мер. Адекватность и точность разрабатываемых прогнозных технологий напрямую зависит от возможностей средств измерений показателей качества электроэнергии и других электроэнергетических величин. Средства измерения (СИ) «Прорыв» позволяют измерять и проводить анализ ранее не регистрируемых быстропротекающих процессов в энергосистеме и на ее объектах: СИ измеряют импульсное напряжение амплитудой от 0,7 кВ до 6,0 кВ и производят запись импульсного напряжения с частотой дискретизации 20 МГц с длительностью записи до 2,5 мс.

В России с 01.07.2015 вводятся требования к средствам обнаружения преднамеренных силовых электромагнитных воздействий (ГОСТ Р 56093-2014).

В табл. 1 (п.5.6, ГОСТ Р 56093-2014) выделены виды воздействий, регистрируемые различными модификациями СИ «Прорыв».

В настоящее время на базе средств измерения показателей качества электроэнергии «Прорыв» нами разрабатывается автоматизированная информационно-измерительная система безопасности электроэнергии, связанной с ее качеством (АИИС БЭЭ).

Наша система АИИС БЭЭ изначально нацелена на решение задач диагностики энергооборудования, оценки ресурса и поиска источников помех, и в то же время, проводит обработку и вывод информации по требованиям стандартов качества электроэнергии и показателей энергоэффективности. Характерные времена усреднения энергетических характеристик для АИИС БЭЭ: 50 нс – 10 минут. Особо следует отметить, что запись электроэнергетических величин в контрольных точках в режиме реального времени дает лишь исходные данные для дальнейшего построения алгоритмов идентификации технических средств (ТС), режимов и технологических циклов работы как ТС, так и энергосистемы на основе анализ взаимосвязи технического состояния ТС с параметрами генерируемых им токов и напряжений. Система предусматривает решение следующих задач:

1. Получение информации, лежащей в основе идентификации ТС, режимов и технологических циклов работы ТС.
2. Исследование утечки конфиденциальной информации по цепям питания и заземления.
3. Получение информации о возникновении помех и локализации источника помех.
4. Контроль за соблюдением технологических параметров энергосистемы и вновь появляющихся нагрузках посредством снятия «контрольного портрета электросети» и непрерывного отслеживания его изменений в контрольных точках сети.
5. Регистрация показателей качества электроэнергии и их соответствия требованиям стандартов.
6. Получение информации о надежности и энергоэффективности (показатели SAIDI, SAIFI) энергосетевого хозяйства, расчет показателей SAIFI и SAIDI.
7. Контроль срабатывании систем защиты, блокировки и режимов работы систем гарантированного (дизель-генераторы) и бесперебойного (UPS) энергоснабжения.
8. Прогноз состояния энергосистемы и ресурса энергооборудования.
9. Получение информации о дате, времени и месте видео- и аудиосъемок по частотному анализу наводок электрической сети.

Таким образом, нужно решать как измерительные задачи, так и задачи разработки технологий получения новых знаний.

1. К измерительным задачам относятся:

1.1. Измерение, оценка, анализ качества электроэнергии и индексов энергоэффективности электросетевых объектов.

1.2. Измерение электроэнергетических величин для решения вопросов диагностики и прогноза остаточного ресурса электросетевого оборудования.

1.3. Измерение электроэнергетических величин для раннего обнаружения источников помех.

2. К задачам разработки технологий получения новых знаний относятся:

2.1. Разработка алгоритмов прогноза режимной надежности энергосистем.

2.2. Разработка критериев энергоэффективности электросетевых объектов в режиме реального времени.

2.3. Разработка методов поиска источников помех в электрических сетях в режиме реального времени.

Таблица 1

Нормируемые характеристики, значения типовых параметров и типовые обозначения средств обнаружения преднамеренных силовых электромагнитных воздействий по сети электропитания

| № п/п | Вид воздействия, типовое обозначение СОПС | Условие выдачи извещения о ПС ЭМВ |
|-------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1 | Перенапряжения большой длительности СОПС-С ЭП-1 | Обнаружение перенапряжения с кратностью 1,5 и более, действующего более 1с |
| 2 | Низковольтные однократные миллисекундные импульсы напряжения СОПС-С ЭП-2 | Обнаружение тока, превышающего номинальное значение потребляемого ТС АСЗИ тока на 2кА и более, при длительности воздействия 5–20 мс и одновременном воздействии перенапряжения 500 В и более |
| 3 | Высоковольтные однократные миллисекундные импульсы напряжения СОПС-С ЭП-3 | Обнаружение тока, превышающего номинальное значение потребляемого ТС АСЗИ тока на 5кА и более, при длительности воздействия 0,1–2 мс и одновременном воздействии перенапряжения 2 кВ и более |
| 4 | Комбинированные однократные импульсы напряжения(высоковольтные миллисекундные импульсы, наложенные на низковольтные миллисекундные импульсы) СОПС-С ЭП-4 | Обнаружение тока, превышающего номинальное значение потребляемого ТС АСЗИ тока на 2кА и более, при длительном воздействии 5-20 мс и одновременном воздействии перенапряжения 500В и более, в сочетании с обнаружением тока, превышающего номинальное значение потребляемого ТС АСЗИ тока на 5кА и более, при длительном воздействии 0,1–2 мс и одновременном воздействии перенапряжения 2 кВ и более |
| 5 | Высоковольтные периодические микросекундные импульсы напряжения СОПС-С ЭП-5 | Обнаружение периодических импульсов напряжения с амплитудой более 5кВ на эквиваленте нагрузки 50 Ом, частотой осцилляций 0,2–1 МГц и частотой следования 0,1–10 кГц |
| 6 | Высоковольтные однократные наносекундные импульсы напряжения СОПС-С ЭП-6 | Обнаружение однократных импульсов напряжения с амплитудой более 10кВ, длительностью 50-1000нс, на эквиваленте нагрузки 50 Ом |
| 7 | Высоковольтные периодические наносекундные импульсы напряжения СОПС-С ЭП-7 | Обнаружение периодических импульсов напряжения с амплитудой более 10кВ на эквиваленте нагрузки 10 кОм, длительностью 10–100нс и частотой следования 0,1–10 кГц |
| 8 | Периодические импульсы тока короткого замыкания | Обнаружение периодических импульсов тока длительностью 0,1–1 мс и амплитудой более 0,5 кА, следующих с частотой 0,1–10 кГц |

СИ «Прорыв-Т-А И»

СИ «Прорыв-Т-А И»
с датчиком тока

Модификация СИ
«Прорыв»

Муравьев О.А.
Научно-производственное республиканское унитарное предприятие
«Белорусский государственный институт стандартизации
и сертификации», г. Минск, Республика Беларусь, +375297610151,
olegmur@yandex.ru

ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ИСПЫТАНИЙ НА УСТОЙЧИВОСТЬ К РАДИОЧАСТОТНЫМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ ПОЛЯМ

1. Постановка задачи

Активное развитие электронной промышленности в мире порождает проблему электромагнитной совместимости (ЭМС). При проектировании технических средств данная проблема является наиболее сложной для решения.

Актуальность проблемы электромагнитной совместимости технических средств вызвана тем, что конфликты в работе токопроводящих элементов, приборов, оборудования и сетей все чаще возникают в результате взаимодействия электромагнитных полей, которые они создают.

Поставленная в рамках научных исследований задача: разработать автоматизированный измерительный комплекс для проведения испытаний на устойчивость к электромагнитным полям в соответствии с [1], а также обеспечить автоматизацию процессов калибровки, измерения и контроля.

2. Используемое оборудование

- Антенна измерительная ETS-Lindgren 3142E;
- Генератор аналоговых сигналов Agilent N5181A;
- Датчик электромагнитного поля (ДЭП) ETS-Lindgren HI-6105;
- Камера экранированная «безэховая»;
- Ответвители направленные Agilent 772D, 778D;
- Усилители мощности Amplifier Research 250W1000A, 200S1G6;
- ПЭВМ с преобразователем USB – IEEE 488.2 (GPIB) и ПО LabVIEW 8.5;
- Измеритель мощности (базовый блок) R&S@NRP2 с датчиком NRP-Z24.

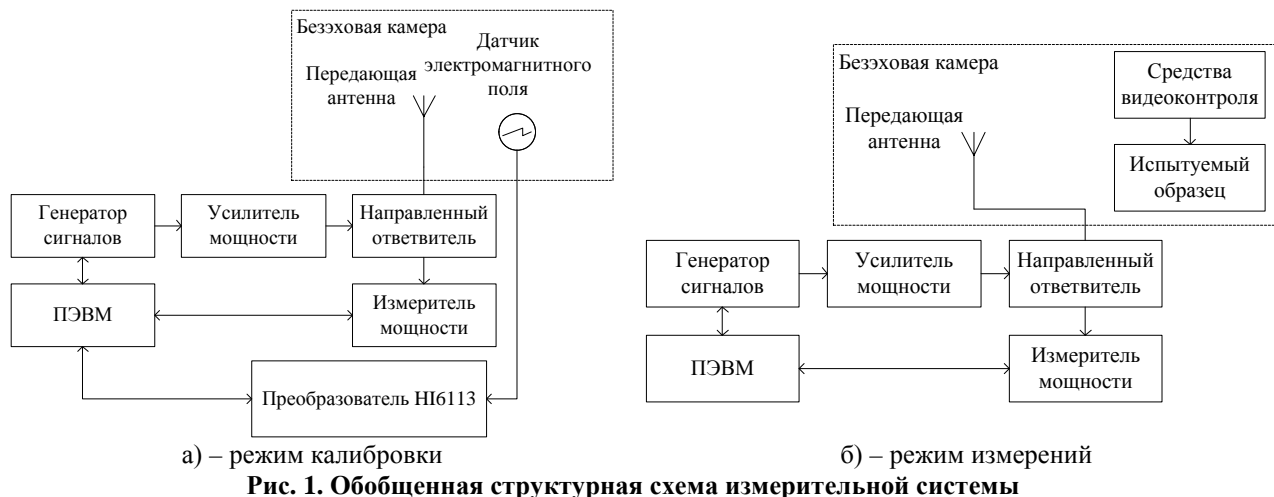
3. Описание решения

3.1. Общий принцип работы измерительной системы

Обобщенная структурная схема комплекса для проведения испытаний на устойчивость к радиочастотным электромагнитным полям приведена на рис. 1. Управление системой и автоматизация процессов измерений осуществляется средствами ПЭВМ. Источником сигнала является высокоточный генератор, который позволяет формировать сигналы требуемой амплитуды и частоты, а также модулировать измерительный сигнал по заданному закону.

Блок усилителей мощности позволяет получить уровни электромагнитного поля стандартных испытательных сигналов амплитудой 1 В/м, 3 В/м и 10 В/м, а также специальные, указываемые в технических условиях на тестируемое оборудование. Уровень сигнала, подаваемого на передающую антенну, контролируется измерителем мощности, подключенным ко вторичному каналу направленного ответвителя. Датчик электромагнитного поля (ДЭП) ETS-Lindgren HI-6105 совместно с преобразователем оптического интерфейса HI6113 образуют цепь обратной связи и используется при калибровке комплекса в плоскости однородного поля (ПОП).

Процесс калибровки и обработки полученных в ее ходе калибровочных значений с алгоритмической точки зрения должен соответствовать требованиям стандарта [1] и представляет собой сложную задачу. Для ее решения было разработано программное обеспечение (ПО), включающее в себя три модуля, логически отражающие три этапа испытаний: калибровка, обработка результатов калибровки и измерение.



3.2. Калибровка

Возможность калибровки ПОП является обязательным условием обеспечения работоспособности разработанного комплекса и соответствует требованиям, приведенным в [1]. Возможны два метода калибровки: при постоянной подводимой к излучающей антенне мощности либо при постоянной напряженности поля [1]. Для проведения калибровки нами был выбран второй метод. Конфигурация площадки для калибровки и точки расположения ДЭП в пределах плоскости однородного поля представлены на рисунке 2.

Полная калибровка ПОП проводится для 16 точек измерительной сетки с шагом 0,5 м. Размер плоскости составляет 1,5×1,5 м с расположением нижней части плоскости на высоте 0,8 м от поверхности пола.

Может быть проведена частичная калибровка плоскости в четырех точках и с шагом между точками 0,5 м при условии, что проекция испытуемого образца (ИО) будет полностью находиться в рамках ПОП.

3.3. Обработка результатов калибровки

Обработка результатов калибровки производится в соответствии с алгоритмом, представленным на рис. 4, с целью оценки измерительной площадки для проведения испытаний на помехоустойчивость по критериям, приведенным в [1].

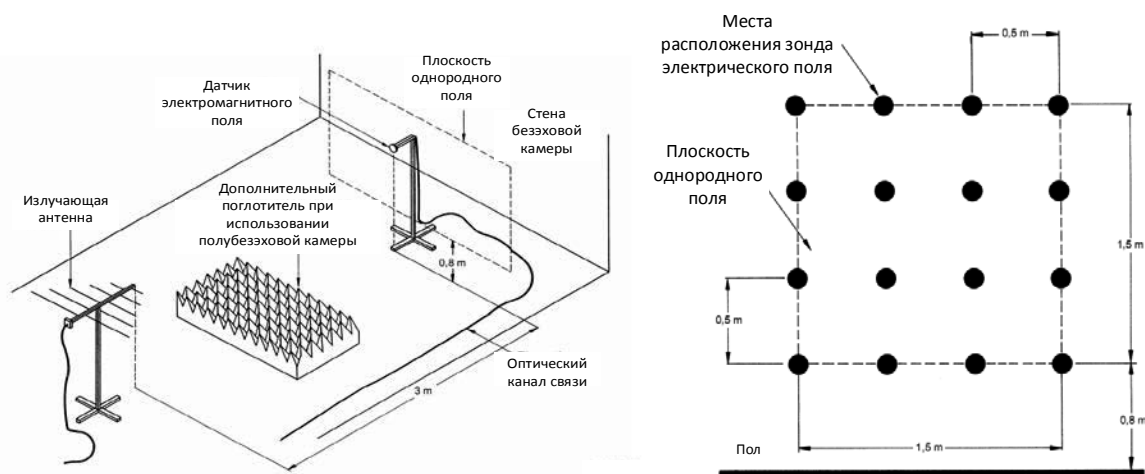


Рис. 2. Расположение передающей антенны и датчика электромагнитного поля при калибровке плоскости однородного поля



Рис. 3. Алгоритм функционирования измерительной системы в режиме «Калибровки»

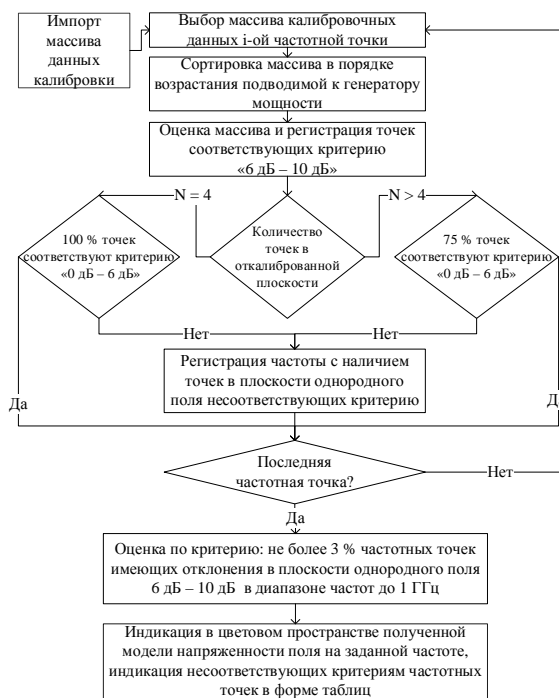


Рис. 4. Алгоритм функционирования комплекса в режиме «Обработки результатов калибровки»

Для обработки результатов оператор импортирует данные калибровки, и программное обеспечение производит обработку калировочных данных.

Испытательное поле считают однородным, если в результате расчета его напряженность, измеряемая в плоскости однородного поля для 75% точек измерения, находится в пределах от 0 до плюс 6 дБ по отношению к номинальному значению. Для минимальной плоскости однородного поля размером 0,5×0,5 м условием однородности является соответствие 100% точек.

В диапазоне частот до 1 ГГц допускается отклонение более плюс 6 дБ, но не превышающее 10 дБ для не более чем 3% частот.

Полученные расчетные данные выводятся на экран в форме таблиц и графиков. При соответствии всем критериям данные калибровки могут быть использованы при проведении испытаний.

3.4. Измерение

Расположение средств измерений и ИО показано на рис. 5.

Запуск модуля ПО «Измерение» обеспечивает доступ оператора к виртуальной панели, представленной на рис. 6.

При испытаниях происходит изменение (качение) частоты выходного сигнала генератора в заданном диапазоне частот. При этом в соответствии с [1] испытательный сигнал является амплитудно- либо импульсно модулированным. Уровень мощности сигнала, подводимого к антенне в каждой частотной точке, считывается из калибровочного файла.

Оператор может зафиксировать частоты, к которым чувствителен ИО и определить критерий качества функционирования используя средства визуального контроля. Также в режиме реального времени можно наблюдать распределение электромагнитного поля в плоскости ПОП на текущей частоте.

По окончании испытаний формируется файл, содержащий информацию о критических для изделия частотах и уровнях сигнала.

4. Оценка точности результатов измерений

По окончании разработки измерительной системы проведена оценка источников неопределенностей и произведен расчет расширенной неопределенности калибровки $U(y)_{CAL} = 1,88$ дБ и измерений $U(y)_{MES} = 2,19$ дБ, $k = 2$. Полученные значения неопределенности соответствуют требованиям [1].

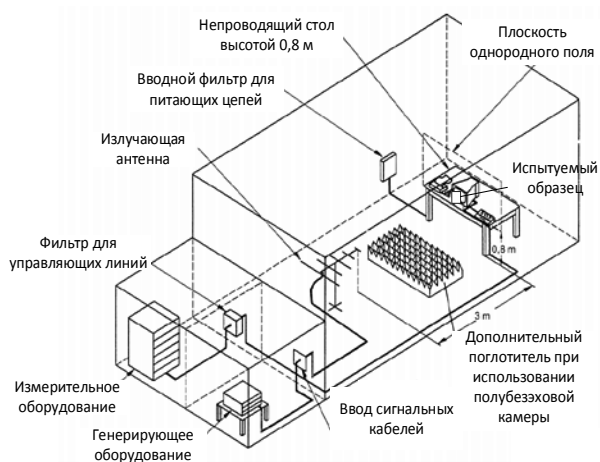


Рис. 5. Конфигурация измерительной площадки при проведении испытаний

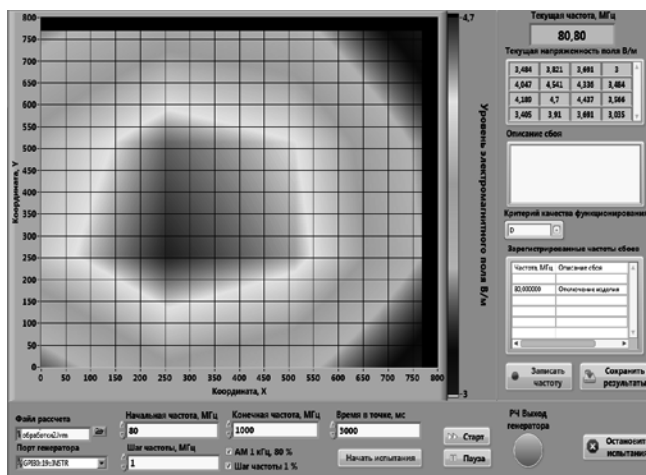


Рис. 6. Виртуальная панель измерительной системы в режиме «Измерение»

5. Внедрение и его перспективы

Создание автоматизированного измерительного комплекса для проведения испытаний на устойчивость к радиочастотным электромагнитным полям является требованием времени. В первую очередь это обусловлено необходимостью проведения качественных испытаний радиоэлектронной продукции. Только через полную автоматизацию всех измерений возможно снижение затрат человеческих ресурсов и сокращение времени испытаний в несколько раз. За счет исключения из бюджета неопределённости ряда источников достигается более высокая точность получаемых результатов по сравнению с проведением испытаний в ручном режиме.

Литература

1. IEC 61000-4-3:2010 Testing and measurement techniques – Radiated, radio-frequency, electromagnetic field immunity test.
2. Суранов А.Я.. LabView 8.20: справочник по функциям. – М.: ДМК Пресс, 2007. – 536 с.

Муравьев О.А., Ярец В.В.
Научно-производственное республиканское унитарное предприятие
«Белорусский государственный институт стандартизации
и сертификации»,
г. Минск, Республика Беларусь, +375297610151, olegmur@yandex.ru

ПЕРЕДВИЖНАЯ ИСПЫТАТЕЛЬНАЯ ЛАБОРАТОРИЯ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОМЕХ ОТ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПОДВИЖНОГО СОСТАВА И СИСТЕМ НА СООТВЕТСТВИЕ ТРЕБОВАНИЯМ ТЕХНИЧЕСКИХ РЕГЛАМЕНТОВ ТАМОЖЕННОГО СОЮЗА

Введение

Со 2 августа вступили в силу технические регламенты Таможенного союза (ТР ТС) «О безопасности железнодорожного подвижного состава», «О безопасности высокоскоростного железнодорожного транспорта» и «О безопасности инфраструктуры железнодорожного транспорта», принятые Решением Комиссии ТС от 15 июля 2011 года № 710.

Одним из направлений обеспечения безопасности инфраструктуры и железнодорожного транспорта является установление требований в области электромагнитной совместимости (ЭМС), а специфика технических средств, на которые распространяются требования вышеуказанных ТР ТС подразумевает проведение испытаний в условиях отличных от лабораторных.

Перечень стандартов, в результате применения которых на добровольной основе обеспечивается соблюдение требований ТР ТС «О безопасности железнодорожного подвижного состава» изменен от 3 февраля 2015 г. № 11 содержит два стандарта [1] и [2], методики выполнения измерений которых подразумевают проведение испытаний вне лаборатории. В [2] установлены нормы электромагнитных помех от железнодорожного подвижного состава (ПС), а также правила и методы испытаний. В свою очередь [1] нормирует электромагнитные помехи от подсистем инфраструктуры железнодорожного транспорта и железнодорожного ПС в целом во внешнюю окружающую среду в полосе частот от 150 кГц до 1 ГГц.

1 Постановка задачи

Проанализируем условия, нормы и режимы работы ПС при проведении испытаний с движущимся ПС, регламентируемых [1] и [2].

В рассматриваемых ТНПА стандартах установлены нормы к излучаемым радиопомехам в диапазоне частот 150 кГц – 30 МГц для магнитных полей и диапазоне 30 МГц – 1 ГГц для электрических полей. На рис. 1.1, 1.2 норма А – при электротяге/питании ПС от сети переменного тока напряжением 25 кВ; В – при электротяге/питании ПС от сети постоянного тока напряжением 3 кВ; С – для не электрифицированных участков железных дорог (автономного ПС).

При выполнении измерений должны отсутствовать атмосферные осадки, температура воздуха составлять не менее 5°C, а скорость ветра менее 10 м/с. Не допускается наличия на проводах контактной сети изморози и гололедных образований.

Измерения напряженности поля электромагнитных помех от железнодорожных систем в целом выполняют в режимах движения ПС: со скоростью (50±10) км/ч при мощности ПС в продолжительном и часовом режимах работы; при максимальной мощности и определенной выбранной скорости; в режиме электрического торможения при тормозном усилии не менее 80% максимального для конкретного ПС. От самого ПС при 1/3 максимального тягового (тормозного) усилия в данном диапазоне скоростей в момент прохождения места установки измерительной антенны. Все системы, находящиеся на борту ПС и способные создавать электромагнитные помехи, должны быть включены и находиться в исправном состоянии.

Проведем описание измерительной площадки, удовлетворяющей перечисленным условиям и способной обеспечить необходимые режимы работы ПС для проведения измерений. А также сконфигурируем передвижную испытательную лабораторию для решения задач данного рода.

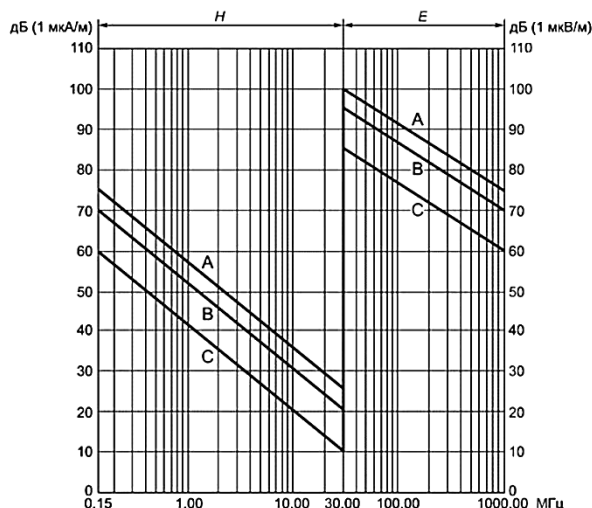


Рис. 1.1. Нормы напряженности поля электромагнитных помех от железнодорожных систем в целом при движении ПС (пиковые значения)

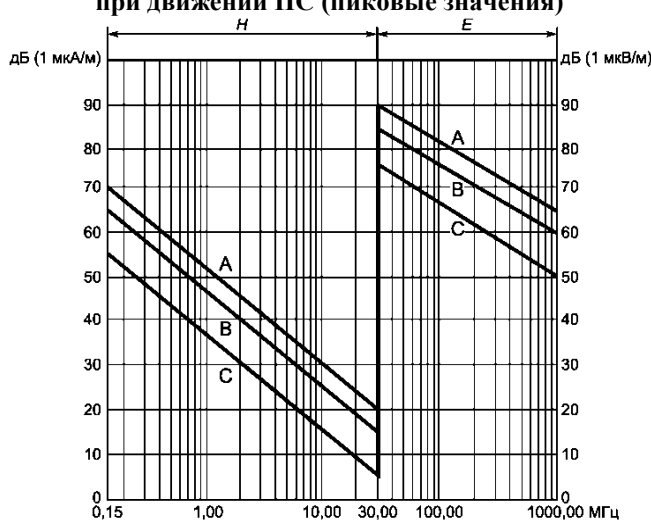


Рис. 1.2. Нормы напряженности поля электромагнитных помех, создаваемых ПС в движении (пиковые значения)

2. Описание решения

2.1. Измерительная площадка

Измерительная площадка должна быть организована в одной точке в пределах участка железной дороги, оснащенного однотипными подсистемами инфраструктуры. Находиться с внешней стороны путей на расстоянии не менее 100 м от линий электропередачи, не относящихся к железной дороге и не должна располагаться в местах постоянного ограничения скорости. Также должны отсутствовать деревья, кустарники, строения, мосты, тоннели, опоры контактной сети с гибкими и жесткими поперечинами.

Допустимый уровень посторонних помех на каждой частоте измерений должен быть не менее чем на 6 дБ ниже норм. Допускается проводить измерения, если уровень посторонних помех превышает допустимый, а суммарный уровень посторонних помех и помех от участка железной дороги не превышает норм. Уровень посторонних помех измеряют на измерительной площадке при отсутствии ПС в пределах 1,5–2 км в обе стороны от места установки измерительной антенны.

Точка измерения самого ПС должна находиться в середине пролета между опорами контактной сети на стороне пути, противоположной месту размещения опор. На двухпутных участках измерения следует проводить со стороны пути, на котором находится испытуемый ПС. Длина контактной подвески в обе стороны от точки измерения должна быть не менее 2 км.

2.2. Передвижная лаборатория

Выполнение всех условий и выбор подходящей площадки для измерений возможны только при наличии передвижной лаборатории (ПЛ). Для измерений такого рода ПЛ должна включать в себя автотранспортное средство, специально подготовленное для перевозки оборудования и персонала, имеющее бортовую сеть напряжением 230 В, измерительный приемник, перекрывающий нормируемый частотный и амплитудный диапазоны, набор измерительных антенн и кабелей, а также место для расположения измерительного оборудования.

Фотографии конфигурации ПЛ показаны на рисунках 2 и 3. Для измерений электромагнитных полей используется приемник TDEMI26G, позволяющий выполнять измерения в режиме реального времени с полосой до 162 МГц в диапазоне частот до 26 ГГц, уровней до 130 дБмкВ, а также комплект антенн FMA11 и ETS Lindgren 3142C, перекрывающих диапазон частот 150 кГц – 3 ГГц. Показанная компоновка используется при проведении измерений в полевых условиях, возможности ее применения ограничиваются лишь допустимыми рабочими температурами окружающей среды для антенн.



Рис. 2. Отсек для перевозки измерительного оборудования

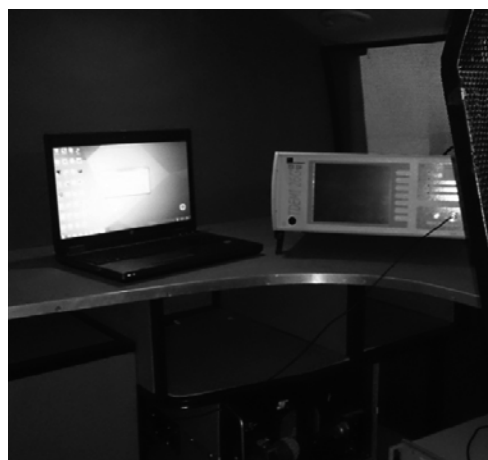


Рис. 3. Операторская для проведения измерений

2.3. Выполнение измерений

Измерения проводят в соответствии с [1], [2] и [3]. Схема расположения оборудования показана на рис. 4 и 5.



Рис. 4. Позиция антенны при измерении магнитного поля в диапазоне частот от 150 кГц до 30 МГц

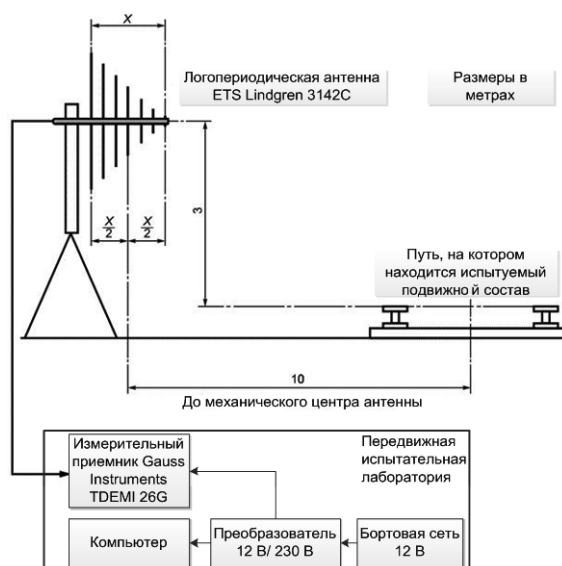


Рис. 5. Позиция антенны при измерении электрического поля в диапазоне частот от 30 МГц до 1 ГГц

Высота установки антенны относительно уровня головки рельса составляет от 1,0 до 2,0 м для рамочной антенны и от 2,5 до 3,5 м для логопериодической антенны. Рамочную антенну устанавливают в вертикальной плоскости параллельно железнодорожному пути, логопериодическую в обеих плоскостях. На участках, электрифицированных на переменном токе, антенны недопустимо размещать у нейтральных вставок.

Если антенну невозможно установить на расстоянии 10 м от оси пути, то рассчитывают эквивалентное значение поля на расстоянии 10 м E_{10} , дБ, рассчитывают по формуле: $E_{10} = E_x + n20\lg(D/10)$, где E_x , дБ – измеренное значение на расстоянии D , м; n – коэффициент, приведенный в [1].

На участках железных дорог, расположенных на насыпи, если нельзя обеспечить значения высот установки антенн относительно уровня головки рельса, результат измерений E_x пересчитывают к эталонному расстоянию 10 м с учетом высоты установки антенны относительно уровня земли. В этом случае величина D , м, определяется по формуле: $D = \sqrt{D_H^2 + h_H^2}$, где D_H – расстояние от оси пути до измерительной антенны, м; h_H – высота насыпи, м. При значительной высоте насыпи измерительную антенну устанавливают на расстоянии 30 м от оси пути.

Показания приемника считывают в период нахождения железнодорожного ПС на отрезке пути 200 м (100 м – до места расположения измерительной антенны и 100 м – за местом расположения антенны).

3. Перспективы использования передвижной лаборатории

В общем случае испытания по параметрам ЭМС должны проводиться в лаборатории. Только таким образом возможно создать эталонные условия испытаний и свести к минимуму влияющие на точность измерений факторы. Однако вследствие присутствия проблемы ЭМС во всех сферах бурно развивающегося технократического общества специалисты сталкиваются с необходимостью проведения точных измерений в нестандартных условиях. Созданная в БелГИСС передвижная испытательная лаборатория способна обеспечить проведение испытаний по серии методик и гарантировать заказчику качество проведенных работ.

Литература

1. ГОСТ Р 55176.2-2012 (МЭК 62236-2:2008) Совместимость технических средств электромагнитная. Системы и оборудование железнодорожного транспорта. Часть 2. Электромагнитные помехи от железнодорожных систем в целом во внешнюю окружающую среду. Требования и методы испытаний. Москва, Стандартинформ, 2014, 27 с.
2. ГОСТ Р 55176.3.1-2012 Совместимость технических средств электромагнитная. Системы и оборудование железнодорожного транспорта. Часть 3-1. Подвижной состав. Требования и методы испытаний. Москва, Стандартинформ, 2014, 32 с.
3. ГОСТ Р 51318.16.2.3 (СИСПР 16-2-3:2006) Совместимость технических средств электромагнитная. Требования к аппаратуре для измерения параметров промышленных радиопомех и помехоустойчивости и методы измерений. Часть 2-3. Методы измерений параметров промышленных радиопомех и помехоустойчивости. Измерение излучаемых радиопомех. Москва, Стандартинформ, 2010, 74 с.

**Сахаров К.Ю., Подосенов С.А., Сухов А.В.,
Туркин В.А., Михеев О.В., Алешко А.И
ФГУП «ВНИИОФИ», г. Москва, Россия,
Тел.: (495) 437-28-47, E-mail: sukhov@vniiofi.ru**

МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИЗМЕРЕНИЙ ИМПУЛЬСНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ В ПИКОСЕКУНДНОМ ДИАПАЗОНЕ

По мере развития техники генерирования и измерения параметров сверхкоротких электромагнитных импульсов (длительностью единицы-десятки пикосекунд) создаются новые системы помехозащищенной радиосвязи, радиолокаторы высокого пространственного разрешения, аппаратура для радиомониторинга и радиоэлектронной борьбы. Измерительные системы, использующие сверхкороткие электромагнитные импульсы (СК ЭМИ), применяются в задачах обеспечения электромагнитной совместимости, при определении электрофизических характеристик радиопоглощающих материалов, а также в антенных измерениях. Достоинством таких систем, работающих во временной области, является то, что они значительно сокращают длительность и трудоемкость измерений. Дело в том, что верхняя граничная частота спектра СК ЭМИ обратно пропорциональна его длительности (длительности фронта), поэтому при зондировании объекта возможно за одно измерение получать его реакцию в широкой полосе частот. Например, верхняя граничная частота спектра гауссовского импульса длительностью 10 пс составляет порядка 40 ГГц. Это соответствует частотному диапазону современных средств радиосвязи и радиолокации (Ka-диапазон от 26,5 до 40 ГГц), а также, соответственно, радиопоглощающих материалов и покрытий. Актуальной задачей становится метрологическое обеспечение измерений импульсных полей в пикосекундном диапазоне во временной области, что соответствует 40 ГГц в частотной области. В 2010 году во ВНИИОФИ создан Государственный первичный специальный эталон единиц напряженностей импульсных электрического и магнитного полей с длительностью фронта импульсов до 20 пс ГЭТ 178-2010 [1], позволивший метрологически обеспечить измерения в частотном диапазоне до 26,5 ГГц. Для расширения измеряемого частотного диапазона вдвое требуется во столько же раз уменьшить длительность фронта воспроизводимого в эталоне импульса.

Основным элементом эталона ГЭТ 178-2010 является моноконическая полеобразующая система, возбуждаемая комплектом генераторов ступенчатых импульсов напряжения с длительностью фронта импульса 10–15 пс при амплитуде до 10 В. Для передачи единиц используется компаратор, созданный на основе полоскового измерительного преобразователя напряженности импульсного электрического поля типа ИППЛ-Л [2]. Импульсы на выходе компаратора регистрируются при помощи стробоскопического осциллографа Tektronix CSA8000 с полосой пропускания 50 ГГц. Структурная схема эталона показана на рис. 1.

Длительность фронта эталонного ЭМИ, определяется, во-первых, длительностью фронта импульса возбуждающего генератора, а во-вторых, временем нарастания переходной характеристики полеобразующей системы (ПС). Для воспроизведения импульсов поля с фронтами до 10 пс длительность фронта импульса возбуждающего генератора должна составлять единицы пикосекунд. Этому требованию наилучшим образом удовлетворяют генераторы серии TMG с обострителем на основе нелинейной линии передачи, выпускаемые НПП «Трим»: минимальная длительность фронта до 5 пс при амплитуде 15 В. Время нарастания переходной характеристики ПС определяется геометрией узла ввода, представляющего собой переход между фидером и полеобразующей системой.

Для существующего эталона расчет импульсных электрических и магнитных полей в рабочей зоне ПС был выполнен методом «заданных токов», основанном на непосредственном нахождении тензора поля от бегущей волны тока произвольной формы, распространяющейся вдоль тонкого криволинейного провода [3]. Экспериментальные результаты достаточно точно совпадают с расчетом при длительности фронта воспроизводимого ЭМИ до 20 пс. Однако, не рассматривалось распространение импульсов тока по проводам с изломами, что сказывалось на амплитуде и размытости фронтов излучаемых импульсов. Излом в переходе «фидер-конус» (узле ввода) явля-

ется практически единственным в тракте полеобразующей системы и именно он определяет минимальную длительность фронта. Поэтому при уменьшении длительности фронта импульса вдвое (до 10 пс) отражения от изломов следовало учесть. Новый аналитический метод расчета, учитывающий коэффициенты отражения и прохождения бегущих волн тока от изломов, предложен в статье [4]. В данной работе не приводим полученные выражения для напряженностей электрического и магнитного полей, но покажем на рис. 2 зависимости коэффициентов прохождения γ и отражения β тока через излом, а также коэффициента мощности излучения от угла излома σ . Так как метод «заданных токов» был применен для расчета конической полеобразующей системы эталона ГЭТ 178-2010, то его уточнение было применено при работах по совершенствованию эталона с целью расширения амплитудно-временного диапазона до 10 пс.

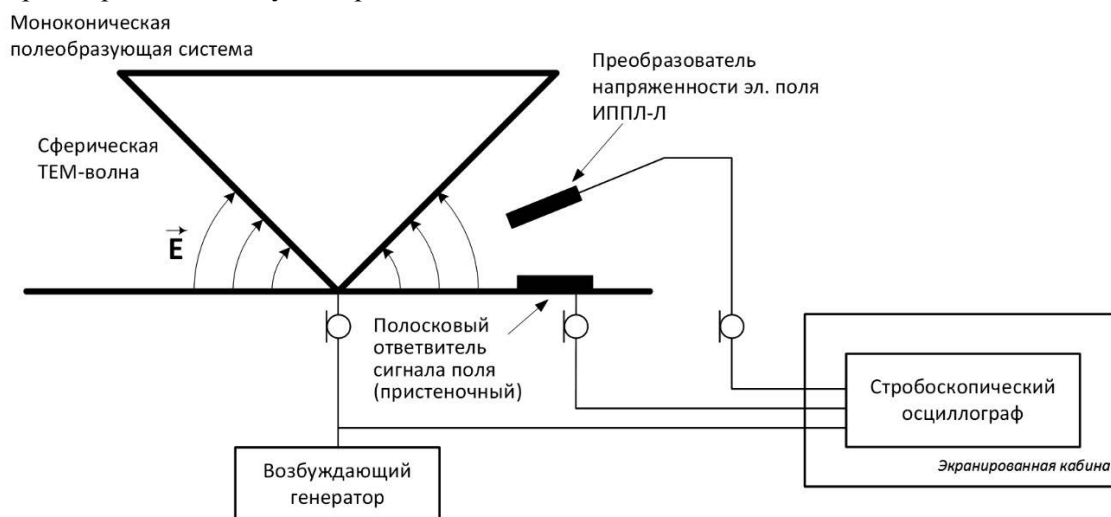


Рис. 1. Структурная схема эталона ГЭТ 178-2010

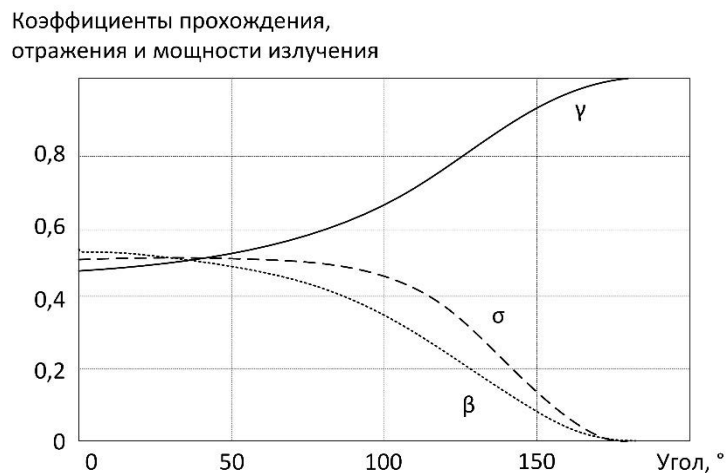


Рис. 2. Зависимости коэффициентов прохождения и отражения тока через излом, а также коэффициента мощности излучения от угла излома [4]

Были выполнены расчеты времени нарастания переходной характеристики (ПХ) для трех фидеров различного сечения с диаметрами внешнего коаксиала $d_1 = 3$ мм, $d_2 = 2,5$ мм и $d_3 = 1,5$ мм. Результаты расчетов приведены на рис. 3. При диаметре фидера 3 мм расчетное время нарастания переходной характеристики полеобразующей системы составляет 8 пс, что с учетом длительности фронта возбуждающего генератора (планируется ~ 5 пс) не позволит воспроизводить в рабочей зоне эталона импульсы с длительностью фронта не более 10 пс. Расчет переходной характеристики для фидера диаметром 2,5 мм дает время нарастания порядка 6 пс. Этого также может оказаться недостаточно, если учитывать затухание сигнала генератора в самом фидере и в соединительном разьеме. При диаметре внешнего коаксиала фидера 1,5 мм время нарастания ПХ составляет порядка 4,5 пс, что является приемлемым.

В соответствии с полученным результатом узел согласования эталона был переработан под фидер с меньшим сечением – радиочастотный кабель РК 50-1,5-25С со сплошным экраном. Коаксиальный разъем для подключения генератора типа SMA с полосой пропускания 26 ГГц был заменен на высокочастотный разъем сечением 2,4 мм с полосой пропускания до 50 ГГц. На рис. 4 показаны замененные элементы узла ввода в коническую полеобразующую систему.

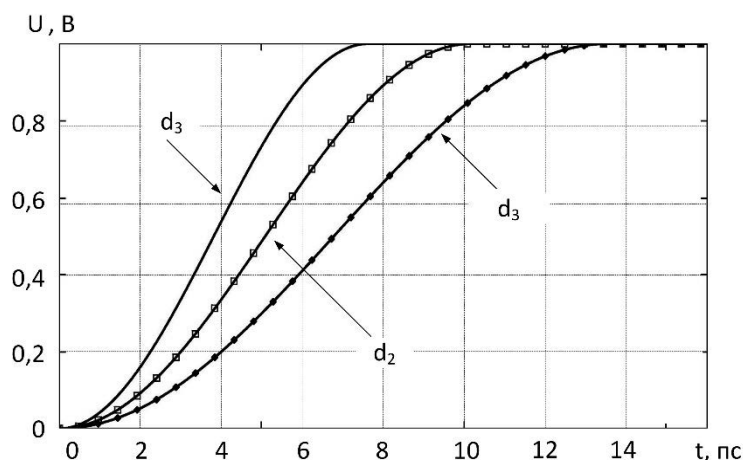


Рис. 3. Расчетные переходные характеристики полеобразующей системы эталона в зависимости от диаметра внешнего коаксиала фидера

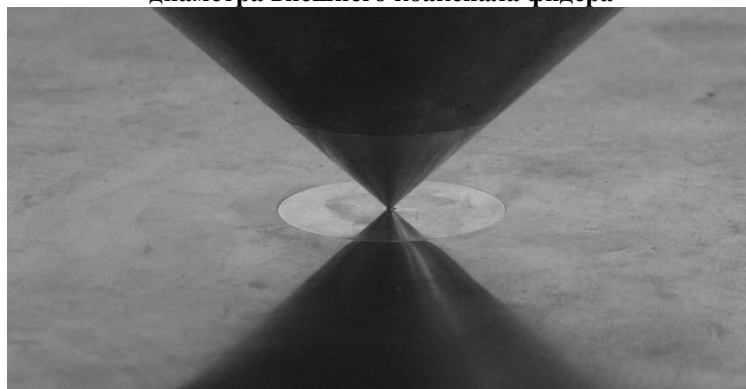


Рис. 4. Переработанный узел ввода полеобразующей системы эталона ГЭТ 178-2010

Для контроля параметров импульсов напряжения на вводе в полеобразующую систему был разработан ответвитель, представляющий собой несимметричный резистивный тройник (полоса пропускания 70 ГГц) с коаксиальными входами. Амплитудно-временные характеристики импульса на выходе ответвителя соответствуют характеристикам при работе генератора на эквивалент нагрузки, что говорит о высокой степени согласования в тракте генератор-ПС.

Были проведены измерения параметров воспроизводимых в эталоне импульсов электрического поля. Полеобразующая система возбуждалась генератором TMG 1010, а регистрация импульсов поля осуществлялась при помощи измерительный преобразователь ИППЛ-Л. На рис. 5 показана сравнительная осциллограмма импульсов на выходе генератора TMG1010 и на выходе преобразователя ИППЛ-Л. Длительность фронта импульсов генератора составляет 14,1 пс, а длительность фронта импульсов на выходе ИППЛ-Л составляет 14,4 пс, то есть они практически совпадают.

В дальнейшем планируется для возбуждения конической полеобразующей системы в составе усовершенствованного эталона применить генератор импульсов напряжения с длительностью фронта в единицы пикосекунд, что позволит воспроизводить эталонные ЭМИ с фронтом длительностью не более 10 пс (в частотной области – до 40 ГГц).

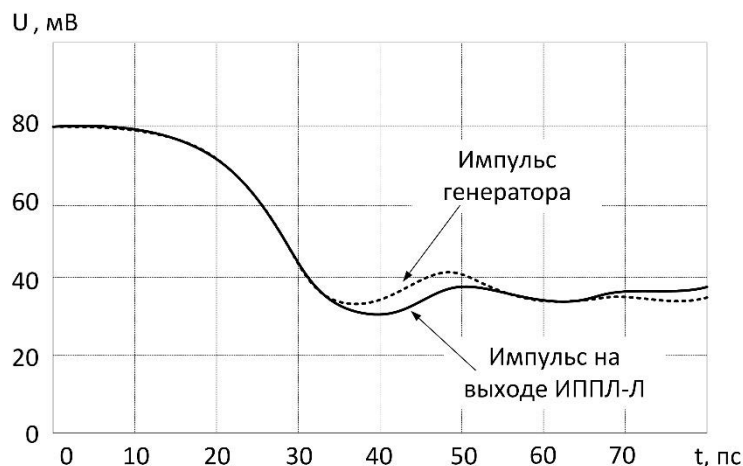


Рис. 5. Сравнительная осциллограмма импульсов на выходе возбуждающего генератора ТМГ1010 и измерительного преобразователя ИППЛ-Л

Исследования проведены при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (соглашение № 14.624.21.0003 от 11 августа 2014 г., уникальный идентификатор прикладных научных исследований RFMEFI62414X0003).

Литература

1. Эталонный комплекс сверхкоротких электромагнитных импульсов с длительностью фронта 20 пс / С.В. Тихомиров, К.Ю. Сахаров, В.А. Туркин [и др.] // Измерительная техника. 2010. № 7. С. 57–59.
2. Измерительный преобразователь напряженности импульсного электрического поля пикосекундной длительности / К.Ю. Сахаров, В.А. Туркин, О.В. Михеев [и др.] // Измерительная техника. 2014. № 2. С. 62–64.
3. Сахаров К. Ю. Принципы создания первичного эталона сверхкоротких электромагнитных импульсов // Технологии электромагнитной совместимости. 2005. № 3. С. 12–16.
4. New method for calculating pulsed electromagnetic fields from traveling current waves in complex wire structures / A.A. Potapov, S.A. Podosenov, J. Foukzon [et al.] // Physics of Wave Phenomena. 2011. Vol. 19. Issue 2. P. 112–123.

Шаммасов Р.Р.
ФГУП «ВНИИФТРИ», Менделеево, Московская обл.
Тел.: (495)526-63-55, E-mail: raussr@mail.ru

ОБЗОР МЕТОДОВ ИСПЫТАНИЙ ТРЕХКООРДИНАТНЫХ РАМОЧНЫХ АНТЕНН (ТРА) НА ОСНОВЕ ДЕЙСТВУЮЩИХ СТАНДАРТОВ

В настоящее время для измерения напряженности магнитного поля промышленных радиопомех (ИРП) в диапазоне частот $0,009 \div 30$ МГц рекомендуется использовать трехкоординатные рамочные антенны (ТРА). Использование ТРА для определения норм на электромагнитное поле радиопомех является альтернативой классическому методу измерения полей от технического средства, с помощью магнитных измерительных антенн на стандартизованных расстояниях. Если в классическом варианте непосредственно измеряется и нормируется напряженность магнитного поля, то при использовании ТРА нормируется наведенный ток, зависящий от размеров ТРА, через который путем пересчета определяется напряженность магнитного поля на стандартизованных расстояниях от испытываемого технического средства.

Целью настоящей работы является анализ технических требований и методов оценки параметров ТРА на основе действующих отечественных стандартов и их международных аналогов.

В России действуют три стандарта, содержащих методы испытаний ТРА:

- ГОСТ CISPR 16-1-4-2013 [1]. 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;
- ГОСТ Р 51318.15-99 [2]. Совместимость технических средств электромагнитная. Радиопомехи промышленные от электрического светового и аналогичного оборудования. Нормы и методы испытаний;
- ГОСТ Р 51319-99 [3]. Совместимость технических средств электромагнитная. Приборы для измерения промышленных радиопомех. Технические требования и методы испытаний.

В каждом из ГОСТ рассмотрены особенности конструкции ТРА и её составных частей, основные характеристики ТРА стандартного диаметра 2 м, графики пересчета для диаметров рамок 3 и 4 м, методы и средства испытаний для подтверждения соответствия ТРА установленным требованиям.

В качестве средства испытаний в рассматриваемых стандартах рекомендуется использовать диполь, конструкция которого изображена на рис. 1.

В указанных стандартах приводится одна и та же схема для испытания ТРА (рис. 2).

На вход диполя подают напряжение от ВЧ-генератора и измеряют напряжение на выходе токосъемника, по которому определяют поочередно наведенный под воздействием магнитного поля диполя ток в рамках ТРА. При этом ЭДС ВЧ-генератора устанавливают равным 1 В, а чувствительность (коэффициент передачи) токосъемника должна составлять 1 В/А.

Сравнительная характеристика способов оценки ТРА в рассмотренных стандартах приведена в табл. 1.

По результатам обзора показано, что в рассматриваемых стандартах существуют расхождения как в терминологии и выборе нормируемых величин, так и достаточности данных для получения результата оценки испытаний ТРА.

Выводы

1. Действующие на данный момент стандарты, касающиеся методов испытаний трехкоординатных рамочных антенн в полосе частот $0,009 \div 30$ МГц, содержат отличающиеся друг от друга наименования метода подтверждения соответствия ТРА требованиям стандарта, несмотря на то, что реализуется одна и та же схема измерений. Н унификация терминов, связанных с определением соответствия ТРА техническим требованиям.

- Графики, с которыми сравниваются результаты измерений, получены путем приближенных расчетов, без оценки точности. Она не гарантирует точность определения, нормируемой для источников магнитного поля радиопомех величины напряженности магнитного поля на стандартизованных расстояниях 3 и 10 м от источника, рассчитанной через ток в ТРА.
- Необходимо обеспечить прослеживаемость процедуры испытаний ТРА к эталонам единицы напряженности поля в диапазоне частот от 9 кГц до 30 МГц, как это принято для измерительных антенн магнитного поля.

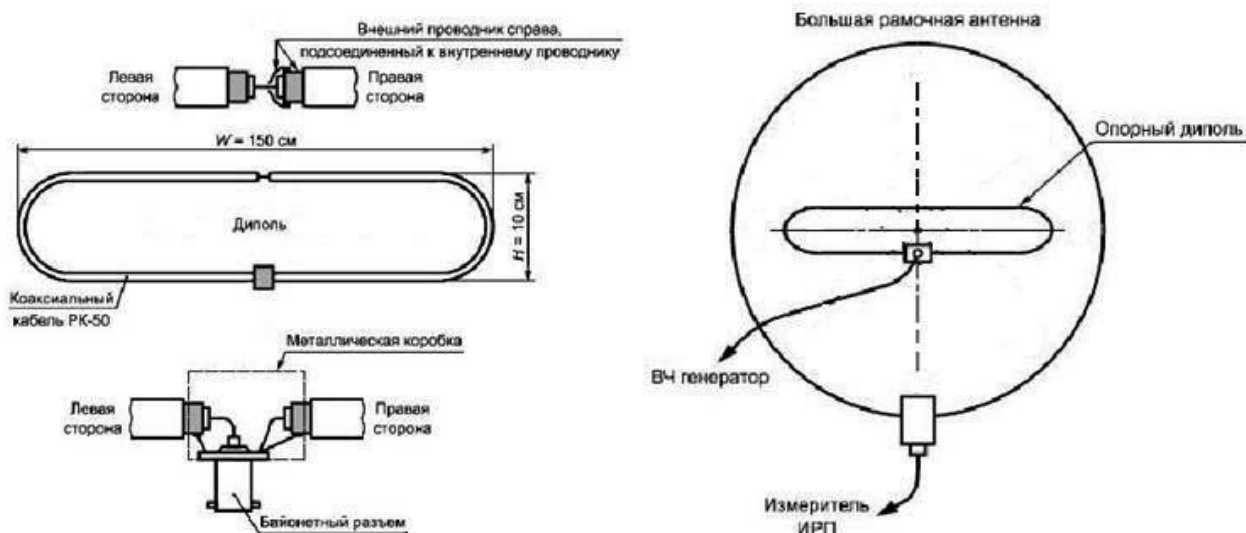


Рис.1. Конструкция диполя, расположение относительно ТРА

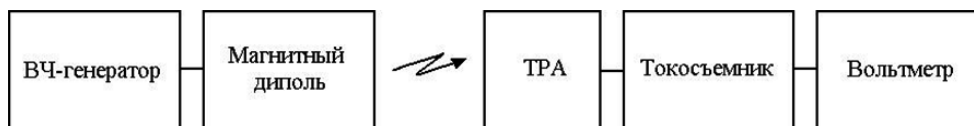


Рис.2. Схема измерения для испытания ТРА

Таблица 1

| Российский стандарт | ГОСТ CISPR 16-1-4-2013 | ГОСТ Р 51318.15-99 | ГОСТ Р 51319-99 |
|-------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|-----------------------------------------------|---------------------------------------------|
| Международный аналог | CISPR 16-1-4 (2007) | CISPR 15 (1996) | CISPR 16-1 (1993) |
| Операция подтверждения соответствия ТРА установленным требованиям | Валидация | Проверка | Калибровка |
| Используемое оборудование | Дипольная антенна | Калибровочный симметричный диполь | Калибровочный диполь |
| Нормируемая величина | Коэффициент оценки большой рамочной антенны, дБ(Ом) | Сила тока, дБ(мкА) | Коэффициент оценки наведенного тока, дБ(Ом) |
| Диапазон значений нормируемой величины | 74–92 | 28–46 | 28–46 |
| Критерий оценки испытаний ТРА | Отличие от графика не более чем на ± 2 дБ | Повторяемость измерений в пределах ± 2 дБ | Соответствие с точностью 1,5 дБ графику |

Заключение:

В результате проведенного обзора выяснилось, что данная ситуация сложилась из-за того, что не использована в явном виде физическая величина, характеризующая источник магнитного поля, размеры которого меньше длины волны – магнитный дипольный момент, с помощью которого определяется наведенный ток в ТРА и напряженность магнитного поля на произвольном расстоянии от источника.

Введение этого параметра, как было показано в [5], упрощает нормирование магнитного поля радиопомех при использовании ТРА. Если характеризовать калибровочный диполь, предлагаемый в действующих стандартах для оценки ТРА, не только конструкцией, но и дипольным моментом, то калибровка ТРА сведется к определению отношения магнитного дипольного момента к напряжению на выходе токосъемника. Снимется жесткое требование к калибровочному коэффициенту (чувствительности) токосъемника 1 В/А в диапазоне частот от 9 кГц до 30 МГц, которое должно выполняться, но не проверяется при оценке ТРА. Появится возможность корректной оценки точности измерений, так как значение и погрешность определения магнитного момента калибровочного диполя может быть получена с помощью эталонных средств измерений, прослеживаемых согласно [5] к первичному эталону напряженности магнитного поля в диапазоне рабочих частот ТРА.

Литература

1. 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. – Введ. 2015-01-01. – М.: Стандартиформ, 2014.
2. ГОСТ Р 51318.15-99. Радиопомехи промышленные от электрического светового и аналогичного оборудования [Текст]. – Введ. 1999-24-12. – М.: Изд-во стандартов, 2000.
3. ГОСТ Р 51319-99. Совместимость технических средств электромагнитная. Приборы для измерения промышленных радиопомех. Технические требования и методы испытаний [Текст]. – Введ. 1999-28-12. – М.: Изд-во стандартов, 2000.
4. В.А. Тищенко, Р.Р. Шаммасов. Нормирование магнитного поля радиопомех электрического светового оборудования. – Технологии электромагнитной совместимости. – 2014. – № 3 (50). – С. 10-14.
5. ГОСТ Р 8.808-2012. Государственная система обеспечения единиц измерений. Государственная поверочная схема для средств измерений напряженности магнитного поля в диапазоне частот от 0,000005 до 1000 МГц. – Введ. 2014-01-01. – М.: Стандартиформ, 2013.

Мещеряков В.Е.
Вологодский государственный университет, г.Вологда, Россия
Тел.: 8-931-500-45-40, E-mail: mesheryakov_1@mail.ru

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ РАСЧЕТА МОЛНИЕЗАЩИТЫ

Прорывы молнии через систему молниезащиты (МЗ) продолжают наносить огромный ущерб объектам промышленности, несмотря на строгое соответствие проектных решений нормам МЗ. В настоящее время в России действует два основных документа: РД 34.21.122-87 (далее РД) и СО-153-34.21.122-2003 (далее СО), а также ведомственные нормативы ОАО «Газпром», ОАО «Транснефть».

Экспериментальные исследования молниезащиты в длинных искровых промежутках [1] легли в основу стандарта Министерства обороны ВСП 22-02-07/МО РФ (далее ВСП). В этом стандарте впервые зафиксировано влияние защищаемого объекта на зону защиты молниеотводов.

РД и СО основываются на вероятностной методике, разработанной Э.М. Базеляном. Предполагается, что лидер молнии движется вертикально до некоторой высоты (плоскости ориентировки) на уровне $5h$, где h – высота объекта ($h < 150$ м). Далее, существует возможность удара в землю, в молниеотвод или в объект. Метод учитывает, что из двух промежутков существует вероятность пробоя и наиболее длинного из них.

Расчеты вероятностным методом приводят к разным решениям при изменении высоты плоскости ориентировки. Избыточная высота ограничивает детализацию объекта, при недостаточной высоте вероятность появления лидера в разных точках поверхности ориентировки различна. То и другое снижает точность расчета, особенно для высотных объектов. Например, согласно РД (зона А) радиус защиты на уровне земли $r_0 = [0.8 - 1.8 \cdot 10^{-3}(h - 150)]$ сначала возрастает при увеличении высоты молниеотвода (до 300 м), затем уменьшается, что противоречит здравому смыслу.

СО не позволяет определить зоны МЗ разновысоких и высотных молниеотводов. Программное обеспечение, которое было призвано решить эти задачи, так и не вышло.

В стандарте МЭК 62305-3 (далее МЭК) зоны МЗ строятся методом защитного угла, который рекомендуется для одиночных молниеотводов, и методом катящейся сферы (МКС).

В МКС объект с молниеотводами «обкатывается» сферой заданного радиуса и считается защищенным, если его не касается сфера радиусом $R = 20, 30, 45, 60$ м для 1, 2, 3, 4 категории МЗ объекта или $R = 10 \cdot I^{0.65}$ в общем случае, где I – минимальный ток молнии. «Обкатывая» молниеотводы (без объектов), получаем зоны защиты. Таким образом, имеем простой расчетный метод, принятый в большинстве стран. Главный недостаток МКС в том, что он не учитывает взаимное влияние молниеотводов, отсюда избыточные, затратные решения. Использование МКС позволяет стандарт СО, при условии более жестких решений. МКС включен в ГОСТ Р 54418.24-2013 для ветроэнергетических установок.

Новые идеи в МЗ высказаны Г.Н. Александровым. Зона захвата в его методе удовлетворяет условию равной вероятности появления лидера молнии (как в вероятностном методе), но расположена на расстоянии стримерной зоны, т.е. вблизи объекта (как в МКС). Условие равной вероятности появления молнии по гипотезе Г.Н. Александрова эквивалентно условию равного относительного наведенного заряда защищаемого объекта [2]

$$p_a = -Q/q, \quad (1)$$

где Q – наведенный заряд объекта с молниеотводами, q – заряд лидера. Дальнейшие расчеты аналогичны МКС. Для каждой точки зоны захвата определяется место поражения объекта или молниеотвода по принципу эквидистантности.

К сожалению, Г.Н. Александрову не удалось завершить работу над своим методом, довести до программной реализации, решения практических задач. Расчет наведенного заряда в (1) должен выполняться тысячи раз для разных положений лидера молнии при построении зоны захвата, что очень трудоемко. Сама гипотеза (1) требует подтверждения.

Нам удалось решить весь комплекс задач, связанных с разработкой метода молниезащиты на основе (1), и довести его до программной реализации [3, 4]. В докладе мы хотели бы представить некоторые результаты работы.

Одиночный молниеотвод. Для сравнения полученных результатов с нормами и методами, построим зоны МЗ для одиночного молниеотвода (рис. 1). Сравнение зон МЗ показало, что наибольшей зоной МЗ обладает РД и СО (кривая 1 и 2, соответственно). Наименьший результат дает норматив ВСП (кривая 3). Для молниеотвода высотой 20 метров полученный результат (рис. 1а) коррелируют с МКС. Для молниеотвода 30 м (рис. 1б) зона МЗ увеличилась, по сравнению с МКС. На характерной высоте (4 м) полученные результаты близки к ВСП. Зона МЗ по ВСП всегда строится с вершины молниеотвода, а по РД и СО всегда ниже вершины. В разрабатываемом методе зона МЗ может строиться как от вершины молниеотвода, так и ниже её.

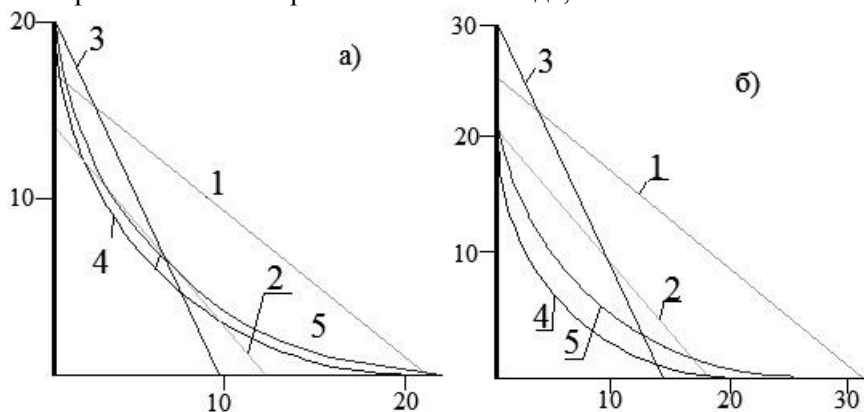


Рис. 1. Зоны защиты стержневого молниеотвода высотой а) 20 метров, б) 30 метров: 1) РД при $P_H=0,999$; 2) СО при $P_H=0,999$; 3) ВСП при $P_H=0,99$ для объекта площадью $0,5 \text{ м}^2$; 4) МКС при $P_H=0,99$; 5) по данным настоящей работы, $P_H=0,99$

Сопоставим зоны защиты двойного стержневого молниеотвода, полученные разными способами (рис. 2). Среди российских норм ВСП вновь дает наименьшую зону защиты по сравнению с РД и СО. Зоны защиты по МКС самые узкие, они не изменились по сравнению с одиночным молниеотводом. Таким образом, МКС не учитывает взаимное влияние молниеотводов, поэтому его применение для объектов с многократными молниеотводами некорректно. В разработанном методе взаимное влияние молниеотводов учитывается взаимными потенциальными коэффициентами при расчете наведенного заряда. В результате зона защиты (рис. 2, кривая 5) заметно отличается от зоны защиты по МКС и хорошо коррелирует с ВСП.

Защищаемый объект оказывает влияние на зону защиты молниеотводов, что установлено экспериментально [1]. Расчеты по разработанному методу подтверждают эту зависимость (рис. 3). Этот факт следует учитывать при расчете молниезащиты таких металлоемких объектов, как нефтехранилища и электрические подстанции.

Выводы. Методы расчета молниезащиты требуют совершенствования. Способ построения зоны захвата молнии из условия равного наведенного заряда объекта заслуживает дальнейшего изучения.

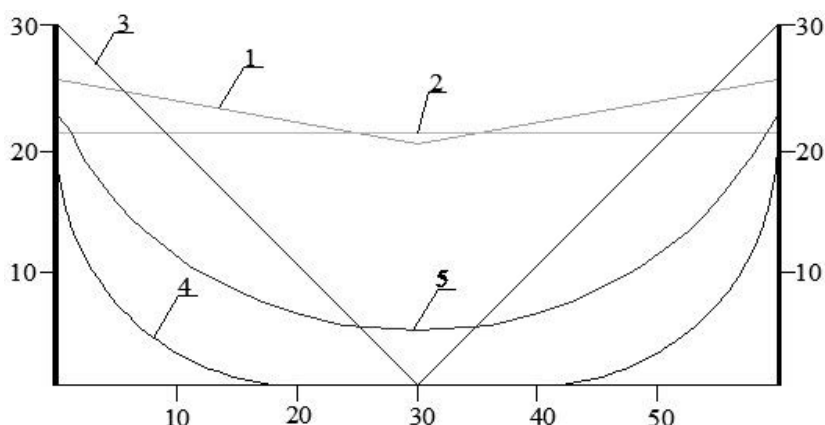


Рис. 2. Зоны защиты двойного стержневого молниеотвода: 1) РД при $P_H=0,999$; 2) СО при $P_H=0,999$; 3) ВСП при $P_H=0,99$ для объекта размерами $10 \times 10 \text{ м}$; 4) МКС при $P_H=0,99$; 5) по данным настоящей работы, $P_H=0,99$

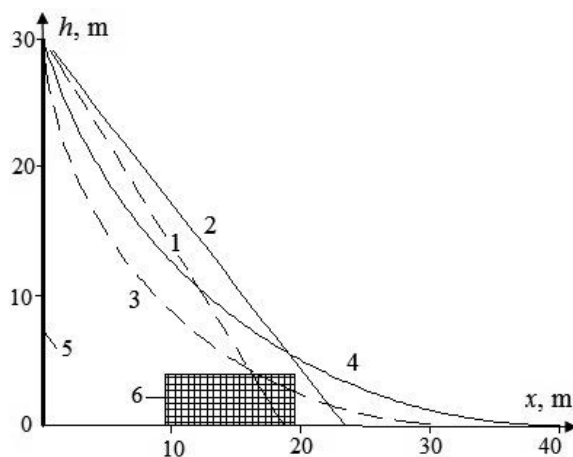


Рис.3. Зоны защиты молниеотвода (5) по данным: ВСП (1,2) и настоящей работы (3,4) при отсутствии (1,3) и наличии (2,4) защищаемого объекта (6) размерами 10x10x4 м для III уровня молниезащиты

Литература

1. Куприенко В.М. Анализ методик расчета и выбора параметров зоны защиты стержневых молниеотводов / В.М. Куприенко // Электричество. – 2012. – №9. – С.39–43.
2. Александров Г.Н. Молния и молниезащита. Ин-т электрофизики и электроэнергетики РАН. – М.: Наука, 2008. – 274 с.
3. Шишигин С.Л. Молниезащита по Г.Н. Александрову. / С.Л. Шишигин, В.Е. Мещеряков // IV Российская конференция по молниезащите: матер. четвертой межд. конф. – Санкт-Петербург. 2014. – С. 34–42.
4. Шишигин С.Л. Метод расчета молниезащиты на основе электростатической модели стягивания лидера молнии / С.Л. Шишигин, В.Е. Мещеряков // Письма в ЖТФ. 2015. – №6. – С.34–41.

Шишигин Д.С.

Вологодский государственный университет, г.Вологда, Россия

Тел.: 8-921-064-63-34, E-mail: shishigind@yandex.ru

ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДЛЯ ЗАДАЧ МОЛНИЕЗАЩИТЫ, ЗАЗЕМЛЕНИЯ, ЭМС

Удар молнии способен причинить значительный материальный ущерб объектам электроэнергетики, нефтегазового комплекса, железнодорожного транспорта, военной инфраструктуры. Задача проектировщика – средствами компьютерного имитационного моделирования найти технические решения, исключая аварии, и воплотить их в чертежах. Она может быть решена только при наличии современного программного обеспечения: многофункционального, надежно-го, производительного и интегрированного в технологию САПР. Дефицит подобных комплексов программ для рассматриваемого класса задач имеет место в нашей стране.

Защиту от прямых ударов молнии осуществляет система молниезащиты. Молниеотводов может быть много (десятки и сотни на электрической подстанции), их положение и высоту надо варьировать. Программисту необходимо реализовать несколько российских норм молниезащиты, а также стандарты МЭК.

Ток молнии, который в расчетах принимается 100 кА и более, через заземлитель стекает в землю. Проектировщику предстоит рассчитать параметры заземлителя (сопротивление, напряжение, токи), чтобы обосновать безопасность устройства для персонала и оборудования.

Для современного высокотехнологического производства, оборудованного микропроцессорными системами управления, не менее опасны и вторичные проявления молнии в виде кондуктивных и электромагнитных помех, приводящие к отказу или ложному срабатыванию автоматики. Уровень напряженности электромагнитного поля не должен превышать норму в местах расположения аппаратуры. Экранирование металлоконструкциями существенно снижает интенсивность поля. Перед проектировщиком возникает следующий класс задач – задач электромагнитной совместимости (ЭМС) и электромагнитного экранирования в частности.

Рассмотренные задачи в настоящее время решаются по отдельности с помощью российских и зарубежных программ, однако только единый подход на основе многофункциональной программы позволяют решить эту сложную, комплексную и практически важную для всех отраслей промышленности задачу эффективно.

Другое требование к программе определяется технологией автоматизированного проектирования – программу следует интегрировать в САПР. Современная тенденция во многих отраслях техники такова, что вместо автономных программ разрабатываются САД-приложения.

Рассмотрение технологии разработки подобной программы – цель настоящей работы.

Программа ЗУМ предназначена для проектирования внешней молниезащиты (по всем российским нормам и стандартам МЭК), расчета заземления и решения задач ЭМС объектов электроэнергетики (рис. 1). Многофункциональность программы – ее первое отличительное свойство. Весь расчет ЭМС электрической подстанции проводится в одной программе.

Программа ЗУМ разработана как AutoCAD–приложение, где AutoCAD служит для геометрического моделирования и визуализации результатов расчета. Это второе отличительное свойство программы оценили проектировщики. Управление AutoCAD осуществляется через объектную модель (технология СОМ). Основные команды AutoCAD продублированы в программе, созданы сценарии, автоматизирующие типовые геометрические построения.

Высокое быстродействие – следующая характеристика программы. Она достигается за счет использования эффективных расчетных моделей и методов, алгоритмической оптимизации кода и использования математической библиотеки Intel Math Kernel Library (Intel MKL), адаптированной для современных процессоров.

Современный процессор работает на порядок быстрее оперативной памяти (ОЗУ) с тенденцией к увеличению. Алгоритмическая оптимизация кода состоит в уменьшении числа обращений к ОЗУ за счет быстрой кэш памяти. Кэш сохраняет последние использованные инструкции и данные, так что циклы и операции с массивами выполняются быстрее. Кэш-промахом называется ситуация, когда данных, необходимых процессору, нет в кэш памяти, и он вынужден обращаться к

медленной внешней памяти. При кэш-попадании доступ к внешней памяти не требуется. Характерный пример. Замена стандартной процедуры умножения матриц по правилу «умножения строки на столбец» на процедуру «умножения строки на строку» дает увеличение производительности в несколько раз, поскольку строки сохраняются в кэш-памяти, а столбцы – нет [1]. Матричные вычисления следует проводить с помощью функций Intel MKL, что на порядок повышает быстродействие по сравнению со свободно распространяемыми математическими пакетами типа AlgLib.

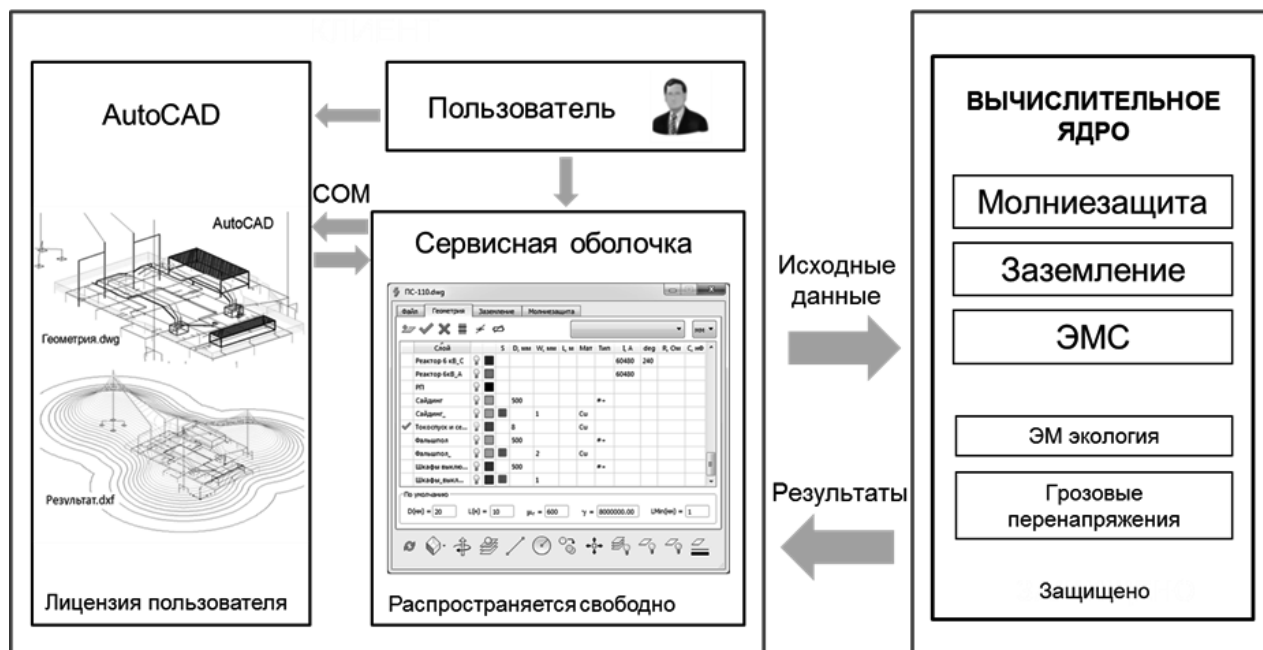


Рис.1. Структура программы ЗУМ

В результате расчет заземления электрической подстанции с 5000 элементами дробления не превышает минуты в любом режиме, включая импульсные процессы при ударе молнии. Проектировщик имеет возможность достаточно быстро исследовать большое количество вариантов и обосновать оптимальное решение.

Достоверность программы подтверждается решением тестовых задач.

В качестве примера выберем внешнюю молниезащиту электрической подстанции. Стандартный способ представления результатов заключается в изображении уровней зоны защиты молниеотводов (рис. 2). Для определения элементов объекта, не попадающих в зону защиты, обычно строится несколько сечений. При использовании метода катящейся сферы из стандарта МЭК 62305 в дополнение к зонам защиты строится зона захвата молнии (рис. 3). Часть зоны захвата, расстояние от которой до объекта меньше, чем до молниеотводов и до земли, называется зоной прорыва молнии. Она выделяется красным цветом на рисунке. Точно также отмечается фрагмент объекта, куда ударяет молнии. Зоны захвата значительно наглядней зоны защиты при анализе защищенности объекта. Но зона защиты на характерных высотах необходима для чертежей.

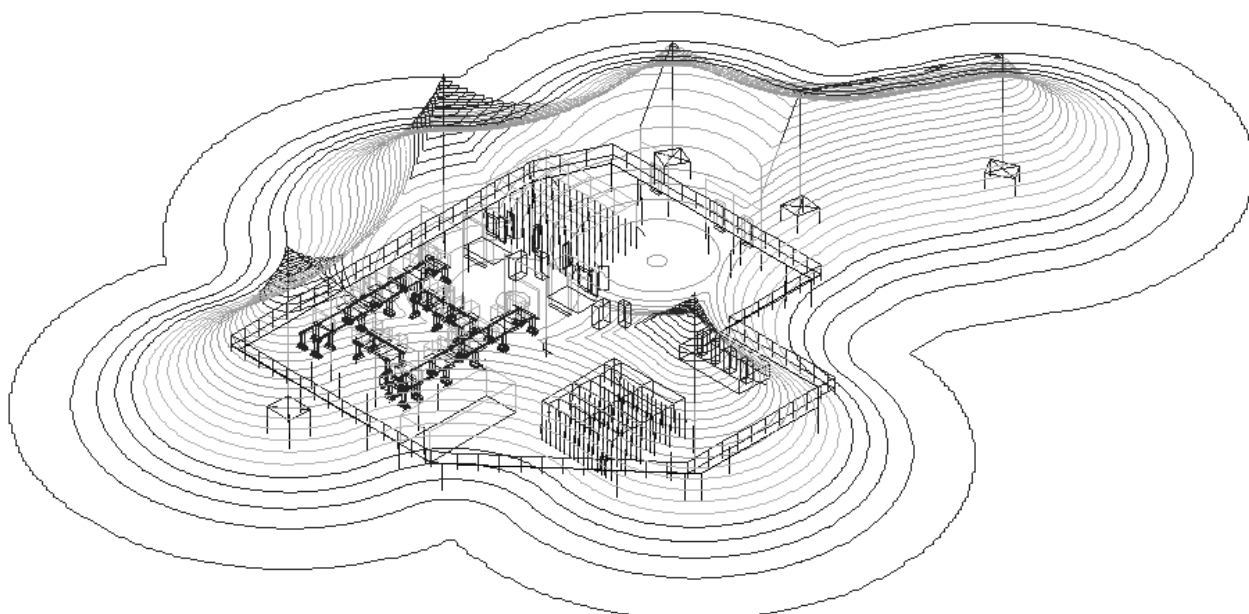


Рис.2. Зоны защиты электрической подстанции от удара молнии

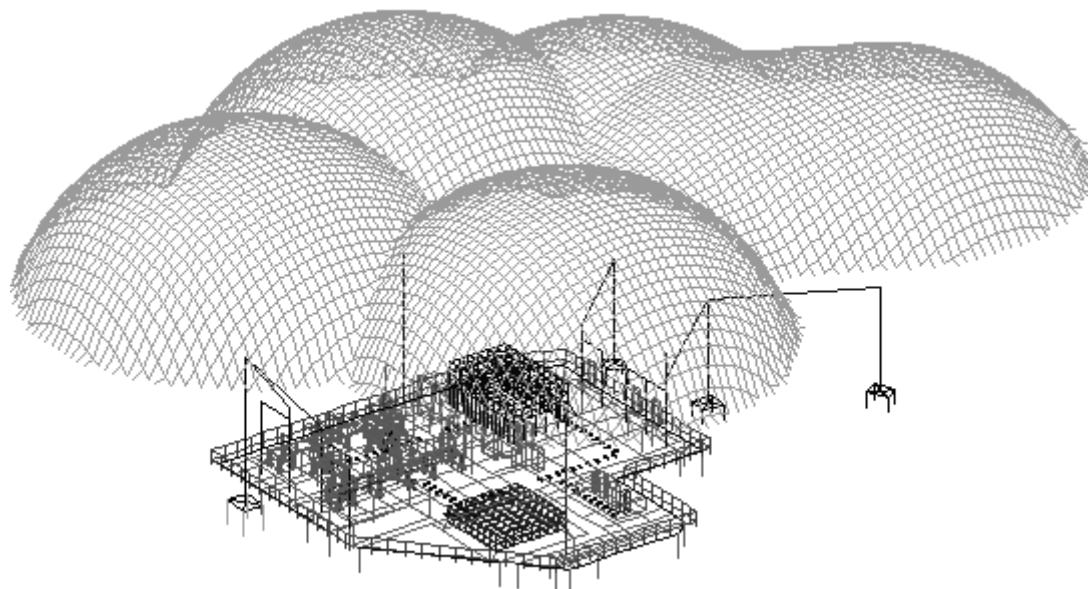


Рис. 3. Зона ориентировки молнии над электрической подстанцией

В докладе будет представлено продолжение решения этой задачи, связанное с расчетами потенциалов, токов, кондуктивных помех контрольного кабеля и напряженности магнитного поля в местах расположения микропроцессорной аппаратуры.

Литература

1. Шишигин, Д.С. AUTOCAD приложение для расчета молниезащиты и заземления объектов электроэнергетики / Д.С. Шишигин // Автоматизация в промышленности. – 2014. – № 9. – С. 28–32.

Бутин В.И., Кундышев П.Я.
ФГУП «ВНИИА им. Н.Л. Духова», г. Москва, Россия
E-mail: butinvi@yandex.ru, enniofilm@mail.ru

МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ АППАРАТУРЫ БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА С ОГРАНИЧЕННЫМ РЕСУРСОМ

Современные беспилотные летательные аппараты (БПЛА) широко применяются для различных целей, в том числе, для мониторинга геологической и экологической обстановки. БПЛА, как правило, оборудованы радиоэлектронной аппаратурой (РЭА), включающей систему бортового управления полетом, приемо-передающие устройства, функциональные блоки слежения и др. Эта аппаратура может быть подвержена воздействию высокочастотных (ВЧ) электромагнитных полей (ЭМП) техногенного происхождения, таких как РЛС, РПС (рис. 1).

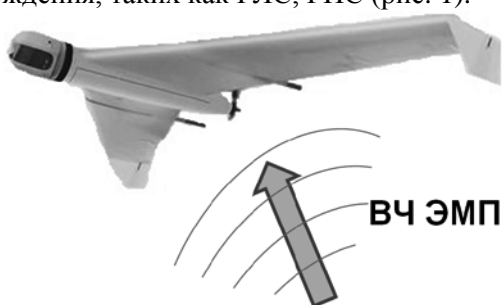


Рис. 1. Воздействие ВЧ ЭМП на БПЛА

В связи с этим, оценка помехоустойчивости БПЛА в данных условиях имеет большое значение. В первую очередь это относится к определению эффективности экранирования корпуса БПЛА с учетом наличия щелей и отверстий в нем, степени внутреннего заполнения БПЛА электроникой, а также внешних линий связи, через которые происходит обмен информацией между отсеками БПЛА, которые могут становиться паразитными антеннами. Учитывая, что ресурс работы при организации проверок аппаратуры БПЛА при проведении испытаний на воздействие ЭМП ВЧ-диапазона может быть ограничен, необходимо рационально организовать выбор требуемого для испытаний частотного диапазона.

В целом, представленная в данной работе методика исследования помехоустойчивости БПЛА заключается в определении частотного диапазона, в котором степень проникновения ЭМП максимальна (т.е. в резонансной области [1]), через проведение простейшего теоретического расчета и последующего моделирования с использованием программы FEKO. После этого, достаточно провести избирательную экспериментальную проверку помехоустойчивости только в этой области.

Проблема определения резонансных областей экранирующих конструкций (типа прямоугольных боксов) при внешнем облучении ВЧ ЭМП неоднократно рассматривалась в литературе. Рассматривались резонансные явления в оболочках с отверстиями, щелями различных конфигураций [2–4], в т.ч. при их заполнении конструктивными элементами типа плат, металлических листов и пр. [5]. Цель исследования, поставленного в данной работе, также заключается в определении резонансного частотного диапазона при экранировании в ВЧ-диапазоне для модели отсека БПЛА в виде проводящего замкнутого корпуса типа цилиндра или усеченного конуса. Теоретически и экспериментально рассматривалось влияние на экранирующие характеристики поперечных щелей в отсеке (которые присутствуют в реальности при сопряжении отсеков друг с другом), внутреннего заполнения отсека конструктивными элементами, наличие выходящих наружу из отсека внешних неэкранированных проводов, а также степени прижатия отсеков друг к другу (через различное количество болтовых соединений).

Для исследований использовался типовой состав оборудования, который показан на схеме исследований, изображенной на рис. 2.

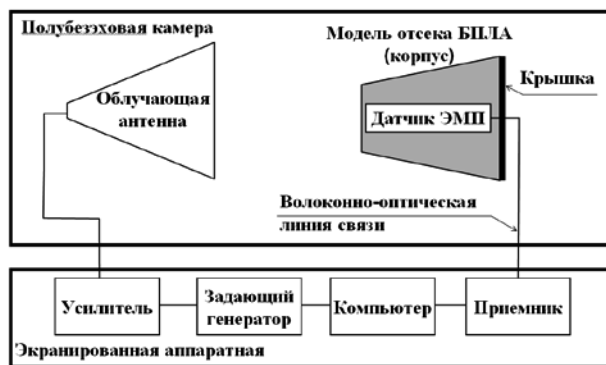


Рис. 2. Схема экспериментальных исследований

Эффективность экранирования (SE) определялась как

$$SE(f) = 20 \lg \left(\frac{E_0(f)}{E_{sh}(f)} \right), \text{ дБ},$$

где $E_0(f)$ – электрическая составляющая ЭМП, определяемая в точке при отсутствии корпуса, В/м, $E_{sh}(f)$ – электрическая составляющая ЭМП, определяемая в этой же точке в центре внутри корпуса, В/м.

Также проводилось моделирование эффективности экранирования корпуса (его компьютерной модели) с использованием программного обеспечения (ПО) FEKO. FEKO использует метод моментов для определения ЭМП, прошедшего через оболочку [8].

Результаты

Результаты экспериментальных исследований и сравнение с результатами моделирования эффективности экранирования полого корпуса, представленные на рис. 3а, указывают на видимое сходство с результатами моделирования в FEKO в определении резонансных частот и общего экранирующего эффекта корпуса. Заполнение, которое моделировало РЭА, представляло собой размещенный внутри корпуса металлический цилиндр. Результаты определения эффективности экранирования корпуса с заполнением, показанные на рис. 3б, указывают на то, что заполнение приводит к вытеснению ЭМП в свободное пространство внутри корпуса из-за присутствия дополнительного металлического объекта.

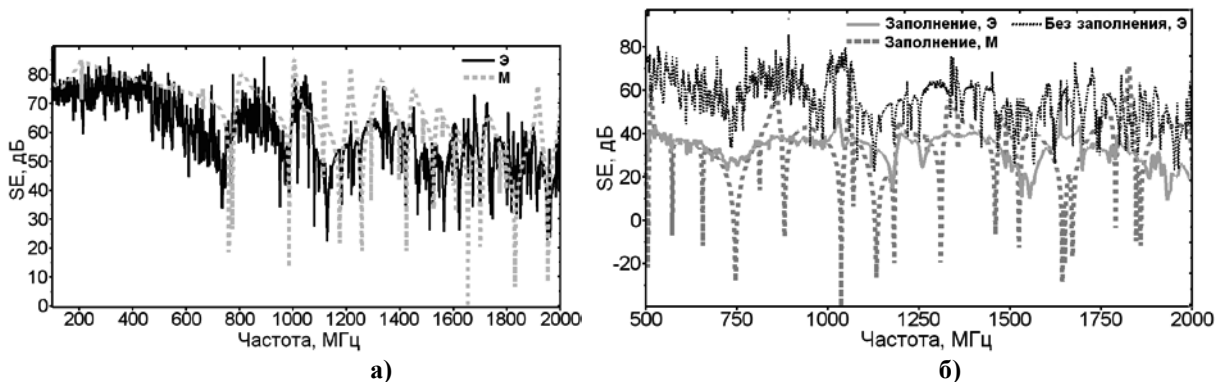


Рис. 3. Результаты экспериментальных исследований (Э) и моделирования (М) SE полого корпуса без заполнения (а) и с заполнением (б)

На рис. 4 показаны результаты экспериментальных исследований эффективности экранирования при подключении неэкранированных жгутов с проводами. В первом случае, жгут присоединялся с внешней стороны корпуса и был вытянут на всю длину вдоль Е-поля, чтобы уловить максимум ЭМП. Во втором случае, в дополнение к первому жгуту к внутренней части соединителя внутри корпуса был присоединен второй аналогичный жгут. Второй жгут был свернут по спирали.

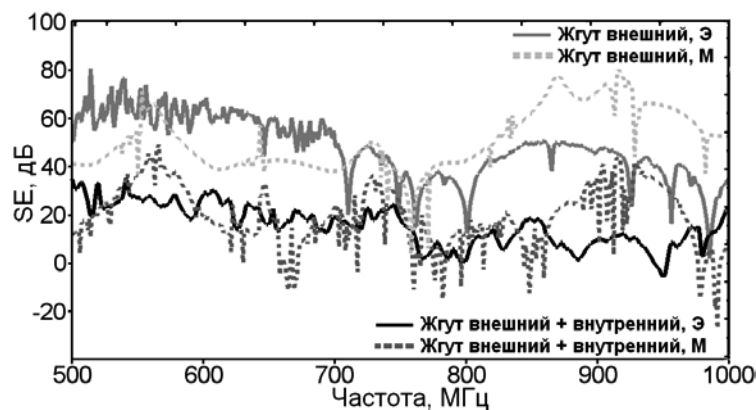


Рис. 4. Результаты экспериментальных исследований (Э) и моделирования (М) SE корпуса с подключенными жгутами с проводами

Как можно видеть, при подключении только внешнего жгута на резонансных частотах эффективность экранирования снижается по сравнению с проникновением только через полый корпус. При подключении второго жгута области провала экранирующей способности корпуса расширяются, эффективность экранирования снижается и ЭМП внутри корпуса может быть большего внешнего. Снова результаты моделирования в FEKO с высокой степенью точности сходятся с экспериментом.

Также исследовалось влияние стягивания съемной крышки и корпусу различным количеством болтов (4, 9 и 15). Результаты экспериментальных исследований показаны на рис. 5а, а результаты моделирования в FEKO – на рис. 5б. Можно видеть, что увеличение точек контакта приводит к увеличению общего экранирующего эффекта. Однако на резонансных частотах эффективность экранирования во всех случаях может падать резко.

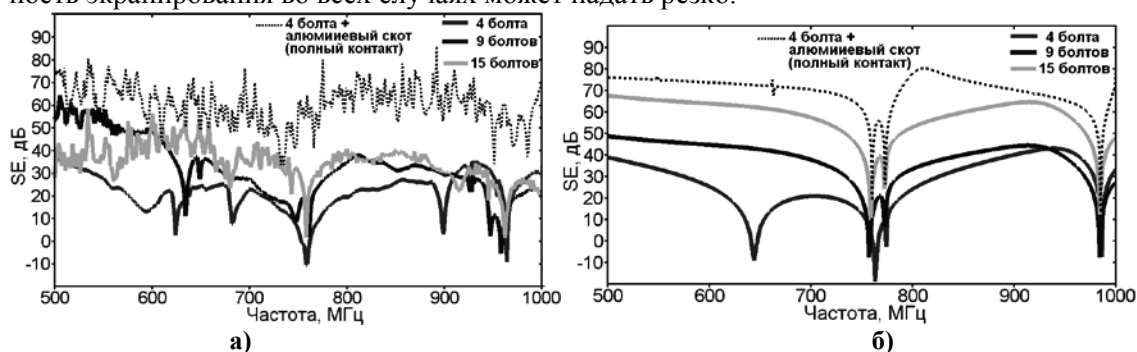


Рис. 5. Результаты экспериментальных исследований (а) и моделирования (б) в FEKO SE корпуса с разным количеством болтов

Сравнивая данные, представленные на рисунках 5а и 5б, можно снова заключить о высокой степени сходства в определении общего экранирующего эффекта и резонансных частотных областей.

Выводы

В данной работе была рассмотрена методика определения резонансного ВЧ-диапазона для отсека БПЛА в виде замкнутой проводящей оболочки типа цилиндра или усеченного конуса. Показано, что экспериментальные данные с высокой степенью согласуются с результатами моделирования в FEKO.

Литература

1. Robinson M.P. et al. Analytical formulation for the shielding effectiveness of enclosures with apertures. – IEEE Trans. on EMC. – 1998. Vol. EMC-40. №3. – P. 240–248.
2. Кундышев П.Я., Бутин В.И. Эффективность экранирования металлических корпусов РЭА в СВЧ-диапазоне при волновом режиме электромагнитного воздействия. – Технологии электромагнитной совместимости. – 2012. – № 4 (43). – С. 7–17.
3. Georgakopoulos S.V. et al. HIRF penetration through apertures: FDTD versus measurements. – IEEE Trans. on EMC. – 2001. Vol. EMC-43. – № 3. – P. 282–294.

4. Nie B., Du P., Yu Y., Shi Z. Study of the shielding properties of enclosures with apertures at higher frequencies using the transmission-line modeling method. – IEEE Trans. on EMC. – 2011. Vol. EMC-53. – № 1. – P. 73–81.
5. Thomas D.W.P. et al. Model of the electromagnetic fields insight a cuboidal enclosure populated with conducting planes or printed circuit boards. – IEEE Trans. on EMC. – 2001. Vol. EMC-43. №2. – P. 161–169.
6. Кундышев П.Я., Бутин В.И., Мусатов Р.Л. Расчетная оценка резонансных частот экранирующих оболочек радиоэлектронной аппаратуры при воздействии электромагнитного излучения ОВЧ-СВЧ диапазона. – Известия института инженерной физики. – 2012. – № 4 (26). – С. 57–60.
7. Jin J.M. Theory and computation of electromagnetic fields. – John Wiley and Sons, 2010. – 616 p.
8. Банков С.Е., Курушин А.А. Расчет излучаемых структур с помощью FEKO. – М.: ЗАО «НПП «Родник», 2008. – 246 с.

Смирнов Ю.Н.
ФБУ «КВФ «Инерстандарт», г.Москва, Россия,
Тел.: 8 (495) 437-9906, Факс: 8 (495) 437-9906, E-mail: scemc@dol.ru

ОСОБЕННОСТИ ПРОВЕДЕНИЯ ИСПЫТАНИЙ НА УСТОЙЧИВОСТЬ К ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМУ ПОЛЮ С РАСШИРЕННЫМ ДИАПАЗОНОМ И БОЛЬШИМ УРОВНЕМ НАПРЯЖЕННОСТИ ПОЛЯ

1. Важнейшие принципы проведения испытаний: повторяемость, воспроизводимость.
2. Условия выполнения: одинаковые характеристики оборудования, одинаковые условия проведения испытаний, одинаковые методики проведения испытаний.
3. Применяемые излучающие системы:
 - антенны,
 - ТЕМ-камеры,
 - ГТЕМ-камеры,
 - полосковые линии,
 - установки равномерного электромагнитного поля (ЭМП).
4. Особенности применения различных излучающих систем:
 - различные характеристики создаваемого ЭМП,
 - ограничения по габаритам и весу испытываемого технического средства (ИТС),
 - размеры рабочих мест,
 - стоимость создания рабочих мест.
5. Особенности рабочих мест при испытаниях в широком диапазоне и при больших уровнях ЭМП:
 - техническая возможность создания рабочих мест,
 - стоимость и экономическая целесообразность,
 - применение гибридных систем.
6. Различия методик проведения испытаний:
 - различия по форме испытательного сигнала,
 - различия установления уровней и допусков.

Акбашев Б.Б.,
НИУ «Высшая школа экономики», МИЭМ, г. Москва;
8-903-729-8191, abba-b@yandex.ru

Балюк Н.В.
НИУ «Высшая школа экономики», МИЭМ, г. Москва;
8-909-924-5603, balyknwwa@mail.ru

Кечиев Л.Н.
НИУ «Высшая школа экономики», МИЭМ, г. Москва;
8-917-572-2727, kln1940@gmail.com

ВОСПРОИЗВЕДЕНИЕ ПОЛЕЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ИМПУЛЬСОВ И ИХ ДЕЙСТВИЕ НА ОБЪЕКТЫ

Решение проблемы воспроизведения поля и действия на объекты разделена на следующие, достаточно самостоятельные, направления исследований:

- воспроизведение параметров полей;
- воспроизведение условий и параметров воздействия;
- формирование и выполнение требований нормативных документов к проведению испытаний различных объектов [1–2].

Воспроизведение полей

Для оценки стойкости объектов широкое распространение нашли методы воспроизведения полей в воздухе. Применение имитаторов позволяет создавать требуемую электромагнитную обстановку в месте расположения объекта при сохранении его внутренних электромагнитных связей и связей с окружающей средой. При таком подходе к формированию электромагнитного импульса (ЭМИ) достигается результат непосредственного воспроизведения воздействия.

Современный имитатор ЭМИ – сложный комплекс, в состав которого входит генератор, система полеобразования, управления и нагрузка, создание которых является результатом трудоемкой исследовательской и опытно-конструкторской работы. В основе воспроизведения электромагнитного импульса с требуемыми амплитудно-временными параметрами и поляризацией в локальном объеме пространства лежат физические процессы формирования импульсного напряжения в высоковольтном источнике питания (импульсном генераторе) и согласование внутренних параметров генератора с волновыми характеристиками полеобразующей системы (излучающей, на связанных волнах или гибридной).

По принципу генерации электромагнитного поля имитаторы ЭМИ разделяются на установки связанных волн (волноводные) и излучающие установки (вibratorные или дипольные).

В установках связанных волн ТЕМ-волна формируется в области, называемой «рабочим объемом», между металлическими электродами, подключенными к одному или нескольким импульсным генераторам напряжения. Испытываемый объект помещается в рабочий объем установки. Большинство существующих имитаторов связанных волн воспроизводят вертикальное электрическое поле и горизонтальное магнитное поле, поскольку в этом случае земля может использоваться как один из проводящих электродов.

К излучающим установкам относятся имитаторы, у которых рабочий объем находится за пределами полеобразующей системы. По конструкции излучающие установки представляют собой антенну (полеобразующую систему), являющуюся нагрузкой импульсного генератора. В зависимости от конструкции полеобразующей системы могут излучаться импульсы с горизонтальной или вертикальной поляризацией электрического поля. Установки излучающего типа позволяют генерировать ЭМИ с малым временем нарастания фронта ($\tau_f < 1$ нс), однако не могут воспроизвести импульсы большой длительности по причине ограниченности физического размера полеобразующей системы.

На воспроизведение требуемых условий испытаний объектов оказывают влияние следующие основные характеристики имитаторов ЭМИ:

- поляризация формируемого поля;
- пространственно-временное распределение напряженностей формируемых электромагнитных импульсов;
- однородность напряженностей электрического и магнитного полей;
- размер испытательного объема.

Поле является однородным, если амплитуда напряженности электрического и магнитного полей не зависят от геометрического расположения точки наблюдения. Учитывая сложность физических процессов формирования ЭМИ в имитаторах, не всегда имеется возможность сформировать импульс с требуемыми параметрами во всей области облучения. Поэтому считается, что если различие амплитудно-временных параметров и распределения электромагнитных полей, токов и напряжений в характерных точках объекта при воздействии реального ЭМИ и ЭМИ имитатора не превосходит погрешности средств измерения (10-20%), то в рабочем объеме установки формируется требуемое электромагнитное поле.

В силу того, что ряд объектов невозможно доставить на экспериментальную базу, их необходимо испытывать только в местах постоянной дислокации, например, самолеты, специальные фортификационные сооружения, радиолокационные станции дальнего обнаружения. В связи с этим актуальными являются вопросы создания мобильных или транспортабельных имитаторов. Оборудование должно быть устойчиво к вибрациям, тряскам. Импульсные генераторы, как правило, необходимо выполнять в металлических корпусах с жидкой или газовой изоляцией с минимально возможными весогабаритными характеристиками. Электрическое питание должно обеспечиваться от автономных бензиновых или дизельных агрегатов.

Воспроизведение действия ЭМИ на объекты

При частичном воспроизведении проводят экспериментальные исследования с целью получить результат действия ЭМИ на тот или иной объект в виде наведенных токов и напряжений. Амплитудно-временные характеристики наведенных токов и напряжений предварительно определяют расчетными или расчетно-экспериментальными методами. Затем осуществляется инжекция токов (напряжений) в элементы конструкции (например, корпус), соединительные линии и цепи аппаратуры.

Использование этого метода связано с методическими трудностями определения параметров импульсных токов и напряжений, наводимых в коммуникациях при воздействии молнии, геомагнитных процессов, ЭМИ ядерного взрыва (ЯВ), других различных факторов искусственного происхождения (излучения широкополосных импульсных РЛС и РПС, преднамеренные электромагнитные воздействия, внутренние помехи).

Проблемы непосредственного воспроизведения сложных многокомпонентных форм испытательных импульсов возникают в тех случаях, когда не представляется возможным исходя из критерия адекватности поражающего действия, сформировать из одного многокомпонентного импульса набор испытательных воздействий. В качестве примера может служить импульс тока мощного молниевых разряда, когда за первым импульсом тока амплитудой 100–200 кА, в течении сотен миллисекунд следует ток паузы амплитудой сотни ампер, после чего второй мощный импульс тока амплитудой до 100 кА. Такое воздействие способно вначале разогреть материал, а потом вызвать его разрушение или деформацию. Очевидно, что простым набором испытательных воздействий не удастся добиться адекватности, данному импульсу, поэтому необходимо для объектов испытаний, где есть вероятность подобного поражающего действия (клепаные соединения, сварные швы, отдельные проводники, композиты) воспроизводить его целиком. Данная задача решается путем синхронизации нескольких электроразрядных установок, генерирующих импульсы, составляющие вместе заданный многокомпонентный.

Проблема испытаний аппаратуры объекта испытаний, находящейся в штатном режиме функционирования (подано рабочее напряжение, идет обмен информацией) заключается в подключение испытательного оборудования без нарушения электрических связей испытываемой аппаратуры, с одной стороны, а с другой – не допустить воздействия на испытательное оборудование рабочего напряжения объекта испытаний. Данная проблема решается посредством разработки специальных устройств связи (трансформаторов тока, влияющих контуров, устройств емкостной и гальванической связи) и развязки (фильтров), их расчета. Кроме упомянутой трудности, следует отметить также тот факт, что ряд нормативных документов для испытаний аппаратуры на воздей-

ствии импульсных токов и напряжений (в частности, при испытаниях бортовой аппаратуры на воздействие близкого удара молнии RTCA-DO-160E, KT-160D и др.) устанавливает требования по согласованию частоты испытательных импульсов с частотой питающей сети (60 Гц, 400 Гц). Выполнение данного требования достигается разработкой соответствующих устройств синхронизации испытательного генератора.

В целом, при воспроизведении импульсных токов и напряжений, наводимые в элементах технических систем объектов электромагнитными полями естественного и искусственного происхождения, возникает целый комплекс научно-технических задач, которые решаются для каждого конкретного объекта в отдельности. Затем осуществляется инъекция токов (напряжений) в элементы конструкции (например, корпус), соединительные линии и цепи аппаратуры.

Формирование и выполнение требований нормативных документов к проведению испытаний различных объектов

Это направление наиболее развито и является основным этапом испытаний объектов.

В настоящее время введено в действие новое поколение нормативных документов (комплексы стандартов России, США, НАТО), в которых заданы требования стойкости аппаратуры и образцов вооружения и военной техники к воздействию поражающих факторов различного происхождения, а также методы и средства испытаний на соответствие современным требованиям.

Для объектов гражданского назначения Международная электротехническая комиссия (МЭК) разработала с участием России серию стандартов МЭК 61000 по ЭМИ высотного ядерного взрыва [3].

Тем не менее, исследования, направленные на уточнение требований стойкости объектов с последующей корректировкой нормативных документов, продолжаются. Это обусловлено необходимостью учёта современных тенденций развития источников мощных электромагнитных полей, а также новых моделей воздействия, совершенствованием методических подходов к заданию требований стойкости объектов, уточнением характеристик поражающих электромагнитных факторов.

Реальное соответствие требованиям стойкости и безопасности объектов в условиях воздействия внешних воздействующих факторов оценивается в ходе испытаний с использованием соответствующих установок-имитаторов.

При решении задач воспроизведения возникают следующие основные проблемы.

1. Проблема, связанная с заданием требований к параметрам испытательных токов и напряжений.

Данная проблема актуальна, прежде всего, тем, что требования стойкости к некоторым видам электромагнитных воздействий целесообразно задавать по полям, воздействующим на образец (трудно учесть в НТД всю номенклатуру, возможные конфигурации объектов испытаний и ситуации воздействия). В данном случае возникает задача расчетного или расчетно-экспериментального определения параметров токов и напряжений в коммуникациях (на входах аппаратуры), исходя из заданных параметров электромагнитных полей, конфигурации и электрофизических характеристик объекта испытаний.

2. Проблема создания имитаторов с параметрами, заданным в НТД либо полученным расчетным или расчетно-экспериментальным способом.

Данные задачи возникают, как правило, тогда, когда испытательные импульсы токов (напряжений) характеризуются сложной многокомпонентной формой и представляют определенные трудности в воспроизведении. В этом случае разрабатывается набор испытательных воздействий, адекватных по поражающему действию заданным в НТД, например, по критериям равенства: амплитуд, удельных энергий в импульсе, крутизны тока (напряжения), количеству электричества в импульсе, кратности повторения и полярности.

Одним из определяющих факторов в создании объектов с необходимыми характеристиками стойкости к электромагнитным факторам является наличие нормативных документов, устанавливающих оптимальную классификацию объектов, технические требования к объектам по их стойкости к ЭМИ, а также порядок и методы испытаний на соответствие объектов заданным требованиям. К числу таких документов в первую очередь относятся стандарты.

Классификация объектов касается прежде всего распределенных объектов по условиям эксплуатации и применения, а также конструктивным и техническим особенностям. К ним отно-

сятся следующие объекты: предназначенные для применения в наземных условиях; предназначенные для применения в условиях водной (морской) среды; авиационные летательные аппараты; ракетное вооружение; космические летательные аппараты.

Каждая группа объектов имеет свои уникальные особенности, которые необходимо учитывать при воспроизведении электромагнитных полей и проектировании установок имитаторов излучений.

Литература

1. Балюк Н.В., Кечиев Л.Н., Степанов П.В. Мощный электромагнитный импульс: воздействие на электронные средства и методы защиты. –М.: ООО «Группа ИДТ», 2008. – 478 с.
2. Кечиев Л.Н., Балюк Н.В. Стандартизация в области ЭМС для военных и гражданских систем. – Технологии ЭМС. – 2014. – № 3 (50). –С. 45–58.
3. Бурутин А.Г., Балюк Н.В., Кечиев Л.Н. Электромагнитные эффекты среды и функциональная безопасность радиоэлектронных систем вооружения. – Технологии ЭМС. – 2010. – № 1. – С. 3–27.

Кечиев Л.Н., Крючков Н.М.
НИУ «Высшая школа экономики», МИЭМ, г. Москва;
Тел.: +7(985)723-02-80; e-mail: kln1940@gmail.com, krug64@gmail.com

Кузнецов В.В.
Калужский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Калуга
Тел.: +7(962)179-21-94; e-mail: ra3xdh@gmail.com

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СВОБОДНОГО ПО QUCS ДЛЯ ОРГАНИЗАЦИИ УЧЕБНОГО ПРОЦЕССА ПО КУРСУ «ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ РЭС»

Традиционно при подготовке студентов специальностей, связанных с электроникой и радиотехникой используется моделирование электронных схем на ПК. Это позволяет наглядно продемонстрировать работу электронного устройства и провести измерения, без физического измерительного оборудования.

Многие учебные заведения сейчас переходят на лицензионное программное обеспечение (ПО), т.к. использование в учебном процессе нелицензионного (т.е. незаконного) ПО вызывает вопросы у проверяющих органов [1, 2].

Лицензии на программное обеспечение в целом делятся на две большие группы: несвободные (собственнические, они же проприетарные; и полусвободные) и лицензии свободного и открытого ПО. Их различия сильно влияют на права конечного пользователя в отношении использования программы" [3].

Поэтому в учебном процессе, все больше, используется проприетарное (коммерческое) ПО для схемотехнического моделирования: MicroCAP, MultiSim, OrCAD и т.п. Всё это сложные программные комплексы стоимостью несколько тысяч долларов. И применение их в учебном процессе для выполнения лабораторных работ, на наш взгляд, не всегда оправдано. В последние годы им появилась альтернатива — легковесная САПР для моделирования электронных схем Qucs [4, 5, 6]. Qucs относится к классу свободного ПО и распространяется бесплатно с открытым исходным кодом. Название проекта расшифровывается как Quite Universal Circuit Simulator (почти универсальный симулятор схем). Разработчиками Qucs являются сотрудники Берлинского института высокочастотной техники M. Margraf и S. Jahn. В настоящее время руководителем проекта являются F. Schreuder (Нидерланды) и G. Torri (Италия). Текущей версией проекта является 0.0.18. В настоящее время ведётся подготовка к релизу версии 0.0.19. Все желающие могут предложить изменения для исходного кода программы. Система является кроссплатформенной и работает под управлением ОС Linux и Windows. Для достижения наилучших результатов рекомендуется использовать ОС Linux.

Qucs позволяет проводить следующие виды моделирования:

1. Моделирование на постоянном токе (DC analysis).
2. Моделирование в частотной области (AC analysis).
3. Моделирование во временной области (Transient analysis).
4. Параметрический анализ (Parameter sweep).
5. Моделирование S-параметров в частотной области (S-parameter).
6. Синтез пассивных фильтров, согласованных схем, расчёт коаксиальных и микрополосковых линий.

Результаты моделирования можно визуализировать в виде графиков в декартовых (2D и 3D) и полярных координатах, таблиц и диаграмм Смита.

Отличительной особенностью Qucs является возможность анализа комплексных частотных характеристик (КЧХ), построение графиков на комплексной плоскости и диаграмм Смита, анализ комплексных сопротивлений и S-параметров. Эти возможности отсутствуют в системах MicroCAP и MultiSim, и здесь Qucs даже превосходит коммерческое ПО. Возможности Qucs достаточны для проведения научных исследований [7], связанных с моделированием электронных схем.

Недостатком системы Qucs является малое количество библиотечных компонентов. Но этот недостаток не является препятствием к использованию, так как Qucs совместим с форматом Spice в котором приводятся модели электронных компонентов в даташитах.

В настоящее время Qucs применяется в Калужском филиале МГТУ им. Н.Э. Баумана на кафедре «Конструирование и производство РЭА» (ЭИУ1-КФ).

Разработан курс лабораторных работ, в ходе которых студенты моделируют различные источники помех и помехоподавляющие схемы.

Курс содержит шесть лабораторных работ:

1. Моделирование помех, вызванных коммутацией индуктивной нагрузки и способы борьбы с ними.
2. Помехоподавляющие элементы: керамический конденсатор и дроссель.
3. Моделирование многозвенного помехоподавляющего LC-фильтра.
4. Моделирование эквивалента сети.
5. Моделирование спектра помех тиристорного фазового регулятора переменного напряжения.
6. Моделирование эквивалентных схем электростатического разряда [7].

Также Qucs применяется в МИЭМ НИУ «Высшая школа экономики» на кафедре «Радиоэлектроника и телекоммуникации» при курсовом и дипломном проектировании для выполнения компьютерного анализа электронных схем. Пример применения можно найти в [8].

Ещё в 2004 году на кафедре РТУиС МИЭМ¹, в рамках дипломной работы (см. результаты в [9]), была разработана программа по синтезу активных фильтров, которую в 2014 году переработал и дополнил Кузнецов В.В. под названием qucs-activefilter (ожидается в следующем стабильном выпуске программы Qucs). При помощи Qucs-activefilter можно будет синтезировать активные ФНЧ, ФВЧ, ППФ, ПЗФ с АЧХ Бесселя, Баттерворта, Чебышева, Кауэра и АЧХ задаваемой пользователем на основе схемотехники звеньев фильтра Саллена-Ки, фильтра с многопетлевой ОС и звена фильтра Кауэра. Алгоритмы синтеза фильтров соответствуют справочнику [10].

Из вышеприведенного видно, что Qucs представляет собой бурно развивающееся программное средство (ПС) для моделирования электронных схем, в том числе в области ЭМС, позволяющее получать результаты, сопоставимые с коммерческими ПС и заменить их в учебном процессе вузов.

Литература

1. Лицензирование программного обеспечения. Вторая часть. http://center-soft.ru/state/licenzirovanie_po2.html.
2. http://center-soft.ru/state/o_licenzirovanii.html.
3. <https://ru.wikipedia.org/>
4. Qucs: Quite Universal Circuit Simulator. <http://qucs.sourceforge.net>.
5. Brinson M. E., Jahn S. Qucs: A GPL software package for circuit simulation, compact device modelling and circuit macromodelling from DC to RF and beyond // International Journal of Numerical Modelling (IJNM): Electronic Networks, Devices and Fields. — 2008. — September. — Vol. 22, no. 4. — Pp. 297 – 319. <http://www3.interscience.wiley.com/journal/121397825/abstract>.
6. Кузнецов В.В., Крючков Н.М. Qucs: Использование свободного ПО для моделирования электронных схем в учебном процессе/ XI конференция разработчиков свободных программ: Тезисы докладов/ Калуга, 26–28 сентября 2014 года. М.: Альт Линукс, 2014.
7. Кузнецов В. В., Кечиев Л. Н. Исследование стойкости печатных узлов к воздействию электростатического разряда // Технологии ЭМС. — 2013. — №1. — С. 29–38.
8. Кечиев Л.Н., Шатов Д.С. Моделирование в среде Qucs развязывающих конденсаторов в составе распределенной системы питания цифровых модулей. — Технологии ЭМС. 2014. № 3(50). С. 3644.
9. Елисеева О.М., Крючков Н.М. Проектирование фильтров. // Электромагнитная совместимость и проектирование электронных средств: Сборник научных трудов МИЭМ. Москва, 2004.
10. Johnson D., Johnson J., and Moore H., A handbook of active filters. Prentice-Hall, Inc, Engewood Cliffs, 1980.

¹ С 1 июля 2012 года кафедра РЭТ МИЭМ НИУ «Высшая школа экономики».

Кечиев Л.Н.,
НИУ «Высшая школа экономики», г. Москва;
Тел.: +7(917)572-27-27; e-mail: klm1940@gmail.com

Михеев В.А.,
ИМЦ «Концерн «Вега», г. Москва;
e-mail: mikheev_v@mail.ru

ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ, СВЯЗАННАЯ С ЭМС, И ЗАДАЧИ ИХ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Проблема функциональной безопасности, связанной с ЭМС, становится все более актуальной [1–3]. Это определяется применением чувствительной электроники для решения ответственных задач, которые важны с позиций обеспечения безопасности, таких как автопилоты и автоматические системы приземления, системы управления и т.п. Современные системы полностью зависят от качества функционирования электроники. Они подвергаются интенсивным электромагнитным воздействиям, например, от радаров аэродромов, широкоэмиттерных радиопередатчиков, прямого удара молнии. Военные системы дополнительно подвергаются мощным воздействиям средств радиоэлектронной борьбы и соответствующих контрмер. Для космической аппаратуры мощным деструктивным фактором может служить электростатический разряд на кабельные системы и бортовую аппаратуру [4, 5].

Понятие функциональной безопасности [6] определяет ситуацию, в которой «безопасность» зависит от правильного функционирования оборудования или системы. Точность и надежность электронного оборудования, связанного с безопасностью – проблема функциональной безопасности. При нарушении функциональной безопасности может быть нанесен ущерб здоровью человека, экологии, собственности.

Большинство законов, инструкций и стандартов в области безопасности или ЭМС, хотя и предусматривают соответствующие испытания, не отражают вероятность нарушения целостности функциональной безопасности перспективных устройств и систем. В результате пользователи и третьи лица подвергаются увеличенным рискам безопасности, а поставщики подвергнуты возрастающим требованиям ответственности.

При рассмотрении вопросов функциональной безопасности рассматриваются критические условия функционирования. Так летательный аппарат (ЛА) может находиться в основном луче антенн мощных передатчиков, таким образом, подвергаясь воздействию электромагнитных полей чрезвычайно высокой интенсивности. Электронные системы ЛА в этом случае должны функционировать без нарушения штатного режима. Часто напряженность таких полей может превосходить санитарные нормы, что совместно с техническими трудностями реализации таких полей затрудняет проведение тестирования оборудования.

Частота мощных воздействий может быть различна, но в среднем каждый гражданский самолет находится под воздействием молнии один раз в год. При этом его корпус становится частью канала дуги, что приводит к огромным импульсным токам, текущим через корпус, и влияющим непосредственно или косвенно на работу систем. Это требует обеспечения длительной работы систем при наведенных импульсных токах. Также угроза молнии требует демонстрации структурной целостности и топливной безопасности во время и после ее воздействия. Нужно упомянуть, что самолеты, по своей природе – «летающий топливный бак», и поэтому следует принимать во внимание риски взрыва топлива, особенно в случае удара молнии.

Электростатические разряды для космической аппаратуры представляют серьезную угрозу, воздействуя на кабельные системы космического аппарата. Наведенные токи и напряжения, попадая на входы блоков системы, могут вызвать сбой и другие нарушения работоспособности систем с непредсказуемыми последствиями. Серьезную опасность представляют ЭСР при заправке ЛА топливом, увеличивая риск взрыва при определенных условиях.

Летательные аппараты это высоко интегрированные системы и, в отличие от больших наземных систем (например, систем электроснабжения или сетей телекоммуникаций), в них трудно разбить проблему на отдельные части с электромагнитной точки зрения и при этом быть уверенным, что синергетические эффекты не были пропущены. Рассмотрение такого физически большого объекта предполагает наличие сложных проблем в сфере ЭМС, функциональной безопасности при электромагнитных воздействиях, а также при проектировании систем.

Для военных систем возникают дополнительные сложности, связанные с преднамеренными угрозами электромагнитного характера, интенсивность которых и вероятность появления растут все время. Они должны также быть приняты во внимание во время проектирования и тестирования систем. Для космической промышленности при проектировании систем, отвечающих требованиям функциональной безопасности, добавляется своя специфическая проблема – ограничения по массе и объему, что влияет на выбор средств защиты и их стоимость.

Электромагнитная среда, в электронные системы должны работать без нарушения функциональной безопасности, является наиболее возмущенной. Например, электронные системы военной авиации должны работать без нарушения функциональной безопасности в изменяющихся интенсивных электромагнитных средах в течение нескольких лет. В свою очередь среда, типичная для военной авиации, зависит от планируемого назначения конкретного вида авиации и поэтому может меняться в зависимости от проекта. Например, самолеты, которые предназначены для палубной авиации, могут находиться на критически малом расстоянии от антенн мощных передатчиков корабля. Это создает чрезвычайно интенсивную электромагнитную среду, для которой должна быть продемонстрирована способность системы противостоять ошибкам.

Внешняя электромагнитная среда, оговоренная как требование к системе, предоставляется разработчиком и обычно задается исходя из действующей нормативно-технической документации. Иногда параметры электромагнитной среды требуют изменения из-за специфических рабочих характеристик (например, мощные излучения от другого самолета). Кроме того, электромагнитная среда на поле боя интенсифицируется за счет применения источников мощных электромагнитных полей, различных средств постановки преднамеренных помех и средств радиопротиводействия. Самая известная из таких угроз – электромагнитный импульс высотного ядерного взрыва (NEMP).

Гражданские самолеты за последние годы были оборудованы безопасными критическими электронными системами. Эта работа координировалась рядом международных организаций в области оборудования самолетов (EUROCAE, CAE, EENWG), что позволило достигнуть согласованного набора сред для гражданских самолетов во всем мире.

Электромагнитная среда излучаемых полей высокой интенсивности (HIRF) разделена на четыре разновидности: нормальная среда, жесткая среда, сертификационная среда, жесткая среда для вертолетов.

Нормальная среда – среда HIRF, которая может быть на аэродромах, обычно в результате работы аэродромных передатчиков, которые являются частью рабочей инфраструктуры поддержки. Предполагается, что большинство лайнеров могут находиться в этой среде ежедневно, возможно кратковременно.

Жесткая среда – среда, в которую может попасть самолет в каком-либо районе земного шара. Единственное ограничение – курс полета должен быть в пределах правил, изложенных Международной Организацией Гражданской авиации (ИКАО).

Сертификационная среда основана на жесткой среде, однако, некоторые расстояния между самолетом и передатчиком были переоценены на основе вероятности нахождения в нормальных условиях полета.

Жесткая среда для вертолетов основана на жесткой среде для самолетов, однако в ней приняты намного меньшие расстояния разнесения между источником полей и объектом, которые могут быть достигнуты вертолетами, по сравнению с самолетами.

Можно заметить, что даже большие гражданские самолеты, которые не летят на малой высоте или приближаются к мощным передатчикам в коротковолновом диапазоне, обязаны демонстрировать способность электронных систем противостоять чрезвычайно большим полям. В дополнение к требованиям среды HIRF гражданский самолет должен продолжать безопасный полет в течение и после разряда молнии на корпус, согласно требованиям JAA и FAA (Федеральное авиационное агентство США).

Электромагнитная среда HIRF, созданная отдаленными источниками, является только частью среды, в которой должны работать системы. Все самолеты используют встроенные системы радиосвязи, использующие внешне установленные антенны. Такие системы создают электромагнитную среду, внешнюю к корпусу самолета, и это должно быть частью требований, предусмотренных проектом. Кроме того, внутреннее оборудование КА и самолета содержит большое число электрически разнообразных систем (мощные переключатели нагрузки, аналоговые и цифровые системы с низким уровнем сигнала), которые из-за ограниченных габаритов объекта должны быть установлены в непосредственной близости друг от друга. Наиболее уязвимы в этом случае кабельные системы, в которых низковольтные цепи находятся под воздействием мощных цепей или ЭСР для КА. Внутренняя электромагнитная обстановка и внутрисистемная ЭМС еще одно требование проекта.

Оборудование электронных систем описывается в терминах восприимчивости к сигналам в частотной и временной области. Эти уровни выбраны как функции напряженности полей окружающей среды, их ослабления корпусом самолета и межсистемным взаимодействием. Кроме того, оборудование должно быть квалифицировано к приемлемым уровням помехоэмиссии в частотной и временной области. Это позволяет управлять межсистемными уровнями угроз и сдерживается, в основном потребностью минимизировать уровни помех в каналах приемника встроенных систем радиосвязи.

Разработчик должен, во-первых, выбрать соответствующие требования спецификации для оборудования в соответствии с требованиями для всей системы. Важно гарантировать, что проект системной интеграции, проект инсталляции систем и проект корпуса (с электромагнитной точки зрения) дополняют друг друга и направлены на достижение уровня угроз ниже уровней квалификации оборудования, чтобы гарантировать способность систем успешно противостоять нарушениям целостности функциональной безопасности.

Интегральные схемы (ИМС), на которых построены узлы и блоки систем, становятся более уязвимыми к воздействию электромагнитных помех, электростатических разрядов как прямого, так и косвенного воздействия. Стремление к повышению быстродействия и снижению энергопотребления приводит к применению микросхем с меньшими топологическими нормами, меньшими напряжениями питания, что вызывает их повышенную чувствительность к воздействию импульсных помех. Помехоустойчивость ИМС к воздействию импульсных помех, возникающих при ЭСР, может быть оценена по их характеристике динамической помехоустойчивости. По мере совершенствования компонентной базы, ее восприимчивость к воздействию наведенных от ЭСР импульсов возрастает.

Исследование кабельных систем показывает, что они остаются одним из наиболее чувствительных элементов электронных систем. Их можно рассматриваться как «случайные» антенны, эффективно воспринимающие воздействующие поля, в том числе и от ЭСР. Обладая определенным коэффициентом трансформации тока, ЭСР возбуждает токи в экранированных кабельных линиях, которые создают напряжения помех на входах электронных блоков системы. Для устранения отрицательного действия перенапряжений следует устанавливать быстродействующие разрядные и ограничительные устройства.

Работа программного обеспечения зависит от целостности сигнала и качества функционирования ИМС; следовательно, когда ЭСР приводит к нарушению работоспособности ИМС или их повреждению, программное обеспечение может работать со сбоями, вызывая соответственно сбои в работе оборудования и систем, которыми оно управляет.

Серьезной проблемой при создании электронных систем является отсутствие стандартов и норм проектирования, которые предусматривают рассмотрение вопросов функциональной безопасности. Не до конца понимая глубину этой проблемы, изготовители стоят на позиции, что устойчивость – проблема надежности, и поэтому должна быть предоставлена на выбор потребителя. Даже, если показатели надежности оговариваются, то зависимость этих показателей с функциональной безопасностью не очевидна. Так, каналы параллельного резервирования при электромагнитных воздействиях могут быть поражены одновременно, что нивелирует все позитивные свойства параллельного резервирования. Следовательно, надежность и ЭМ-стойкость электроники, когда речь идет о связанных с функциональной безопасностью применениях, не связаны между собой и не координируются в каких-либо документах.

Эта разобщенность, являющаяся результатом проблем, описанных выше, приводит к

увеличенным опасностями для пользователей почти любого вида оборудования или транспортных средств, и для третьих лиц. Одновременно, следует отметить, что поставщики электронных систем все более и более подвергнуты огромным рискам ответственности за функционирование изделия, учитывая экономические, социальные, военные факторы.

В космической отрасли, как и в ряде других отраслей промышленности, разработчики традиционно обращались к проблеме ЭМС как проблеме, связанной с безопасностью, скорее из собственного понимания ответственности, чем из потребности исполнить определенные инструкции и стандарты. Стоит вопрос: является ли подход, основанный на рассмотрении функциональной безопасности через проблему ЭМС адекватным?

ЭМС определяется, как способность аппаратуры работать одновременно с другими средствами в реальной электромагнитной обстановке, выполняя штатные функции, не создавая помех другим средствам. Внешние воздействия подразумевают помехи естественного и техногенного происхождения, включая ЭСР. Частотный спектр помеховых воздействий простирается в диапазон многих гигагерц. Наличие помех может привести к сбоям в работе электронных средств, в ряде случаев и к выходу их из строя. Аппаратура ЛА должна отвечать требованиям ЭМС, и важность этого фактора подтверждается следующими основными тенденциями в технологии:

Безопасность – термин, использованный, чтобы обозначить понятие согласованного понимания опасностей, и их рисков, которые являются приемлемыми для данного общества [6]. Некоторые типы действий несут большие опасности или риски, чем другие. Законы о безопасности вообще требуют, чтобы продукция была разработана и произведена столь же безопасной, как общество «имеет право ожидать». т.е. безопасность в определенной мере социальная категория.

Функциональная безопасность – термин, использованный, чтобы охватить опасности и риски, связанные с ошибками или сбоями в функционировании устройства или аппарата. Это отлично от собственной безопасности, которая определяет потенциал устройства противостоять таким опасностям, как огонь, удар током, ядовитые пары и т.п.

Разработчики связанных с безопасностью систем должны определить параметры безопасности. Они должны включать возможные опасности и исследования рисков, которые принимаются во внимание, по крайней мере, из-за следующих разумно обозримых факторов:

- неправильное применение системы: или случайное (например, неправильная инсталляция или человеческая ошибка), или преднамеренное (например, перегрузка или использование для непреднамеренной цели),
- ошибки в проекте, особенно влияющие на отказы и сбои электронных систем,
- экстремальные значения внешних воздействий, включая электромагнитные воздействия, высокие температуры, вибрации, комплексные воздействия и т.п., которые могут встретиться в жизненном цикле ЛА.
- последствия (опасности), с их вероятностями (риски).

Параметр безопасности также должен включать анализ того, достигает ли проект безопасности, которую общество «имеет право ожидать», и что требуется сделать, чтобы достигнуть этого.

Всегда, когда электронное устройство управляет прибором или системой, которая в случае нарушения штатного режима приводит к более высокому риску, тогда точность и надежность электроники становятся проблемой безопасности. Но все типы электроники восприимчивы к погрешностям, сбоям или повреждениям из-за ЭМ помех; следовательно, опасности или риски могут быть усилены отсутствием адекватных показателей ЭМС.

Разработчики полагают, что любое оборудование, которое, как объявляет его изготовитель, было выполнено в соответствии со стандартами или Директивами ЭМС, должно быть свободным от всех проблем ЭМС. Но эти нормативные документы направлены исключительно на устранение технических барьеров в торговле и не могут из-за их ограниченной природы должным образом иметь дело с проблемами функциональной безопасности, связанными с ЭМС. При рассмотрении ЭМС принимается во внимание только нормальное функционирование и типичная электромагнитная обстановка (ЭМО) [3]. В отличие от этого, при рассмотрении вопросов безопасности принимаются во внимание разумно обозримые события низкой вероятности, человеческие ошибки и возможность ошибок в применении, наличие перегрузок и

экологические экстремальные значения.

Основные задачи, которые следует решать при проектировании электронных систем с учетом факторов функциональной безопасности, можно свести к следующим:

- определение угроз электромагнитного характера, которые могут воздействовать на аппаратуру,
- выявление последствий после критических уровней электромагнитных воздействий,
- выявление последствий помехоэмиссии окружающего оборудования,
- определение разумно обозримых количественных оценок нарушения функциональной безопасности,
- определение методов и средств достижения необходимого уровня безопасности,
- документальное подтверждение достижения требуемого уровня функциональной безопасности.

Важен экономический фактор обеспечения функциональной безопасности. Даже один проект, в котором нарушена функциональная безопасность, может привести к таким экономическим потерям, которые не будут компенсированы множеством удавшихся проектов. Кроме того, единственный инцидент безопасности может коренным образом подорвать репутацию компании.

Философия процесса проектирования систем, обеспечивающих функциональную безопасность, базируется на верификации проекта как можно раньше (то есть уменьшения риска, связанного с незащищенностью системы, на возможно более ранних стадиях проекта), что позволяет экономить средства и сокращать сроки проектирования. Квалификация завершеного проекта основана на пяти источниках данных, а именно:

- данные доступны для анализа,
- тестирование корпуса и компонентов инсталлированной системы,
- тестирование оборудования,
- анализ результатов моделирования,
- тестирование системы в целом.

Такой широкий спектр данных является результатом понимания, что невозможно проверить все компоненты системы, во всех режимах, на всех частотах, при всех видах модуляций и при всех направлениях облучения. Квалификация поэтому проводится в зависимости от критичности объекта.

Использование моделирования способствует совершенствованию проекта. Это позволяет получить количественные данные для спецификации проекта и экспертизы критических областей, требующих отклонений от проекта. Моделирование важно для определения уровней тестирования, получения данных в тех направлениях, в которых не может быть проведено экспериментальное исследование.

В ряде случаев не весь процесс проектирования может всегда использоваться. Например, из-за чрезвычайно протяженного жизненного цикла корпуса ЛА по сравнению со временем, при котором системы становятся устаревшими, используется модернизация систем в пределах существующего корпуса. Нужно помнить, что специалисты, не осведомленные в вопросах ЭМС, должны быть проинформированы об соответствующих особенностях продукта. Системы в ЛА остаются установленными относительно друг друга однажды при завершении проекта, и квалификация закончена, разнообразие внешней обстановки и угроз огромно. Кроме того, самолет и его системы должны изменяться за счет модернизации при длительном сроке службы самолета (более 30 лет), что создает проблему мониторинга.

Процесс тестирования ведется на многих уровнях, а именно:

- компоненты (например, соединители, экранирующие материалы кабелей),
- оборудование (например, компьютер контроля полета),
- компонент корпуса (например, крылья),
- система в целом.

Известны различные испытательные методики для комплексного тестирования, и они не отличаются от применяемых в коммерческих или промышленных секторах. Методики испытаний непрерывно совершенствуются, а документы, на которые при этом ссылаются, должны быть последними их версиями. В них отражены те проблемы, которые возникли в результате изменений

в технологических и экономических областях. Типичные изменения касаются:

- повышения точности и воспроизводимости результатов тестирования,
- сокращения стоимости тестирования,
- воспроизведение электромагнитной среды, которая более адекватно отражает реальную ситуацию.

Тестирование отдельных компонентов системы должно проводиться раньше, чем ЛА в целом. Это позволяет выявить проблемы риска отказов на более ранних стадиях, что минимизирует стоимость коррекций и доработок.

В современных условиях непрерывно требуется применение новых решений для обеспечения ЭМС и функциональной безопасности. Это определяется следующими факторами:

- постоянное возрастание уровней угроз электромагнитного характера,
- все большая интеграция электронных и радиоэлектронных систем,
- расширенное применение электромеханических устройств, сервомеханизмов и т.п.,
- ужесточение требований на штатную гарантию стойкости,
- стремление к использованию коммерческих компонентов.

Литература

1. Бурутин А.Г., Балюк Н.В., Кечиев Л.Н. Электромагнитные эффекты среды и функциональная безопасность радиоэлектронных систем вооружения. – Технологии ЭМС. – 2010. – № 1(40). – С. 3–27.
2. IEE Guidance Document on EMC & Functional Safety. – IEE. – 2008. – P. 177.
3. Armstrong K. EMC-Related Functional Safety of Electronically Controlled Equipment. – Compliance Engineering. – 2001. – № 1. – P. 24–32.
4. Кечиев Л.Н., Пожидаев Е.Д. Защита электронных средств от воздействия статического электричества/ Учеб. пособие для вузов. – М.: Издательский Дом «Технологии», 2005. – 352 с.
5. Белик Г.А., Абрамешин А.Е., Саенко В.С. Внутренняя электризация бортовой радиоэлектронной аппаратуры космических аппаратов. – Технологии ЭМС. – 2012. – В настоящем номере.
6. Смит Д.Д. Функциональная безопасность. Простое руководство по применению стандарта МЭК 61508 и связанных с ним стандартов/ Дэвид Дж. Смит, Кеннет Дж. Л. Симпсон – М. Издательский Дом «Технологии», 2004. – 208 с.

Кечиев Л.Н., Шатов Д.С.
НИУ «Высшая школа экономики», МИЭМ, г. Москва;
Тел.: +7(917) 572-2727; e-mail: kln1940@gmail.com, D.S.Shatov@mail.ru

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СРЕДСТВ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРИ РАЗРАБОТКЕ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ СИСТЕМЫ ПИТАНИЯ ЦИФРОВЫХ МОДУЛЕЙ

Одним из основных направлений, по которым развивается электроника, на сегодняшний день, является направление увеличения быстродействия новейших цифровых микросхем при одновременной миниатюризации последних. Вместе с этим наблюдается неуклонная тенденция по снижению уровня питающих напряжений. В современных микросхемах уже достигнуты уровни питающих напряжений на уровне 0,9 В (Altera Stratix IV). Вместе с тем, снижение уровня питающих напряжений накладывает все большие требования по ограничению допустимого значения уровня пульсаций напряжения в системе питания и повышению помехоустойчивости цифровых узлов. Обеспечить столь малые значения допустимых изменений напряжения в широком диапазоне частот представляет сложную задачу. Эффективность ее решения определяется результатом совместной работы конструкторов и схемотехников, а варианты решения могут быть как конструкторскими, так схемотехническими [1, 2].

Одним из наиболее эффективных способов решения поставленной задачи является снижение полного сопротивления распределенной системы питания на всем рабочем частотном диапазоне, что достигается использованием в ее составе развязывающих конденсаторов и помехозащитных фильтров. Распределенная система питания включает в себя средства как низкочастотной, так и высокочастотной развязки: стабилизатор питания, низкочастотные (удерживающие), среднечастотные и высокочастотные развязывающие конденсаторы, а также средства снижения полного сопротивления, реализуемые возможностями конструкции самой печатной платы (планарный конденсатор).

Ввиду того, что одновременно со снижением уровней питающих напряжений в современных устройствах возрастают значения токов потребления и снижаются допустимые пульсации, значения полных сопротивлений распределенной системы питания (РСП) современных узлов имеют очень малые значения. Они зависят от уровня питающего напряжения, допустимого значения уровня пульсации и тока потребления. При использовании оптимально подобранной системы распределенного питания цифрового узла, достигается низкий уровень полного сопротивления на всем рабочем частотном интервале. Методика выбора и определения необходимого числа развязывающих конденсаторов для цифровых узлов, а также наиболее полные рекомендации по установке и расположению элементов РСП наиболее подробно рассматриваются в [1, 2]. Для принятия окончательного решения целесообразно провести моделирование РСП, которое проводилось в программе QUCS.

Моделирование продемонстрировало, что одними из основных методов снижения полного сопротивления, является параллельное подключение конденсаторов одного и разных номиналов. Снижение значения полного сопротивления на всем частотном диапазоне достигается параллельным подключением развязывающих конденсаторов с различными значениями емкостей и индуктивности (ESL). Значения емкостей развязывающих конденсаторов при этом не должны резко отличаться, ввиду того, что возможны образования резких антирезонансных пиков (появления участков, на которых наблюдается резкое увеличение полного сопротивления). При этом в окрестности самих резонансных частот развязывающих конденсаторов, антирезонансные пики не так сильно выражены, о чем свидетельствует график на рис. 1.

Снижение значения полного сопротивления в пределах антирезонансного пика достигается подключением развязывающего или нескольких развязывающих конденсаторов с подобранной резонансной частотой или частотами, которые располагаются в области тех частот, где наблюдается наиболее резкие изменения полного сопротивления. Подключение конденсаторов с емкостями, которые отличаются значением емкостей не более, чем на порядок, позволяет избежать резких изменений полного сопротивления в пределах рабочей частотной области. В том случае, если в области некоторой частоты уровень полного сопротивления превышает требуемый уровень, необ-

ходимо прибегнуть к параллельному подключению развязывающих конденсаторов. Ниже, приведен график (рис. 2), иллюстрирующий данное заключение.

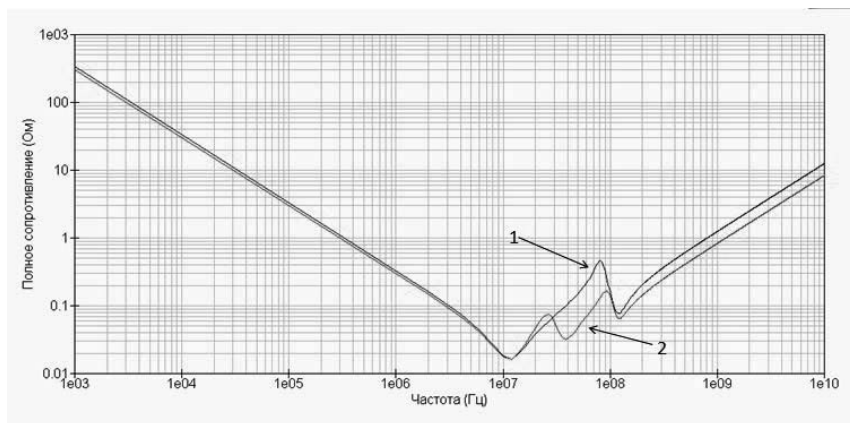


Рис. 1. Сравнительная характеристика полного сопротивления от частоты для набора из двух (кривая – 1) и трех высокочастотных конденсаторов (кривая – 2)

В том случае, если в области некоторой частоты снижено полное сопротивление, но требуемый уровень полного сопротивления не

достигнут, необходимо прибегнуть к параллельному подключению развязывающих конденсаторов одного номинала, желательного одного типа, с резонансной частотой, наиболее близкой к значению частоты рабочего интервала, на котором необходимо добиться дополнительного снижения полного сопротивления. Однако необходимо учитывать, что конденсаторы сильно различаются между собой. Стандартный двухвыводной конденсатор в корпусе 0402 со значением емкости 0,047 мкФ и низкоиндуктивный конденсатор в том же корпусе с таким же значением емкости, могут иметь резонансные частоты, которые не только не совпадают, но и могут отличаться на десятки мегагерц (ввиду более низкой индуктивности у последнего). Даже при использовании одного типа конденсатора с одним значением емкости, только в результате различного рода допусков, которые, как правило, оговаривает разработчик, значение емкости может отличаться на 20%.

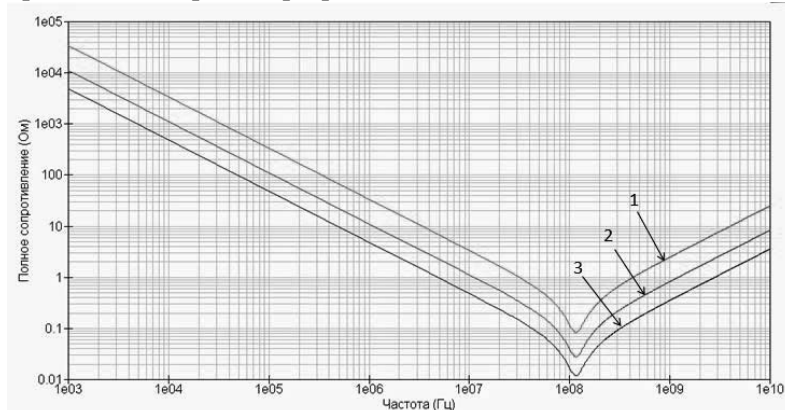


Рис. 2. Зависимость полного сопротивления от частоты: 1 – одного конденсатора, 2 – трех конденсаторов, 3 – семи развязывающих конденсаторов

Каждый из компонентов РСП эффективен только в пределах некоторого частотного интервала и выполняет функцию снижения полного сопротивления только на некотором отрезке частотного диапазона.

Так стабилизатор обеспечивает снижение полного сопротивления, в среднем, до 100 кГц, удерживающие конденсаторы – до 1 МГц, среднечастотные и высокочастотные конденсаторы, наиболее эффективны, до нескольких сот мегагерц. Планарный конденсатор, который формируется слоями питания и опорного напряжения печатной платы, обеспечивает требуемый уровень полного сопротивления в интервале от нескольких сотен мегагерц до единиц гигагерц. Необходимо так подобрать элементы РСП, чтобы значение полного сопротивления всей системы, находилось в пределах требуемого уровня полного сопротивления во всем частотном диапазоне.

Ниже приведен график (рис. 3) зависимости полного сопротивления от частоты для РСП, которая состоит из стабилизатора напряжения, работающего в режиме переключения, 5 удерживающих конденсаторов емкостью 470 мкФ, 4 высокочастотных развязывающих конденсаторов с номиналами 0,0047, 0,047, 0,47, 4,7 мкФ в корпусе 0402 и планарного конденсатора.

При моделировании необходимо учитывать тот факт, что каждый из указанных выше компонентов обладает характерным для него значением индуктивности, который и ограничивает использование каждого из указанных элементов в более высокочастотной области. Наиболее низкочастотным компонентам соответствуют самые высокие значения индуктивности, а компоненты, которые предназначены для развязки цепей в высокочастотном диапазоне обладают наиболее низ-

кими значениями индуктивности (десятки-сотни пикофарад для планарного конденсатора). При моделировании должны быть учтены не только индуктивность всех компонентов распределенной системы питания, но и индуктивность монтажа.

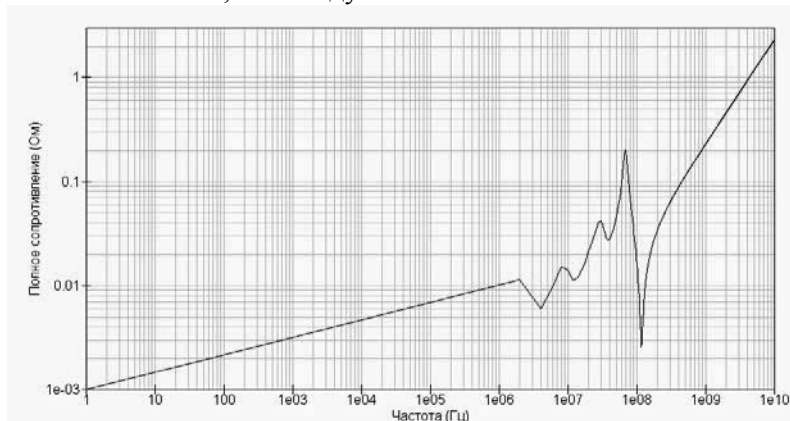


Рис. 3. Зависимость полного сопротивления от частоты РСП

Особое внимание, при конструировании МПП, следует обратить на реализацию конструкции низкоиндуктивного планарного конденсатора, сформированного слоями питания и заземления многослойной печатной платы (МПП). При моделировании планарного конденсатора не-

обходимо учитывать не только емкость планарной структуры, но и связанную с ней индуктивность. Учет индуктивности планарного конденсатора показывает, что наличие индуктивности, всего в десятки-сотни пикогенри, может значительно затруднить развязку в высокочастотной области, если не принять дополнительные меры по снижению индуктивности. Индуктивность планарного конденсатора зависит от геометрических размеров слоев МПП и от материала, который будет использован в качестве диэлектрика конденсатора. Существуют ряд технологических ограничений, связанных с минимизацией индуктивности планарного конденсатора. Минимальная толщина подложки ограничена минимальной толщиной диэлектрика, а также значением диэлектрической постоянной данного диэлектрика.

Эффективность построения РСП определяется большим набором факторов: необходимо определить не только значения номиналов развязывающих конденсаторов, но и определить их необходимое число, определить место оптимального размещения каждого из поверхностно-монтируемых компонентов на поверхности печатной платы, а также осуществить качественный монтаж, приняв меры по сокращению индуктивности монтажа.

Литература

1. Шатов Д.С. Разработка рекомендаций по применению развязывающих конденсаторов в системе питания быстродействующих цифровых узлов. Выпускная квалификационная работа. –2014. – 188 с.
2. Кечиев Л.Н., Шатов Д.С.. Моделирование в среде QUCS развязывающих конденсаторов в составе распределенной системы питания цифровых модулей. – Технологии ЭМС. – 2014. – №3 (50). –с. 36–44.

Кузнецов В.В.,
Калужский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Калуга
Тел.: +7(962)179-21-94; e-mail: ra3xdh@gmail.com

УПРОЩЁННАЯ МОДЕЛЬ ВОЗДЕЙСТВИЯ ЭСР НА ПОЛЕВОЙ ТРАНЗИСТОР, СМОНТИРОВАННЫЙ НА ПЕЧАТНОЙ ПЛАТЕ

Целью данного исследования является разработка упрощённой модели воздействия ЭСР с печатной платой (СВМ ЭСР) на печатные узлы с силовыми полевыми транзисторами. Разработанная модель основана на моделировании переходного процесса при ЭСР. Физические параметры объекта воздействия ЭСР заменяются параметрами компонентов эквивалентной электрической схемы. Исследование выполнено в 2011–2014 годах на базе кафедры «Радиоэлектроника и телекоммуникации» (бывшая кафедра РТУиС) МИЭМ НИУ ВШЭ.

Если электронный компонент, несущий статический заряд, затем прикоснётся к какому-либо металлическому предмету, например к установочной головке, то произойдёт быстрый разряд. Соответствующая модель известна как CDM-модель или модель заряженного компонента [1].

Имеются данные [2] о том, что при соединении электронных компонентов с печатной платой, их порог отказа при CDM тестах снижается в несколько раз. Ассоциация ESDA [3] предлагается ввести особую модель ЭСР — модель заряженной платы (СВМ — Charged board model).

В ходе исследований была разработана методика схемотехнического моделирования воздействия СВМ ЭСР на полевые транзисторы [4], основанная на замене физических параметров объекта воздействия ЭСР на параметры компонентов эквивалентной электрической схемы воздействия СВМ и ЭСР.

Существует три подхода к моделированию ЭСР с печатной платой: моделирование печатной платы при помощи электромагнитного симулятора, моделирование с использованием эквивалентных схем с распределёнными параметрами и моделирование при помощи эквивалентных схем с сосредоточенными параметрами. Первый метод имеет наибольшую точность, а последний — наименее. Но применение электромагнитного симулятора требует использования дорогостоящего ПО и значительных затрат вычислительных ресурсов. В данной работе показано, что для целей определения порога отказа электронных компонентов при СВМ ЭСР достаточно использования моделирования с применением эквивалентных схем с сосредоточенными параметрами.

В ходе работ проведено экспериментальное измерение формы тока СВМ ЭСР и сравнение с результатами моделирования эквивалентной схемы СВМ ЭСР. Сформулировано условие отказа МДП-транзистора, основанное на вычислении заряда, прошедшего при ЭСР через подзатворную ёмкость.

Воздействие ЭСР на полевой транзистор описывается следующей эквивалентной схемой (рис. 1). Ёмкость печатной платы C_{pcb} подключается к выводу истока транзистора.

ЭСР инициируется при контакте заземлённого разрядного наконечника с выводом транзистора. Если после ЭСР с данным напряжением V_{test} произошёл отказ транзистора, то это напряжение можно рассматривать как порог отказа транзистора при СВМ ЭСР. Датчиком тока ЭСР служит резистор R_2 . Подключив к нему осциллограф, можно наблюдать на его дисплее форму тока импульса ЭСР. Паразитные индуктивности могут быть определены по данным [5], а сопротивление дуги — по данным [6, 7].

Имея параметры эквивалентной схемы можно провести моделирование в программе Qucs [8] и исследовать форму тока ЭСР. В ходе исследований автором внесён ряд изменений в исходный код ПО Qucs для оптимизации его использования в исследовательском и учебном процессе. В результате моделирования получена форма тока ЭСР, показанная на рис. 2.

В результате проведения тестов на имитаторе СВМ ЭСР известно, что транзистор IRF630, установленный на тестовую печатную плату отказывает при ЭСР с напряжением 480 В. Из результатов экспериментов и моделирования следует, что критерием отказа МОП-транзистора при СВМ ЭСР служит равенство заряда, накопленного емкостью затвора транзистора в течение первого полупериода импульса тока ЭСР, пороговому значению заряда Q_{bd} , равному произведению ёмкости затвора C_{gs} на пробивное напряжение подзатворного диэлектрика V_{bd} :

$$Q_{bd} = C_{gs} V_{bd} \quad (1)$$

Для измерения формы тока ЭСР использовался стенд согласно схеме на рис.1. Форма измеренного и смоделированного тока показана на рис.2. Как видно из рис. 2, результаты моделирования хорошо согласуются с результатами экспериментов.

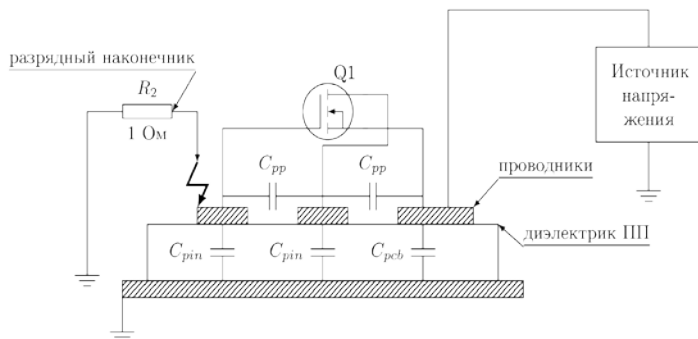


Рис. 1. Установка для испытания транзисторов на воздействие СВМ ЭСР

Измерения формы тока проведены при помощи осциллографа FlukePM3394В в режиме согласованного входного сопротивления 50 Ом. Отличием формы тока при СВМ ЭСР от формы тока CDM ЭСР является то, что переходный процесс затянут и более высокая пиковая амплитуда тока.

Форма тока в виде затухающих колебаний свидетельствует о высокой добротности контура, по которому течёт ток ЭСР. Следовательно, сопротивление дуги при моделировании СВМ ЭСР с печатной платой при низких напряжениях (менее 500 В) можно принять равным менее 1 Ом.

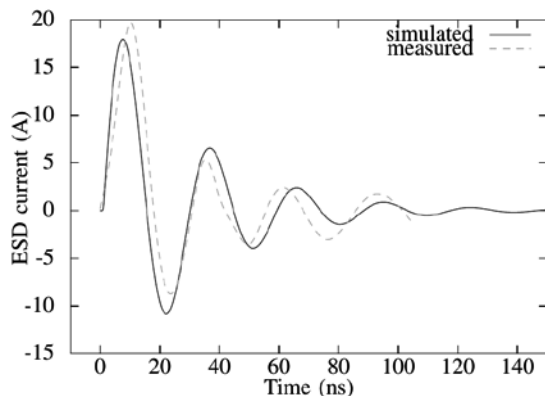


Рис. 2. Форма тока ЭСР, полученная в результате моделирования и в результате экспериментов

На основании сравнения экспериментальных данных с результатами моделирования можно заключить, что схемотехническая модель СВМ ЭСР, предложенная в [4] воспроизводит физические процессы при СВМ ЭСР корректно. Разработанная методика моделирования может применяться для расчёта порога отказа МОП-транзистора при CDM

ЭСР. Для применения данной методики необходимо знать эквивалентную ёмкость печатного монтажа (измеряется при помощи RCL-метра общего назначения), эквивалентную ёмкость печатного монтажа (рассчитывается на основании КД) и иметь в распоряжении параметры МОП-транзистора, предоставляемые производителем.

Литература

1. Кечиев Л. Н., Пожидаев Е. Д. Защита электронных средств от воздействия статического электричества. — М.: ИД «Технологии», 2005. — 352 с.
2. Colnar J., Trotman J., Petrice R. Decreased CDM ratings for ESD-sensitive devices in printed circuit boards// In Compliance. — 2010. — September. — Pp.38 – 41.
3. Industry Council on ESD Target Levels. — White Paper 2: A Case for Lowering Component Level CDM ESD Specifications and Requirements, April, 2010.
4. Кузнецов В. В., Кечиев Л. Н. Исследование стойкости печатных узлов к воздействию электростатического разряда // Технологии ЭМС. — 2013. — № 1. — С. 29–38.
5. Кечиев Л. Н. Проектирование печатных плат для цифровой быстродействующей аппаратуры. — М.: Группа ИДТ, 2007. — 618 с.
6. Bonisch S., Kalkner W., Pommerenke D. Modeling of short-gap ESD under consideration of different discharge mechanisms // Plasma Science, IEEE Transactions on. — 2003. — aug. — Vol. 31, no. 4. — Pp. 736 – 744.
7. Bönisch S. Die Electrostatische Entladung bei kleinen Abständen und Spannungen. Dr.-Ing. genehmigte Dissertation. — TU Berlin, 2004. — 153 pp.
8. Brinson M. E., Jahn S. Qucs: A GPL software package for circuit simulation, compact device modelling and circuit macromodelling from DC to RF and beyond // International Journal of Numerical Modelling (IJNM): Electronic Networks, Devices and Fields. — 2008. — September. — Vol. 22, no. 4. — Pp. 297 – 319. <http://www3.interscience.wiley.com/journal/121397825/abstract>.

Довгун В. П.

**Красноярский институт железнодорожного транспорта –
филиал ФГБОУ ВПО «Иркутский Государственный университет путей сообщения»
Тел.: +7(913) 519 07 96, E-mail.: valerydovgun@gmail.com**

Сташков И.А.

**Красноярский институт железнодорожного транспорта –
филиал ФГБОУ ВПО «Иркутский Государственный университет путей сообщения»
Тел.: +7(953) 592 16 90, E-mail.: ivanstashkov33@gmail.com**

ПРОБЛЕМЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ В ТЯГОВЫХ СЕТЯХ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

На электрифицированных железных дорогах широкое распространение получила система тягового электроснабжения однофазного переменного тока напряжением 25 кВ. Электроподвижной состав (ЭПС) переменного тока оказывает значительное влияние на качество электроэнергии в питающей сети. В то же время способность ЭПС выполнять свои функции зависит от качества электроэнергии в сети тягового электроснабжения (СТЭ).

Серьезной проблемой тяговых сетей является несинусоидальный характер токов, потребляемых однофазными выпрямителями. Кривая тока содержит первую (основную) гармонику и высшие гармонические составляющие. В спектрах токов преобладающими являются низкочастотные гармоники ($n = 3, 5, 7$). С ростом тяговых нагрузок гармонические искажения тока увеличиваются. Несинусоидальные токи вызывают искажения кривых напряжения на токоприемниках электроподвижного состава.

С ростом тяговых нагрузок гармонические искажения токов увеличиваются. Одновременно в спектре напряжения наблюдаются всплески амплитуд гармоник высших порядков ($n > 10$). Причина заключается в том, что для высокочастотных гармонических составляющих тяговая сеть представляет линию с распределенными параметрами. Анализ показал, что частотные характеристики системы тягового электроснабжения (СТЭ) имеют резонансные максимумы, расположение и амплитуда которых зависят от протяженности участка сети, расположения локомотива в зоне питания, а также параметров тяговых трансформаторов. Сопротивление СТЭ на частоте резонанса составляет 2–2,5 кОм. Частота резонансного максимума уменьшается с ростом протяженности участка. При этом происходит усиление гармоник напряжения и тока меньшего порядка, имеющих большую амплитуду. Наибольшее значение сопротивления СТЭ имеет в тех случаях, когда локомотив находится в конце участка.

Резонансные и волновые явления вызывают перенапряжения на токоприемниках ЭПС, которые могут в несколько раз превышать амплитуду рабочего синусоидального напряжения. Это приводит к ускоренному старению изоляции силового оборудования. Кроме того, резонансы сопровождаются импульсными провалами напряжения. Это ухудшает энергетические показатели ЭПС и может вызвать сбои в работе систем управления тиристорными преобразователями.

Для улучшения эксплуатационных характеристик тяговой нагрузки необходимо применение фильтрокомпенсирующих устройств (ФКУ) мощностью 3–5 Мвар. Помимо компенсации реактивной мощности устанавливаемые ФКУ должны шунтировать низкочастотные гармонические составляющие тока, демпфировать резонансные перенапряжения на токоприемнике ЭПС, обеспечивать электромагнитную совместимость тяговой сети с цепями питания устройств автоматики и телемеханики. Для этого на частотах, превышающих 500 Гц, сопротивление ФКУ должно быть согласовано с волновым сопротивлением контактной сети.

В докладе рассмотрены варианты построения фильтрокомпенсирующих устройств для систем тягового электроснабжения, отвечающих перечисленным требованиям. Критериями для сравнения являлись частотные характеристики устройств, суммарная емкость батарей конденсаторов и индуктивность реакторов, потери мощности на частоте основной гармоники. Показано, что

для обеспечения электромагнитной совместимости с ЭПС с системой тягового электроснабжения и устройствами автоматики и телемеханики необходимы модульные ФКУ, включающие узкополосные звенья для подавления низкочастотных гармоник, а также широкополосное звено, корректирующее частотные характеристики сети.

В докладе предложен общий метод расчета широкополосных фильтров (ШПФ), обеспечивающих демпфирование высокочастотных гармоник напряжения. Предлагаемый метод расчета основан на представлении ШПФ в виде лестничного LC -четырёхполюсника, нагруженного на активное сопротивление. Процедура расчета широкополосного демпфирующего фильтра включает следующие шаги.

На первом шаге выполняется расчет низкочастотного прототипа, реализующего типовую передаточную функцию фильтра Баттерворта или Чебышева.

На втором шаге для получения фильтра верхних частот используется частотное преобразование, определяемое выражением $s = \omega_c / p$. Здесь ω_c – частота среза фильтра верхних частот. При таком преобразовании передаточная функция НЧ-прототипа трансформируется в передаточную функцию фильтра верхних частот с частотой среза ω_c . При этом конденсаторы заменяются катушками, индуктивность которых равна $L' = 1/C\omega_c$ Гн. Катушки НЧ-прототипа заменяются конденсаторами емкостью $C' = 1/L\omega_c$ Ф.

На третьем шаге производится денормирование сопротивлений фильтра для того, чтобы обеспечить согласование входного сопротивления фильтра с волновым сопротивлением СТЭ.

Спроектированный фильтр представляет лестничный LC -четырёхполюсник, нагруженный на сопротивление, равное волновому сопротивлению СТЭ. В зависимости от выбранного низкочастотного прототипа характеристики фильтра в полосе пропускания имеют максимально плоский или равноволновой характер. Предлагаемый метод позволяет упростить расчет и исключить громоздкие вычисления, поскольку значения элементов НЧ-прототипа различного порядка можно найти в справочной литературе. Отметим, что предлагаемый метод позволяет синтезировать широкополосные фильтры любого порядка.

В докладе приведены примеры расчета различных конфигураций ФКУ для системы тягового электроснабжения. Сравнение характеристик различных конфигураций пассивных ФКУ показало, что наиболее эффективна структура, образованная параллельным соединением двухчастотного звена, настроенного на частоты 3 и 5-й гармоник, и широкополосного звена третьего порядка, обеспечивающего коррекцию СТЭ в области высоких частот. Включение ФКУ значительно ослабляет резонансные перенапряжения на токоприемнике ЭПС и обеспечивает электромагнитную совместимость тяговой сети с цепями питания устройств автоматики и телемеханики.

Рассмотрены различные варианты установки ФКУ в системе тягового электроснабжения. Показано, что эффективное подавление гармоник напряжения и тока достигается при установке ФКУ на посту секционирования.

Союстова А.О.
АО «ЦНИИ «Курс», г. Москва, Россия,
Тел.: +7(495) 365-65-39, Факс: +7(495) 365-43-14,
E-mail: free1425@rambler.ru

ЭКСПЕРТИЗА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ МОРСКИХ ОБЪЕКТОВ ПРИОРИТЕТНЫХ ОБЛАСТЕЙ СУДОСТРОИТЕЛЬНОЙ ОТРАСЛИ

В настоящее время одними из экономически важных отраслей отечественной промышленности являются добыча углеводородных природных ресурсов и сжиженного природного газа, активное освоение территорий Арктического шельфа, в том числе Баренцевого и Охотского морей. Поэтому одними из приоритетных направлений развития судостроительной отрасли является строительство и эксплуатация нового поколения плавучих буровых установок и атомных ледоколов. Следует заметить, на таких объектах морской инфраструктуры располагается множество плотно укомплектованных радиоэлектронных средств различного назначения, которые создают сложную электромагнитную обстановку. Возникает актуальная задача проведения экспертизы электромагнитной обстановки и обеспечения электромагнитной безопасности на морских объектах в отношении персонала и экипажа, радиоэлектронной аппаратуры, легковоспламеняющихся жидкостей [1, 2, 3].

Электромагнитная безопасность (ЭМБ) – состояние, при котором отсутствует недопустимый риск, вызванный электромагнитным возмущением, связанный с причинением вреда жизни или здоровью граждан, имуществу физических или юридических лиц, государственному или муниципальному имуществу, техническим средствам, окружающей среде, жизни или здоровью животных и растений.

Для информационной поддержки в помощи принятия решений проблемы обеспечения ЭМБ был разработан автоматизированный программный комплекс для проведения моделирования электромагнитной обстановки, расчета уровней электромагнитных полей ВЧ-СВЧ диапазона, анализа экспериментальных данных и оценки электромагнитной безопасности на морских объектах.

Для апробации разработанного научно-методического и программного обеспечения была проведена расчётно-оценочная экспертиза электромагнитной безопасности на примере современных объектов отечественного судостроения: полупогружной морской буровой установкой 6 поколения «Полярная звезда» и универсального атомного ледокола типа ЛК-60Я.

Одним из аспектов проблемы электромагнитной безопасности на плавучей полупогружной морской буровой установке (ППБУ) шестого поколения «Полярная звезда» (проект 7072) является возможность воспламенения паров горючих жидкостей из-за интенсивного ЭМП, создаваемого находящимися в непосредственной близости от контрольных (расчётных) точек РЭС и РЛС (радиолокационных станций) [4].

На рис. 1 приведён чертёж ППБУ (вид сбоку) с нанесёнными и пронумерованными на нём антенными постами (условными обозначениями точек основания недостающих антенных постов, указанных на других видах) излучающих радиоэлектронных средств (РЭС) и размещёнными контрольными (расчётными) точками (КТ). Для оценки ЭМБ выбраны девять контрольных точек верхней надстройки ППБУ с высокой вероятностью превышения ЭМП ПДУ.

На рис. 2а отображена диаграмма процентного распределения энергетического вклада всех РЭС, расположенных на ППБУ, для одной из выбранных КТ. Гистограмма оценки интегрального ЭМП для всех КТ на ППБУ (рис. 2б) позволяет отображать результаты расчёта в двух режимах (относительное превышение среднего и импульсного уровней ЭМП ПДУ)

В результате исследований выявлено, что средний интегральный уровень и импульсный интегральный уровень ЭМП радиочастот на ППБУ при работе всех рассматриваемых РЭС во всех рассматриваемых КТ не превышает ПДУ. Таким образом, для рассматриваемых условий риск воспламенения паров горючих жидкостей минимален.

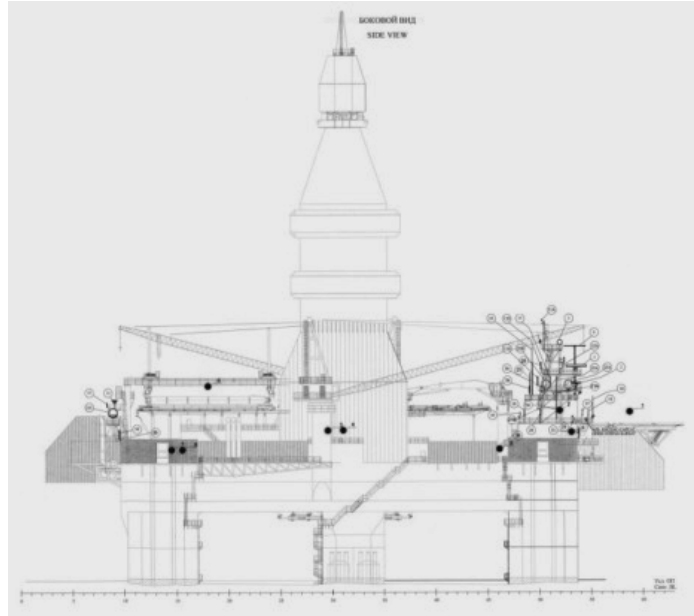
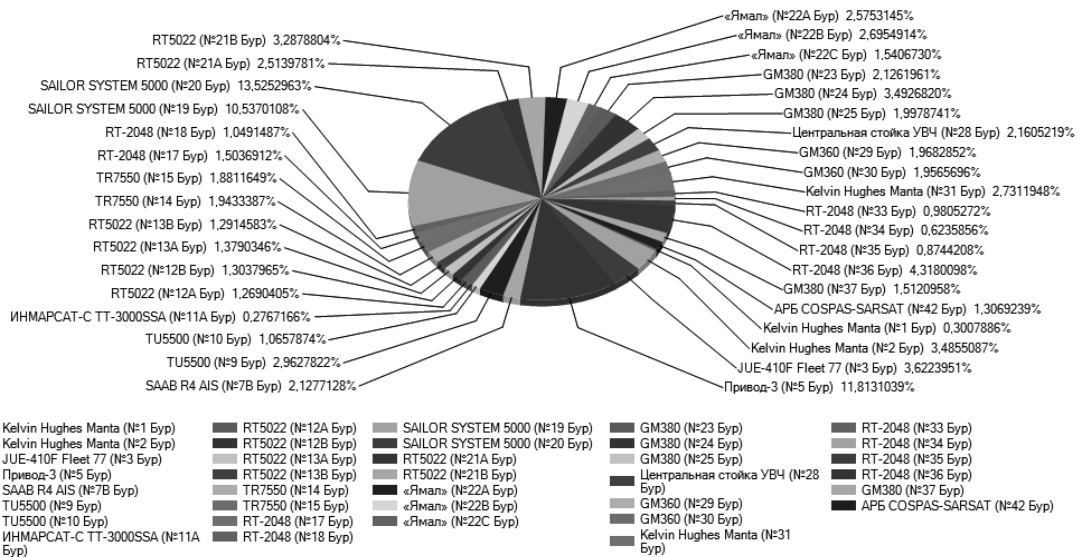
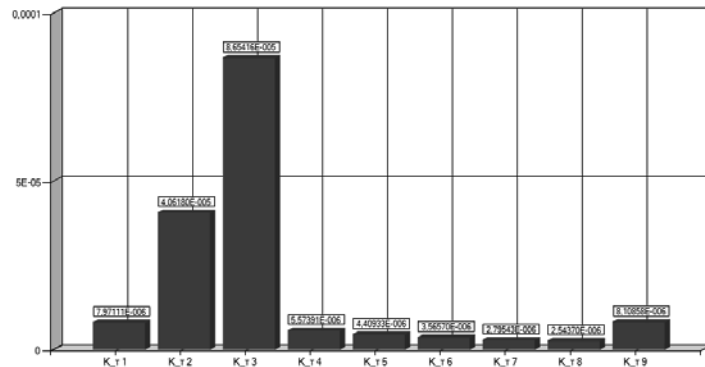


Рис. 1. Плавающая полупогружная буровая установка 6 поколения, проект 7072 (вид сбоку)



а)



б)

Рис. 2. Распределение энергетического вклада РЭС и КТ (а - диаграмма распределения энергетического вклада РЭС для одной КТ; б - гистограмма оценки интегрального ЭМП для всех КТ ПШБУ)

Для оценки ЭМБ на универсальном атомном ледоколе типа ЛК-60Я в отношении персонала были использованы ПДУ согласно СанПиН 2.5.2/2.2.4.1989-06 [5]. На рис. 3 приведён чертёж атомного ледокола с нанесёнными и пронумерованными на нём антенными постами РЭС и КТ. Для оценки ЭМБ выбраны десять контрольных точек верхней надстройки атомного ледокола с высокой вероятностью пребывания экипажа и производственного персонала.

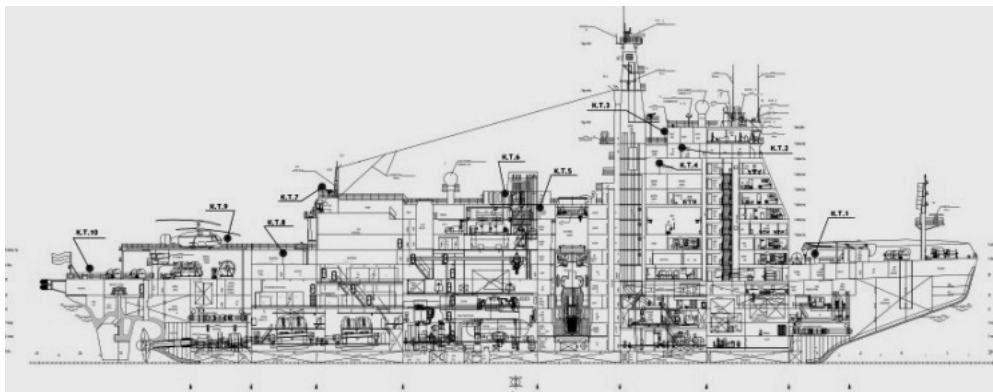
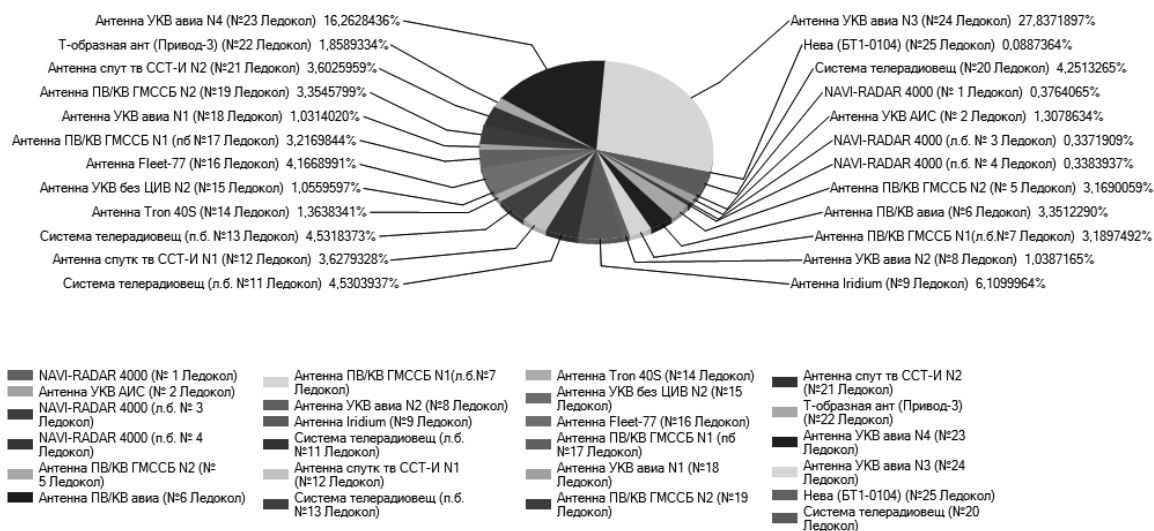


Рис. 3. Универсальный атомный ледокол типа ЛК-60Я (вид сбоку)

На рис. 4а отображена диаграмма процентного распределения энергетического вклада всех РЭС, расположенных на атомном ледоколе, для выбранной КТ. На рис. 4б отображена гистограмма оценки интегрального ЭМП для всех КТ на атомном ледоколе. В результате выявлено, что импульсный уровень интегрального ЭМП при работе всех рассматриваемых РЭС для шести контрольных точек превышает ПДУ. Для остальных контрольных точек импульсный уровень интегрального ЭМП не превышает 52% от ПДУ. Средний интегральный уровень электромагнитных полей радиочастот при работе всех рассматриваемых радиоэлектронных средств для трёх контрольных точек превышает предельно-допустимые уровни, для одной контрольной точки практически достигает предельно-допустимого уровня. Уменьшения интегрального среднего и импульсного уровней создаваемых ЭМП при работе антенных постов РЭС можно добиться, применяя различные организационные и технические решения: снижение излучаемой мощности РЭС, увеличение высоты расположения антенного поста РЭС, применение специальных затеняющих экранов надстроек между контрольной точкой и антенным постом РЭС.

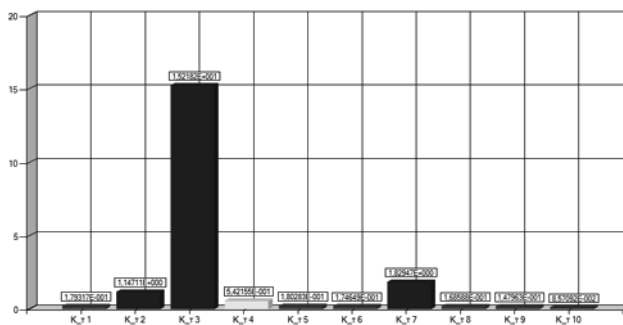
Таким образом, разработанная программно-алгоритмическая реализация научно-технической методики по оценке ЭМБ на объектах морской инфраструктуры позволяет проводить расчёт рисков в отношении электромагнитного излучения радиочастотного диапазона при функционировании РЭС радиосвязного и радиолокационного профилей в отношении персонала, легко воспламеняющихся жидкостей и газов, радиоэлектронного оборудования с наглядным отображением результатов в виде графиков, гистограмм и диаграмм по интересующим параметрам и способствовать информационной поддержке принятия решения по обоснованному применению организационных и технических решений задачи обеспечения ЭМБ на морских объектах.

Распределение энергетического вклада РЭС



а)

Сутегарная оценка вклада контрольных точек в электромагнитную обстановку на норском объекте.



б)

Рис. 4. Распределение энергетического вклада РЭС и КТ
(а - диаграмма распределения энергетического вклада РЭС для одной КТ;
б – гистограмма оценки интегрального ЭМП для всех КТ атомного ледокола)

Литература

1. Технический регламент о безопасности объектов морского транспорта (утв. постановлением Правительства РФ от 12 августа 2010 г. N 620).
2. Технический регламент таможенного союза ТР ТС 020/2011. Электромагнитная совместимость технических средств (утв. Решением Комиссии Таможенного союза от 9 декабря 2011 г. №879).
3. Бурутин А.Г., Балюк Н.В., Кечиев Л.Н. Электромагнитные эффекты среды и функциональная безопасность радиоэлектронных систем вооружения // «Технологии электромагнитной совместимости»: Научно-технический журнал. – 2010, № 1(32). – С. 3-27.
4. NAVSEA OP 3565/NAVAIR 16-1-529 volume 1. Electromagnetic radiation hazards (u) (hazards to personnel, fuel and other flammable material).
5. СанПиН 2.5.2/2.2.4.1989-06. Электромагнитные поля на плавательных средствах и морских сооружениях. Гигиенические требования безопасности.

Жегов Н.А., Кириллов В.Ю., Клыков А.В., Томилин М.М.
ФГБОУ ВПО МАИ (НИУ),
г. Москва, Российская Федерация
8-(499)-158-49-01; e-mail: emc@mai.ru

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЭКРАНИРОВАНИЯ БОРТОВЫХ КАБЕЛЕЙ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ. СРАВНЕНИЕ МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

Расчет и экспериментальное исследование эффективности экранирования являются составными частями процесса проектирования бортовых кабелей летательных аппаратов. Эффективность экранирования может быть определена с помощью различных методов, один из которых основан на экспериментальном определении сопротивления связи [1]. Сопротивление связи определяется, например, с помощью коаксиальной или триаксиальной установок.

Частотная зависимость эффективности экранирования рассчитывается по формуле [1]

$$S_s(f) = \frac{I_0(f)}{I_1(f)}, \quad (1)$$

где $I_0(f)$ – ток, протекающий по экрану кабеля; $I_1(f)$ – ток на внутреннем проводнике; f – частота.

Приближенная формула вычисления эффективности экранирования при условии, что сопротивление связи определено, имеет вид [1]

$$S_s = 20 \lg R_c - 20 \lg Z_{св} = 34 - 20 \lg Z_{св}, \text{ дБ}, \quad (2)$$

где $Z_{св}$ – экспериментально определенное полное сопротивление связи; $R_c = 50$ Ом – согласующее сопротивление в коаксиальной установке.

Формула (2), которая следует из формулы (1), справедлива для кабелей длиной не более одного метра и частот, не превышающих 3 МГц. Для более высоких частот необходимо учитывать падение тока из-за возрастающего индуктивного сопротивления экрана кабеля [2]. Другой экспериментальный метод определения эффективности экранирования основан на воздействии электромагнитного поля, создаваемого, например, ТЕМ-камерой на кабели с одинаковой структурой, при условии, что один кабель обладает экраном, а второй – без экрана.

Частотная характеристика эффективности экранирования в данном случае определяется формулой

$$S_s(f) = 20 \lg \frac{U_0(f)}{U_1(f)}, \text{ дБ},$$

где $U_0(f)$ – синфазное напряжение, наведенное на сопротивлении нагрузки, подключенном к внутренним проводникам кабеля без экрана; $U_1(f)$ – синфазное напряжение на сопротивлении нагрузки, подключенном к тем же внутренним проводникам кабеля с экраном.

Экспериментальные исследования показывают, что значения эффективности экранирования, полученные двумя выше указанными методами, могут существенно отличаться.

Данный вывод также подтверждается результатами компьютерного моделирования триаксиальной установки и моделирования воздействия электромагнитного поля на экранированный кабель со сплошным экраном.

Показано, что необходимо различать эффективность экранирования кабеля от воздействия тока, протекающего по экрану, и эффективность экранирования кабеля при воздействии электромагнитного поля.

Установлено, что электромагнитное поле наводит на внутренних проводниках синфазное напряжение большее, чем напряжение, которое наводится током, протекающим по экрану кабеля в коаксиальной линии при условии, что значения тока на экране в коаксиальной линии равны значениям тока, наведенного на экране электромагнитным полем.

На основе полученных результатов сформулирован вывод о том, что расчёт синфазных напряжений на внутренних проводниках, наводимых электромагнитным полем, основанный на предварительном расчете наведенного полем на экране кабеля тока с последующим вычислением значений синфазного напряжения с помощью сопротивления связи по формуле

$$U = I_0 \cdot Z_{св},$$

где I_0 – ток на экране кабеля, наведенный электромагнитным полем; $Z_{св}$ – сопротивление связи, может привести к значительным погрешностям.

Литература

1. Экранирование бортовой кабельной сети самолетов (вертолетов). Методика измерения эффективности экранирования. ОСТ 1 01205, 2012. – 38 с.
2. Кириллов В.Ю., Клыков А.В. Нгуен В.Х. Томилин М.М. Исследование сопротивления связи и эффективности экранирования бортовых кабелей летательных аппаратов // Технологии ЭМС. № 2 (49), 2014. – С. 3–8.

Кириллов В.Ю., Томилин М.М.
ФГБОУ ВПО МАИ (НИУ), г. Москва, Российская Федерация
8-(499)-158-49-01; e-mail: emc@mai.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ СРЕДСТВ АНТИСТАТИЧЕСКОЙ ЗАЩИТЫ БОРТОВЫХ КАБЕЛЕЙ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ ОТ МАГНИТОСФЕРНОЙ ПЛАЗМЫ

В натуральных условиях эксплуатации происходит электризация диэлектрических материалов не только внешних покрытий элементов конструкции и корпуса космического аппарата, но и внутренних изоляционных материалов кабелей, что приводит к появлению электростатических разрядов, воздействующих на внутренние поверхности экранов и внутренние проводники кабелей. Имитировать такие разряды можно только путём проведения модельных испытаний [1]. При этом следует отдельно моделировать электризацию кабелей, расположенных на внешней поверхности корпуса космического аппарата и кабелей, смонтированных во внутреннем пространстве конструкции космического аппарата и предназначенных для соединения внутренних бортовых приборов и устройств. У кабелей, соединяющих внутренние бортовые приборы, могут в меньшей степени подвергаться электризации их внутренние изоляционные материалы. В некоторых случаях кабели могут быть полностью изолированы от воздействия магнитосферной плазмы. Но в силу того что металлические элементы конструкции космического аппарата при взаимодействии с потоком магнитосферной плазмы приобретают потенциал, между экранами кабелей, которые соединены с металлическими частями конструкции космического аппарата, и внутренними проводниками могут возникать электростатические разряды в виде пробоев внутренней изоляции. Такие разряды могут привести к появлению кондуктивных импульсных помех на внутренних проводниках бортовых кабелей. Поэтому необходимо проводить не только стендовые исследования восприимчивости экранированных кабелей к воздействию электростатических разрядов, но и модельные, основанные на электрофизическом моделировании электризации бортовых кабелей.

Модельные исследования электризации экранированных кабелей следует разделить на следующие этапы:

- облучение электронным потоком электровакуумной установки исследуемого кабеля, закреплённого на имитаторе элемента корпуса космического аппарата и соединяющего имитаторы бортовых приборов, при условии, что имитатор элемента корпуса заземлён;
- облучение кабеля электронным потоком электровакуумной установки, для случая, когда имитатор элемента корпуса не заземлён. При этом исследуемый кабель должен подвергаться прямому воздействию электронного потока;
- облучение незаземлённого имитатора элемента корпуса космического аппарата таким образом, чтобы исследуемый кабель не подвергался прямому воздействию электронного потока.

Бортовой кабель представляет собой кабельную сборку, состоящую из экранированных витых пар проводников, размещённых в общем (внешнем) плетёном экране. Внешний экран кабеля через разъёмы имеет электрическое соединение с корпусами имитаторов бортовых приборов и имитатором элемента корпуса космического аппарата. Электростатическому зарядению подвергаются внутренние изоляционные материалы кабеля, благодаря проникновению электронов через внешний плетёный экран. Накопление электростатических зарядов на внутренних изоляционных материалах приводит к появлению внутренних разрядов. Кондуктивные помехи в виде импульсных токов на внутренних проводниках и, соответственно, импульсных напряжений на сопротивлениях нагрузки, имитирующих входные сопротивления бортовых приборов, появляются в результате разрядов на внешний экран.

В результате исследования электризации диэлектрических изоляционных материалов бортовых кабелей космических аппаратов установлено, что при значениях электронного тока имитационного потока магнитосферной космической плазмы в диапазоне $0,1-1 \text{ нА}\cdot\text{см}^{-2}$ происходит электризация изоляции исследуемого кабеля. В результате электризации возникают электростатические раз-

ряды, которые создают на сопротивлениях нагрузки импульсные напряжения наносекундной длительности с амплитудой, изменяющейся в диапазоне 264–1100 мВ.

Использование экранирующего покрытия, выполненного из гибкого металлизированного материала ТЭТ 085K71 Н10, обеспечивает полную антистатическую защиту кабеля от электризации при воздействии имитационного потока магнитосферной плазмы.

Литература

1. Стандарт для испытаний ракетно-космической техники на устойчивость к электростатическим разрядам. Электростатические модельные испытания [Текст] / Г.В. Бабкин, В.А. Иванов, В.Ю. Кириллов, Е.П. Морозов, В.Г. Соколов // Технологии ЭМС. – М., 2005. – №3(14). – С. 30–32.

Соколов С.А.
ФГБОУ ВПО МТУСИ, г.Москва, Россия
Тел. 8 903 749 56 64, факс. 495 957 77 36,
E-mail: stanislav.a.sokolov@gmail.com

ВОЗДЕЙСТВИЕ УДАРОВ МОЛНИИ НА ПОЛНОСТЬЮ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ОПТИЧЕСКИЙ КАБЕЛЬ

Введение

Распространено заблуждение, что полностью диэлектрический кабель не подвержен воздействию внешнего электромагнитного поля, однако это неверно. Свет имеет электромагнитную природу и реагирует на внешнее поле, под действием которого происходит поворот плоскости поляризации распространяющейся волны. Это воздействие не приводит к повреждению кабеля, а лишь меняет поляризацию волны и может создать дополнительное затухание и поляризационную модовую дисперсию (ПМД). Активные и пассивные элементы оптической линии также могут быть чувствительными к поляризации, что может привести к неправильному срабатыванию аппаратуры и к помехам. Кроме того, последними исследованиями молний установлено, что при разрядах молнии возникают мощные рентгеновское и гамма-излучения, которые могут разрушать структуру волокна. Ниже рассмотрено воздействие молнии на полностью диэлектрические оптические кабели.

1. Поворот плоскости поляризации света под действием электромагнитного поля

Явления вращения плоскости поляризации света в поперечном электрическом (эффект Керра) и продольном магнитном (эффект Фарадея) полях были открыты ещё в XIX веке. При прохождении света по волокну под воздействием внешнего электромагнитного поля происходит поворот плоскости колебаний (поляризации) световой волны. Различным образом поляризованные волны света при падении на плоскую поверхность имеют разные величины Френелевских коэффициентов. Изменение плоскости поляризации света в оптическом волокне может также привести к так называемому двойному лучепреломлению и возникновению двух ортогональных составляющих волны, между которыми распределится первоначальная энергия сигнала. Каждая из составляющих будет распространяться независимо друг от друга. Так как параметры волокна вдоль различных плоскостей, проходящих через ось, могут несколько отличаться, следствием может явиться увеличение дисперсии и затухания сигнала, аналогичные поляризационной модовой дисперсии при геометрических неоднородностях. Под действием электрического поля плоскость поляризации поворачивается на угол

$$\varphi = 2\pi \cdot K \cdot E^2 \cdot L, \quad (1)$$

а под воздействием продольного магнитного поля на угол (эффект Фарадея)

$$\psi = 1.66 \cdot 10^{-5} \cdot L \cdot H, \text{ град.}, \quad (2)$$

где K – постоянная Керра; E – величина поперечного внешнего поля; L – длина пути, проходимого светом под воздействием поля, м; H – напряжённость продольного магнитного поля (направленного вдоль оси кабеля), А/м.

Величина K может быть получена при рассмотрении процессов поляризации в веществе. Эта постоянная зависит от длины волны света и температуры, а также от технологии изготовления. Для верхнего значения K при $\lambda = 1,55$ мкм; $n = 1,5$ и $T = 293^\circ\text{C}$ получаем

$$K = F(n, T, \lambda) = \frac{f(n, T)}{\lambda} = 0.402 \cdot 10^{-13}, \text{ м/В}^2.$$

Как видно, K имеет малую величину, и для возникновения заметного эффекта Керра электрическое поле должно быть достаточно велико. Большие величины поля возможны вблизи точки удара молнии. Если удар молнии происходит вблизи трассы проложенного диэлектрического (без металлических элементов в конструкции) оптического кабеля (ОК), то в волокнах последнего возможно возникновение эффекта Керра. Очень большую величину в земле и на поверхности электрическое поле может иметь также при воздействии высотного ядерного взрыва. Если считать, что удар молнии с амплитудой I происходит на расстоянии a от трассы кабеля, а кабель проложен на

глубине h вблизи поверхности земли с удельным сопротивлением ρ , то поворот плоскости поляризации ϕ света в кабеле под действием электрического поля равен [1, 2]:

$$\phi = \frac{3}{16} K \frac{(I\rho)^2}{(a^2 + h^2)^{\frac{3}{2}}} \quad (3),$$

под действием продольного магнитного поля

$$\Psi \cong \frac{fI}{2} e^{-56\sigma(h+a)} \quad (4),$$

где σ – удельная проводимость земли ($\sigma = 1/\rho$).

Полагая значения входящих в (3) и (4) величин: $I = 50$ кА, $\rho = 1000$ Ом·м, $a = 10$ м, $h = 1$ м, найдём, что $\phi = 1^\circ$, а $\Psi = 0,4$ градуса, т.е. однократное воздействие молнии в одной точке при средних условиях вызывает сравнительно небольшой эффект. Однако в некоторых случаях при больших значениях удельного сопротивления грунта и амплитуды молнии и близком расстоянии до точки удара молнии (например, $a = 1$ м) величина эффекта может возрасти в десятки раз. Кроме того, как известно, удар молнии обычно состоит из нескольких повторных разрядов. Если длина кабеля велика, то удары молнии могут происходить в различных точках вдоль трассы кабеля, что ещё больше увеличит воздействие на волокно. Число n_{ϕ_0} случаев за грозовой сезон, когда в результате ударов молнии поблизости от трассы оптического кабеля угол ϕ превышает некоторую величину ϕ_0 равно [2, 3]:

$$n_{\phi_0} = 0.756 \cdot 10^{-2} \cdot \rho^{2/3} \cdot \phi_0^{-1/3} \quad (5),$$

где ρ – удельное сопротивление грунта в Ом·м, количество ударов молнии в единицу площади за грозовой день принято равным $q = 0,1$ удара/км²·день, длина кабеля $L = 100$ км, число дней с грозой $N = 25$, а ϕ_0 – в радианах.

Поворот плоскости поляризации, например на 45° при удельном сопротивлении 100 Ом·м осуществляется примерно один раз в 5 лет, а при $\rho = 400$ Ом·м уже один раз в два года. При $\rho = 2000$ Ом·м это случается чаще, чем раз в год, а при $\rho = 5000$ Ом·м – два с половиной раза в год.

Число случаев, когда $\psi \gg \psi_0$ [2, 3], равно

$$v(\psi_0) = -0.36 N\rho \cdot Ei(-4.819 \psi_0) \cdot 10^{-3} \quad (6)$$

При этом: N – в днях, ρ – в Ом·м, ψ_0 – в градусах, $q = 0,1$ уд/км²·день, $L = 100$ км, $\lambda = 1,55$

мкм. Функция $Ei(x) = \int_x^\infty \frac{1}{u} e^{-u} du$ табулирована и может быть найдена в справочниках.

Развитие систем волнового мультиплексирования со всё возрастающим числом несущих привело к тому, что в одном окне прозрачности может передаваться несколько десятков, а то и сотен волн, сдвинутых друг относительно друга на доли нм. Поворот плоскости поляризации для всех волн будет разный, и при прочих равных условиях короткие волны сместятся на больший угол по сравнению с длинными волнами. К оптическому усилителю подойдут пакеты волн с разной поляризацией, что может создать проблемы в фильтрах и изоляторах. К поляризации чувствительны некоторые типы усилителей, например, полупроводниковые лазерные и Рамановские усилители. Известно также, что короткие и длинные волны распространяются с разной скоростью вследствие зависимости коэффициента преломления от длины волны. Следовательно, определившиеся дополнительные пакеты волн с разной поляризацией будут иметь ещё и разную скорость распространения, и в результате воздействия молнии возникает дополнительная поляризационная модовая дисперсия, которая может создать проблемы при взаимодействии с временным мультиплексированием и синхронизацией при больших скоростях передачи. Если используется ортогональное мультиплексирование с одновременной передачей по волокну волн с горизонтальной и вертикальной поляризацией, то составляющие, имевшие первоначально только вертикальную поляризацию после поворота плоскости поляризации под действием внешнего поля могут частично оказаться наложенными на основные волны с горизонтальной поляризацией, что увеличит риск ошибок. При передаче современных каналов большой ёмкости со скоростью в несколько терабит/с цена ошибок может быть очень велика.

2. Рентгеновское и гамма – излучение при грозовых разрядах

При изучении γ -излучения нейтронных звёзд со спутников в 1991 году было замечено яркое миллисекундное γ -излучение со стороны земли. В 2003 году Джозеф Двайер [4, 5] и его сотрудники засекли мощный всплеск γ -излучения из грозового облака продолжительностью 0,3 мс. Интересные результаты были получены при изучении так называемых триггерных (инициированных) молний. Энергия излучаемых квантов может достигать величины 100 МэВ, а на уровне поверхности земли с энергией, превышающей 10 МэВ. Начало γ -вспышки происходит, когда восходящий положительный стреловидный лидер достигает заряда облака в нескольких километрах над землёй. Если учесть, что γ -излучение очень сильно поглощается атмосферой, то можно представить, какой большой величины могли быть γ -кванты в месте возникновения. Плотность потока фотонов, достигающих уровня земли невелика, составляя всего единицы фотонов (с энергией в несколько МэВ) на квадратный сантиметр, поскольку гамма-излучение сильно затухает в атмосфере.

Направленные вверх разряды от высоких заземлённых объектов (например, высоких предметов, башен, молниеотводов) также имеют начальную стадию, подобную триггерной молнии, и вспышки γ -лучей возможно случаются во время молниевых разрядов с высоких структур. Возникновение рентгеновских и γ -излучений наблюдались также вблизи облаков и на вершинах гор. Известно, что ионизирующие излучения оказывают серьёзное влияние на оптические кабели, ухудшая их свойства. В настоящее время магистральная связь практически полностью осуществляется с помощью оптических кабелей. Проложенные в грунте или подвешенные на опорах оптические кабели могут подвергаться воздействию грозовых разрядов, и, как следствие, в некоторых случаях подвергаться рентгеновскому и γ -облучению. В некоторых случаях и летательные аппараты могут оказаться вблизи заряженных облаков. Хотя длина оптических кабелей внутри аппарата небольшая, но амплитуда воздействия вследствие близости к источнику может быть велика. Основные эффекты, производимые рентгеновским и γ -излучением в волокне – это смещение атомов из нормального положения в кристаллической решётке и ионизация. Радиация приводит к нарушению имеющихся в основе материала оптического волокна связей и к появлению свободных связей, которые служат ловушками зарядов. При облучении в результате захвата структурными и примесными дефектами электронов и дырок возникают так называемые центры окраски, которые поглощают свет в некоторых частях спектра, что и приводит к дополнительному затуханию и изменяются первичные параметры оптического волокна. Легирующие добавки, остаточные механические напряжения, примеси, малое содержание гидроксильной группы ОН изменяют радиационную стойкость волокна. В этой связи, волокна с отсутствием водяного пика могут оказаться более чувствительны к радиационным воздействиям. В случае полимеров ионизирующее излучение существенно изменяет их макроскопические свойства, нарушая связи полимерных цепочек, что приводит к разрушению волокна.

Литература

1. Соколов С.А. Эффекты Керра и Фарадея в оптическом кабеле. – Электросвязь. – №4. – 1996.
2. Соколов С.А.. Электромагнитные воздействия на современную инфраструктуру связи. – М.: Медиа Паблишер, 2009. – 182 с.
3. Соколов С. Воздействие внешних полей на металлические и оптические кабели связи. LAP: LAMBERT Academic Publishing. Saarbrücken, Deutschland (Германия), 2014. – 164 с.
4. J.R.Dwyer et al. X-ray bursts associated with leader steps in cloud-to-ground lightning. Geophysical Research Letters, vol.32, L01803, 2005.
5. J.R.Dwyer et al. A ground level gamma-ray burst observed with rocket-m triggered lightning. Geophysical Research Letters, vol.31, L05119, 2004.
6. Соколов С.А. Современный подход к грозозащите оптических кабелей. – Электросвязь. – 2014. – № 8. – С. 32–34.
7. Соколов С.А. Возникновение поляризационной модовой дисперсии под действием грозовых разрядов. – Электросвязь. – 2004. – № 11.
8. Соколов С.А. Воздействие грозовых разрядов на оптические кабели в горной местности и вблизи высотных сооружений. – Первая миля. – 2013. – № 2. – С. 102–106.
9. Соколов С.А. Сети связи нового поколения и электромагнитная совместимость. – Электросвязь. – 2012. – № 3. – С. 48–50.

10. Харченко И.А.

ЗАО «Группа Защиты-ЮТТА», г. Москва, Россия
Тел./Факс: (495) 788-77-32, доб. 3-24, E-mail: ihar@mail333.com

ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ КОММУТАЦИОННОЙ АППАРАТУРЫ С ПЕРСПЕКТИВНЫМИ БОРТОВЫМИ СИСТЕМАМИ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Распределительные системы постоянного повышенного напряжения (СППН) для перспективных ЛА с повышенной энергоемкостью электрооборудования обсуждаются настолько давно, что могут называться классическими [1, 2].

К основным достоинствам СППН относятся следующие:

- отсутствие гидро- или пневмоприводов постоянной частоты вращения (ППЧВ);
- простота обеспечения параллельной работы каналов (повышение установленной сетевой мощности и «горячее резервирование»);
- отсутствие реактивной мощности и индуктивных потерь напряжения;
- минимум преобразователей для большинства потребителей;
- возможность использования буферных емкостных накопителей и аккумуляторов;
- высокая разрешающая способность дифференциальной защиты (отсутствие емкостных паразитных утечек);
- высокое качество электроэнергии.

Основным недостатком СППН, до настоящего времени сдерживающим их применение и по существу нейтрализующим все вышеупомянутые достоинства, является необходимость оснащения сетевых контакторов и автоматов защиты громоздкими и недолговечными дугогасительными камерами и помехоподавительными экранами.

Следует особо отметить, что любая попытка реализации бездугового расщепления, например, с помощью транзисторов, приводит к сложности рассеивания энергии предвключенных сетевых индуктивностей без перенапряжений.

Помимо этого транзисторные ключи с повышенным постоянным рабочим напряжением имеют низкую радиационную стойкость, подвержены гальванической диффузии сквозь полупроводниковые поверхности, не могут обеспечить требуемую полную гальваническую развязку замыкаемых цепей и имеют относительно низкую стойкость к мощным кондуктивным электромагнитным импульсам (ЭМИ).

Предложенный в [1] новый базовый способ обратимого деления постоянного напряжения (ОДПН), позволяет радикально изменить ситуацию и обеспечить в СППН бездуговое расщепление контакторов, а также с успехом применив групповые бездуговые контакторы и даже контакторные контроллеры (программные групповые бездуговые контакторы) [3].

На рис. 1 приведены упрощенные структуры защищенных приоритетом РФ двух распределительных систем «квазипостоянного повышенного напряжения» (КППН) со схемами бездугового расщепления (СБР) на базе ОДПН:

- а) с асинхронно плавающими однополярными потенциалами (АПОП);
- б) с плавающим потенциалом коммутационной шины (ППКШ).

На рис. 1 использованы обозначения: ОДПН (АДН) – обратимый (активный) делитель постоянного напряжения; ДДТ – дифференциальный датчик тока; Ш_± – распределительные шины; Ш_к – коммутационная шина; Н – нагрузки; К_± – контакторы.

Первая структура содержит трехпроводный кабель ОДПН с расщепленными средними звеньями и по два развязывающих (суммирующих) силовых диода в цепи каждой нагрузки. Вторая структура содержит также трехпроводный кабель, аналогичный ОДПН и по одному импульсному (кратковременно включаемому) диоду в цепи каждой нагрузки. Обе структуры имеют по три распределительные шины (Ш, Ш_±, Ш_{0(к)}), по два бездуговых контактора в цепи каждой нагрузки, по схеме синхронизации управления ОДПН и контакторами (К) и по дифференциальному датчику тока (ДДТ) для селективной защиты от пробоев, утечек изоляции и КЗ. Там же приведены осцил-

лограммы потенциалов шин ($U_{ш1,2}$, $U_{шк}$) и напряжения на остальных нагрузках ($U_{н2,3}$) при отключении данной нагрузки (H_1).

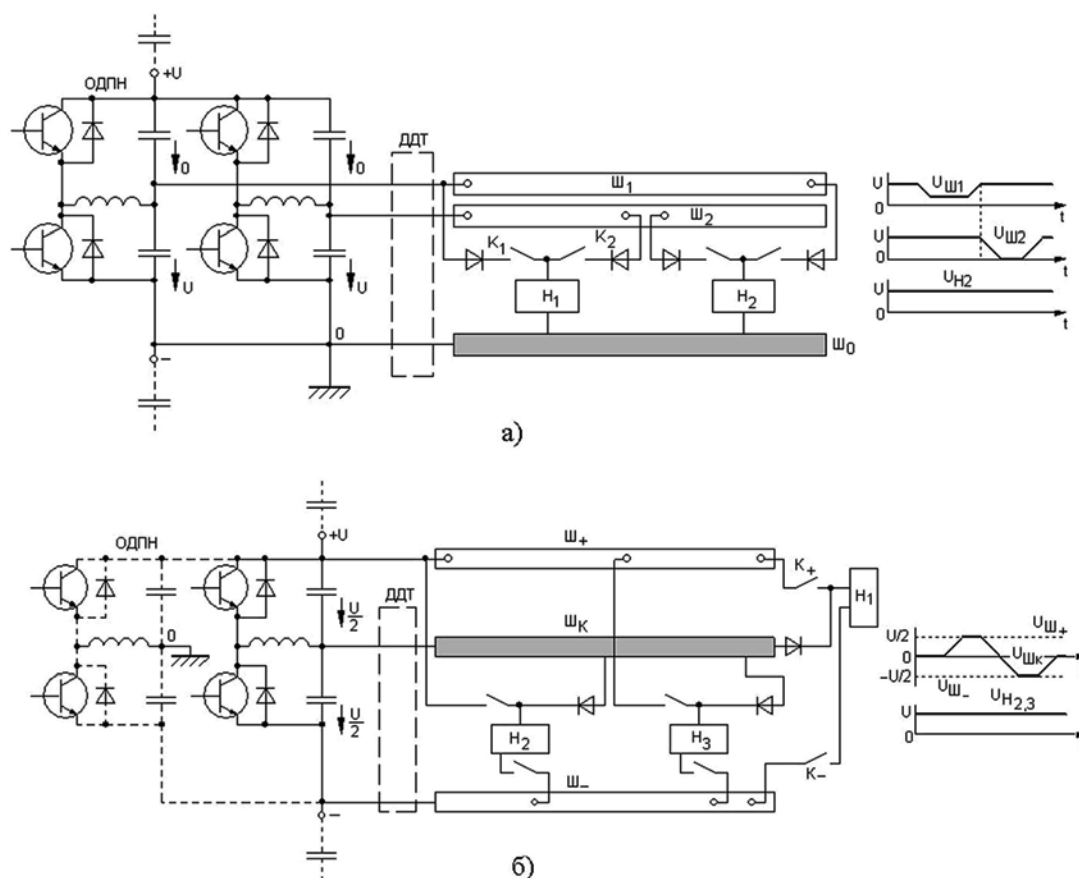


Рис. 1. Распределительные системы «квазипостоянного» повышенного напряжения со схемами бездугового расщепления (СБР) на базе ОДПН: а) с асинхронно-плавающими однополярными потенциалами (АПОП); б) с плавающим потенциалом коммутационной шины (ППКШ)

Первая система (рис. 1а) работает следующим образом. В режиме питания нагрузок H_1 и H_2 расщепленные средние звенья ОДПН дублируют друг друга, обеспечивая закоротку своих верхних конденсаторов и зарядность нижних до напряжения питания U , подводимого к нагрузкам через замкнутые контакторы $K_{1,2}$. Для выключения первой нагрузки (H_1) с помощью левых плеч среднего звена ОДПН сначала плавно снижается потенциал $U_{ш1}$ шины $Ш_1$, затем выключается обесточенный контактор K_1 после чего потенциал $U_{ш1}$ плавно восстанавливается. Заметим, что на питании других нагрузок указанная манипуляция не сказывается, т.к. их питание дублируется по шине $Ш_1$. Далее аналогичная манипуляция, но с полным обнулением потенциала, производится с помощью правых плеч среднего звена ОДПН для обеспечения аналогичного бездугового выключения контактора K_2 , что также не сказывается на других нагрузках. Попутно заметим, что каждый из кабелей питания $Ш_1$ и $Ш_2$ рассчитан на половинный номинальный ток, невзирая на импульсную (двойную) перегрузку в интервале размыкания контактора.

Во второй системе (рис. 1б) в режиме питания нагрузок H_1 , H_2 и H_3 основное (правое) звено ОДПН обеспечивает равную зарядку обоих конденсаторов до половины напряжения питания $U/2$. Для выключения третьей нагрузки (H_3) одновременно плавно обнуляется напряжение верхнего конденсатора и удваивается напряжение нижнего. При этом бывший нулевой потенциал $U_{шк}$ коммутационной шины $Ш_к$ становится равным потенциалу $U_{ш+}$ шины $Ш_+$. Затем размыкается контактор K_+ , после чего опять одновременно напряжение верхнего конденсатора плавно повышается до U , а нижнего – обнуляется; далее размыкается контактор K_- , после чего схема управления плавно возвращает конденсаторы ОДПН в исходное состояние. При вышеуказанных манипуляциях напряжение между шинами $Ш_+$ $Ш_-$ остается постоянным (U), чем обеспечивается бесперебойное питание остальных нагрузок (H_1 и H_2).

Второй комплект среднего звена ОДПН (показан пунктиром) может быть применен для искусственного заземления Π_k и фиксирования потенциалов Π_+ и Π_- .

Проведем краткий сравнительный анализ вариантов распределительных систем КППН со СБР на базе ОДПН (с АПОП и ППКШ).

Общие достоинства:

- бездуговое расцепление, а возможно и безыскровое замыкание контакторов при повышенном напряжении питания; применимость групповых контакторов и контактных контроллеров;
- отсутствие реактивной мощности;
- обеспечение селективно-дифференциальной защиты;
- возможность относительно простого аккумуляторного резервирования с рекуперацией энергии и подпитки пиковых нагрузок;
- отсутствие продольных помех из-за петлевых контуров для \overline{H} -помех (по сравнению с однопроводными системами с использованием корпуса).

Общие недостатки в сравнении с классической одно- или двухпроводной СППН:

- удвоение числа контакторов и обеспечение временного сдвига при их расцеплении;
- наличие третьего провода;
- обязательность синхронизации ОДПН с контакторами.

Дополнительные достоинства системы с ППКШ в сравнении с системой АПОП:

- снижение вдвое постоянного рабочего напряжения изоляции для конденсаторов ОДПН и проводов Ш1,2 относительно корпуса (интенсивности старения и вероятности пробоя);
- отсутствие силовых диодов в цепи постоянного питания нагрузок (есть импульсные диоды без радиаторов).
- простота параллельного объединения сетей (по шинам Π_{\pm});
- третий провод (коммутационный) - малого сечения;
- вторые средние звенья ОДПН нагружены только при несимметричных нагрузках с половинным напряжением.

К недостаткам этой системы в сравнении с классической одно- или двухпроводной СППН относятся:

- обязательность наличия контакторов в цепях обеих полярностей (для исключения подвода напряжения к отключенным нагрузкам при коммутациях);
- необходимость синхронизации управления ОДПН и контакторами;
- наличие проводов (хотя и малого сечения) с диодами (хотя и без радиаторов) между коммутационной шиной и нагрузками с регулярным пульсированием потенциала, подведенного к одному из выводов отключенных нагрузок относительно земли.

На рис. 2 представлен вариант однопроводной СППН с ППКШ и заземленной отрицательной шиной (СППН- 0+270В). В отличие от системы, приведенной на рис. 1, в ней вместо диодов применены тиристоры (VS), позволяющие исключить подведение пульсирующих потенциалов к отключенным нагрузкам. Здесь в качестве регулируемого источника для питания коммутационной шины (Π_k) применен простейший активный делитель напряжения (АДН) на базе двухтранзисторного обратимого импульсного конвертора (VT_{1,2}) с емкостным фильтром (C_{1,2}). Пунктиром также показаны цепи диодного шунтирования (VD_ш) индуктивных нагрузок (H_{1,2,3}) при размыкании (K_{1,2,3}).

На рис. 3 показан аналогичный вариант двухпроводной СППН с ППКШ и заземленной нулевой шиной (Π_0) (СППН 0±135 В). Здесь для питания коммутационной шины использован АДН с двуполярным входным потенциалом относительно нулевого (заземленного) провода питания и нулевой шины (Π_0).

В качестве потребителей могут использоваться нагрузки с заземленным «минусом» 135В (H_{1,2,3}), с заземленным «плюсом» 135В (H_{1,2,3}) и с заземленной «средней точкой» 270В (H₄). К достоинствам этой системы относится также пониженное рабочее напряжение на изоляции кабелей, проводов и распределительных шин относительно заземленного корпуса объекта, благодаря чему ослабляется процесс старения изоляции, повышается ее надежность и электробезопасность.

Рассмотренные схемотехнические решения обеспечивают электромагнитную совмести-

мость электромеханической коммутационной аппаратуры (контакторов, реле и автоматов защиты сети) с системами электроснабжения постоянного тока повышенного напряжения. Предложенные схемы бездуговой (безыскровой) коммутации позволяют исключить громоздкие дугогасительные камеры и помехоподавительные экраны из конструкции электромеханических коммутаторов.

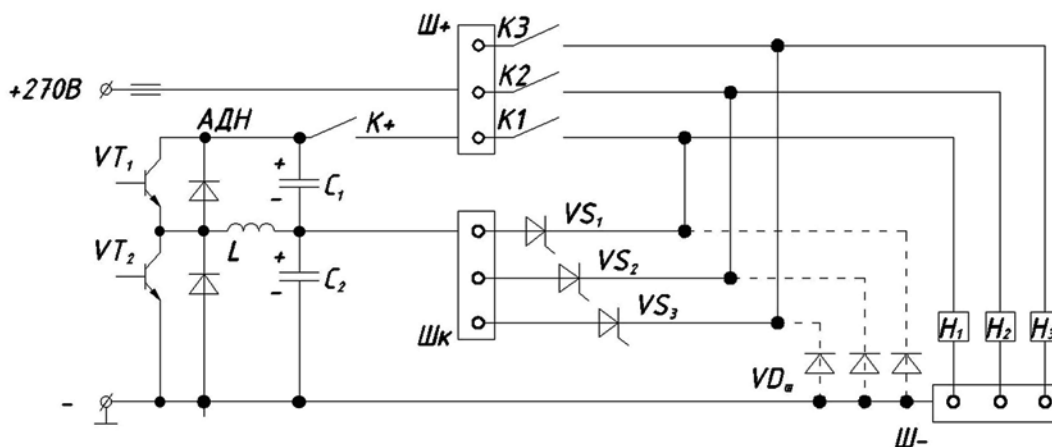


Рис. 2. Вариант однопроводной СППН с ППКШ и заземленной отрицательной шиной (СППН -0+270 В)

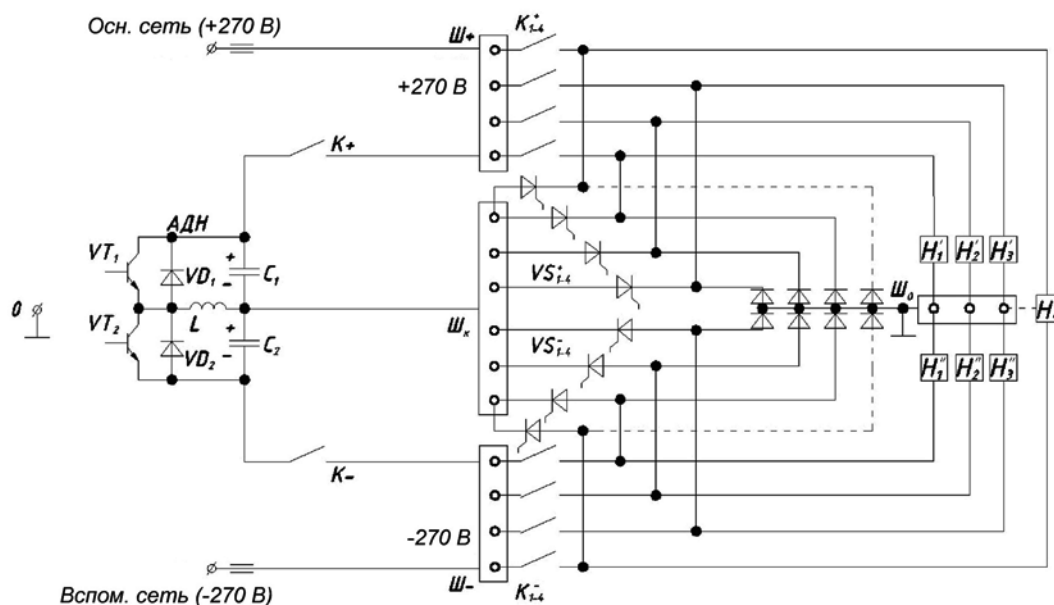


Рис. 3. Вариант двухпроводной СППН с ППКШ и заземленной нулевой шиной (СППН 0±270 В)

Литература

1. Резников С.Б., Бочаров В.В., Кириллов В.Ю., Постников В.А. Электроэнергетическая и электромагнитная совместимость транспортного электрооборудования с высоковольтными цепями питания. Под ред. д.т.н, проф. С.Б. Резникова/М.: Изд-во МАИ-ПРИНТ, 2010 г., 512с.
2. Электрооборудование летательных: учебник для вузов. В двух томах; под ред. С.А. Грузкова/ – М.: Изд-во МЭИ, 2005 г. Том 1. Системы электроснабжения летательных аппаратов. 2005 г., – 568 с.
3. Электрооборудование летательных аппаратов: учебник для вузов. В двух томах / под ред. С.А. Грузкова. – М.: изд-во МЭИ, 2005- 2008. – Том 2. Элементы и системы электрооборудования – приемники электрической энергии. – М.: Издательский дом МЭИ, 2008. – 552 с.

Дементьев А.Н., Назаров Ю.Б., Смирнов М.Е.
 ФГУП ЦНИИмаш, г. Королев, Россия,
 тел.: 513-59-46, 513-40-34, 513-48-36

ИНТЕГРАЛЬНОЕ УРАВНЕНИЕ ДЛЯ ПОЛОСКОВОЙ РАМОЧНОЙ АНТЕННЫ, РАСПОЛОЖЕННОЙ НА ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ЦИЛИНДРЕ

Введение

Рамочные антенны (РА) нашли самое широкое применение в различных радиоэлектронных системах. Исследованию таких антенн посвящено огромное число публикаций. Как правило, большинство этих работ основаны на различных приближениях и допущениях. Например, в работах [1–3] используется несамосогласованный [4] подход к расчету электромагнитного поля: поле излучения рамочной антенны определяется по априорно заданному из определенных физических соображений распределению тока по антенне. Этот подход имеет ограничение: он справедлив лишь для излучателей малых электрических размеров. В общем случае необходимо найти распределение тока на антенне при заданной сторонней ЭДС. Самосогласованным методом задача анализа рамочной антенны решена в [4–6]. Однако в этих работах РА находится в свободном пространстве, а не на несущей конструкции, влияние которой на излучение РА нельзя учесть с помощью описанных в них методов. В данной работе рассмотрена задача определения распределения поверхностной плотности тока по РА, расположенной на диэлектрическом цилиндре, который выполняет конструктивные функции и обеспечивает требуемые характеристик излучения.

1. Физическая модель

Будем использовать следующую физическую модель. РА представляет собой узкую бесконечно тонкую идеально проводящую полосу шириной $2l$, свернутую в кольцо радиуса a , которая соосно расположена на бесконечном диэлектрическом цилиндре такого же радиуса (рис. 1). Диэлектрическая проницаемость цилиндра – ε_1 , магнитная проницаемость — μ_1 . Диэлектрическая проницаемость среды, окружающей цилиндр — ε_2 , магнитная проницаемость — μ_2 . РА возбуждается гармонической во времени $\exp(i\omega t)$ распределенной сторонней ЭДС, приложенной в области разрыва с угловой шириной 2Δ . Будем считать, что возбуждающее поле имеет только продольную составляющую E_φ^{ext} , и так как полоска узкая, то поперечной составляющей поверхностной плотности тока η_z пренебрежем, потому что она в этом случае много меньше продольной составляющей η_φ . На поверхности ленточного проводника ($\rho = a$) должно выполняться граничное условие:

$$E_\varphi = -E_\varphi^{\text{ext}}(\varphi, z) = \begin{cases} e_\varphi^{\text{ext}}(\varphi, z) & \text{при } |\varphi| \leq \Delta, |z| \leq l, \\ 0 & \text{при } \varphi \in (\Delta, 2\pi - \Delta), |z| \leq l, \end{cases} \quad (1)$$

где e_φ^{ext} — стороннее электрическое поле в зазоре антенны.

2. Интегральное уравнение

Разложим вектора напряженности электрического поля, магнитного поля и поверхностной плотности тока по координате φ в ряд Фурье, а по координате z интеграл Фурье.

На поверхности цилиндра $\rho = a$ Фурье-образ $\vec{E}_\tau = \{E_z, E_\varphi\}$ тангенциальной составляющей напряженности электрического поля \vec{E}_τ и Фурье-образ $\vec{F} = \{F_z, F_\varphi\}$ поверхностной плотности тока $\vec{\eta}$ на антенне связаны через матрицу поверхностных импедансов $[Z]$ поверхности $\rho = a$ следующим образом [7]:

$$\begin{bmatrix} E_z \\ E_\varphi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_z \\ F_\varphi \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где Z_{ij} ($i, j = 1, 2$) — элементы матрицы поверхностных импедансов $[Z]$, представляющие собой функции переменных Фурье-пространства n, h : $Z_{ij} = Z_{ij}(n, h)$.

Для определения матрицы поверхностных импедансов $[Z]$ проще сначала найти матрицу поверхностных адмитансов $[Y]$:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{F}_z \\ \mathbf{F}_\varphi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{E}_z \\ \mathbf{E}_\varphi \end{bmatrix}, \quad (3)$$

где Y_{ij} ($i, j = 1, 2$) — элементы матрицы поверхностных адмитансов $[Y]$, которые также являются функциями переменных n и h .

Из матричных соотношений (2) и (3) следует, что матрица $[Y]$ есть обратная матрице, т.е. $[Z] = [Y]^{-1}$.

Матрица поверхностных адмитансов поверхности $\rho = a$ легко определяется через матрицы входных адмитансов области 1 ($\rho < a$) — $[Y^{(1)}]$ и области 2 ($\rho > a$) — $[Y^{(2)}]$ (рис. 1) [7]:

$$[Y] = [Y^{(2)}] - [Y^{(1)}].$$

Матрицы входных адмитансов получаются методом, аналогичным описанному в [8]. Здесь приведем лишь конечные выражения для их элементов.

$$Y_{11}^{(1)} = \frac{1}{\rho^2 i \omega \mu_0 (k^2 \varepsilon_1 \mu_1 - h^2)} \left(\frac{k^2 \rho^2 \varepsilon_1 J_n'(-iv_1 \rho)}{J_n(-iv_1 \rho)} - \frac{(nh)^2 J_n(-iv_1 \rho)}{\mu_1 J_n'(-iv_1 \rho)} \right), \quad Y_{12}^{(1)} = \frac{\left(\frac{1}{\rho} nh J_n(-iv_1 \rho) \right)}{i \omega \mu_0 \mu_1 J_n'(-iv_1 \rho)},$$

$$Y_{21}^{(1)} = -\frac{\left(\frac{1}{\rho} nh J_n(-iv_1 \rho) \right)}{i \omega \mu_0 \mu_1 J_n'(-iv_1 \rho)}, \quad Y_{22}^{(1)} = \frac{(k^2 \varepsilon_1 \mu_1 - h^2) J_n(-iv_1 \rho)}{i \omega \mu_0 \mu_1 J_n'(-iv_1 \rho)}.$$

$$Y_{11}^{(2)} = \frac{1}{\rho^2 i \omega \mu_0 (k^2 \varepsilon_2 \mu_2 - h^2)} \left(\frac{k^2 \rho^2 \varepsilon_2 H_n^{(2)'}(-iv_2 \rho)}{H_n^{(2)}(-iv_2 \rho)} - \frac{(nh)^2 H_n^{(2)}(-iv_2 \rho)}{\mu_2 H_n^{(2)'}(-iv_2 \rho)} \right),$$

$$Y_{12}^{(2)} = \frac{\left(\frac{1}{\rho} nh H_n^{(2)}(-iv_2 \rho) \right)}{i \omega \mu_0 \mu_2 H_n^{(2)'}(-iv_2 \rho)},$$

$$Y_{21}^{(2)} = -\frac{\left(\frac{1}{\rho} nh H_n^{(2)}(-iv_2 \rho) \right)}{i \omega \mu_0 \mu_2 H_n^{(2)'}(-iv_2 \rho)}, \quad Y_{22}^{(2)} = \frac{(k^2 \varepsilon_2 \mu_2 - h^2) H_n^{(2)}(-iv_2 \rho)}{i \omega \mu_0 \mu_2 H_n^{(2)'}(-iv_2 \rho)}.$$

где J_n — функция Бесселя первого рода n -го порядка, $H_n^{(2)}$ — функция Ханкеля второго рода n -го порядка.

$$J_n'(-iv_1 \rho) = \frac{\partial J_n(-iv_1 \rho)}{\partial \rho}, \quad H_n^{(2)}(-iv_2 \rho) = \frac{\partial H_n^{(2)}(-iv_2 \rho)}{\partial \rho}$$

$$v_{1,2} = \sqrt{h^2 - k^2 \varepsilon_{1,2} \mu_{1,2}}.$$

Определяя \mathbf{E}_φ из (2) и выполняя обратное преобразование Фурье, предварительно определив Z_{22} описанным выше способом, получаем следующее выражение для \mathbf{E}_φ на поверхности цилиндра $\rho = a$.

$$E_\varphi(\varphi, z, \rho = a) = \int_0^{2\pi} \int_{-l}^l \eta_\varphi(\varphi', z') Z_{22}(\varphi', z'; \varphi, z) d\varphi' dz', \quad (4)$$

где

$$Z_{22}(\varphi', z', \varphi, z) = \frac{1}{4\pi^2} \sum_{n=-\infty}^{\infty} e^{in(\varphi-\varphi')} \int_{-\infty}^{\infty} Z_{22}(n, h) e^{-ih(z-z')} dh.$$

Подставляя (4) в граничные условия (1) получаем следующее ИУ.

$$-E_{\varphi}^{\text{ext}}(\varphi, z, \rho = a) = \int_0^{2\pi} \int_{-l}^l \eta_{\varphi}(\varphi', z') Z_{22}(\varphi', z'; \varphi, z) d\varphi' dz',$$

Поперечное распределение продольной составляющей поверхностной плотности тока η_{φ} для узких полосок можно считать квазистатическим [7]:

$$\eta_{\varphi}(\varphi', z') = \frac{f(\varphi')}{\sqrt{1-(z'/l)^2}}, \quad (5)$$

где $f(\varphi')$ — функция, характеризующая продольное распределение поверхностной плотности тока η_{φ} .

Подставим (5) в (4) и выполним интегрирование по z' . Так как уравнение (4) справедливо для любых $z \in [-l, l]$, то его можно записать при $z = 0$ и получить следующее ИУ относительно неизвестной функции $f(\varphi')$.

$$-E_{\varphi}^{\text{ext}}(\varphi, z = 0, \rho = a) = \int_0^{2\pi} f(\varphi') K(\varphi', \varphi) d\varphi', \quad (6)$$

где

$$K(\varphi', \varphi) = \frac{l}{4\pi} \sum_{n=-\infty}^{\infty} e^{in(\varphi-\varphi')} \int_{-\infty}^{\infty} J_0(hl) Z_{22}(n, h) dh.$$

Решить уравнение (6) можно, например, методом моментов. Неизвестную функцию $f(\varphi')$ искать в виде разложения в ряд Фурье по косинусам.

В качестве примера были рассчитаны распределения тока на поверхности рамочной антенны, расположенной на диэлектрическом цилиндре с $\varepsilon_1 = 1$ (рис. 2а) и $\varepsilon_1 = 3$ (рис. 2б). Расчеты проведены при следующих геометрических размерах антенны: $ka = 1$, $l/\lambda = 0.01$, $\Delta = 0.01$. Действительная часть I_{φ} изображена сплошной линией, мнимая часть — штриховой линией.

Ток определялся по формуле:

$$I(\varphi) = \int_{-l}^l \eta(\varphi, z) dz = f(\varphi) \int_{-l}^l \frac{1}{\sqrt{1-\left(\frac{z}{l}\right)^2}} dz = \pi l f(\varphi).$$

Зависимость стороннего поля e_{φ}^{ext} представлялась в виде ступеньки с помощью функции Хевисайда как в [8].

Таким образом, предложенный метод в рамках принятой физической модели позволил свести задачу определения функции распределения плотности тока на поверхности полосковой рамочной антенны, расположенной на диэлектрическом цилиндре к одномерному ИУ.

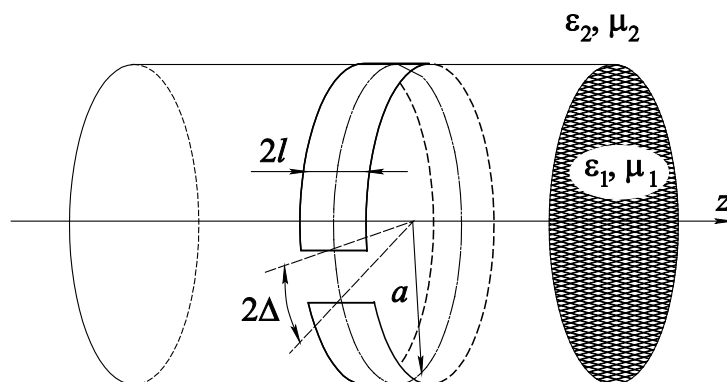


Рис. 1. Геометрия задачи

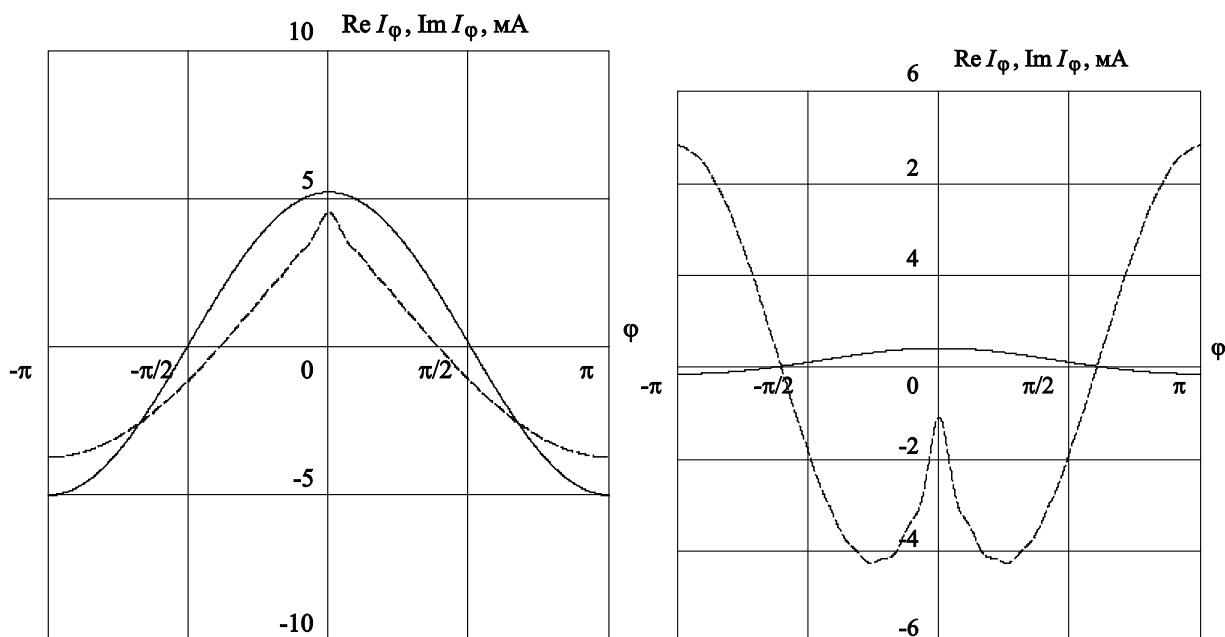


Рис. 2. Распределение тока на поверхности рамочной антенны (сплошная линия — действительная часть, штриховая — мнимая), расположенной на цилиндре с диэлектрической проницаемостью $\epsilon_1 = 1$ (а) и $\epsilon_1 = 3$ (б)

Литература

1. Wang T.N.C., Bell T.F. // IEEE Trans. Antennas and Propagat. 1972. Vol. AP-20. N 3. P. 394–398.
2. Андронов А.А., Чугунов Ю.В. // УФН. 1975. Т. 116. Вып. 1. С. 79–113.
3. Мареев Е.А., Чугунов Ю.В. Антенны в плазме. Н. Новгород: ИПД АН СССР, 1991. 231 с.
4. Неганов В.А. Физическая регуляризация некорректных задач электродинамики. М.: Сайнс-Пресс, 2008. 450 с.
5. Неганов В.А., Табаков Д.П. // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2007. Т. 10. № 4. С. 8-19.
6. Неганов В.А., Ключев Д.С. // Доклады академии наук. 2006. Вып. 407. №. 3. С. 329–331.
7. Неганов В.А., Нефедов Е.И., Яровой Г.П. Полосково-щелевые структуры сверх- и крайне-высоких частот. – М: Наука. Физматлит, 1996. 304 с.
8. Ключев Д.С., Соколова Ю.В. // Радиотехника и электроника. 2015. Т. 60. № 1. С. 52–57.

Исаков С. В.

ОАО «ЛИИ им. М. М. Громова», г. Жуковский, Россия.

Тел.: (495) 556-57-07, Факс: (495) 556-58-45, E-mail: isakovs@progtech.ru

Сазонов Н. И.

ОАО «ЛИИ им. М. М. Громова», г. Жуковский, Россия.

Тел.: (495) 556-58-45, Факс: (495) 556-58-45, E-mail: sazonov@lii.ru

ОТРАБОТКА СОВРЕМЕННОЙ ТЕХНОЛОГИИ СЕРТИФИКАЦИОННЫХ ИСПЫТАНИЙ ГРАЖДАНСКИХ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ (ВС) НА СТОЙКОСТЬ К ВОЗДЕЙСТВИЮ ВНЕШНИХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ ВЫСОКОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ (HIRF)

В последнее время влияние внешних электромагнитных полей (ЭМП) высокой интенсивности (международно признанная аббревиатура – HIRF (High Intensity Radiated Fields)) на бортовое оборудование (БО) воздушного судна (ВС) довольно часто рассматривается как одна из возможных причин лётных происшествий и авиационных катастроф. Испытания БО в составе ВС на стойкость к воздействию HIRF в соответствии с требованиями зарубежных и отечественных нормативно-технических документов (НТД) являются обязательными при сертификации всех типов новых и модернизируемых ВС.

В данной статье представлены основные направления работ по сертификации ВС на стойкость к воздействию HIRF, которые проводятся на всех этапах создания ВС.

Включение требований по HIRF в сертификационный базис ВС

В 2013- 2014 годах в авиационные правила (АП-23, АП-25, АП-27) были добавлены специальные параграфы (§25.1317, §23.1308 для самолётов и §27.1317 для вертолётов), в которых подробно отражены требования к бортовому оборудованию ВС в части стойкости к воздействию внешнего ЭМП (частоты внешних ЭМП, уровни напряжённости электрического поля, тип модуляции). Требования, предъявляемые к бортовому оборудованию по стойкости к воздействию HIRF, задаваемые в АП, зависят от критичности выполняемых им функций. Следовательно, на начальном этапе процесса сертификации ВС необходимо разработать перечень критических и существенных систем ВС, подлежащих оценке на стойкость к воздействию HIRF. В этом перечне на основе анализа отказобезопасности всё оборудование ВС в соответствии с требованиями АП разбивается по критичности на следующие категории: А (отказ приводит к катастрофической ситуации (КС)), В (отказ приводит к аварийной ситуации (АС)) и С (отказ приводит к сложной ситуации (СС)). Для различных категорий оборудования в соответствии с вышеприведённой классификацией должны выполняться следующие требования:

Для оборудования категории А испытания в составе ВС являются обязательными. Стойкость БО в составе ВС должна обеспечиваться в диапазоне частот от 10 кГц до 40 ГГц при уровне напряжённости электрического поля в зависимости от частоты для самолёта до 300 В/м (средние значения), до 3000 В/м (пиковые значения) и для вертолёта до 490 В/м (средние значения), до 7200В/м (пиковые значения).

Испытания бортового оборудования категории В и С в составе ВС не проводятся. Сертификация этого оборудования в составе ВС проводится по результатам квалификационных испытаний в соответствии с требованиями АП: для оборудования категории В по категории жёсткости R, R и для оборудования категории С по категории жёсткости T, T (первая буква - категория жёсткости к кондуктивным помехам, вторая буква - категория жёсткости к излучаемым помехам по классификации КТ-160G (DO-160G/ED-14G), раздел 20). Однако, если оборудование категории В и С не соответствует требованиям КТ-160G (DO-160G/ED-14G), раздел 20) или не проходило квалификационные испытания, то допускается проводить испытания этого оборудования в составе ВС.

Предлагается несколько различных методов испытаний БО категории А в составе ВС требованиям по HIRF: прямым методом непосредственного воздействия внешнего ЭМП нормированного (большого) уровня в диапазоне частот 10 кГц – 40 ГГц или эквивалентными методами через определение передаточных функций ЛА в диапазоне частот 10 кГц – 400 МГц и определение ко-

эфициента экранирования ЛА в диапазоне частот 100 МГц – 40 ГГц. Выбор метода оценки соответствия зависит от нескольких факторов: результатов квалификационных стендовых испытаний БО на соответствие требованиям КТ-160G (DO-160G/ED-14G), раздел 20, технических возможностей испытательной базы и т. д.

В международной и отечественной практике чаще всего испытания БО в составе ВС проводятся эквивалентными методами облучения ВС электромагнитным полем малого уровня с последующим пересчётом результатов испытаний к уровням ЭМП, заданных в сертификационном базисе ВС. Ниже приведены основные этапы методологии проведения таких испытаний.

Проведение испытаний в диапазоне частот 10 кГц – 400 МГц методом измерения тока малого уровня (LLSC)

Метод LLSC (Low Level Swept Current - сканирующий ток низкого уровня) применяется для определения передаточной функции ВС (ПФ – передаточная функция), которая рассчитывается, как отношение уровня индуцированного тока в жгутах ВС к измеренному при калибровке уровню напряжённости воздействующего на ВС внешнего ЭМП в диапазоне частот 10 кГц – 400 МГц. Для определения передаточной функции ВС облучается в нескольких различных положениях относительно излучающих антенн электромагнитными полями, как вертикальной, так и горизонтальной поляризациями, при этом осуществляется измерение и регистрация индуцированного тока в испытываемых жгутах БО. Измеренные токи нормируются относительно уровня напряжённости излучаемого поля с целью получения набора графиков ПФ, зависящих от типа испытываемых жгутов, направления излучения и поляризации ЭМП. Наихудший случай передаточных функций ВС, учитывающий наибольшее значение измеренного тока при двух поляризациях поля (вертикальной и горизонтальной) и при нескольких направлениях излучения, должен использоваться в дальнейшем для оценки индуцированного тока по жгутам бортового оборудования и проведения испытаний ВС методом инъекции тока большого уровня в диапазоне частот 10кГц – 400 МГц.

Проведение испытаний в диапазоне частот 10 кГц – 400 МГц методом инъекции тока большого уровня (BCI)

Испытания на стойкость к воздействию внешнего ЭМП высокой интенсивности в диапазоне от частот от 10 кГц до 400 МГц проводятся методом инъекции тока большого уровня (Bulk Current Injection (BCI)) с использованием инжекторов тока, подключаемых к жгутам бортовых цепей испытываемого оборудования ВС. При проведении испытаний методом BCI бортовые системы должны быть полностью функционирующими, оборудование ВС должно быть в эксплуатационном режиме, обеспечивающем выполнение соответствующих критических функций, требующих подтверждения соответствия в условиях воздействия HIRF. Уровни тока, которые инжектируются в жгуты испытываемого оборудования при проведении испытаний методом BCI, определяются путём пересчёта уровней ЭМП, приведённых в сертификационном базисе ВС с использованием ПФ, полученной ранее на этапе проведения испытаний ВС методом LLSC.

Проведение испытаний в диапазоне частот 100 МГц – 18 ГГц методом измерения поля малого уровня (LLSF)

Метод LLSF (Low Level Swept Field - сканирующее поле низкого уровня) применяется для оценки уровня электромагнитного поля внутри ВС при его облучении внешним электромагнитным полем в диапазоне частот от 100 МГц до 18 ГГц. Данные испытания позволяют определить коэффициент экранирования (КЭ) фюзеляжа ВС, показывающего, насколько корпус ВС ослабляет внешнее электромагнитное поле. КЭ фюзеляжа ВС рассчитывается как отношение уровня напряжённости внешнего ЭМП, измеренного при калибровке к уровню напряжённости ЭМП, измеренного внутри ВС. Каждый испытываемый приборный отсек ВС подвергается облучению электромагнитным полем с нескольких различных направлений и, как с горизонтальной, так и с вертикальной поляризациями с целью определения условий наихудшего случая. Результаты измерения КЭ используются далее для оценки уровня напряжённости ЭМП внутри фюзеляжа ВС. Рассчитанные уровни ЭМП сравниваются с квалификационными уровнями радиочастотной восприимчивости оборудования по КТ-160G (DO-160G/ED-14G), раздел 20 с целью оценки стойкости оборудования в составе ВС к воздействию внешнего ЭМП.

Проведение испытаний в диапазоне частот 100 МГц – 18 ГГц методом излучения электромагнитного поля высокой интенсивности внутри фюзеляжа ВС (HIRF)

Бортовое оборудование, прошедшее квалификационные испытания на восприимчивость к излучаемым помехам в соответствии с требованиями КТ-160G (DO-160G/ED-14G), раздел 20, на уровне ЭМП, меньшие, чем рассчитанные внутри фюзеляжа ВС с учётом измеренного ранее КЭ, подвергается дополнительным испытаниям в составе ВС. Такие испытания методом HIRF в диапазоне частот от 100 МГц до 18 ГГц проводятся путём размещения излучающей антенны внутри фюзеляжа ВС рядом с блоками испытываемого оборудования. Уровень излучаемого электромагнитного поля внутри ВС рассчитывается путем деления напряженности электромагнитного поля, соответствующей требованиям сертификационного базиса, на КЭ фюзеляжа ВС, полученный ранее методом LLSF. При проведении испытаний методом HIRF бортовое оборудование ВС должно быть в эксплуатационном режиме, обеспечивающем выполнение соответствующих критических функций, требующих подтверждения соответствия в условиях воздействия HIRF.

Анализ результатов испытаний бортового оборудования в составе ВС и стендовых квалификационных испытаний с целью сертификации ВС на HIRF

Сертификация ВС проводится по результатам квалификационных испытаний бортового оборудования и испытаний бортового оборудования в составе ВС. В качестве доказательной документации разрабатывается акт, в котором приведены результаты испытаний бортового оборудования категории А в составе ВС и результаты квалификационных испытаний бортового оборудования категории В и С на соответствие требованиям КТ-160G (DO-160G/ED-14G) раздел 20 и содержится заключение о соответствии типовой конструкции ВС с установленным на нём бортовым оборудованием требованиям сертификационного базиса в части стойкости к воздействию HIRF.

В ОАО «ЛИИ им. М. М. Громова» (в лаборатории электромагнитной совместимости БО летательных аппаратов) с середины 80-х годов по настоящее время проводятся работы по разработке научно-методического обеспечения оценки стойкости БО к воздействию HIRF, созданию стендовой базы для проведения испытаний на HIRF. Создаваемая стендовая база позволяет в автоматизированном режиме с использованием волоконно-оптических линий связи проводить испытания на стойкость к воздействию HIRF по вышеизложенной технологии.

Литература

1. The certification of aircraft electrical and electronic systems for operation in the High Intensity Radiated Field (HIRF) Environment. AC/AMJ 20.1317, 1998.
2. Guidance to the certification of aircraft electrical/electronic systems for operation in the High Intensity Radiated Field (HIRF) Environment. Eurocae ED-107A/SAE ARP5583A, 2010.
3. Environmental Conditions and Test Procedures for Airborne Equipment. RTCA DO-160 G/EUROCAE ED-14G. Radio Technical Commission for Aeronautics, 2010.
4. Условия эксплуатации и окружающей среды для бортового авиационного оборудования. (Внешние воздействующие факторы – ВВФ). КТ-160G, 2014.
5. АП-23. Авиационные правила. Часть 23. Нормы лётной годности гражданских лёгких самолётов, 2013.
6. АП-27. Авиационные правила. Часть 27. Нормы лётной годности винтокрылых аппаратов нормальной категории, 2013.

Смирнов А.П., Басалаев К.К.

РАЗВИТИЕ ТРЕБОВАНИЙ К ХАРАКТЕРИСТИКАМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ ОБЩЕПРОМЫШЛЕННОЙ И АВИАЦИОННОЙ ПРОДУКЦИИ И СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ДЛЯ ИХ ОЦЕНКИ

Под электромагнитной совместимостью (ЭМС) понимается способность технического средства (ТС) функционировать с заданным качеством в заданной электромагнитной обстановке и не создавать недопустимых электромагнитных помех другим ТС. Понятие ЭМС появилось с появлением первых радиоэлектронных средств и в настоящее время становится все более актуальным. Особенностью ЭМС является непреднамеренный характер создаваемых и анализируемых помех. При этом характеристики помех или воздействий предписываются для строго заданных условий работы ТС. Поэтому отечественная и мировая практика в сфере оценки показателей ЭМС отличается высоким уровнем регламентации методов оценки помех и испытаний на устойчивость к помехам. Красноречивым подтверждением этого факта, а также важности ЭМС в современной насыщенной электрическими, электронными и радиотехническими ТС обстановке является введение в 2013 году Технического регламента Таможенного союза ТР ТС 020/2011 «Электромагнитная совместимость технических средств». Указанный технический регламент касается продукции гражданского применения. Но, очевидно, что включенные в него помехи и критерии устойчивости ТС, а также методы оценки будут аналогичны продукции оборонного назначения, а также других отраслей, таких, как авиационная индустрия, автомобильная или связанная отрасль. Очевидно, что имея собственные специфические дополнительные требования по ЭМС, для аналогичных тестов требования оборонных стандартов будут жестче требований гражданских стандартов.

Анализ динамики развития национальных стандартов в области показывает, что они в значительной степени основаны на зарубежных аналогичных стандартах, зачастую аутентичны им. Такая ситуация привела к тому, что фактически в каждой области действующий национальный стандарт фактически является «предпоследней» версией аналогичного зарубежного стандарта. Поэтому чтобы оценить актуальные требования к отечественной оборонной продукции, следует рассмотреть и основываться на соответствующие зарубежные стандарты.

Здесь определяющим является стандарт MIL STD 461 и частично MIL STD 462. Несмотря на то, что данный стандарт разработан в интересах Минобороны США, он используется в различных сферах, особенно в области разработки различных систем управления, вычислительных систем, компонентов авиационной и автомобильной техники. Это связано с тем, что поскольку требования указанного стандарта жестче требований гражданских стандартов, соответствие ТС требованиям MIL-STD-461 автоматически означает соответствие ТС требованиям национальных стандартов в части касающейся. Кроме того, соответствие требованиям стандарта позволяет применять ТС в оборонной сфере, что повышает конкурентоспособность и расширяет рынок сбыта продукта. Тем не менее, было бы целесообразно рассмотреть стандарты на авиационную продукцию DO 160 и автомобильные стандарты, отраженные Правилах № 10 ЕЭК ООН. Это связано с тем, что часто объектами этих стандартов являются устройства двойного назначения, что делает требования этих стандартов важными для оборонной продукции в целом.

Анализ динамики изменений основных требований в этих стандартах представлен в Табл.1, 2, 3. Результаты анализа показали значительную схожесть физической природы тестов, тем самым показывая возможность в конечном счете сближения методов тестирования, отраженных в различных нормативных документах. Как подтверждение сказанному, в 2014 году планируется введение версии MIL STD 461G. Предполагается, что новая версия стандарта будет включать новые тесты, в частности CS117, RS106, RS108, в значительной степени похожие на тесты документа DO 160. В частности, тест CS117 будет аналогичен тесту раздела 22 DO-160 с некоторыми изменениями:

- испытания предполагается проводить только на устойчивость к многократному удару и многократной вспышке;
- среди методов испытаний оставить только метод кабельного ввода помехи;

- ограничить применение данного теста только объектами авиационной электроники.
Тесты RS106, RS108 будут соответственно аналогичны тестам RS105 и Разделу 23 RTCA/DO-160.

Основными тенденциями требований к ЭМС оборонной продукции являются:

- расширение частотного диапазона для оценки эмиссии до 18 ГГц и для устойчивости до 40 ГГц;
- повышение жесткости испытаний на устойчивость к излучаемым помехам до 200 В/м для узкополосных помех и до 7 кВ/м для импульсных помех и некоторых ТС.

В отношении других тестов существенных изменений не замечено.

Можно сказать, что указанные три стандарта охватывают полностью весь перечень требований и методов оценки показателей ЭМС, а соответствие ТС указанным в них требованиям делает его полностью соответствующим требованиям ЭМС. Стандарты предлагают альтернативные методы оценки, что делает их удобными для производителей и испытателей ТС.

Среди всех требований ЭМС большинство из них не вызывает трудностей при наличии соответствующей аппаратуры. В настоящее время на рынке обращается достаточное количество продуктов различных зарубежных фирм, таких как SOLAR, АМТЕК, TESEQ, KEYSIGHT и других, включающих универсальные, автоматизированные испытательные генераторы, генераторы импульсных помех, различные устройства ввода помех, измерительные антенны, а также измерительные приемники, измерительные датчики или токосъемники. Особое внимание вызывают тесты на устойчивость к мощным помехам, требующие при традиционной конфигурации установки мощные усилители, безэховые экранированные камеры, и как следствие являющиеся чрезвычайно затратными.

В тоже время широко используемые за рубежом реверберационные камеры и генераторы поля в виде ГТЕМ ячеек позволяют отказаться от применения безэховых камер и мощных усилителей. Так первичная аттестация реверберационной камеры TESEQ показала, что для поля 200 В/м в диапазоне частот до 18 ГГц потребуется всего 1 Вт входной мощности. Это показывает возможность существенного снижения стоимости оценки устойчивости к излучаемым помехам.

Другим направлением развития технических средств в области ЭМС является естественно желание производителей или испытателей технических средств иметь в распоряжении комплексные системы, позволяющие охватить в одной комплексной установке возможность испытаний сразу по нескольким стандартам. Поскольку среди тестирования на характеристики ЭМС проверка устойчивости является более затратной, то рассмотрим комплексирование тестов именно в этой области.

В табл. 4, 5 приведены результаты сравнения характеристик тестов по трем группам испытаний – устойчивости к кондуктивным низкочастотным радиопомехам, устойчивости к кондуктивным высокочастотным радиопомехам, устойчивости к излучаемым радиопомехам. Очевидны близость частотных диапазонов и жесткостей испытаний. Заметная общность характеристик тестов позволяет сформировать комплексные испытательные системы, позволяющие учесть требования испытаний сразу по нескольким стандартам. Примерный состав предлагаемых установок на примере оборудования известных и популярных в мире TESEQ, Keysight и других производителей приведен в этих же табл. 4, 5.

Таким образом, анализ тенденций развития требований в части ЭМС показывает их сближение с точки зрения задания требований и методик испытаний. Это позволяет создавать комплексные унифицированные системы для тестирования ЭМС. Анализ парка технических средств показывает практическую возможность реализации комплексных испытательных систем. Данный фактор целесообразно учитывать при создании или комплектовании испытательных лабораторий, предназначенных для тестирования оборонной продукции и технических средств общего применения, так как позволяет создавать лаборатории и с достаточно широкой областью аккредитации.

Таблица 1

Динамика изменений требований стандартов серии MIL-STD-461 (обозначения: в частотных диапазонах: к-“кГц”, М-“МГц”, Г-“ГГц”, U – напряжение, I – ток, E – напряженность электрического поля, H – напряженность магнитного поля)

| Тест | Описание теста | MIL STD, версия/год | | | | | |
|-------|--------------------------------------------|---------------------|--------------|-------|----------------------------|-------------|-------|
| | | 461A | 461B | 461C | 461D | 461E | 461F |
| | | 1968 | 1980 | 1986 | 1993 | 1999 | 2007 |
| CE101 | Линии питания, кондуктивные помехи | I,0.03-20к | CE101 | | I,30-10к | | |
| CE102 | Сигнальные кабели, кондуктивные помехи | I,30-20к | I,30-15к | | Линии питания: U,10к-10М | | |
| CE103 | Линии питания, кондуктивные помехи | I,20к-50М | CE103 | | | | |
| CE104 | Сигнальные кабели, кондуктивные помехи | I,20к-50М | I,15к-50М | | | | |
| CE105 | Метод инверсного фильтра | I,30-50М | | | | | |
| CE106 | Антенные входы | 10к-12.4Г | 10к-26Г | | 10к-40Г | | |
| CE107 | Линии питания, импульсы, временная область | | CE07 | | | | |
| CS101 | Линии питания, НЧ кондуктивные помехи | | 30-50к | | U:30-150к | | |
| CS102 | Линии питания | 50к-400М | | | | | |
| CS103 | Антенные порты, интермодуляция | 30-10Г | 15к-10Г | | | | |
| CS104 | Антенные порты, нежелательные сигналы (2) | 30-10Г | 30-20Г | | | | |
| CS105 | Антенные порты, перекрестная модуляция | 30-10Г | 30-20Г | | | | |
| CS106 | Импульсные помехи, линии питания | 100/10 | 200/10;0.15 | | | | 400/5 |
| CS107 | Коммутационные помехи | CS107 | | | | | |
| CS108 | Антенные порты, нежелательные сигналы (1) | 30-10Г | | | | | |
| CS109 | Структурные токи | 60-100к | | | | | |
| CS110 | Затухающие синусоиды, контакты 10к-100М | | CS10 | | | | |
| CS111 | Затухающие колебательные помехи, кабели | | CS11 | | | | |
| CS114 | Кондуктивные высокочастотные помехи, ток | | | | 10к-400М: I | 10к-200М: I | |
| CS115 | Кондуктивные импульсные помехи, фронт, | | | | 2/30нс. 5А | | |
| CS116 | Затухающие колебательные помехи, кабели | | | | 10к-100М (6 частот) | | |
| RE101 | Магнитное поле, эмиссия | 30-30к | 30-50к | | H: 30-100к | | |
| RE102 | Электрическое поле, эмиссия | | 14к-10Г | | E:10к-18Г (на 1 м) | | |
| RE103 | Гармонические и побочные сигналы, антенны | 10к-40Г | | | | | |
| RE104 | Магнитное поле, эмиссия | 20-50к | | | | | |
| RE105 | Автомобили, двигатели, эмиссия | E,150к-1Г | | | | | |
| RE106 | Перегрузка линий питания | E,14к- 1Г | | | | | |
| RS101 | Магнитное поле, устойчивость | 30-30к | 30-50к | | 30-100к | | |
| RS102 | Наводки магнитного/электрического поля | МП ПЧ и имп. | | МП/ЭП | | | |
| RS103 | Электрическое поле, устойчивость | 14к-10Г | 14к-10Г(40Г) | | 10к-40Г | 2М-40Г | |
| RS104 | Наводки гармонического магнитного поля | 14к-30М | | | | | |
| RS105 | Импульсное электромагнитное поле | | | RS05 | RS105, 50 кВ/м, фронт 75нс | | |

Таблица 2.

Основные отличия последней версии документа DO-160D

| № | Тест | Цель и особенности испытаний | Основные изменения в версии |
|----|----------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. | Магнитное поле | Оценка влияния объекта испытаний на показания компаса или на показания датчика магнитного поля | Подробный рис. 15.1, объясняющий испытательную установку и методику испытаний. |
| 2. | Входное питание | Устойчивость к изменению питания при нормальном и аварийном состоянии самолета, а также вносимых искажений и влияния на энергосистему самолета | Требование проверки устойчивости к мгновенным прерываниям питания и характеристики прерываний. Аварийный тест устойчивости к мощной импульсной помехе для каждой фазы переменного тока. |
| 3. | Импульсы напряжения | Устойчивость к импульсам напряжения в линиях питания AC и/или DC, аналог CS106 MIL-STD461F | Требование минимум 50 импульсов положительной и отрицательной полярности |
| 4. | Кондуктивные низкочастотные помехи звуковых частот | Устойчивость к помехам в линиях питания, тест почти идентичен CS 101 MIL STD461F с небольшими различиями в уровне и частоте. Уровень до 8 % от напряжения питания в диапазоне 0.01-150 кГц | Ограничение максимальной допускаемой потребляемой мощностью в 100 Вт заменено на ограничение максимального потребляемого тока по уровню пик-пик 36 А. Удалена спецификация импеданса 0.6 Ом для связывающего трансформатора |

| | | | |
|-----|----------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 5. | Наведенные помехи низкочастотного поля | Устойчивость к помехам, наведенным низкочастотным электрическим и магнитным полям и переходным импульсам напряжения | Замечание о неприменимости теста к входным линиям питания; добавлен тест устойчивости объекта к наведенным электрическим полям |
| 6. | Радиочастотные помехи (кондуктивные и излучаемые) | Устойчивость к кондуктивным и излучаемым радиочастотным помехам с амплитудной и импульсной модуляцией. Тесты соответственно аналогичны методу MIL-STD-46F CS114 для частот 10 кГц-400 МГц с использованием токового зонда и методу MIL-STD-461F RS103 для частот 100 МГц - 18 ГГц с использованием полубезэховой или реверберационной камеры | Пересмотрены формулировки и термины, чтобы сблизить содержание раздела с требованиями других стандартов. Требование об облучении всех лицевых поверхностей объекта. Указание на равенство расстояния до антенны при калибровке и тестировании. Метод в реверберационной камере был изменен от режима непрерывного вращения к дискретному вращению смесителя, введены новые соответствующие методики. |
| 7. | Эмиссия радиочастотных помех (кондуктивных и излучаемых) | Эмиссия кондуктивных помех в соединительных кабелях и линиях питания и излучаемых помех. Кондуктивные помехи измеряются в диапазоне 150 кГц-152 МГц токоъемником, излучаемые помехи измеряются в диапазоне 100 МГц – 6 ГГц в безэховой или реверберационной камере | Добавлен новый предел помех для высокочастотных и навигационных приемников. Изменена частота с 1 ГГц до 960 МГц., на которой изменяется полоса пропускания с 100 кГц до 1 МГц, Удалена опция использования полосы пропускания 10 кГц в частотных точках выше 960 МГц и введено замечание, что может быть использован предусилитель. |
| 8. | Импульсные помехи, наведенные молнией | Устойчивость к наведенным молнией импульсам в контактные соединители, соединительные кабели и линии питания. Используется контактный ввод (для устойчивости к повреждению) или кабельный ввод (для устойчивости к нарушению). Раздел рассматривает возможность следующих импульсов: однократный удар, многократный удар и многократная вспышка. | Исключен метод резистора для определения импеданса источника для контактного ввода. Добавлена форма импульса 6 для кабельного ввода, только для испытаний многократных вспышек. |
| 9. | Прямое воздействие молнии | Устойчивость внешнего электрооборудования и электронного оборудования к прямому попаданию молнии. Поскольку эти тесты обычно приводят к разрушению, то объект не запитывается. Требуются высокие напряжения и/или до уровней тысяч киловольт и/или сотен ампер. | Изменений по сравнению с предыдущей версией нет. |
| 10. | Электростатический разряд | Устойчивость оборудования к воздушному электростатическому разряду Этот тест определяет, может ли объект функционировать во время или после воздушного электростатического разряда. Воздействие 10 импульсов положительной и отрицательной полярности 15 кВ. | Изменения включают разъяснение применимости контрольных точек, в частности утверждение, что контакты соединителей не проверяются. |

Таблица 3

Различие требований ЭМС национального и зарубежного стандарта для транспортных средств

| Тесты | Требования к тестам | |
|-----------------------------------------------------------------------|--------------------------------------|----------------------------------|
| | ГОСТ Р 41.10-99 (Правила №10 1997г.) | Правила ЕЭК ООН №10 от 2012 года |
| Эмиссия помех от транспортного средства и электронных сборочных узлов | 30–1000 МГц | 30–1000 МГц |

| | | |
|---------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Устойчивость транспортных средств к излучаемым помехам | Частотный диапазон 30–1000 МГц Уровень 24 В/м в 90 % частотных точках, в том числе не менее 20 В/м во всем диапазоне | Частотный диапазон 20–2000 МГц Уровень 30 В/м в 90 % частотных точках, в том числе не менее 25 В/м во всем диапазоне |
| Устойчивость электронных сборочных узлов к излучаемым помехам | 48 В/м в 150 мм полосковой линии; 12 В/м в 800 мм полосковой линии; 60 В/м в ТЕМ-ячейке; 48 мА ток помехи методом ВСІ. | 60 В/м в 150 мм полосковой линии; 15 В/м в 800 мм полосковой линии; 75 В/м в ТЕМ-ячейке; 60 мА ток помехи методом ВСІ. |
| Устойчивость электронных сборочных узлов к импульсным помехам по линиям питания | Отсутствуют, соответствующие испытания отражены в ГОСТ | Импульсы 1, 2a/2b, 3a/3b, 4 (3 уровень жесткости) по ISO 7637-2 (2004) |
| Эмиссия импульсных помех в линии питания | - | Включен раздел, основанный на ISO 7637-2 (2004) |
| Электростатический разряд | - | Включены ссылка на ISO 10605 |
| Тесты, специфичные для гибридных автомобилей | - | Тесты устойчивости к импульсным микросекундным, наносекундным помехам, искажениям питающей сети и др. |

Таблица 4

Испытания на устойчивость к кондуктивным радиопомехам.

| Документы | Воздействия (уровень, диапазон, сигнал) | Оборудование |
|----------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Устойчивость к кондуктивным низкочастотным радиопомехам | | |
| ГОСТР51317.4.16 | До 30 В, в диапазоне 15 Гц–150 кГц узкополосный | <ul style="list-style-type: none"> • NSG 4060 (TESEQ) - специализированная испытательная система в составе генератора 15-150 кГц, усилителя мощности до 200 Вт, блока мониторинга объекта; • Устройства связи/развязки по подбору (TESEQ); • Дополнительные модули (TESEQ) для силовых линий питания |
| MIL-STD-461F, CS101 | До 6 В, в диапазоне 30 Гц-150 кГц или от второй гармоники частоты питания | |
| DO 160, раздел 18 | До 4 В, в диапазоне 700 Гц-32 кГц для питания АС, в диапазоне 10 Гц-200 кГц для питания DC | |
| Правила 10 ЕЭК ООН | Отсутствуют | |
| Устойчивость к кондуктивным низкочастотным радиопомехам | | |
| ГОСТ Р 51317.4.6 | До 10 В, в диапазоне 150 кГц-80 МГц, с АМ с повышением максимумов | <ul style="list-style-type: none"> • NSG 4070, TESEQ - специализированная испытательная система в составе генератора 9 кГц- 1 ГГц, блока мониторинга объекта; трехканальным измерителем мощности, с опционально встраиваемым усилителем мощности до 75 Вт во всем диапазоне или в 150 кГц-230 МГц; • Усилитель мощности (TESEQ), 100 Вт; • Устройства связи/развязки (TESEQ) по подбору в зависимости от типа линий (с разрывом линии) • Токовый зонд (TESEQ) для ввода помех симметричных и несимметричных токов (без разрыва линии) • Согласующий аттенуатор (TESEQ) • Принадлежности и программное приложение. |
| MIL STD 461F, CS114 | До 109 дБмкА, (300 мА), в диапазоне 10 кГц -200 МГц, меандр и ИМ с сохранением максимумов | |
| DO 160, раздел 20 (п.1) | До 300 мА, в диапазоне 10 кГц -400 МГц, меандр и ИМ с сохранением максимумов | |
| Правила 10 ЕЭК ООН, ISO 11452-4 | До 60 (100) мА, в диапазоне частот 1-400 МГц, АМ с сохранением максимумов | |

Таблица 5

Испытания на устойчивость к излучаемым высокочастотным помехам (корпус объекта)

| Документы | Воздействия | Оборудование |
|-------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ГОСТ Р 51317.4.3 | До 10 В/м, в диапазоне 0.08-6 ГГц, АМ с повышением максимумов и поправкой на вариации до 6 дБ | <ul style="list-style-type: none"> • ITS 6006 (TESEQ) - специализированная испытательная система в составе генератора 80-6000 МГц, блока мониторинга объекта, трехканального модуля измерения мощности, коммутатора и переключателя; • Усилители мощности до 6 ГГц (TESEQ с выходной мощностью до 100 Вт);; • Излучающие антенны (0.08-6 ГГц), GTEM-ячейки (TESEQ, 10 кГц- 20 ГГц), реверберационные камеры (TESEQ, в диапазоне 0.5-18 ГГц); • Принадлежности (коммутаторы, ответвители, измерители мощности – по подбору); • Программные приложения (общее и специализированные – под конкретные требования и конфигурации) |
| Правила 10 ЕЭК ООН | До 30 (75 -для устройств) В/м, в диапазоне 0.02-2 ГГц, АМ (1 кГц, 80 %) с сохранением максимумов | |
| DO 160, раздел 20 (п.2) | До 200 (300) В/м, в диапазоне 100 МГц -18 ГГц, меандр и ИМ с сохранением максимумов | <ul style="list-style-type: none"> • Генератор (например, Keysight, N5183A с опциями до 20 ГГц и модуляцией); • Усилители мощности до 3 ГГц (TESEQ с выходной мощностью до 1 кВт), до 18 ГГц (IFI, с выходной мощностью до 100 Вт в диапазоне до 18 (40) ГГц); • Излучающие антенны (0.03-40 ГГц), GTEM -ячейки (TESEQ, 10 кГц- 20 ГГц), реверберационные камеры (TESEQ, в диапазоне 0.5-18 ГГц); • Принадлежности (коммутаторы, ответвители, измерители мощности – по подбору); • Программные приложения (общее и специализированные – под конкретные требования и конфигурации) |
| MIL STD 461F, RS103 | До 200 В/м, в диапазоне 2 МГц -18 (40) ГГц, меандр и ИМ с сохранением максимумов | |

Лазарев Д.В.
АО «ЦНИИ «Курс», г. Москва, Россия,
Тел.: +7(495) 365-65-39, Факс: +7(495) 365-43-14,
E-mail: qsk@mail.ru

ТЕХНОЛОГИЯ И МОБИЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ ДЛЯ МОНИТОРИНГА ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ МОРСКИХ ОБЪЕКТОВ В ВЕРХНЕЙ ПОЛУСФЕРЕ

Функционирование любых сложных объектов и сооружений, в том числе морского базирования, оснащённых радиоэлектронными средствами различного назначения, сопровождается генерацией многих физических полей, в том числе и электромагнитных (ЭМП), в верхней полусфере. Каждый такой объект имеет свой, характерный только для него, портрет физических полей. Постоянный мониторинг портретов физических полей позволяет контролировать общее состояние работоспособности объектов и их оборудования.

Особое место среди физических полей объектов занимают первичные ЭМП, создаваемые объектовыми источниками излучения электромагнитной энергии, их производные, образующиеся вследствие переизлучения, источники искрообразования и непосредственно влияющие на качество обеспечения электромагнитной совместимости объектовых радиоэлектронных средств (ЭМС РЭС) и электромагнитную безопасность (ЭМБ) в отношении биологических объектов и технических средств [1].

Для устранения недостатков, присущих стандартным способам измерений параметров ЭМП (универсальные наземные мобильные системы мониторинга ЭМП радиочастот, летающие лаборатории на базе самолетов), рассматриваемым в контексте измерений параметров ЭМП крупномасштабных морских объектов, а также учёта особенностей эксплуатации ТОМБ был разработан оригинальный способ измерений параметров физических полей верхней полусферы морских объектов [2]. Данный способ основан на использовании морского автоматизированного воздушно-радиоизмерительного комплекса с применением вертолётного беспилотного летательного аппарата (БПЛА), в том числе привязного типа. Способ предназначен для определения параметров интегрального или парциального электромагнитного поля, создаваемого радиотехническими средствами морского объекта, в локальных областях и точках пространства. К параметрам интегрального электромагнитного поля относятся энергетические, частотные, фазовые, временные и поляризационные параметры ЭМП.

Технический результат рассматриваемого изобретения заключается в повышении точности измерений, снижении затрат на их проведение, доступности и простоты проведения для проектантов и эксплуатантов исследуемого морского объекта. Указанный результат достигается за счёт того, что в заявленном способе фиксируются значения параметров ЭМП крупногабаритного морского объекта, без вывода его из эксплуатации, для любых положений чувствительных элементов радиоизмерительного комплекса по пеленгу, углу места и дальности по отношению к исследуемому морскому объекту и отсутствует необходимость применения сложных дорогостоящих операций с применением летающих лабораторий и наземных измерительных комплексов.

На рис. 1 показано взаимодействие различных компонентов измерительной системы, обеспечивающей реализацию первого варианта предлагаемого способа, где 1 – измеряемое ЭМП крупногабаритного морского объекта; 2 – источник измеряемого физического поля, например, антенна радиолокационной станции; 3 – крупногабаритный морской объект (например, корабль); 4 – управляемое беспилотное вертолётное аэроподъёмное устройство (АПУ) привязного типа, содержащее управляемый с внешней ЭВМ радиоизмерительный комплекс ЭМП (элементы радиоизмерительного комплекса); 5 – совокупность электрических кабелей, обеспечивающих работу валов электродвигателей, связанных с воздушными винтами аэроэлектроподъёмного устройства (АПУ), обеспечивающих электропитание радиоизмерительного комплекса, обеспечивающих управление работой радиоизмерительного комплекса (также возможна реализация управления как АПУ, так и радиоизмерительным комплексом по беспроводным радиоканалам, однако такое техническое решение необходимо обосновать с позиций ЭМС РЭС); 6 – контейнер для транспортировки АПУ, содержащий также, например, рабочее место оператора, проводящего измерения, содержащий, в

свою очередь, по меньшей мере управляющую ЭВМ; 7 – самоходный подвижный морской объект (например, катер). При этом рассматриваемый вариант данного способа может осуществляться как при стоянке исследуемого морского объекта, так и при его движении.

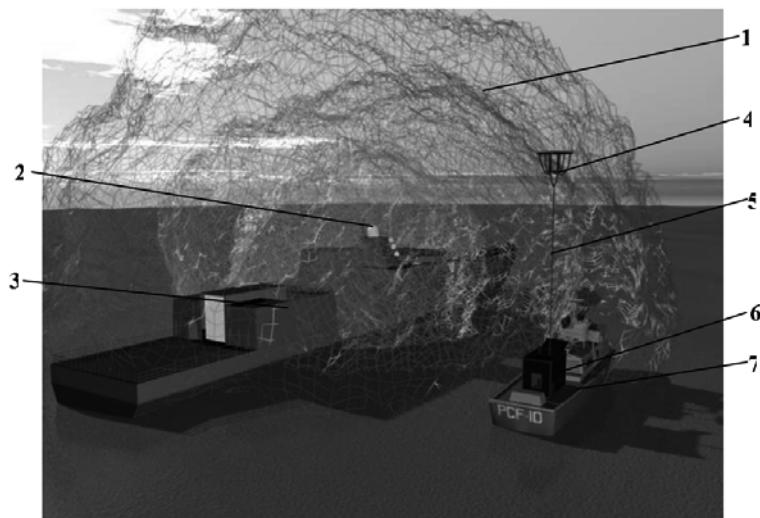


Рис. 1. Реализация разработанного способа измерения по первому варианту для корабля

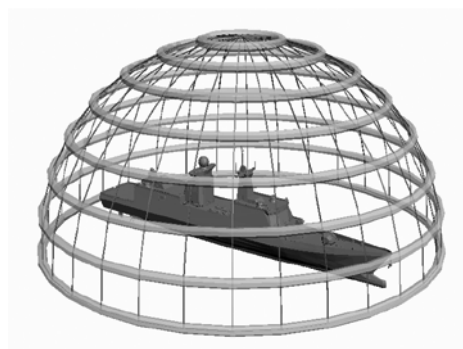


Рис. 2. К пояснению методики проведения испытаний ТОМБ

При этом оптимальным с точки зрения временных, материальных ресурсов и трудоёмкости является проведение испытаний ТОМБ по предлагаемому способу по следующей методике: определяется необходимый радиус удаления от исследуемого ТОМБ; определяется необходимая высота подъёма АПУ с радиоизмерительным комплексом (элементами радиоизмерительного комплекса); выдерживая заданную высоту подъёма АПУ, самоходный морской объект, например катер, перемещается с требуемой скоростью по окружности выбранного радиуса, и проводятся измерения параметров ЭМП, при этом результатами измерений окажутся значения параметров ЭМП на всех азимутах окружности при фиксированных дальности и угле места; определяют следующую интересующую высоту подъёма АПУ с радиоизмерительным комплексом (элементами радиоизмерительного комплекса) и повторяют указанные действия; таким образом удаётся получить в сжатые сроки большой объём результатов испытаний для геометрического места точек в виде концентрических окружностей, по которым возможно построить электромагнитный портрет исследуемого ТОМБ (рис. 3).

Для реализации разработанной технологии мониторинга ЭМП верхней полусферы кораблей и иных сложных технических объектов морского базирования необходимо было разработать программное обеспечение визуализации результатов измерений параметров ЭМП верхней полусферы кораблей и иных объектов при их испытаниях. Для решения этой задачи было разработано программное обеспечение по визуализации результатов натуральных испытаний морских объектов «Монитор ЭМО». Внешний вид программного обеспечения представлен на рис. 3.

Исходными данными для работы программного обеспечения является трехмерная модель исследуемого морского объекта с размещёнными на нём антенными постами радиотехнических систем.

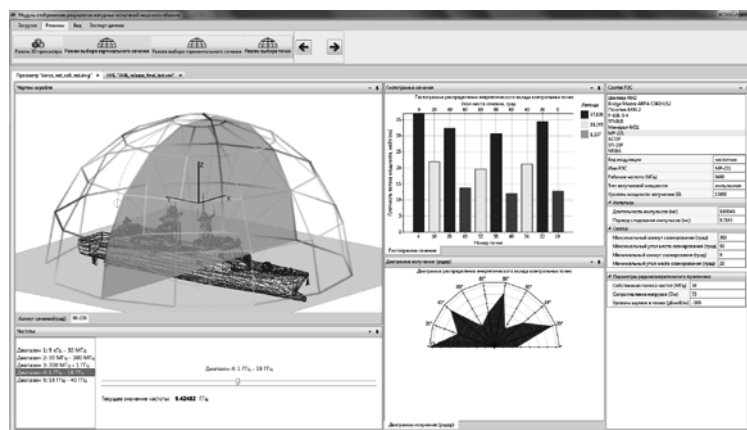


Рис. 3. Внешний вид программы «Монитор ЭМО»

Для оценки и контроля ЭМП в верхней полусфере кораблей и внедрения современного инструмента в интересах проектантов, строителей и эксплуатантов, посредством которого должна решаться задача обеспечения совместного функционирования совокупности РЭС различного назначения без создания недопустимых взаимных помех был разработан опытный образец мобильного измерительно-аналитического комплекса (МИАК) нового поколения. Технический облик МИАК выполнен с использованием двух вариантов исполнения аэромобильного модуля: на основе применения беспилотного летательного аппарата привязного типа и с использованием подъемно-мачтового устройства.

Созданный опытный образец МИАК и специализированное программное обеспечение позволяет автоматизировать процесс измерения, обработки и анализа электромагнитных характеристик исследуемого ТОМБ и существенно уменьшить работы по реализации организационных и технических решений для обеспечения ЭМС РЭС и ЭМБ на ТОМБ.

Литература

1. Лазарев Д.В., Крутько А.Н. К вопросу измерения электромагнитных полей верхней полусферы крупномасштабных морских объектов // Проблемы развития корабельного вооружения и судового радиоэлектронного оборудования. – 2013г. - №2 – С. 46–69.
2. Патент РФ на изобретение № 2481601. Способ измерения параметров физических полей верхней полусферы морского объекта. Авторы: Клячко Л.М., Лазарев Д.В., Седов В.А., Чуриков А.Ю., Горчакова Е.А. // Бюллетень изобретений № 13 от 10.05.2013 г., приоритет от 04.08.2011 г.

Лазарев Д.В.
АО «ЦНИИ «Курс», г. Москва, Россия,
Тел.: +7(495) 365-65-39, Факс: +7(495) 365-43-14,
E-mail: qsk@mail.ru

ТЕХНОЛОГИЯ РАСЧЁТНОЙ ОЦЕНКИ СТОЙКОСТИ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ К СВЕРХКОРОТКИМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ ИЗЛУЧЕНИЯМ БОЛЬШОЙ МОЩНОСТИ

Проблема обеспечения стойкости радиотехнических систем различного назначения (радиолокация, навигация, связь) к преднамеренным мощным электромагнитным воздействиям (МЭМВ) актуальна для всех современных радиоэлектронных комплексов гражданского и специального назначения. Острая необходимость обеспечения радиоэлектронной защиты (РЭЗ) современных многофункциональных радиоэлектронных комплексов обусловлена высокой степенью интеграции основных видов базовых несущих конструкций радиоэлектронного оборудования, начиная от шкафов и стоек до блоков и функциональных узлов, вплоть до компонентного уровня электронной элементной базы. При этом существенно увеличивается подверженность к различным видам отказов таких систем при влиянии мощного внешнего электромагнитного воздействия, в том числе искусственного происхождения. Функционирование разрабатываемых радиоэлектронных систем в сложной электромагнитной обстановке (ЭМО) становится более традиционным условием их эксплуатации, особенно это характерно для подвижных объектов и сложных наземных инфраструктурных объектов. Тенденция к ужесточению эксплуатационной ЭМО, а также возможная вероятность преднамеренных МЭМВ приводит к выдвиганию повышенных требований к РЭЗ и анализу стойкости, в первую очередь, особо ответственных стратегических радиотехнических объектов специального назначения [1, 2].

До настоящего времени основным средством подтверждения характеристик стойкости радиоэлектронного оборудования к воздействию как кондуктивных, так и излучаемых МЭМВ являлись результаты лабораторных, полигонных или натуральных испытаний образцов техники. Помимо того, что такие виды исследований являются трудоёмкими, сложными и дорогостоящими, **проблема интерпретации** протоколов результатов таких испытаний является отдельной самостоятельной задачей, решение которой не всегда однозначно.

Необходимость более глубокого исследования процессов, происходящих при преднамеренных МЭМВ на радиоэлектронные средства, требует применения аналитических и численных методов их описания. Расчётная оценка стойкости (РОСт) позволяет на ранних этапах проектирования радиоэлектронных систем прогнозировать их предельно-допустимые уровни (ПДУ) по отношению к МЭМВ. Наличие таких оценок позволит на основных этапах жизненного цикла радиоэлектронного средства оценить **качество** проведения этапов проектирования, отладки и изготовления образцов продукции и принятых организационно-технических, конструктивно-технологических и структурно-схемотехнических решений, направленных на достижение заданного уровня радиоэлектронной защиты. Применение РОСт актуально не только для перспективных проектируемых радиоэлектронных средств, но и для поставляемых или эксплуатируемых серийных образцов.

Рассматривая влияние излучаемых МЭМВ на радиотехнические системы различного назначения необходимо в первую очередь рассматривать такое влияние через антенно-фидерные тракты таких систем, как наиболее уязвимых к данному виду воздействий.

Разработанная технология расчётно-оценочной экспертизы (РОЭ) стойкости радиотехнических систем различного назначения представляет собой поэтапный анализ различных уровней (контуров) рассматриваемого процесса воздействия мощного электромагнитного фактора: 1. **Сигнальный контур** – анализ во временной области электромагнитного возмущения (мгновенной мощности), выдаваемого источником электромагнитного воздействия, с оценкой его параметров (форма, длительность, частота следования, длительность фронта, длительность среза, пиковое значение, время воздействия); 2. **Частотный контур** – анализ в частотной области электромаг-

нитного возмущения, выдаваемого источником электромагнитного воздействия, с применением прямого быстрого преобразования Фурье (БПФ) для получения амплитудно-частотной (АЧХ) и фазо-частотной (ФЧХ) зависимости спектральной плотности мощности сигнала; 3. **Фидерный контур источника** – анализ параметров фидерного устройства (в том числе составного) источника электромагнитного воздействия с оценкой его АЧХ и ФЧХ коэффициента передачи и преобразования транслируемого электромагнитного возмущения; 4. **Антенный контур источника** – анализ параметров антенного устройства источника электромагнитного воздействия с оценкой его АЧХ и ФЧХ коэффициента передачи и преобразования излучаемого электромагнитного возмущения; 5. **Траекторный контур** – анализ параметров трассы распространения электромагнитного возмущения с оценкой её АЧХ и ФЧХ коэффициента передачи и преобразования излучаемого электромагнитного возмущения; 6. **Антенный контур рецептора** – анализ параметров антенного устройства рецептора электромагнитного воздействия с оценкой его АЧХ и ФЧХ коэффициента передачи и преобразования наводимого электромагнитного возмущения; 7. **Фидерный контур рецептора** – анализ параметров фидерного устройства (в том числе составного) рецептора электромагнитного воздействия с оценкой его АЧХ и ФЧХ коэффициента передачи и преобразования транслируемого электромагнитного возмущения; 8. **Защитный контур** – анализ параметров схемотехнических защитных устройств от мощных электромагнитных воздействий с оценкой его АЧХ, ФЧХ и переходной характеристики (ПХ) коэффициента передачи и преобразования транслируемого электромагнитного возмущения; 9. **Компонентный контур** – анализ параметров входных цепей и компонентов рецептора с оценкой их предельно-допустимых уровней (ПДУ) стойкости к мощным электромагнитным воздействиям (анализ во временной области электромагнитного возмущения, дошедшего до входных цепей и компонентов рецептора, с применением обратного быстрого преобразования Фурье (БПФ)).

По разработанной технологии и научно-методическому обеспечению было разработано специализированное исследовательское программное обеспечение (СИПО) (рис. 1, 2).

По итогам проведённых исследований был сделан ряд заключений. Наиболее опасным является биполярный сверхкороткий электромагнитный импульс наносекундного диапазона в виде затухающего по экспоненте синуса, излучаемый пирамидальной рупорной антенной. Наименее эффективным является униполярный сверхкороткий электромагнитный импульс наносекундного диапазона в виде полусинуса, излучаемого зеркальной параболической антенной. Наиболее стойким к МЭМВ из рассмотренных является приёмопередатчик радиосвязи ОВЧ диапазона с вибраторной антенной. Наименее стойким к МЭМИ из рассмотренных является приёмопередатчик спутниковой связи СВЧ диапазона с зеркальной параболической антенной. Одними из определяющих факторов электромагнитной стойкости являются коэффициент усиления антенных устройств и полоса пропускания приёмников.

Преимуществом предлагаемого подхода к расчётной оценке стойкости (РОСт) радиотехнических устройств к мощным преднамеренным электромагнитным воздействиям является возможность анализа влияния каждого контура на прохождение рассматриваемого электромагнитного процесса и оценка их вклада в амплитудно-фазо-частотное преобразование структуры исследуемого электромагнитного возмущения. Преимуществом предлагаемого подхода к получению базы данных расчётных ПДУ относительно излучаемых МЭМВ для исследуемых радиоэлектронных систем является возможность получения ряда таких оценок при вариации многочисленных видов и сочетаний исходных данных, относящихся как к МЭМВ (длительность фронта, пиковое значение, частота следования), так и к исследуемой радиоэлектронной системе (параметры фидерного тракта, характеристики антенного устройства).

Практическая значимость разрабатываемой технологии и методического обеспечения каждого её этапа заключается в возможности на ранних этапах проектирования радиоэлектронных средств на основе расчётно-оценочной экспертизы их стойкости к потенциальным мощным преднамеренным электромагнитным воздействиям обосновать организационно-технические, конструктивно-технологические и структурно-схемотехнические решения, направленные на достижение заданного уровня радиоэлектронной защиты, а также существенно улучшить разработку программы и методик лабораторных, полигонных и натурных испытаний на этапе контрольно-инструментальной экспертизы (КИЭ) стойкости радиоэлектронных устройств к мощным преднамеренным электромагнитным воздействиям и интерпретации протоколов таких испытаний.

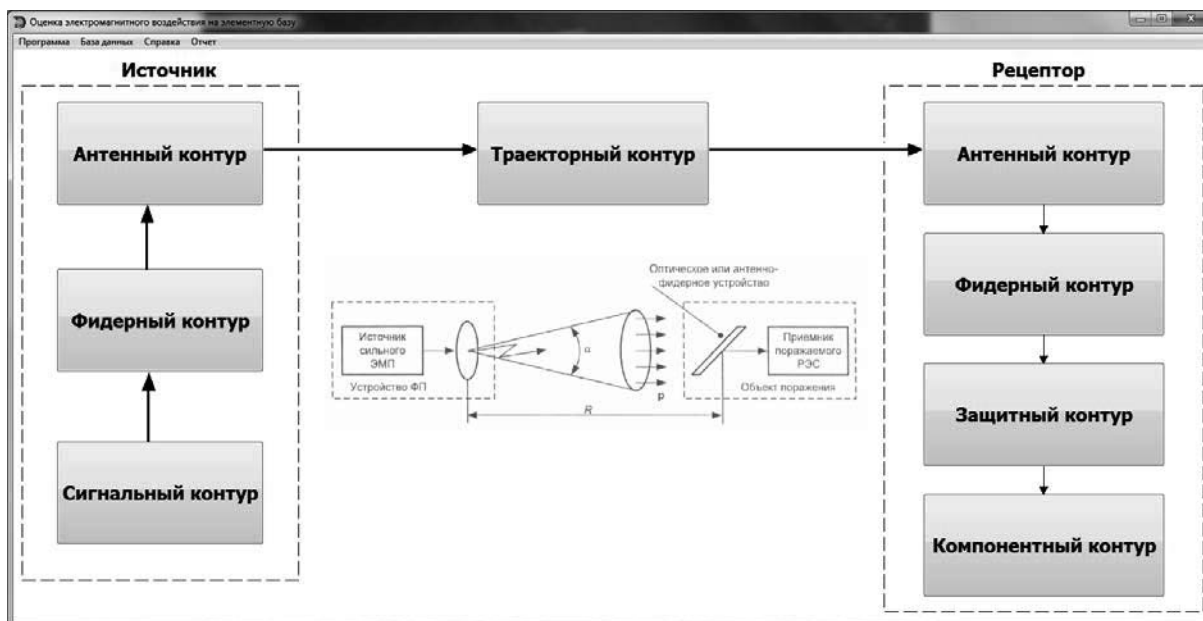


Рис. 1. Внешний вид главной формы разработанного СИПО

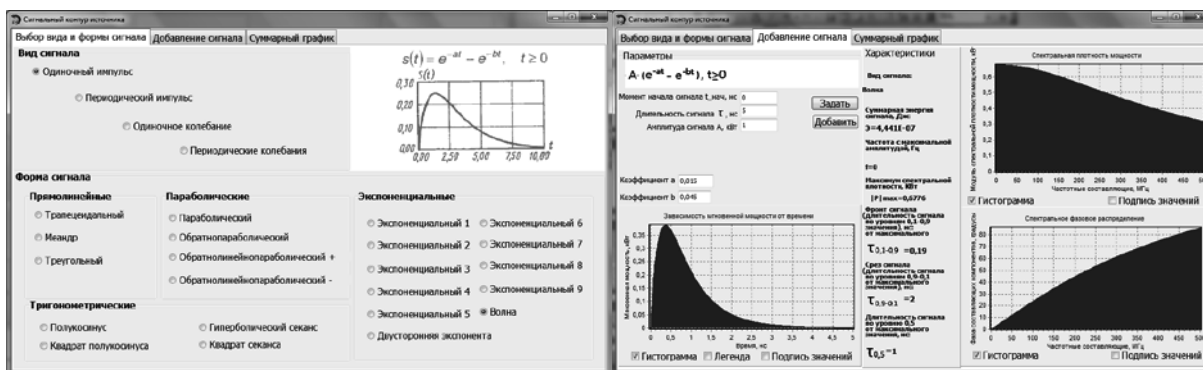


Рис. 2. Внешний вид формы сигнального контура разработанного СИПО

Литература

1. Балук Н.В., Кечиев Л.Н., Степанов П.В. Мощный электромагнитный импульс: воздействие на электронные средства и методы защиты. – М.: ООО «Группа ИДТ», 2007. – 478 с.
2. ГОСТ Р 51317.1.5-2009 Совместимость технических средств электромагнитная. Воздействие электромагнитные большой мощности на системы гражданского назначения. Основные положения.

Вацков П.Ю.

ОАО «НИИ Микроприборов им. Г. Я. Гуськова», г. Москва, Россия

Тел.: (499) 710-10-29, E-mail: p.vatskov@gmail.com

ОСОБЕННОСТИ НОРМИРОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ ЭМС МОДУЛЕЙ БОРТОВОЙ АППАРАТУРЫ МАЛЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Актуальность рассмотрения темы обусловлена большим разнообразием и значительными существенными отступлениями от действующих стандартов требований технических заданий (ТЗ) к ЭМС объектов разработки. ТЗ задают четыре категории испытаний на ЭМС:

- эмиссия электромагнитных помех;
- устойчивость к воздействию электромагнитных помех;
- эмиссия кондуктивных помех;
- устойчивость к воздействию кондуктивных помех.

Требования стандартов нарушаются в двух аспектах: в перечне и названиях (определениях) параметров; в численных значениях устанавливаемых норм.

Нами было рассмотрено более 10 проектов ТЗ на разработку блоков бортовой аппаратуры космических аппаратов (КА). Эти проекты ТЗ содержат более 20 различных терминов, отсутствующих в действующем основополагающем стандарте ГОСТ Р 50397-2011. В то же время принятые в стандарте нормируемые требования (норма электромагнитной эмиссии, норма устойчивости к электромагнитным помехам, уровень электромагнитной совместимости) не задаются, несмотря на то, что без внесения их в ТЗ невозможно создать методы контроля ЭМС, позволяющие оценить взаимное влияние модулей бортовой аппаратуры.

Особенность требований ЭМС отдельных блоков КА в том, что необходимо устанавливать параметры ЭМС каждого блока относительно других блоков того же уровня иерархии (межблочная ЭМС) и ЭМС набора модулей внутри блока числом от 6 до 20 (внутриблочная ЭМС). При этом нормы допустимых уровней помехоустойчивости и эмиссии следует устанавливать исходя из конструкции блока, расстояния между модулями, уровня электромагнитной совместимости в пространстве между блоками КА. Минимальный перечень заданных норм может содержать:

- уровень ЭМС в межблочном пространстве (уровень межблочной ЭМС);
- уровень ЭМС внутри блока;
- норму эмиссии в межблочном пространстве;
- норму эмиссии модулей внутри блока;
- уровень помехоустойчивости модулей внутри блока.

В таком случае уровень помехоустойчивости блока в целом нормированию не подлежит.

Заслуживает внимания задание для каждой точки рабочего объема КА запаса по ЭМС. Это тем более актуально при задании нормы эмиссии только для стандартного расстояния $r = 1$ м от источника, как это рекомендуется в стандарте США MIL-STD-461F. Напряженность поля (электрического, магнитного) возрастает по мере приближения к источнику эмиссии. Таким образом, если расстояние от источника помех до рецептора составляет при плотной упаковке модулей в блок 0,02–0,05 м, норма эмиссии, заданная для $r = 1$ м, не позволит оценить влияние источника на находящийся вблизи объект. Задание запаса по ЭМС для каждого модуля внутри блока сделает возможным создание оперативных методов контроля ЭМС. Оперативные методы позволят проводить испытания по ЭМС и вносить коррективы в конструкцию модулей по мере их изготовления. Задание норм эмиссии на расстоянии 0,02–0,05 м от источника позволит не задействовать при испытаниях экранированную камеру.

Сарылов О.В. (Россия, г.Москва, ФГУП «ВНИИА»)

Сарылов В.Н. (Россия, г.Москва, АО «ВНИИАЭС»)

ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ОБСТАНОВКА В РАЙОНЕ РАЗМЕЩЕНИЯ БЕЛОЯРСКОЙ АЭС. ПОТЕНЦИАЛЬНОЕ ВЛИЯНИЕ ЭМО НА БЕЗОПАСНОСТЬ

В процессе эксплуатации оборудование систем важных для безопасности атомных станций подвергается внешним электромагнитным воздействиям природного и техногенного происхождения, в частности:

- радиочастотным электромагнитным полям, излучаемым радарными установками транспортных средств, например, судовыми установками в акватории района сооружения энергоблоков АЭС, радиолокационными станциями слежения оборонного назначения или физической охраны территории АЭС, а также излучениям мобильных или стационарных абонентских радиостанций двухсторонней радиотелефонной связи персонала АЭС, в том числе с внешними службами оперативной поддержки эксплуатации энергоблоков АЭС;

- магнитным и электрическим полям промышленной частоты, импульсным и затухающим полям, генерируемым как молниевыми разрядами, так и силовым оборудованием электрических подстанций, а также коммутационными процессами в электрических сетях и установках низкого, среднего и высокого напряжения;

В соответствии с федеральными нормами и правилами [1,2] для обеспечения безопасности объектов использования атомной энергии (ОИАЭ) должна гарантироваться их устойчивость при внешних воздействиях. Системы и элементы ОИАЭ, важные для безопасности, должны обладать стойкостью к внешним воздействиям от процессов, явлений и факторов природного и техногенного происхождения, которыми может характеризоваться площадка размещения ОИАЭ.

При внешних воздействиях на ОИАЭ должны предотвращаться недопустимые с точки зрения выполнения функций безопасности повреждения или отказы систем и элементов, важных для безопасности.

Частота возникновения электромагнитных воздействий и их амплитуды должны выявляться как в окружающей местности, так и на площадке сооружения АЭС для оценки опасности их влияния на безопасность АЭС.

По результатам обследований электромагнитной обстановки проводится выбор мер по инженерной защите как оборудования, так и зданий и сооружений ОИАЭ, проводится подтверждение соответствия систем и элементов важных для безопасности требованиям нормативных документов, проводится классификация по степеням опасности электромагнитных воздействий на функционирование оборудования, классификация площадки размещения АЭС и электромагнитной обстановки в помещениях размещения оборудования и систем важных для безопасности.

В докладе рассматриваются результаты измерений параметров радиочастотных электромагнитных полей, магнитных полей промышленной частоты, характеристики интенсивности грозовой деятельности и параметры грозовой электромагнитной обстановки в окружающей местности и на территории сооружения энергоблока № 4 Белоярской АЭС, проводится классификация по степеням опасности воздействий внешнего радиочастотного электромагнитного поля, магнитного поля промышленной частоты и молниевых разрядов на эксплуатационную надежность систем важных для безопасности, проводится классификация площадки сооружения энергоблока № 4 и анализ влияния перечисленных выше видов воздействий на безопасность эксплуатации энергоблока № 4 Белоярской АЭС.

1 Процедуры обследования электромагнитной обстановки и интенсивности грозовой деятельности в районе размещения Белоярской АЭС

Измерение максимальных уровней напряженности радиочастотного электромагнитного поля в полосе частот от 9 кГц до 35 ГГц [4] и магнитного поля промышленной частоты осуществлялось в районе и на территории сооружения энергоблока № 4 Белоярской АЭС.

- **Проведение измерений параметров ЭМО в окружающей местности, на площадке сооружения и в помещениях энергоблока № 4**

Измерения максимальных значений уровней напряженности радиочастотного электромагнитного поля в полосе частот от 9 кГц до 35 ГГц осуществлялось на удалении 5 км [2] от энергоблока в селе Каменка и на противоположном берегу водохранилища, на площадке сооружения энергоблока № 4 на удалении от 20 до 150 м от стен ГК и в помещениях размещения оборудования ТПТС, КЭ СУЗ, ИЧ СУЗ, АЗ-ПЗ, УСБТ, СВБУ и БЩУ на различных отметках по высоте ГК с различных сторон ГК по азимуту.

В процессе работ осуществлялась фиксация GPS-координат точек измерения излучений для определения их местоположения по азимуту

Целью измерений являлось определение максимальных значений уровней напряженности радиочастотного электромагнитного поля снаружи и внутри ГК для оценки эффективности экранирующих свойств стен здания ГК с учетом выполненных инженерных решений на момент измерений.

- Проведение измерений магнитных полей промышленной частоты на площадке энергоблока № 4 вблизи главного корпуса

Измерения максимальных значений уровней напряженности магнитного поля промышленной частоты [5] осуществлялось на расстоянии от 10 м до 100 м от стен здания ГК.

Целью измерений являлось определение максимальных значений уровней напряженности магнитного поля промышленной частоты.

- Оценка интенсивности грозовой деятельности в районе размещения Белоярской АЭС

Целью работ являлся поиск и представление информации по интенсивности грозовой деятельности в районе размещения энергоблока № 4 Белоярской АЭС по результатам исследований, опубликованных в открытой литературе за 2007-2009гг., а также информации о параметрах молниевых разрядов по результатам проведенных измерений с метеостанций г. Екатеринбурга, г. Каменск-Уральский и Верхнее Дуброво.

2 Результаты измерений параметров ЭМО

Устойчивость оборудования и систем важных для безопасности к радиочастотному электромагнитному полю в полосе частот до 6 ГГц нормируется стандартом [6]. В этом же диапазоне частот проводится оценка эффективности ослабления наружного радиочастотного поля стенами здания ГК для подтверждения соответствия оборудования и систем важных для безопасности нормируемым требованиям устойчивости к радиочастотному полю с использованием информации о реальной ЭМО.

Устойчивость оборудования и систем важных для безопасности АЭС в диапазоне частот от 6 ГГц до 35 ГГц в настоящее время не нормируется современной нормативной базой.

Для приведенного выше исходного состояния энергоблока № 4 проведенные измерения параметров ЭМО в полосе частот от 9 кГц до 150 кГц и от 18 ГГц до 35 ГГц показали, что сигналы от возможных источников радиочастотных излучений в окружающей местности и на площадке размещения энергоблока № 4 отсутствуют и показания измерительной аппаратуры находятся на уровне ее собственных шумов. Поэтому не представилось возможным провести оценку эффективности ослабления наружного радиочастотного поля стенами здания ГК в этих диапазонах частот.

Обобщенная информация по ослаблению стенами здания ГК сигналов внешнего радиочастотного поля, например, в помещении размещения оборудования УСБТ приведена в табл. 1.

Измерения значений напряженностей импульсных магнитных полей и магнитных полей промышленной частоты вокруг здания ГК при отсутствии смонтированного силового электрооборудования, высоковольтных выключателей и разъединителей на ОРУ приведены в табл. 2 и не превышают значения 0,1 А/м.

Параметры молниевых разрядов в районе размещения Белоярской АЭС измерялись метеостанциями, расположение которых приведено на рис. 1.

В табл. 3 приведена плотность молниевых разрядов на квадратный километр на различных удалениях от Белоярской АЭС, зарегистрированных системами «Веря-М» и пунктами наблюдения ПН1 и ПН2.

В табл. 4–6 приведена информация о характеристиках грозовой деятельности в районе размещения Белоярской АЭС: среднее число дней с грозой, наибольшее число дней с грозой, средняя продолжительность гроз по данным метеостанций.

Таблица 1

| Помещение УСБТ (2UBR07 231) - восточная сторона ГК | | | |
|----------------------------------------------------|------------------|--------------|------------------|
| Частота, МГц | Затухание, дБмкВ | Частота, МГц | Затухание, дБмкВ |
| 10 | 25 | 190 | 20 |
| 12 | 15 | 420 | 30 |
| 15 | 30 | 430 | 30 |
| 22 | 15 | 450 | 35 |
| 60 | 10 | 470 | 25 |
| 70 | 15 | 480 | 35 |
| 90 | 15 | 870 | 15 |
| 100 | 20 | 900 | 40 |
| 120 | 20 | 950 | 50 |
| 130 | 15 | 1700 | 20 |
| 170 | 35 | 2300 | 20 |

Таблица 2

| Напряженность магнитного поля вблизи ГК | | | |
|-----------------------------------------|---------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|
| № точек по схеме | Координаты точек | Максимальные значения напряженности магнитного поля промышленной частоты (50Гц), А/м вертикальная/горизонтальная | Погрешность измерений, % |
| «Точка 5» | 56°51'34"с.ш., 61°19'16"в.д. | $6,78 \cdot 10^{-3} / 7,5 \cdot 10^{-3}$ | ±15% |
| «Точка 8» | 56°51'36"с.ш., 61°19'23"в.д. | $6,49 \cdot 10^{-3} / 6,58 \cdot 10^{-3}$ | ±15% |
| «Точка 10» | 56°51'34"с.ш., 61°19'32"в.д. | $6,2 \cdot 10^{-3} / 6,2 \cdot 10^{-3}$ | ±15% |
| «Точка 12» | 56°51'28"с.ш., 61°19'22"в.д. | $19,6 \cdot 10^{-3} / 41,4 \cdot 10^{-3}$ | ±15% |



1 - город Заречный; 2 - мс. Верхнее Дуброво; 3 - мс. Артемовский; 4 - мс. Екатеринбург; 5 - мс. Каменск-Уральский; 6 - мс. Кольцово; 7 - мс. Сысерть

Рис. 1. Карта района с указанием расположений метеостанций

Таблица 3

Плотность молниевых разрядов на км² на различных удалениях от центра БАЭС для этих же ПН

| Год | 2007 | | 2008 | | | 2009 | | |
|---------------------------------------------------------------------------|-------|------|-------|-------|------|-------|-------|-------|
| Наименование ПН | Верея | ПН1 | Верея | ПН1 | ПН2 | Верея | ПН1 | ПН2 |
| Плотность МР на км ² в квадрате со сторонами $r \times r$, км | | | | | | | | |
| 10 км | 0,96 | 0 | 1,16 | 0,16 | 0,04 | 0,24 | 0 | 0,04 |
| 20 км | 0,72 | 0,02 | 1,27 | 0,09 | 0,12 | 0,17 | 0,02 | 0,03 |
| 40 км | 0,56 | 0,04 | 1,645 | 0,135 | 0,09 | 0,18 | 0,025 | 0,012 |

Таблица 4

Среднее число дней с грозой для БАЭС

| Станция | Месяц | | | | | | | | од |
|---------|-------|-----|---|----|-----|------|----|------|----|
| | III | IV | V | VI | VII | VIII | IX | X | |
| БАЭС* | | 0,2 | 3 | 8 | 9 | 5 | 2 | 0,03 | 26 |

* Грозы наблюдались в ноябре- 0,1 дня и в декабре- 0,03 дня.
 ** То же в ноябре и в декабре по 0,03 дня.

Таблица 5

Наибольшее число дней с грозой по БАЭС

| Станция | Месяц | | | | | | | | | | Год |
|---------|-------|----|---|----|-----|------|----|---|----|-----|-----|
| | III | IV | V | VI | VII | VIII | IX | X | XI | XII | |
| БАЭС | | 2 | 8 | 14 | 18 | 11 | 6 | 1 | 1 | 1 | 41 |

Таблица 6

Средняя продолжительность гроз (в часах)

| Станция | Месяц | | | | | | | | | Год | В день с грозой |
|---------|-------|-----|------|------|------|-----|------|----|-----|------|-----------------|
| | IV | V | VI | VII | VIII | IX | X | XI | XII | | |
| БАЭС | 0,3 | 4,6 | 15,6 | 18,6 | 10,8 | 1,6 | 0,01 | . | . | 51,4 | 1,7 |

Примечание – Точка (.) означает, что гроза отмечалась как явление без указания продолжительности.

| Станция | Продолжительность грозы в день с грозой | | |
|---------|-----------------------------------------|--------------------------|------------|
| | средняя | максимальная непрерывная | дата |
| БАЭС | 1,5 | 18,8 | 18.08.1941 |

Для проектирования молниезащиты Белоярской АЭС следует использовать информацию, полученную от этих метеостанций за период 2007–2009гг., в соответствии с которой максимальная плотность молниевых разрядов (МР) в районе размещения БАЭС составляет 4,67 разр/км² в год при наибольшем числе дней с грозой 41 день.

По данным спутниковых наблюдений в районе размещения БАЭС плотность МР равна 6 разр/км² в год. Спутниковая система регистрирует как наземные, так и внутри- и межоблачные разряды. Данные системы «Верея» использовались для расчета токов молний:

$$I = E_{\max} \frac{2\pi c^2 \epsilon_0 r}{\nu_0} \quad (7)$$

где I – сила тока, А, E_{\max} – максимальная напряжённость вертикальной компоненты электрического поля, В/м; c – скорость света, $c = 300\,000$ км/с; ϵ_0 – диэлектрическая проницаемость свободного пространства, $\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$ Ф/м; r – расстояние до источника, м; ν_0 – скорость движения импульса тока в наземном разряде, принятая равной 10^8 м/с.

В табл. 7 представлены расчетные значения силы токов МР.

Таблица 7

Сила тока МР в районе БАЭС по данным комплекса «Верея-М»

| Год регистрации | Полярность МР | Мин сила тока, кА | Сред сила тока, кА | Макс сила тока, кА | Кол-во МР | СКО | Медиана, кА |
|-----------------|---------------|-----------------------|-------------------------|--------------------|---------------|------|-------------|
| 2007 | + | 6,3 | 33,2 | 94,8 | 38 | 19,9 | 31,8 |
| 2007 | - | 1,9 | 73,0 | 160,0 | 186 | 36,5 | 67,8 |
| 2008 | + | 5,6 | 48,6 | 160,0 | 51 | 43,2 | 29,8 |
| 2008 | - | 3,7 | 54,8 | 160,0 | 607 | 31,5 | 47,5 |
| 2009 | + | 18,4 | 81,8 | 160,0 | 21 | 44,3 | 75,9 |
| 2009 | - | 1,3 | 52,6 | 149,2 | 53 | 34,1 | 47,2 |
| 2007-2009 | + | 5,6 | 54,5 | 160,0 | 110 | 40,6 | 35,5 |
| 2007-2009 | - | 1,3 | 60,1 | 160,0 | 846 | 33,7 | 50,8 |
| 2007-2009 | все | 1,3 | 57,7 | 160,0 | 956 | 34,7 | 49,5 |
| Год регистрации | Полярность МР | Кол-во МР с I>150, кА | Кол-во во МР с I<20, кА | % случаев I>150 | %случаев I<20 | | |
| 2007 | + | 0 | 10 | 0 | 26,32 | | |
| 2007 | - | 8 | 7 | 4,30 | 3,76 | | |
| 2008 | + | 3 | 12 | 5,88 | 23,53 | | |
| 2008 | - | 16 | 49 | 2,64 | 8,07 | | |
| 2009 | + | 2 | 2 | 9,52 | 9,52 | | |
| 2009 | - | 0 | 5 | 0,00 | 9,43 | | |
| 2007-2009 | + | 5 | 24 | 4,55 | 21,82 | | |
| 2007-2009 | - | 24 | 61 | 2,84 | 7,21 | | |
| 2007-2009 | все | 29 | 85 | 3,03 | 8,89 | | |

Минимальное значение силы тока разряда молнии составляет 1,3 кА, максимальное – 160 кА.

Среднее значение токов разряда молний для разных лет – в пределах от 33 до 82 кА (81%).

3 Анализ результатов измерений и расчетов. Классификация по степеням опасности электромагнитных воздействий

Устойчивость оборудования систем важных для безопасности атомных станций в зависимости от их назначения и влияния на безопасность регламентирована национальным стандартом [6].

Стандарт введен в Регламенты по эксплуатации АЭС Указанием эксплуатирующей организации от 05.09.2002г., УК № 175.

В табл. 8 представлены выборочные требования обеспечения электромагнитной совместимости оборудования АСУ ТП, важного для безопасности БАЭС, установленные в ЧТЗ на подсистемы АСУ ТП.

Таблица 8

Требования обеспечения электромагнитной совместимости подсистем АСУ ТП энергоблока №4 Белоярской АЭС-2

| № п/п | Подсистемы АСУ ТП | Классы безопасности ОПБ-88/97 | Нормы устойчивости/Критерии ГОСТ Р50746-2000 | Установлено в ЧТЗ/ТЗ |
|-------|----------------------------------------------|-------------------------------|----------------------------------------------|-----------------------|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 1 | Система верхнего блочного уровня (СВБУ) | 3Н | III/A | 59085090.33533.015/18 |
| 2 | Управляющая система безопасности по техноло- | 3НУ | IV/A | 59085090.33533.015/34 |

| № п/п | Подсистемы АСУ ТП | Классы безопасности ОПБ-88/97 | Нормы устойчивости/Критерии ГОСТ Р50746-2000 | Установлено в ЧТЗ/ТЗ |
|-------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------------------|-----------------------|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| | гическим параметрам (УСБТ) | | | |
| 3 | Система иницирующей части защит СУЗ (ИЧ АЗ-ПЗ) АКНП АЗ-ПЗ-ПС АПС Шлюз СВБУ | 3У 3У 3НУ 3НУ | III/A | 59085090.33533.015/ |
| 4 | Система управления и защиты реактора (СУЗ) КНФП АЗНФП КТП АЗТП ИЧ АЗ АРМ | 3НУ 3У 3У 3У 3У 3Н | IV/A | 23767649.10702.028 |
| 5 | Комплекс электрооборудования системы управления и защиты (КЭ СУЗ) | 3НУ | IV/A | ТАИК.500051.113 |
| 6 | Управляющая система безопасности аварийного расхолаживания реактора (УСБ АР) | 3У | III/A | 23767649.10702.027 |
| 7 | Система регистрации важных параметров эксплуатации (СРВПЭ) | 3Н | III/A | 812-78/19.06.09 |
| 8 | Система промышленной антисейсмической защиты (СИАЗ-01) | 3У | IV/A | СФЮА.057 |
| 9 | Система контроля и управления механизмами транспортно-технологического оборудования (СУМ ТТО) | 3Н | III/A | Проект ЧТЗ |
| 10 | Система контроля и управления реакторного отделения нормальной эксплуатации (СКУ РО) | 3Н | III/A | Проект ЧТЗ |
| 11 | Система контроля и управления электротехническим оборудованием системы аварийного электроснабжения | 4Н | II/A(B) | 59085090.33533.015/11 |
| 12 | Комплекс вторичных преобразователей натриевого КИП (КВПН) | 3Н | III/A | 59085090.33533.015/ |
| 13 | Система контроля и управления предупредительной защиты системы безопасности (СКУ ПЗ СБ) | 2У | IV/A | Проект ЧТЗ |

Подсистемы АСУ ТП, перечисленные в табл. 8, предназначены для решения задач:
- управления технологическими объектами (ТОУ) систем безопасности;

- управления ТОУ систем нормальной эксплуатации, важных для безопасности;
- управления ТОУ систем нормальной эксплуатации.

Обследования ЭМО в окружающей местности и на территории сооружения энергоблока № 4 Белоярской АЭС показали, что на этапе сооружения при не введенных в действие ОРУ и силовых электроустановках напряженность магнитного поля промышленной частоты, импульсного и затухающего магнитных полей не превышают значений, установленных в табл. 8.

При отсутствии радиолокационных систем физической защиты территории БАЭС напряженность радиочастотного электромагнитного поля в полосе частот от 18 ГГц до 35 ГГц находится на уровне собственных шумов измерительной аппаратуры.

В случае применения на территории ЭБ-4 радиолокационной системы физической защиты территории БАЭС на частоте 35 ГГц следует учитывать, что напряженность электрического поля, создаваемого РЛС на частоте 35 ГГц в ближней зоне на расстоянии 4,5 м от излучателя может составлять 3,9 кВ/м, а на расстоянии 16 м от излучателя – 1,6 кВ/м.

На удалении 450 м напряженность радиочастотного импульса составит 55 В/м. При прохождении радиочастотного излучения через стекло, кирпичную или бетонную стену напряженность воздействующего электрического поля может составлять значения от 40 В/м до 0,3 В/м.

При планировании размещения РЛС в целях физической защиты территории БАЭС следует выполнять мероприятия по исключению возможности попадания сфокусированного луча РЛС как на здание ГК, так и на территорию ОРУ.

Из результатов проведенных измерений следует, что в диапазоне частот от 150 кГц до 18 ГГц на некоторых частотах квазипиковые значения уровней напряженностей радиочастотных электромагнитных помех, создаваемых возможными источниками радиочастотных излучений, в районе и на территории сооружения энергоблока № 4 Белоярской АЭС превышают значения напряженности поля промышленных радиопомех, нормируемых стандартом [7] для оборудования класса А для излучательной помехоэмиссии и приведенных в ЧТЗ на оборудование систем важных для безопасности, поставляемого на энергоблок № 4, но не превышают значений напряженности радиочастотного поля, нормируемых стандартом [6] в части устойчивости к электромагнитным воздействиям оборудования группы исполнения 1 (1 В/м). Следует отметить, что реально зафиксированные уровни радиочастотных помех на действующих энергоблоках АЭС при эксплуатации в штатном режиме с включенным по проектной схеме оборудованием могут достигать значений до 10 В/м.

Анализ результатов ослабления сигналов помех в полосе частот от 0,15 МГц до 18 ГГц стенами здания ГК с учетом классификации степени жесткости ЭМО по таблице Б1 [6] показывает, что помещения размещения оборудования УСБТ, КЭ СУЗ, ИЧ СУЗ, АЗ-ПЗ, СВБУ, БЦУ и ТПТС следует отнести к электромагнитной обстановке средней жесткости в отношении внешних радиочастотных электромагнитных полей и магнитных полей.

Классификация по степеням опасности [2] оценивалась по состоянию измерений параметров радиочастотного электромагнитного поля и магнитного поля промышленной частоты, которые могут возникать в окружающей сооружаемый энергоблок № 4 БАЭС местности от внешних техногенных источников излучений.

По результатам выполненных измерений напряженность радиочастотного поля в диапазоне частот от 80 МГц до 6 ГГц [6] снаружи здания ГК составляет 1,5 В/м, что значительно меньше значений 10 В/м и 30 В/м, приведенных в таблице 8 для оборудования классов безопасности 2 и 3 по ФНП [8]. С учетом затухания в стенах ЭБ-4 напряженность радиочастотного поля от внешних техногенных источников в помещениях размещения систем важных для безопасности будет еще меньше и не окажет влияния на функциональную безопасность, если только подтверждено, например, приемочными испытаниями, соответствие оборудования требованиям электромагнитной совместимости, установленным в ЧТЗ (таблица 8).

Отсутствие на момент проведения анализа информации в виде протоколов испытаний перечисленного выше оборудования не позволяет оценить оперативные запасы [9] по устойчивости этого оборудования к измеренным значениям параметров электромагнитной обстановки.

Следует отметить, что в отсутствии экранирующей сетки системы эквипотенциального заземления эффективность ослабления помех стенами здания ГК ниже, чем установлено нормами в 80–100 дБмкВ.

Проектной документацией предусматривается обеспечение затухания в 40–60 дБмкВ.

На основании п.2.2 ФНП [2] воздействия внешнего радиочастотного поля от возможных источников техногенного излучения в диапазоне частот до 35 ГГц по результатам проведенных измерений [10] на стадии сооружения ЭБ-4 БАЭС можно отнести к III степени опасности, характеризующейся низкими значениями параметров и характеристик в соответствии с исходным состоянием энергоблока на момент проведения измерений и не вызывающей ощутимых последствий для окружающей среды.

Площадку размещения энергоблока № 4 БАЭС можно классифицировать на основании п.2.6.1 [2] классом А, на которой отсутствуют внешние радиочастотные воздействия техногенных источников I и II степеней опасности, характеризующие соответственно особо опасные и опасные явления электромагнитного происхождения, сопровождающиеся ощутимыми последствиями для окружающей среды или катастрофами.

В случае применения на территории размещения ЭБ-4 радиолокационной системы физической защиты территории БАЭС необходимо проводить аналогичный комплекс работ в соответствии с п.6.9 [2] для переклассификации степени опасности и характера территории размещения ЭБ-4 и для выбора оптимального размещения излучателей РЛС. Эти работы необходимо выполнять после полного завершения комплекса работ по сооружению и вводу в эксплуатацию эквипотенциального заземления с соответствующим монтажом экранирующей сетки и экранов. При этом обязательно выполнение дополнительных работ по п.6.20 и п.6.23 [2] по обследованию состояния систем важных для безопасности с целью определения возможности дальнейшей эксплуатации ЭБ-4 Белоярской АЭС.

По результатам проведенных измерений напряженности магнитного поля его воздействие с учетом исходного состояния монтажа электротехнического оборудования и ОРУ также можно отнести к III степени опасности.

Напряженность импульсного магнитного поля при удаленных разрядах молний достигает значения 0,5 А/м, а при разряде в молниеприемник на расстоянии 50 м от РЩ может достигать значения 300 А/м.

Принимая во внимание опыт эксплуатации ОРУ и КРУ на действующей Курской АЭС, а также требования ЧТЗ для систем важных для безопасности БАЭС воздействие магнитных полей промышленной частоты и импульсных магнитных полей, возникающих при удаленных и близких МР, можно отнести к III степени опасности, а площадку размещения энергоблока № 4 БАЭС классифицировать классом А.

- На энергоблоке № 4 БАЭС проектом предусмотрено внедрение системы транкинговой радиосвязи ПСТР01, предназначенной для двухсторонней связи персонала на территории БАЭС и в 30-километровой зоне, включая защищенный пункт управления противоаварийными действиями в г. Заречный. Рабочий диапазон частот, используемый техническими средствами ПСТР01, составляет от 410 МГц до 430 МГц. Оборудование ПСТР01 устанавливается в периодически обслуживаемых и обслуживаемых помещениях ЭБ-4, в том числе в здании реактора и снаружи зданий.

Для оценки влияния излучений ПСТР01, во время сеансов радиосвязи, на эксплуатационную устойчивость оборудования систем важных для безопасности проведены исследования, которые показали, что напряженность радиочастотного поля различна при различном удалении измерительной антенны приемника от излучающей антенны радиостанции ПСТР01 и составляют: 136,64 дБ/мкВ/м на расстоянии 1 м; 126,65 дБ/мкВ/м на расстоянии 3 м; 115,22 дБ/мкВ/м на расстоянии 10 м.

Видно, что при использовании ПСТР01 на расстояниях менее 1 м от оборудования систем важных для безопасности радиочастотное излучение может превысить норму в 140 дБ/мкВ/м, установленную стандартом [6] по устойчивости этих систем.

Поэтому после монтажа ПСТР01 по месту эксплуатации на ЭБ-4 представляется целесообразным выполнить цикл измерений фактических значений напряженности радиочастотного электромагнитного поля в местах штатного использования радиотелефонной связи для выявления степени влияния оборудования ПСТР01 на устойчивость функционирования систем важных для безопасности энергоблока № 4 БАЭС.

Что касается влияния молниевых разрядов, то в период выполнения работ на ЭБ-4 БАЭС отсутствовала грозовая обстановка. При анализе следует учитывать статистические данные от метеостанций. Степень опасности прямых МР с учетом приведенных выше статистических данных о

максимальных значениях силы тока в 160 кА следует внимательно рассмотреть в связи с выполненным подходом проектной организации по реализации концепции эквипотенциального заземления и способом прокладки кабелей управляющей системы безопасности. Предварительный анализ реализации проекта эквипотенциального заземления и прокладки кабелей УСБТ заставляет сделать предположение, что воздействие прямых МР следует отнести к степени опасности II [2], а площадку сооружения энергоблока № 4 БАЭС следует классифицировать классом Б с учетом интенсивности грозовой деятельности в г. Заречный.

В соответствии с основными решениями проектной организации по заземлению и помехозащищенности технических средств важных для безопасности в части защиты от молниевых разрядов, перенапряжений и радиочастотных полей на энергоблоке № 4 предусматривается внешняя молниезащита, в задачи которой входит безопасный отвод токов грозовых разрядов в землю и распределение потенциала по объему грунта, а также внутренняя защита от разрядов молний, направленная на уменьшение вызванных ею электромагнитных полей в пределах защищенной зоны, в которой располагаются и кабельные связи. Для снижения потенциалов, вызываемых токами разряда молний, предусматривается эквипотенциальная поверхность здания ГК в виде сетчатой структуры.

Основной задачей молниезащиты является перехват разрядов молний молниеотводами и разряд токов молний в землю через отводящие спуски.

В соответствии с проектными решениями ЭБ-4 трассы кабелей 1 и 3 каналов УСБТ вынесены из молниезащитных зон здания ГК и проложены в галерее (металлических коробах) на внешней стене вокруг здания реакторного отделения

Обоснований защиты кабелей УСБТ от наводимых молнией электромагнитных полей внутри галереи проектной организацией не приводится, несмотря на имеющуюся информацию о силе тока разрядов молний в районе размещения ЭБ-4, утверждается лишь, что «от прямого удара молний галерея защищена», а также, что «принятые решения обеспечивают больший коэффициент экранирования, чем в случае прокладки кабельных трасс в здании, т.к. сплошной стальной экран несравнимо эффективней арматурной сети здания».

Следует отметить, что вынос кабелей УСБТ из молниезащитных зон здания ГК не обоснован, т.к. галерея на внешней стороне здания вносится в зону молниевых разрядов, а ее заземленные массивные металлические короба являются хорошим «притягивателем» молний. В практике известны многочисленные случаи, когда разряд молний происходил не в наконечник молниеотводов (или в данном случае в крышу или козырек здания ГК), а в середину спусков или в основание молниеотводов. В проектных решениях по выносу кабелей УСБТ из внешней и внутренней зон молниезащиты отсутствует анализ рисков повреждений как кабелей в галерее на внешней стене ГК, так и оборудования УСБТ в здании ГК.

4 Заключение

1. В процессе обследования электромагнитной обстановки в окружающей местности и на площадке сооружения энергоблока № 4 Белоярской АЭС зафиксированы узкополосные максимумы радиочастотных помех на частотах 170, 420, 460, 950, 1800, 2200 МГц в направлении измерений, что соответствует по большей части частотам работы радиопередающих высокочастотных устройств.
2. Измеренные значения радиочастотных помех характеризуются низким уровнем по всему диапазону частот, кроме узкополосных максимумов, отмеченных выше. Этим они отличаются от спектрограмм помех, измеренных на действующих энергоблоках АЭС, для которых характерно наличие помех по всему диапазону частот за счет работающего энергетического оборудования.
3. Суммарная составляющая в диапазоне частот от 100 кГц до 3 ГГц составляет 1,34 В/м, что отражает низкие фоновые значения радиочастотных помех по всему диапазону частот. Для действующих энергоблоков АЭС это значение колеблется от 3 до 10 В/м.
4. Радиочастотные помехи в диапазонах частот от 9 кГц до 150 кГц и от 18 ГГц до 35 ГГц в отсутствие радиолокационных систем физической защиты территории БАЭС находятся на уровне фона измерительной аппаратуры.
5. В диапазоне частот от 150 кГц до 18 ГГц на некоторых частотах квазипиковые значения уровней напряженностей радиочастотных помех превышают значения стандарта по нормированию

эмиссии помех, но не превышают значений, нормируемых по устойчивости оборудования систем важных для безопасности.

6. Напряженность магнитного поля в отсутствии ОРУ и силового оборудования АЭС на момент измерений не превышает значения 0,1 А/м.
7. В отсутствии экранирующей сетки эквипотенциального заземления и незаконченностью экранирования помещений на момент измерений эффективность ослабления помех стенами здания ГК ниже значений, нормированных в проектной документации диапазоном от 40 до 60 дБмкВ.
8. Напряженность радиочастотного поля транкинговой системы радиотелефонной связи персонала АЭС может превышать нормированное значение при использовании ее на удалении от оборудования систем важных для безопасности менее 1 м.
9. По состоянию на момент обследования ЭМО воздействие внешнего радиочастотного поля и магнитного поля промышленной частоты на оборудование систем важных для безопасности можно отнести к III степени опасности, а площадку размещения энергоблока № 4 классифицировать классом А в соответствии с федеральными нормами и правилами в области использования атомной энергии. При применении радиолокационной системы физической защиты территории Белоярской АЭС потребуется переквалификация площадки размещения энергоблока № 4.
10. С учетом проектных решений по выносу кабелей УСБТ из молниезащитной зоны ГК в галерею на наружную стену ГК воздействие молниевых разрядов можно отнести к II степени опасности, а площадку размещения энергоблока № 4 классифицировать классом Б [2].
11. Электромагнитную обстановку в помещениях размещения оборудования УСБТ, КЭ СУЗ, ИЧ СУЗ, АЗ-ПЗ, СВБУ, БЩУ и ТПТС следует классифицировать средней жесткостью в отношении внешних радиочастотных полей и магнитных полей промышленной частоты.
12. Для уточнения степени опасности электромагнитных воздействий, включая воздействия радиотелефонной связи, на оборудование систем важных для безопасности и на энергоблок в целом после сооружения ЭБ-4 и монтажа штатного оборудования, запитанного по штатной схеме, в период комплексной наладки до физпуска следует выполнить комплекс работ в соответствии с [11].
13. В соответствии с [2] аналогичный комплекс работ следует выполнять для всех сооружаемых энергоблоков АЭС, в особенности для тех, размещение которых запланировано в непосредственной близости от государственных границ сопредельных государств (Балтийская АЭС, Белорусская АЭС), в зоне размещения которых применяются мощные радарные установки для охраны границ, а также рядом с водными акваториями (Ленинградская АЭС), в зоне размещения которых используются мощные корабельные радиолокационные установки.

Литература

1. НП-032-01, «Размещение атомных станций. Основные критерии и требования по обеспечению безопасности», Ростехнадзор, М., 2002, – 13 с.
2. НП-064-05, «Учет внешних воздействий природного и техногенного происхождения на объекты использования атомной энергии», Ростехнадзор, М., 2005, – 103 с.
3. Концептуальный отчет «Требования к обеспечению электромагнитной совместимости зданий и сооружений в связи с использованием в управляющих системах микропроцессорной техники», Инженерные решения, Бл.4-0-70-От-002, ОАО «СПбАЭП», г. Санкт-Петербург, 2011.
4. Методика выполнения измерений уровня напряженности электромагнитного поля промышленных радиопомех при проведении радиоконтроля на месте эксплуатации технических средств, № 001-162-2009, ФГУП «ВНИИФТРИ» – ФГУП «ВНИИМС», М., 2009.
5. СанПиН 2.2.4.723-93 «Переменные магнитные поля промышленной частоты (50 Гц) в производственных условиях».
6. ГОСТ Р 50746-2000 (ГОСТ 32137-2013). Совместимость технических средств электромагнитная. Технические средства для атомных станций. Требования и методы испытаний. – 2000 г. – 31 с.
7. ГОСТ Р 51318.22-2006. Совместимость технических средств электромагнитная. Оборудование информационных технологий. Радиопомехи промышленные. Нормы и методы измерений.

8. НП-001-97 (ОПБ-88/97) «Общие положения обеспечения безопасности атомных станций», Госатомнадзор России, М., 1997.
9. РД ЭО 0439-02. Порядок оценки устойчивости элементов систем контроля и управления к электромагнитным воздействиям при модернизации и продлении эксплуатации на атомных станциях, ОАО «Концерн Росэнергоатом», 2002 г., 53 с.
10. Протокол измерений интегральной электромагнитной обстановки в районе, на территории сооружения и в помещениях систем, важных для безопасности энергоблока № 4 Белоярской АЭС-2, рег. № 1187-041/ИЦ ЭМС-12ПИ, ОАО «ВНИИАЭС», ФГУП «ВНИИА», М., 2012.
11. РД ЭО 1.1.2.25.0943-2013 «Требования к обеспечению электромагнитной совместимости систем контроля и управления атомных станций», ОАО «Концерн Росэнергоатом», М., 2013г., 124с.

Сарылов В.Н., Сарылов О.В.
Россия, г. Москва, АО «ВНИИАЭС», ФГУП «ВНИИА»

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ СИСТЕМ КОНТРОЛЯ И УПРАВЛЕНИЯ АТОМНЫХ СТАНЦИЙ НА ЭТАПАХ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА

В процессе эксплуатации на энергоблоках атомных станций технические средства систем контроля и управления подвергаются электромагнитным воздействиям природного и техногенного происхождения, которые могут оказывать негативное влияние на функциональную безопасность управляющих систем безопасности и приводить к опасным последствиям: «отказам на требование», «отказам, сопровождаемым несанкционированными действиями, «отказам, сопровождаемым нарушениями нормального функционирования».

Поэтому для повышения эксплуатационной устойчивости, надежности и безопасности эксплуатации энергоблоков АЭС необходимо уделять постоянное внимание обеспечению устойчивости оборудования, в том числе управляющих систем безопасности, к электромагнитным воздействиям природного и техногенного происхождения на всех этапах жизненного цикла АСУ ТП.

Одним из направлений деятельности АО «ВНИИАЭС» является организация подтверждения соответствия нормируемым требованиям и реализация работ по обеспечению электромагнитной совместимости технических средств автоматизации, программно-технических средств и комплексов на действующих, модернизируемых и вновь вводимых энергоблоках АЭС.

Работы проводятся совместно с испытательным центром ФГУП «ВНИИА» в соответствии с:

- Указаниями «Концерн «Росэнергоатом» № 175 и № 104 УК «О повышении помехоустойчивости оборудования, эксплуатируемого на атомных станциях»;
- «Программой повышения помехозащищенности оборудования и систем АЭС по результатам анализа проведенных обследований», утвержденной «Концерном «Росэнергоатом», от 13.11.2007г.;
- Руководящим документом РД ЭО 0439-02 «Порядок оценки устойчивости элементов систем контроля и управления к электромагнитным воздействиям при модернизации и продлении эксплуатации на атомных станциях»;
- Руководящим документом эксплуатирующей организации «РД ЭО 1.1.2.25.0943-2013 «Требования к обеспечению электромагнитной совместимости систем контроля и управления атомных станций на этапах жизненного цикла».

Работы проводятся на этапах разработки и изготовления, ввода в эксплуатацию, эксплуатации и модернизации ПТС/ПТК АСУ ТП в объеме продления эксплуатации сверх назначенного срока службы.

1. Нормативные требования и особенности подтверждения соответствия продукции для АЭС требованиям электромагнитной совместимости

Особенности стандартизации и подтверждения соответствия продукции для объектов использования атомной энергии (ОИАЭ), в том числе в части электромагнитной совместимости, установлены в Федеральном законе о техническом регулировании [1], в постановлении Правительства Российской Федерации от 01 марта 2013 г. [2] и в нормативном правовом акте органа государственного регулирования безопасности [3].

Технические средства ОИАЭ, в том числе АЭС, в зависимости от назначения и влияния на безопасность входят в состав систем нормальной эксплуатации (ТС СНЭ), систем важных для безопасности (ТС СВБ), систем безопасности (ТС СБ).

В качестве ТС СНЭ может использоваться общепромышленное оборудование, предназначенное как для самостоятельного (автономного) применения, так и для комплектации ТС СВБ и СБ в соответствии с положением [4] федеральных норм и правил в области использования атомной энергии (ФНП).

Нарушения нормального функционирования ТС СВБ и СБ в условиях эксплуатации при возникновении электромагнитных помех на ОИАЭ могут приводить, например, к несанкционированным остановам энергоблоков атомных станций (АЭС), или к самопроизвольным (“самоходы”) извлечениям поглотителей нейтронов из активной зоны ядерных реакторов, что может снизить эксплуатационную устойчивость энергоблоков, или привести к нарушениям условий безопасной эксплуатации ядерно-опасных объектов.

Федеральный закон [5] об использовании атомной энергии (ФЗ-170) устанавливает требования к ФНП [6], в соответствии с которыми к ТС более высокого класса безопасности (СБ, СВБ) устанавливаются более высокие требования, в том числе по электромагнитной совместимости (ЭМС), нежели к ТС более низкого класса безопасности (СНЭ).

Федеральный закон [1] о техническом регулировании (ФЗ-184) и выпущенное на его основе постановление [2] Правительства Российской Федерации от 01.03.2013г., №173 (ПП-173) устанавливают положение об особенностях стандартизации в области использования атомной энергии, в соответствии с которыми не допускается противоречий документов по стандартизации требованиям ФНП ОИАЭ, устанавливаются требования обеспечения необходимого уровня безопасности и требования гармонизации с международными стандартами.

Технический регламент [7] Таможенного союза (ТР ТС 020/2011) хотя и не содержит в своем перечне продукции для ОИАЭ, но включает в перечень нормативной документации межгосударственный стандарт [8] по электромагнитной совместимости технических средств для атомных станций и в соответствии с пунктом 2 Статьи 7 устанавливает положение о возможности подтверждения соответствия продукции, не включенной в Перечень, в форме сертификации – по решению изготовителя или импортера. Поэтому, положения ТР ТС 020/2011 совместно с положениями ПП-173 об особенностях стандартизации в ОИАЭ могут использоваться для подтверждения соответствия требованиям электромагнитной совместимости, например, при поставке ТС СНЭ на ОИАЭ.

В настоящее время как зарубежные, так и российские фирмы поставляют ТС СНЭ, СВБ и СБ как на российские, так и на зарубежные АЭС.

Различные фирмы при оценке соответствия требованиям электромагнитной совместимости продукции, поставляемой на атомные станции, используют различные международные и национальные стандарты, или построенные на их основе платформы подтверждения соответствия, которые, однако, не учитывают требований ФНП.

Зарубежные фирмы при поставке ТС (СНЭ, СВБ, СБ), в том числе на российские АЭС, используют общий стандарт по ЭМС МЭК 61000-6-2 [9], или основанные на его требованиях национальные стандарты или платформы (например, КТА 3503 – Германия, CSN 33-2000 и ZAT SANDRA – Чехия, SPINLINE 3 – Франция). Требования по ЭМС в этих документах установлены фиксировано вне зависимости от условий эксплуатации (электромагнитной обстановки) и от назначения и влияния ТС на безопасность АЭС, а перечень видов воздействий не охватывает номенклатуру регламентированных видов воздействий, установленных для ОИАЭ, критерии же качества функционирования установленные для большинства видов воздействий (В и С) допускают появление сбоев и отказов в функционировании, в том числе ТС СБ и СВБ (таблица 1).

Некоторые зарубежные фирмы используют для подтверждения соответствия требованиям ЭМС технических средств СНЭ, СВБ и СБ международный стандарт на продукцию для атомных станций МЭК 62003:2009 [10], который, однако, не учитывает требований ФНП в части назначения и влияния ТС на безопасность АЭС, но в отличие от МЭК 61000-6-2 предусматривает оценку соответствия в зависимости от условий эксплуатации (степени жесткости ЭМО) и критерий качества функционирования А (а не В или С – как это установлено в МЭК 61000-6-2).

Однако для всех категорий безопасности ТС (СНЭ, СВБ, СБ) для одинаковых условий эксплуатации (например, в одном и том же помещении) в МЭК 62003 установлены (таблица 1) одни и те же требования по ЭМС. Существенный недостаток МЭК 62003 – при возникновении помех установленного и одинакового для СНЭ, СВБ и СБ значения (например, по одной и той же сети надежного электропитания) возможно одновременное нарушение функционирования СНЭ, СВБ, и СБ с последующими остановами или разгрузкой энергоблоков АЭС или нарушениями условий безопасной эксплуатации ядерной установки. Это означает, что запас по устойчивости СВБ и СБ к помехам отсутствует и возможно одновременное нарушение функционирования СНЭ, СВБ и СБ по “общей причине” в нарушение требований ФНП [6].

Поставка продукции на ОИАЭ возможна при соблюдении условий действия лицензии регулирующего органа (Ростехнадзора), в соответствии с которыми целью является обеспечение эксплуатационной устойчивости и безопасности функционирования СВБ и СБ в условиях электромагнитных воздействий природного и техногенного происхождения.

Межгосударственный стандарт [8] принят прямым внедрением отмененного в настоящее время российского национального стандарта ГОСТ Р 50746-2000 [11]. Область применения стандарта [8] распространяется на технические средства для атомных станций. Технические требования по обеспечению электромагнитной совместимости в нем дифференцированы в зависимости от назначения ТС, их влияния на безопасность АЭС и от степени жесткости электромагнитной обстановки, в которой используются ТС на АЭС.

К недостаткам стандарта [8] следует отнести отсутствие его актуализации.

В стандарте [8] применяются методы испытаний, заимствованные из базовых российских стандартов, гармонизированных с базовыми международными стандартами МЭК 61000-4 на дату 2000 г. В связи с совершенствованием международных базовых стандартов по ЭМС многие методы испытаний, применяемые в стандарте [8], отменены или устарели.

В межгосударственном стандарте [8] для различных категорий безопасности ТС ОИАЭ при одинаковых условиях эксплуатации (например, в одном и том же помещении) назначаются (таблица 1), в отличие от МЭК 62003, различные требования по устойчивости к помехам, что соответствует требованиям ФНП [6], предписывающим устанавливать более высокие требования для более высокого класса безопасности (например, для СБ по сравнению с СВБ или СНЭ) при эксплуатации в одинаковых условиях (степень жесткости ЭМО).

В отличие от МЭК 62003:2009 при подтверждении соответствия с использованием ГОСТ 32137-2013 предусматривается запас СВБ и СБ по устойчивости к помехам, нормируемым для СНЭ, чем исключается одновременный отказ СНЭ, СВБ и СБ “по общей причине” во исполнение требований ФНП [6], что способствует повышению эксплуатационной устойчивости и безопасности функционирования ТС на ОИАЭ.

В соответствии с изложенным выше:

- Общие стандарты МЭК 61000-6-2/EN61000-6-2 и разработанные на их основе национальные стандарты и платформы подтверждения соответствия КТА-3503, ГОСТ Р 61000-6-2, SPINLINE, ZAT “Platform” не учитывают особенностей стандартизации в области использования атомной энергии, не охватывают весь перечень испытательных воздействий, установленных для ТС ОИАЭ, не рекомендуются в целях подтверждения соответствия ТС СВБ и ТС СБ ОИАЭ и могут быть использованы только для подтверждения соответствия общепромышленного оборудования, не предназначенного для комплектации СВБ и СБ ОИАЭ.
- Стандарт МЭК 62003:2009 не учитывает особенностей стандартизации в области использования атомной энергии, не рекомендуется для подтверждения соответствия ТС СВБ и ТС СБ ОИАЭ и может быть использован для подтверждения соответствия общепромышленного оборудования как предназначенного, так и не предназначенного для комплектации СВБ и СБ ОИАЭ на основании положения НП-071-06.
- В стандарте ГОСТ 32137-2013 учтены положения Федерального закона №170-ФЗ “Об использовании атомной энергии”, Федерального закона №184-ФЗ “О техническом регулировании”, Федеральных норм и правил в области использования атомной энергии, постановления Правительства Российской Федерации от 01.03.2013 №173. В настоящее время стандарт [8] используется на всех этапах жизненного цикла в целях применения единых принципов и правил технического регулирования и подтверждения соответствия, для учета особенностей стандартизации продукции (работ, услуг), для которой устанавливаются требования, связанные с обеспечением безопасности в области использования атомной энергии.

Для учета требований и методов вновь введенных международных базовых стандартов по ЭМС, требований по обеспечению функциональной безопасности СКУ в отношении электромагнитной совместимости, оценки риска и полноты безопасности, установленных в стандартах [12-14], оценки запасов по устойчивости СКУ к электромагнитным воздействиям [15], учета положений технического регламента Таможенного союза [7] в части использования общепромышленного оборудования, не предназначенного для комплектации систем безопасности и систем важных для

безопасности, положений НП-071-06 [4] в части использования общепромышленного оборудования в системах безопасности и важных для безопасности, учета положений технического регламента Таможенного союза [7] в части требований к эксплуатационной документации СКУ и в части использования схем подтверждения соответствия необходимо проведение актуализации межгосударственного стандарта по ЭМС [8] для применения при обращении продукции для АЭС как в России, так и за рубежом.

2 Порядок обеспечения требований электромагнитной совместимости и функциональной безопасности систем контроля и управления атомных станций на этапах жизненного цикла

В целях совершенствования обеспечения электромагнитной совместимости технических средств и систем контроля и управления (СКУ) технологических процессов, важных для безопасности, на этапах разработки и изготовления, приемочных испытаний на предприятиях-изготовителях, интеграционных испытаний на полигоне Главного конструктора АСУ ТП, сооружения новых энергоблоков АЭС, ввода в эксплуатацию новых и модернизируемых энергоблоков АЭС, продления сроков эксплуатации сверх назначенного срока службы СКУ, расследования инцидентов при эксплуатации действующих энергоблоков АЭС эксплуатирующей организацией введен в действие с 03.03.2014г. руководящий документ РД ЭО 1.1.2.25.0943-2013 [15].

РД предназначен для использования изготовителями и поставщиками СКУ, предприятиями Системного интегратора и Главного конструктора АСУ ТП, головной организацией отрасли по электромагнитной совместимости, эксплуатирующей организацией (ОАО «Концерн Росэнергоатом») и ее филиалами.

РД распространяется на вновь разрабатываемые, модернизируемые и находящиеся в эксплуатации технические средства и системы контроля и управления технологической и электрической части, важные для безопасности АЭС, изготавливаемые и поставляемые отечественными и зарубежными предприятиями (фирмами).

Порядок подтверждения соответствия СКУ требованиям обеспечения электромагнитной совместимости и функциональной безопасности на этапах жизненного цикла приведен на схеме.

Таблица 1. Сравнение отдельных требований ЭМС, установленных МЭК 61000-6-2, МЭК 62003 и ГОСТ 32137 для СНЭ, СВБ и используемых в ЭМО средней жесткости с учетом и без учета требований ФНП

СБ,

| Виды воздействий по базовым МЭК 61000- | СНЭ | | | СВБ | | | СБ | | |
|--------------------------------------------------------------|---------------|------------|------------|---------------|------------|------------|---------------|------------|------------|
| | МЭК 61000-6-2 | МЭК 62003 | ГОСТ 32137 | МЭК 61000-6-2 | МЭК 62003 | ГОСТ 32137 | МЭК 61000-6-2 | МЭК 62003 | ГОСТ 32137 |
| Микросекундные импульсные помехи, 4-5: | | | | | | | | | |
| - провод – провод | ± 1 кВ/В | ± 0,5 кВ/А | ± 0,5 кВ/А | ± 1 кВ/В | ± 0,5 кВ/А | ± 1 кВ/А | ± 1 кВ/В | ± 0,5 кВ/А | ± 2 кВ/А |
| - провод –«земля» | ± 2 кВ/В | ± 1 кВ/А | ± 1 кВ/А | ± 2 кВ/В | ± 1 кВ/А | ± 2 кВ/А | ± 2 кВ/В | ± 1 кВ/А | ± 4 кВ/А |
| Динамические изменения напряжения питания, 4-11: | | | | | | | | | |
| - провалы на 30% | 0,6 с/С | 500 мс/А | 500 мс/А | 0,6 с/С | 500 мс/А | 1 с/А | 0,6 с/С | 500 мс/А | 2 с/А |
| - прерывания на 100% | 20 мс/В | 5 с/А | 50 мс/А | 20 мс/В | 5 с/А | 100 мс/А | 20 мс/В | 5 с/А | 200 мс/А |
| - выбросы на 20% | – | 500 мс/А | 500 мс/А | – | 500 мс/А | 1 с/А | – | 500 мс/А | 2 с/А |
| Наносекундные импульсные помехи по сети питания, 4-4: | | | | | | | | | |
| -переменного тока | ± 2 кВ/В | ± 1 кВ/А | ± 1 кВ/А | ± 2 кВ/В | ± 1 кВ/А | ± 2 кВ/А | ± 2 кВ/В | ± 1 кВ/А | ± 4 кВ/А |
| - постоянного тока | ± 2 кВ/В | ± 0,5 кВ/А | ± 0,5 кВ/А | ± 2 кВ/В | ± 0,5 кВ/А | ± 1 кВ/А | ± 2 кВ/В | ± 0,5 кВ/А | ± 2 кВ/А |
| - линии ввода/ вывода | ± 1 кВ/В | ± 0,5 кВ/А | ± 0,5 кВ/А | ± 1 кВ/В | ± 0,5 кВ/А | ± 1 кВ/А | ± 1 кВ/В | ± 0,5 кВ/А | ± 2 кВ/А |
| Электростатические разряды, 4-2: | | | | | | | | | |
| - контактные | ± 4 кВ/В | ± 4 кВ/А | ± 4 кВ/А | ± 4 кВ/В | ± 4 кВ/А | ± 6 кВ/А | ± 4 кВ/В | ± 4 кВ/А | ± 8 кВ/А |
| - воздушные | ± 8 кВ/В | ± 4 кВ/А | ± 4 кВ/А | ± 8 кВ/В | ± 4 кВ/А | ± 8 кВ/А | ± 8 кВ/В | ± 4 кВ/А | ± 15 кВ/А |

Для применения, в том числе на единой таможенной территории Таможенного союза, единых принципов и правил технического регулирования для подтверждения на всех этапах жизненного цикла соответствия требованиям электромагнитной совместимости и функциональной безопасности программно-технических средств и комплексов автоматизированных систем управления технологическими процессами атомных станций и в целях реализации требований руководящего документа Эксплуатирующей организации [15] предприятием Системного интегратора и Главного конструктора АСУ ТП АЭС (АО «ВНИИАЭС») выпущен процедурный документ «Методические указания. Порядок подготовки и проведения испытаний ПТС и ПТК АСУ ТП на соответствие требованиям электромагнитной совместимости на этапах жизненного цикла» [16], включая:

2.1. Порядок подготовки, назначения требований ЭМС при разработке технической документации и проведения испытаний ПТС и ПТК АСУ ТП для оценки соответствия требованиям обеспечения электромагнитной совместимости и функциональной безопасности в отношении электромагнитной совместимости на этапах разработки, изготовления и приемки [8, 17, 22, 25]. Цель: Применение единых принципов и правил испытаний и подтверждения соответствия, в том числе на единой таможенной территории Таможенного союза, продукции (услуг), для которой устанавливаются требования, связанные с обеспечением безопасности в области использования атомной энергии.

2.2. Порядок подготовки и проведения испытаний ПТС и ПТК АСУ ТП для оценки соответствия требованиям обеспечения электромагнитной совместимости на этапе интеграционных испытаний на полигоне Главного конструктора автоматизированных систем управления технологическим процессом перед поставкой на АЭС [8, 23, 24]. Цель: Интеграционные испытания АСУ ТП в целом в качестве первого этапа предварительных автономных испытаний перед поставкой на АЭС.

2.3. Порядок подготовки и проведения обследования электромагнитной обстановки в окружающей местности и в помещениях размещения оборудования АСУ ТП для оценки соответствия требованиям обеспечения электромагнитной совместимости на этапах сооружения энергоблоков АЭС, при предварительных и комплексных испытаниях и при опытной эксплуатации на АЭС [8, 18, 19, 20, 21]. Цель: Классификация площадок АЭС, помещений размещения систем важных для безопасности по степеням опасности от электромагнитных воздействий радиолокационных установок физической защиты территории АЭС, охраны государственных границ, радиолокационных станций слежения оборонного назначения и от молниевых разрядов.

2.4. Порядок проведения оценки соответствия ПТС и ПТК АСУ ТП требованиям обеспечения электромагнитной совместимости при приемочных испытаниях на АЭС, в период промышленной эксплуатации и при нарушениях нормальной эксплуатации энергоблоков АЭС [8, 21, 24]. Цель: Оценка качества функционирования АСУ ТП в условиях реальной электромагнитной обстановки, поиск и устранение первопричин нарушений нормальной эксплуатации АСУ ТП при возникновении помех.

2.5. Порядок проведения оценки соответствия ПТС и ПТК АСУ ТП требованиям обеспечения электромагнитной совместимости при продлении эксплуатации сверх назначенного срока службы [8, 26, 27]. Цель: Оценка оперативных запасов по устойчивости к промышленным электромагнитным помехам технических средств, не подлежащих замене при модернизации АСУ ТП.

Схема. Порядок подтверждения соответствия систем контроля и управления требованиям обеспечения электромагнитной совместимости и функциональной безопасности на этапах жизненного цикла

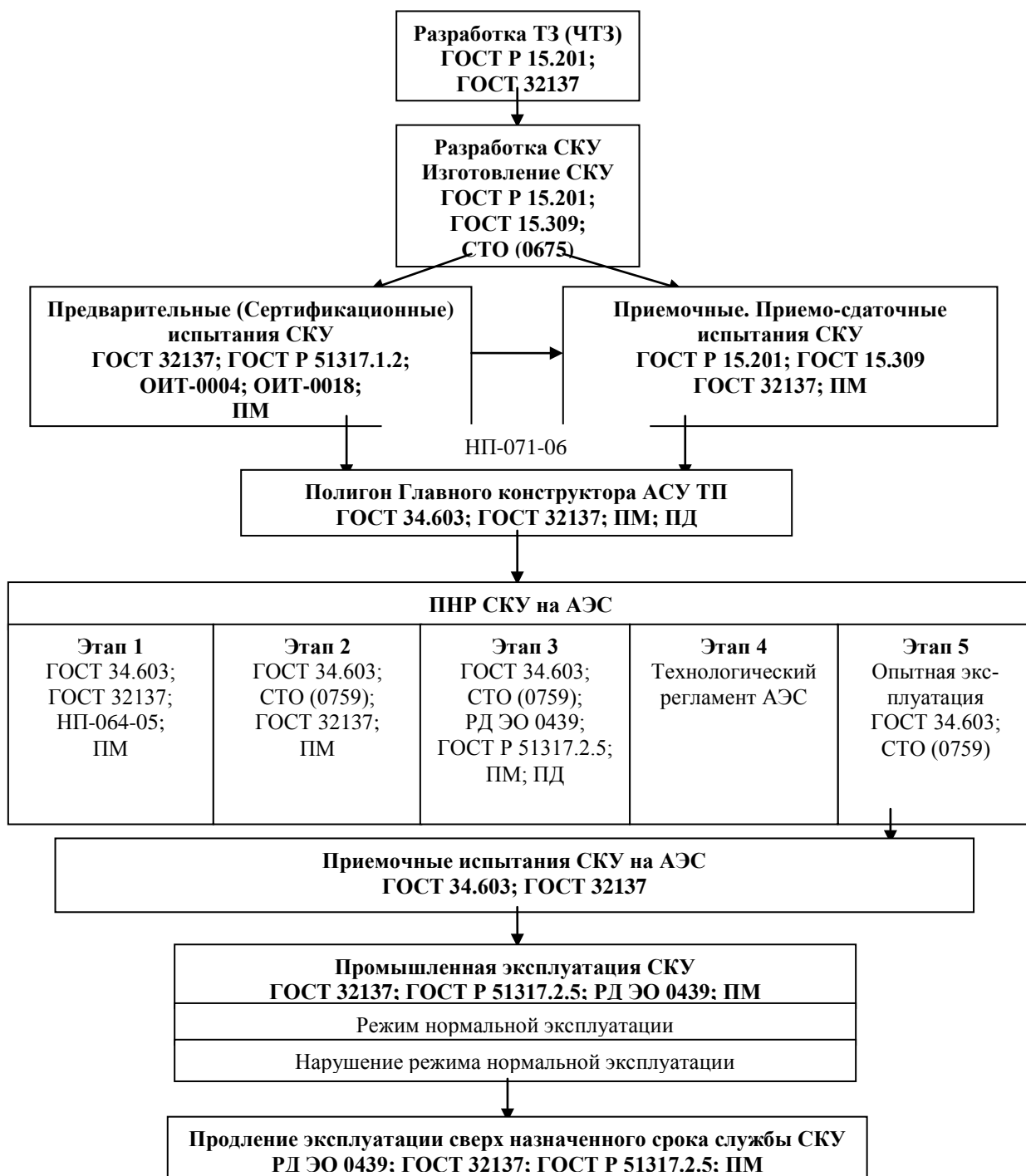


Схема обеспечения ЭМС СКУ на этапах жизненного цикла

3 Заключение

3.1. В докладе рассмотрены особенности подтверждения соответствия программно-технических средств и комплексов автоматизированных систем контроля и управления технологических процессов атомных станций требованиям электромагнитной совместимости и функциональной безопасности в зависимости от их назначения, влияния на безопасность и условий эксплуатации на АЭС.

3.2. Рассмотрены требования, порядок и методические указания по обеспечению электромагнитной совместимости и функциональной безопасности систем контроля и управления атомных станций на этапах жизненного цикла [15, 16] при:

- разработке и изготовлении;
- приемочных, квалификационных, сертификационных испытаниях;
- интеграционных испытаниях;
- сооружении новых энергоблоков АЭС;
 - вводе в эксплуатацию новых и модернизируемых энергоблоков АЭС;
- продлении эксплуатации сверх назначенного срока службы;
- расследовании инцидентов при эксплуатации действующих энергоблоков АЭС.

3.3. Предложены мероприятия по актуализации межгосударственного стандарта [8] в целях учета современных требований федеральных норм и правил в области использования атомной энергии, международных базовых стандартов по электромагнитной совместимости и функциональной безопасности, руководящих документов эксплуатирующей организации, положений технического регламента Таможенного союза по электромагнитной совместимости для применения при обращении продукции для АЭС как в России, так и за рубежом.

Литература

1. Федеральный закон «О техническом регулировании» от 27.12.2002г., № 184-ФЗ.
2. Постановление Правительства Российской Федерации от 01.03.2013г., № 173 «Об утверждении положения об особенностях стандартизации продукции (работ, услуг), для которой устанавливаются требования, связанные с обеспечением безопасности в области использования атомной энергии, а также процессов проектирования (включая изыскания), производства, строительства, монтажа, наладки, эксплуатации, хранения, перевозки, реализации, утилизации и захоронения указанной продукции».
3. Положение Ростехнадзора «Об особенностях подтверждения соответствия продукции (работ, услуг), для которой устанавливаются требования, связанные с обеспечением безопасности в области использования атомной энергии, а также процессов проектирования (включая изыскания), производства, строительства, монтажа, наладки, эксплуатации, хранения, перевозки, реализации, утилизации и захоронения указанной продукции».
4. Федеральные нормы и правила, НП-071-06 «Правила оценки соответствия оборудования, комплектующих, материалов и полуфабрикатов, поставляемых на объекты использования атомной энергии», Ростехнадзор, 2006, 12 с.
5. Федеральный закон, №170-ФЗ «Об использовании атомной энергии», 1995г., 33 с.
6. Федеральные нормы и правила, НП-001-97 (ОПБ-88/97) «Общие положения обеспечения безопасности атомных станций», Ростехнадзор, 1997г., 39с.
7. Технический регламент Таможенного союза «Электромагнитная совместимость технических средств», ТР ТС 020/2011, 2011г., 29с.
8. ГОСТ 32137-2013 «Совместимость технических средств электромагнитная. Технические средства для атомных станций. Требования и методы испытаний», 2013г., 31 с.
9. МЭК 61000-6-2:2005 «Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость к электромагнитным помехам технических средств, применяемых в промышленных зонах. Требования и методы испытаний», (МОД), 2005г., 29 с.
10. МЭК 62003:2009 (IEC 62003:2009) «Атомные станции. Технические средства контроля и управления важные для безопасности. Требования для испытаний на электромагнитную совместимость», 2009г., 36 с.
11. ГОСТ Р 50746-2000 «Совместимость технических средств электромагнитная. Технические средства для атомных станций. Требования и методы испытаний», 2000 г., 31 с.

12. ГОСТ Р 51317.1.2 (МЭК 61000-1-2:2008) «Совместимость технических средств электромагнитная. Методология обеспечения функциональной безопасности технических средств в отношении электромагнитной совместимости».
13. ГОСТ Р МЭК 61508-5-2007 «Функциональная безопасность систем электрических, электронных, программируемых электронных, связанных с безопасностью. Часть 5. Рекомендации по применению методов определения уровней полноты безопасности».
14. Международная шкала ядерных событий. Руководство для пользователей. Вена. МАГАТЭ. Введена в действие в отрасли Указанием Министерства по атомной энергии Российской Федерации от 07.09.1993г., № 02-138УК.
15. РД ЭО 1.1.2.25.0943-2013 «Требования к обеспечению электромагнитной совместимости систем контроля и управления атомных станций», Росэнергоатом, 2013 г., 124 с.
16. Процедурный документ. Методические указания. Порядок подготовки и проведения испытаний ПТС и ПТК АСУ ТП на соответствие требованиям электромагнитной совместимости на этапах жизненного цикла, ПД 900.3028-2014, АО «ВНИИАЭС», 2014 г.
17. СТО 1.1.1.07.001.0675-2008 «Атомные станции. Аппаратура, приборы, средства систем контроля и управления. Общие технические требования.», Росэнергоатом, 2008 г., 103 с.
18. СТО 1.1.1.03.003.0759-2008 «Готовность систем, оборудования и помещений энергоблоков атомных станций с реакторами ВВЭР-1000 на базе проекта В-320 к этапам ввода в эксплуатацию. Технические требования», Росэнергоатом, 2008г., 96с.
19. Федеральные нормы и правила, НП-064-05 «Учет внешних воздействий природного и техногенного происхождения на объекты использования атомной энергии», Ростехнадзор, 2005г., 47с.
20. НП-032-01 «Размещение атомных станций. Основные критерии и требования по обеспечению безопасности».
21. РД ЭО 0439-02 «Порядок оценки устойчивости элементов систем контроля и управления к электромагнитным воздействиям при модернизации и продлении эксплуатации на атомных станциях», Росэнергоатом, 2002 г., 53 с.
22. ОИТ-0018-2001 «Порядок признания сертификатов (протоколов испытаний), выданных в других системах сертификации», АНО «Атомсертифика», – М., 2001 г.
23. Интеграционные испытания СВБУ/СВСУ с системами контроля и управления АСУ ТП. Порядок подготовки, проведения и оформления результатов испытаний. Методические указания. Процедурный документ ПД 900.13-20013, ОАО «ВНИИАЭС», М., 2013 г.
24. ГОСТ 34.603-1992 «Виды испытаний автоматизированных систем».
25. РД 50-34.698-1990 «Автоматизированные системы. Требования к содержанию документов».
26. СТО 1.1.1.01.007.0281-2010 «Управление ресурсными характеристиками элементов энергоблоков атомных станций», Росэнергоатом, 2010 г.
27. РД ЭО 0294-2001 «Методика и типовая программа оценки технического состояния и остаточного ресурса комплекса электрооборудования системы управления и защиты ядерных установок типа ВВЭР», Росэнергоатом, 2001 г.

Кузнецов К.А.

Компания «Frankonia EMC Test Systems GmbH», г. Москва, Россия

Тел: (495) 640-14-78, Факс: (495) 660-6277доб 903873, E-mail:

kuznetsov@frankoniagroup.ru

ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ИСПЫТАНИЙ НА ПОМЕХОЭМИССИЮ И УСТОЙЧИВОСТЬ К ИЗЛУЧАЕМЫМ ПОМЕХАМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТРЕХОСЕВОЙ КОНФИГУРАЦИИ БЕЗЭХОВОЙ ЭКРАНИРОВАННОЙ КАМЕРЫ

Типовая конфигурация полубезэховой камеры для испытаний на электромагнитную совместимость – прямоугольный параллелепипед, при этом в зависимости от вида испытания как правило в одном цикле испытаний продукта приходится несколько раз менять расположение антенн, менять тестовую дистанцию, добавлять убирать радиопоглощающие покрытия на пол.

Компанией Frankonia разработана полубезэховая камера с тремя измерительными осями с конфигурацией, показанной на рис. 1.

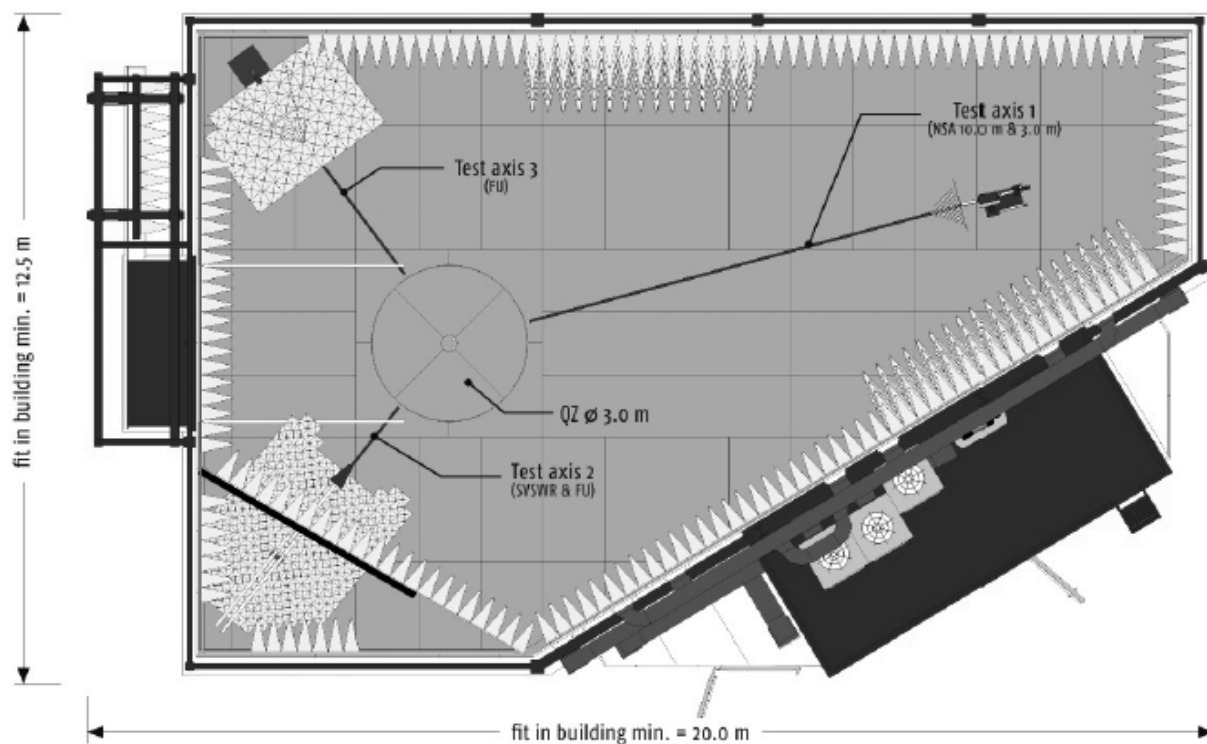


Рис. 1. Конфигурация трехосевой камеры

Трехосевая структура позволяет производить испытания с минимальной потерей времени на перенастройку испытательной площадки, а при использовании современных коммутаторов и специально разработанного ПО становится возможным проведения полностью автоматизированного испытания включающего в один цикл испытания – испытание на устойчивость к радиочастотному полю по МЭК 61000-4-3 (ось 3 камеры), измерение помехоэмиссии до 1 ГГц (ось 1 камеры) и измерение помехоэмиссии на частотах свыше 1 ГГц (ось 2 камеры), где, как известно, для соблюдения требований CISPR16-1-4 по КСВн необходимо применение небольшого количества радиопоглощающего покрытия на полу.

Основополагающим фактором является то что разработанная трехосевая конфигурация камеры полностью соответствует требованиям актуальных стандартов по ЭМС, при этом за счет нестандартной конфигурации камеры появляется возможность использования свободного пространства (по отношению к использованию одноосевой классической конфигурации 10-ти метровой камеры) в помещении под усилительные и операторские экранированные комнаты (рис. 2).

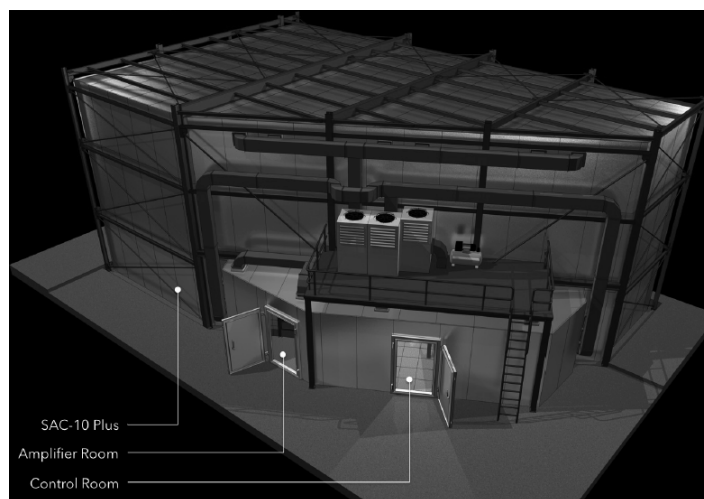


Рис. 2. Экранированные комнаты

Басалаев К.К.

ЗАО «Научно-производственная фирма «ДИПОЛЬ», г. Москва, Россия
Тел. 8 (495) 645-20-02, e-mail: bk@dipaul.ru

АЛЬТЕРНАТИВНЫЕ МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ЭМИССИИ И ИСПЫТАНИЙ НА УСТОЙЧИВОСТЬ МАЛОГАБАРИТНЫХ ОБЪЕКТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГТЕМ-КАМЕР

Существуют различные методы испытаний электрического и электронного оборудования на помехоэмиссию и помехоустойчивость.

Традиционно для испытаний рекомендуются следующие средства испытаний:

1) Для оценки эмиссии излучаемых помех (radiated emissions – RE):

Состав приборов для измерения ИРП, БЭК или открытые площадки (рис. 1).

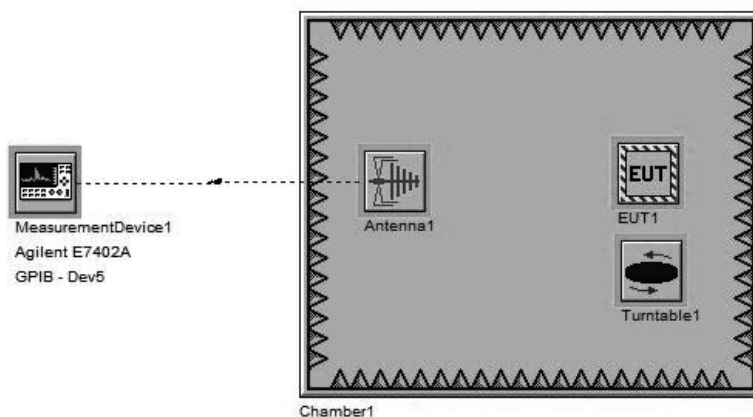


Рис.1 Схема испытания на помехоэмиссию

2) Для оценки устойчивости к излучаемым помехам (radiated susceptibility – RS): БЭК, генератор(ы) радиочастотных сигналов, излучающие антенны, изотропная антенна (датчик) и вспомогательное оборудование (рис. 2).

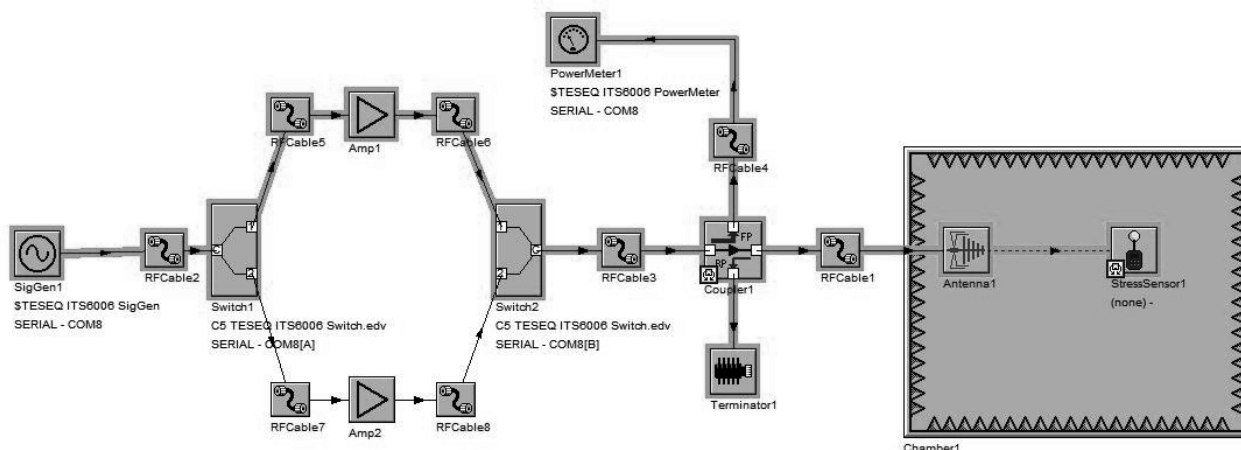


Рис.2. Схема испытания на помехоустойчивость

Подробно методы и условия испытаний изложены в соответствующих стандартах серии МЭК 61000-4-х, СИСПР, MIL-STD и их отечественных аналогах.

Однако наряду с классическими рекомендованными методами испытаний во многих документах приведены ссылки, либо кратко описаны альтернативные методы испытаний ТС. Одним из таких методов является использование волноводов для возбуждения поперечных электромагнитных волн (ТЕМ-волн), ссылка на который есть в п.6 ГОСТ Р 51317.4.3-99. Условия испытаний с приме-

нением альтернативных методов создания полей должны быть эквивалентны условиям испытаний в безэховых камерах. Методы испытаний подробно описаны в стандарте ИЕС 61000-4-20.

ТЕМ волновод (ТЕМ waveguide): Открытая или закрытая система линий передач, в которой волна распространяется в режиме поперечной электромагнитной волны, чтобы создать определенное поле для испытательных целей. Таким образом, существуют разные виды ТЕМ волноводов в зависимости от их формы и конструктивных особенностей.

С точки зрения испытаний на соответствие стандартам по ЭМС, наиболее универсальными являются волноводы закрытого типа с экранированными поверхностями, диапазон рабочих частот которых полностью перекрывает требования стандартов по ЭМС (от ~0 Гц до 18 ГГц). Такие средства испытаний называются ГТЕМ камеры (GTEM Cells).

Испытания на помехоустойчивость с использованием ГТЕМ-камер во многом коррелируют с испытаниями по стандарту МЭК 61000-4-3. К основным отличиям можно отнести допустимый размер объекта испытаний (ОИ) и формулу для расчета необходимой мощности. Максимальная высота ОИ рекомендована до $0,33h$, где h расстояние между проводниками.

Формула расчета подаваемой мощности, необходимой для создания напряженности E поля:

$$P = (E \cdot h)^2 / Z F M,$$

где h – расстояние между проводниками, Z – входное сопротивление (50 Ом), F – коэффициент однородности (в «рязах», а не в дБ), M – коэффициент амплитудной модуляции.

Для создания напряженности $E = 10$ В/м в камере для разных высот h необходима мощность, изображенная на рис. 3:

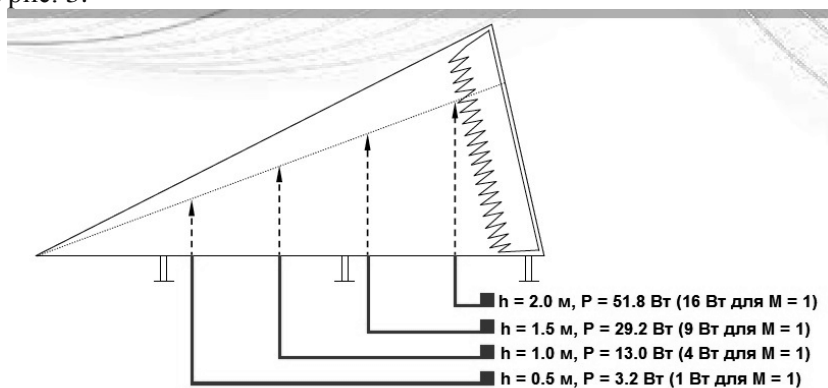


Рис. 3. Мощностные параметры камеры

Исходя из расчетов, можно сделать вывод об актуальности использования альтернативных методов испытаний на помехоустойчивость. Для задач испытания небольших объектов метод с использованием ГТЕМ камер является менее требовательным и намного более дешевым, а, следовательно - перспективным.

Для оценки эмиссии излучаемых помех в ГТЕМ камерах существует два способа. Наиболее распространенный – способ измерения ИРП с помощью корреляции с методом, применяемым на открытой измерительной площадке. Алгоритм корреляции, описываемый в ИЕС 61000-4-20, используется для пересчета уровня напряженности поля, измеренного в ТЕМ волноводе, в уровень на открытой измерительной площадке.

Следовательно, для небольших ОИ есть возможность оценивать эмиссию излучаемых помех в лаборатории, не оснащенной БЭК, антеннами и мачтами.

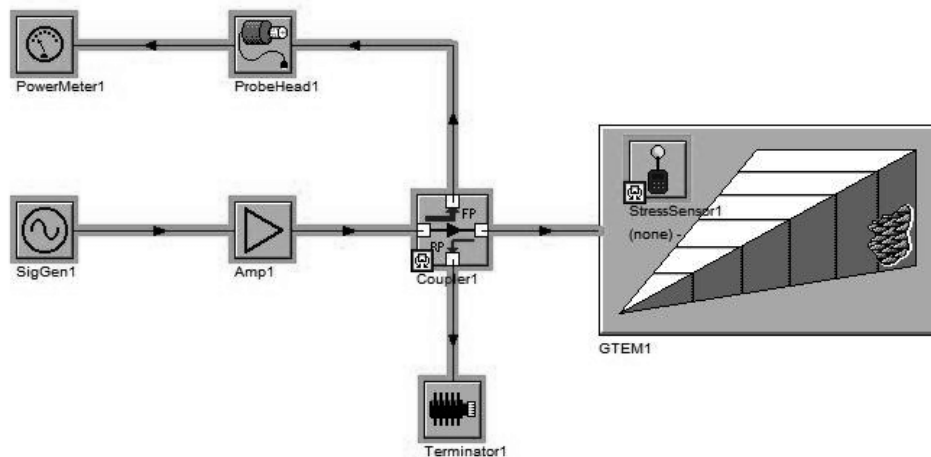


Рис.4 Схема использования GTEM камеры при испытаниях на помехоустойчивость ТС

Литература:

1. IEC 61000-4-20: Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-20: Testing and measurement techniques – Emission and immunity testing in transverse electromagnetic (TEM) waveguides
2. ГОСТ Р 51317.4.3-99 (МЭК 61000-4-3-95). Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость к радиочастотному электромагнитному полю. Требования и методы испытаний

Соковишин М.А.

СЕРТИФИКАЦИОННЫЕ И ПРЕДКВАЛИФИКАЦИОННЫЕ ИСПЫТАНИЯ НА ЭМС. РЕАЛИЗАЦИЯ РАЗЛИЧНЫХ КОНЦЕПЦИЙ В СОВРЕМЕННОМ ИЗМЕРИТЕЛЬНОМ ОБОРУДОВАНИИ

1. Анализ измерительной задачи.

В процессе окончательной или предварительной проверок на соответствие стандартам ЭМС решаются задачи контроля эмиссии и задачи определения устойчивости. В процессе решения этих задач измеряются два типа помех: излучаемые и кондуктивные. Одним из основных элементов системы для решения задачи контроля эмиссии является измерительный приемник.

2. Архитектура измерительных приемников.

Современный измерительный приемник МХЕ N9038А имеет два отдельных высокочастотных входа для измерения помех: основной - для измерения излучаемых и дополнительный - для кондуктивных помех. Дополнительный вход имеет специальную защиту от перегрузки. Измерительный приемник позволяет осуществлять преселекцию сигналов при помощи входного преселектора. Преселектор предотвращает перегрузку первого смесителя, снижая мощность сигнала на входе. Преселектор состоит из набора фиксированных и перестраиваемых коммутируемых фильтров. Далее сигнал может быть подан на встроенный предусилитель, позволяющий достигнуть высокой чувствительности прибора при измерениях.

3. Ключевые параметры приемников.

Ключевыми параметрами измерительных приемников являются: чувствительность, амплитудная погрешность, скорость сканирования, ширина полосы анализа. Для достижения максимальной чувствительности необходимо использовать фильтр ПЧ с минимально возможной полосой пропускания, минимальное ослабление входного аттенюатора на входе, усреднение трассы или фидо-фильтр с соответствующей частотой среза, активировать предусилитель. Амплитудная погрешность определяется множеством факторов: значением входного КСВН прибора, погрешностью переключения входного аттенюатора, АЧХ входного фильтра, характеристиками преобразования смесителя, характеристиками тракта ПЧ, погрешностью переключения фильтров ПЧ, характеристиками логарифмического усилителя, а также погрешностью встроенного калибратора. В измерительном приемнике N9038А реализован полностью цифровой тракт ПЧ, что позволяет значительно уменьшить амплитудную погрешность прибора по сравнению аналоговым трактом. Скорость работы данного приемника значительно увеличена благодаря добавлению функции сканирования во временной области.

4. Использование приемника при измерениях.

Измерительный приемник N9038А позволяет осуществлять предварительное сканирование с автоматическим созданием списка подозрительных сигналов и последующим их детальным обследованием и финальным измерением. По результатам измерений создается отчет в электронном виде.

5. Принципы предквалификационных испытаний.

Использование анализатора сигналов для предквалификационных испытаний на ЭМС позволяет снизить стоимость исследований и разработок. Для таких испытаний может быть использован любой анализатор серии X с установленным ПО N6141A.

Хамадулин Э.Ф.
ФГУП «ВНИИФТРИ», п. Менделеево, Россия
Тел.: (495) 526-63-02, Факс (495) 526-63-03, E-mail: test-center@vniiftri.ru

РАЗВИТИЕ ИСПЫТАТЕЛЬНОЙ БАЗЫ ДЛЯ ОЦЕНКИ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЭМС В НАТУРНЫХ И ЛАБОРАТОРНЫХ УСЛОВИЯХ

Сертификация продукции, товаров и услуг - ключевой аспект стабильной работы компаний-производителей, гарантия безопасности продукции, поставляемой и эксплуатируемой на промышленных предприятиях России, Белоруссии, Казахстана и других стран мира.

Научно-исследовательский центр ФГУП «ВНИИФТРИ» выполняет работы по проведению испытаний и подтверждению соответствия широкого круга продукции.

Научно-исследовательский центр (НИЦ) ФГУП «ВНИИФТРИ» включает в себя:

- Испытательную лабораторию электромагнитной совместимости технических средств ИЛ ЭМС ТС «ВНИИФТРИ-ТЕСТ» РОСС RU.0001.21АЯ50;
- Испытательную лабораторию взрывозащищенных средств измерений, контроля и элементов автоматики ИЛ ВСИ «ВНИИФТРИ» РОСС RU.0001.21ИП09;
- Испытательную лабораторию безопасности технических средств ИЛ Б ТС «ВНИИФТРИ-ТЕСТ» РОСС RU.0001.21МЛ42;
- Испытательный центр медицинской техники ИЦМТ «ВНИИФТРИ» (Письмо-разрешение №01-1118/08);
- Орган по сертификации взрывозащищенных средств измерений, контроля и элементов автоматики ОС ВСИ «ВНИИФТРИ» РОСС RU.0001.11ГБ06;
- Орган по сертификации средств измерений, медицинской техники и электрооборудования ОС «ВНИИФТРИ-ТЕСТ» РОСС RU.0001.11МЛ06.



Рис.1. Основные виды испытаний проводимых НИЦ

РАБОТЫ И УСЛУГИ, оказываемые в НИЦ ФГУП «ВНИИФТРИ»:

- методическая помощь в подготовке документов для подтверждения соответствия;
- экспертиза технической документации;
- организация проведения сертификационных испытаний продукции по параметрам взрывозащиты, безопасности и электромагнитной совместимости на соответствие требований Технических регламентов Таможенного союза 004/11; 020/11; 012/11;
- оформление обязательных, добровольных сертификатов соответствия;

- регистрация деклараций о соответствии;
- организация проведения технических испытаний изделий медицинской техники с целью получения Регистрационного удостоверения Минздрава РФ;
- испытания продукции на соответствие установленных заказчиком технических требований.

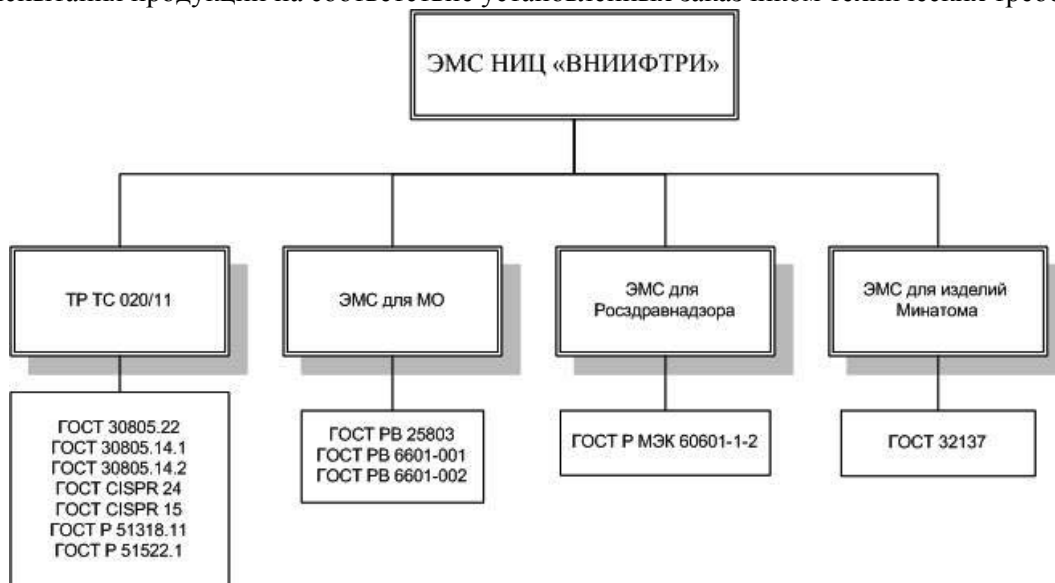


Рис.2. Классификация видов испытаний по ЭМС

Проблема обеспечения оценки широкополосных импульсных радиопомех имеет ряд отличий от стандартных методов измерений. Предлагается использовать методы и аппаратуру для испытаний с применением спектральной плотности (СП) импульсов. Для изучения структуры радиопомех как случайных процессов предлагаются методы с использованием вероятностных распределений параметров радиопомех. Указывается неэффективность использования методов и норм измерения квазипиковых (QP) и средних (AV) параметров напряжения для оценки «мешающего» действия радиопомех.

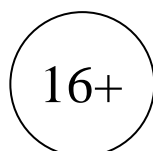


Рис.3. Разработка методов и средств для анализа различных видов помех

**ТЕХНОЛОГИИ, ИЗМЕРЕНИЯ И ИСПЫТАНИЯ
В ОБЛАСТИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ**

ТехноЭМС 2015

ТРУДЫ КОНФЕРЕНЦИИ



Грифон
111141, Москва, Электродная ул., 36
Тел.: 8-499-740-45-62
www.grifon-m.ru