

Технологии ЭМС

В номере

- ▷ Памяти Арменского Е.В.
- ▷ Памяти Стася К.Н.
- ▷ Требования зарубежных стандартов по стойкости и безопасности объектов к мощным электромагнитным воздействиям
- ▷ Применение теории многопроводных линий передачи для обоснования методов испытаний аппаратуры на устойчивость к радиочастотным кондуктивным помехам
- ▷ Применение вейвлет-преобразования для анализа внешних электромагнитных воздействий на цепи автоматики и связи
- ▷ Чувствительность цифровых устройств к электростатическому разряду при оценке значимости диагностируемых электрорадиоэлементов
- ▷ Методы снижения уровня побочных излучений микроволновых устройств термообработки листовых материалов
- ▷ Разработка метода редукции модели линейной эквивалентной электрической схемы, построенной в однородном координатном базисе
- ▷ Разработка концепции политики безопасности инфокоммуникаций МИС ИС в условиях электромагнитных атак
- ▷ Принципы и методы реализации политики безопасности системы обеспечения электромагнитной безопасности многофункциональных информационных сетей
- ▷ Автоматизация измерений эффективности экранирования контейнеров в широком диапазоне частот с использованием векторного анализатора цепей
- ▷ Устойчивость автомобилей к электромагнитному воздействию
- ▷ Всероссийская НТК «ТехноЭМС 2015»
- ▷ IV Международная научно-практическая конференция «Инновационные информационные технологии»

Технологии электромагнитной совместимости *Technologies of electromagnetic compatibility* 2014. № 4(51).

emc-journal.ru

ISSN 1729-2670

УЧРЕДИТЕЛЬ ЖУРНАЛА:

ООО «Издательский Дом «ТЕХНОЛОГИИ».

Зарегистрирован в Министерстве Российской Федерации по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций. Регистрационное свидетельство ПИ № 77-9669 от 24 августа 2001 года

Оформить подписку можно
по объединенному каталогу «Пресса России»:
10362 — полугодовой индекс;
в издательстве (предпочтительно) (8-985-134-4367).

Главный редактор журнала,
председатель редакционного совета
БАЛЮК НИКОЛАЙ ВАСИЛЬЕВИЧ, д.т.н., проф.
Зам. главного редактора журнала
КЕЧИЕВ ЛЕОНID НИКОЛАЕВИЧ, д.т.н., проф.
ФАЙЗРАХМАНОВ НИКОЛАЙ ИСХАКОВИЧ,
Редакционный совет:
АКБАШЕВ БЕСЛАН БОРИСОВИЧ, д.т.н.
ВОРШЕВСКИЙ АЛЕКСАНДР АЛЕКСЕЕВИЧ, д.т.н., проф.
КИРИЛЛОВ ВЛАДИМИР ЮРЬЕВИЧ, д.т.н., проф.
КОСТРОМИНов АЛЕКСАНДР МИХАЙЛОВИЧ,
д.т.н., проф.
КРИВОВ АНАТОЛИЙ СЕРГЕЕВИЧ, д.т.н., проф.
МЫРОВА ЛЮДМИЛА ОШЕРОВНА, д.т.н., проф.
НЕФЕДОВ ВИКТОР ИВАНОВИЧ, д.т.н., проф.
НИКИТИНА ВАЛЕНТИНА НИКОЛАЕВНА, д.мед.н., проф.
НИКИФОРОВ ВЛАДИМИР ВАСИЛЬЕВИЧ, к.т.н.
ПОЖИДАЕВ ЕВГЕНИЙ ДМИТРИЕВИЧ, д.т.н., проф.
САРЫЛОВ ВЛАДИМИР НИКОЛАЕВИЧ
САХАРОВ КОНСТАНТИН ЮРЬЕВИЧ, д.т.н., с.н.с.
СУХОРУКОВ СЕРГЕЙ АРСЕНЬЕВИЧ, к.т.н., доцент
ТУХАС ВЯЧЕСЛАВ АНАТОЛЬЕВИЧ, д.т.н., проф.
ФОМИНИЧ ЭДУАРД НИКОЛАЕВИЧ, д.т.н., проф.
ЧЕРМОШЕНЦЕВ СЕРГЕЙ ФЕДОРОВИЧ, д.т.н., проф.
ИЗДАТЕЛЬ ЖУРНАЛА:
ООО «Издательский Дом «ТЕХНОЛОГИИ».
РЕДАКЦИЯ ЖУРНАЛА:
НОЧУ «Новая Инженерная Школа»
Издается при содействии кафедры РЭТ
МИЭМ-НИУ ВШЭ.

Главный редактор СТАСЬ Константин Николаевич
Исполнительный директор
Леонтьева Анна Анатольевна
Адрес: 105005, Москва, Наб. академика Туполева, 15,
стр. 29, оф. 117.
ООО «Издательский Дом «ТЕХНОЛОГИИ»
Редакция: тел./факс +7-985-134-4367,
e-mail: kln1940@gmail.com.

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

Подписано к печати 01.12.2014

Журнал включен в перечень ведущих журналов и изданий Высшей аттестационной комиссии (ВАК).

Журнал включен в Реферативный журнал и Базы данных ВИНИТИ. Сведения о журнале ежегодно публикуются в международной справочной системе по периодическим и продолжающимся изданиям «Ulrich's Periodicals Directory».

Содержание**Памятки Арменского Е.В.****Памятки Стася К.Н.**

Кечиев Л.Н., Балюк Н.В. Требования зарубежных стандартов по стойкости и безопасности объектов к мощным электромагнитным воздействиям	5
Балюк Н.В., Дмитриева Н.Ю., Дубровин Е.А., Крохалев Д.И., Пыж А.В., Сидорюк П.А. Применение теории многопроводных линий передач для обоснования методов испытаний аппаратуры на устойчивость к радиочастотным кондуктивным помехам	17
Митрохин В.В., Полянов В.В. Применение вейвлет-преобразования для анализа внешних электромагнитных воздействий на цепи автоматики и связи	25
Иванов И.А., Полесский С.Н., Тихонов А.Н., Уваисов С.У. Чувствительность цифровых устройств к электростатическому разряду при оценке значимости диагностируемых электрорадиоэлементов	34
Нефедов В.Н., Назаров И.В., Симонов В.П. Методы снижения уровня побочных излучений микроволновых устройств термообработки листовых материалов	44
Борисов Н.И., Малина А.С., Востриков А.В., Кравченко Н.П. Разработка метода редукции модели линейной эквивалентной электрической схемы, построенной в однородном координатном базисе ...	49
Михеев В.А., Семин В.Г. Разработка концепции политики безопасности инфокоммуникаций МИС ИС в условиях электромагнитных атак	58
Михеев В.А., Семин В.Г. Принципы и методы реализации политики безопасности системы обеспечения электромагнитной безопасности многофункциональных информационных сетей	62
Пилков А.В., Купцов Н.М., Радомский А.Н. Автоматизация измерений эффективности экранирования контейнеров в широком диапазоне частот с использованием векторного анализатора цепей	67
Николаев П.А. Устойчивость автомобилей к электромагнитному воздействию	72

ВСЕРОССИЙСКАЯ НТК «ТЕХНОЭМС 2015»

IV МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ
КОНФЕРЕНЦИЯ «ИННОВАЦИОННЫЕ
ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ»

УДК 621.337/.39:00-6

Л.Н. Кечиев, Н.В. Балюк

Требования зарубежных стандартов по стойкости и безопасности объектов к мощным электромагнитным воздействиям

Изложены требования современных зарубежных стандартов по стойкости и безопасности в области мощных электромагнитных воздействий для военных и гражданских систем. Стандарты определяют требования как результат воздействия электромагнитной обстановки на оборудование, системы и носители, охватывают все электромагнитные факторы, включая электромагнитную совместимость, электромагнитные поля высокой интенсивности, молниевые разряды и электромагнитный импульс ядерного взрыва.

Ключевые слова: стандартизация, требования стойкости, военные системы, защита

Общие положения

Воздействие электромагнитных факторов на системы вооружения и военной техники (ВВТ) определяют требования стойкости и безопасности для образцов и систем воздушного, морского, космического и наземного базирования, включая их средства вооружения, и применимы как к новым, так и к модернизируемым образцам и системам в целом.

Стандарты определяют электромагнитное воздействие (ЭМВ) как воздействие электромагнитной обстановки на боеспособность вооруженных сил, оборудование, системы и носители и охватывают все электромагнитные факторы, включая электромагнитную совместимость, электромагнитные поля высокой интенсивности, электромагнитную стойкость, электромагнитный импульс, опасные ЭМВ на личный состав, боеприпасы и летучие вещества, а также электромагнитные явления природного происхождения – молния и электростатические разряды [1].

Стандартами задаются требования по следующим направлениям:

- внутрисистемная электромагнитная совместимость (ЭМС): помехи от взаимной модуляции, генерируемых корпусом судна; уровни внутренней электромагнитной обстановки на судне; высокочастотный резонансный разряд с космического аппарата;
- уровни излучений РЛС и РПС;
- параметры воздействия прямого и близкого ударов молнии;
- параметры и результаты воздействия ЭМИ высотного ядерного взрыва;
- требования по обеспечению ЭМС подсистем и оборудования к электромагнитным помехам: требования к изделиям коммерческого назначения; требования по воздействию постоянного магнитного поля корабельных установок;
- требования по обеспечению ЭМС к электростатическим разрядам: при наборе высоты летательным аппаратом и дозаправке в воздухе; по электростатическим осаждениям; требования к подсистемам вооружения;
- требования по опасным уровням электромагнитного излучения: воздействующего на личный состав; на топливо; на пироэлементы;
- требования по обеспечению стойкости к действию ЭМВ в течение жизненного цикла;
- требования по электрической металлизации: к проводникам возвратного потенциала источника питания; к антенным устройствам; к механическим соединителям; по защите от поражения электрическим током и защите от тока утечки при аварии, защите от воспламенения паров топлива;
- требования по внешнему заземлению: к заземляющим разъемам самолетов; к обслуживанию и ремонту системы заземления оборудования;

- требования по контролю характеристик электромагнитных помех подсистем и оборудования: эмиссия кондуктивных помех, восприимчивость к кондуктивным помехам, эмиссия помех излучения, восприимчивость к помехам излучения;
- уровни электромагнитных воздействий, определяющих запас по стойкости, в том числе для цепей инициирования пироусилителей [2–5].

Запас по стойкости к ЭМВ стандартами вводятся в виде уровней предельных электромагнитных воздействий, определяемые как разница между уровнями ЭМ воздействия на подсистемы, оборудование и уровнем нарушения работоспособности подсистемы и оборудования вследствие ЭМ воздействия на систему в целом, выражаемые в виде отношения в децибелах, представляющие собой не что иное, как запас по стойкости подсистемы/оборудования. Указывается, что оборудование, выполняющее критические с точки зрения безопасности и целевого предназначения функции, должно иметь запас по стойкости и безопасности не менее 6 дБ (2 раза). Устройства электрического инициирования по максимальному значению параметра воздействия, не приводящего к срабатыванию должны иметь запас по безопасности не менее 16,5 дБ (6,7 раза), по стойкости – не менее 6 дБ.

При этом максимальное значение электромагнитного воздействия, не приводящего к срабатыванию, определяется как наибольшее значение, не приводящее к срабатыванию в течение 5 минут более чем 0,1% всех устройств инициирования данной конструкции при доверительной вероятности 95%.

Указанные значения запаса по стойкости и безопасности должны быть подтверждены при испытаниях, теоретических исследованиях или их сочетании. В Руководстве по применению стандарта [3] сказано, что запас по стойкости, равный 16,5 дБ, использован в стандарте MIL-STD-464A, в соответствии с критериями ранее использовавшегося стандарта MIL-STD-1385, и составляет не более 15% от тока, не приводящего к срабатыванию: $20\lg(0,15) = 16,5$ дБ.

Стандартом MIL-STD-1385 также устанавливается критерий не превышения максимальной амплитуды срабатывания устройства электрического инициирования, не приводящий к последствиям, связанным с безопасностью, равный 15% от амплитудного значения, что соответствует 7 дБ.

Отмечается, что критерии запаса стойкости/безопасности должны закладываться в конструкцию изделия с целью учета вариаций широкого спектра факторов: прокладки кабелей, их заделки в разъемы, проводимости поверхностей электрической металлизации, различий применяемых блочных электронных компонентов, деградации вследствие старения. Кроме того, существуют и неопределенности: в части подтверждения стойкости/безопасности вследствие используемого метода испытаний, ограничений по воспроизведению воздействий и точности измерений. Выполнение требований по запасу стойкости/безопасности, как отмечается в Руководстве по применению стандарта [3] обеспечит выполнение требований по защите от ЭМВ всех разрабатываемых систем. В основном, термин «запас по стойкости» применяется к отдельным видам внешней электромагнитной обстановки (ЭМО), действующей на систему, включая молнию (только эффекты непрямого действия), межсистемную ЭМС, ЭМИ, воздействие опасных ЭМ излучений на боеприпасы и аспекты воздействия внутрисистемных ЭМ помех на цепи инициирования пироусилителей.

В стандартах изложен следующий подход к методам испытаний на соответствие заданным требованиям по обеспечению стойкости и безопасности к ЭМВ. Особое внимание в документах обращено на то, что испытания в целом основываются не только на его конечных результатах, но и на успешном прохождении всех стадий проектирования и разработки, предусматривающих свои объемы испытаний на ЭМС.

На первом этапе проводится оценка различного бортового оборудования и отбор образцов, работа которых влияет на безопасность функционирования. Отмечается, что возможные методы сертификации и испытаний определяются длиной волн ЭМ действующего фактора по отношению к резонансным частотам системы, обычно составляющим от 1 до 30 МГц, а также эффектами взаимодействия с бортовой электроникой.

На низких частотах реакция какого-либо интерфейса аппаратуры определяется резонансами, обусловленными целиком корпусом объекта, а на высоких частотах в основном определяется локальными эффектами, проникновением ЭМ энергии через электрические неоднородности. Аттестация образца ВВТ основана, в основном, на определении передаточных функций между внешними электромагнитными полями (ЭМП) и электронным оборудованием, с последующим подтверждением защищенности последнего к уровням, соответствующим реальному воздействию.

Это, в свою очередь, определяет второй и третий этапы аттестации. В документах указывается, что максимальные уровни защищенности электронного оборудования обычно определяются на основе предшествующих лабораторных испытаний на воздействие ЭМ помех в соответствие с требованиями, приведенными в стандартах, либо ином другом равнозначном национальном документе. Стандарты устанавливают различные подходы к проведению испытаний образцов ВВТ.

Самым строгим подходом является облучение образца ВВТ однородным полем с параметрами, полностью отвечающими реальному воздействию при различных углах падения и поляризации падающего поля, пока не будут набраны необходимые данные, позволяющие адекватно судить о защищенности электроники. Данный подход обычно реализуем только для малогабаритных образцов ВВТ по причине невозможности испытательного оборудования воспроизводить требуемые уровни ЭМП в больших испытательных объемах.

На частотах ниже основной частоты резонанса конструкции объект может быть нагружен током от источника, подключенного к определенным точкам, размещенным на экране. Для определения токов по экрану используются методы компьютерного моделирования. Далее, при воспроизведении тока с расчетной амплитудой по экрану, контролируется работоспособность аппаратуры. Альтернативный метод предполагает воспроизведение тока по экрану с меньшим, чем требуемый, уровнем амплитуды и измерением реакций отклика в интерфейсах аппаратуры. Измеренные таким образом реакции пересчитываются на максимальную амплитуду, а затем проводятся либо лабораторные испытания, либо испытания методом инжекции тока в пучок проводов непосредственно при размещении нагружаемой аппаратуры на носителе. Таким образом, проводится оценка защищенности аппаратуры.

Ниже частоты примерно 400 МГц общим подходом является проведение испытаний по определению токов перестраиваемой частоты с малой амплитудой. В данном случае, объект облучается низкоинтенсивными ЭМП с различными углами падения и поляризации, при этом осуществляется измерение токов, наведенных в электрических интерфейсах аппаратуры. Полученные токи пересчитываются на амплитуду полномасштабного воздействия с целью дальнейшего проведения испытаний аппаратуры на защищенность либо в лаборатории, либо непосредственно на борту методом инжекции тока в пучок проводов. Отмечается, что в данном случае необходимо внимательно относиться к лабораторным испытаниям, так как они не учитывают реально существующих отличий в конструкции кабеля и его длину при прокладке в носителе.

Выше частоты 400 МГц может использоваться подход, заключающийся в нагружении объекта низкоинтенсивными ЭМП перестраиваемой частоты. В данном диапазоне внутренние ЭМП в системе могут быть измерены с существенно большей точностью, чем наведенные токи. Эти измеренные внутренние поля пересчитываются на реальные воздействия. В дальнейшем, для подтверждения защищенности оборудования проводятся либо лабораторные испытания, либо испытания внутри носителя на действие полей, пересчитанных на максимальное воздействие.

Альтернативным подходом для оценки защищенности крупногабаритных объектов в диапазоне частот выше 400 МГц является проведение локальных нагрузений ЭМП его частей с максимально-требуемыми уровнями амплитуд. Участки облучения должны выбираться в зависимости от установки оборудования, выполняющего критические функции и наличия электрических неоднородностей [6].

Параметры электромагнитных воздействий для оценки стойкости и безопасности объектов

Поля высокой интенсивности (электромагнитные поля РЛС и РПС)

Применительно к крупногабаритным образцам авиационной техники (АТ) электромагнитные поля РЛС и РПС в стандарте [3] задаются для следующих типов летательных аппаратов (ЛА) и условий боевого применения: морские корабельные операции – нахождение самолета на взлетной полосе палубного типа и верхней палубе, морские корабельные операции – нахождение самолета в пучке луча РЛС/РПС, для самолетов армейской авиации с поворотным крылом, для самолетов с неподвижным крылом, за исключением морских операций. В табл. 1 приведены параметры электромагнитной обстановки при нахождении ЛА в основном луче РЛС/РПС.

В Руководстве по применению стандарта указано, что амплитуды напряженностей электрических полей ниже уровня палубы не превышают следующих значений:

- для надводных кораблей с металлическим корпусом – 10 В/м в диапазоне частот 10 кГц – 18 ГГц;

- для надводных кораблей с неметаллическим корпусом – 10 В/м в диапазоне частот 10 кГц – 2 МГц, 50 В/м в диапазоне 2 МГц – 1 ГГц и 10 В/м в диапазоне 1 ГГц – 18 ГГц;
- для подводных лодок – 5 В/м в диапазоне частот 10 кГц – 1 ГГц.

Таблица 1

Параметры внешней ЭМО при нахождении ЛА в основном луче РЛС/РПС при проведении корабельных морских операций

Диапазон частот (МГц)	Электрическое поле, (В/м)	
	Амплитудное значение	Среднее значение
0.01–2	-	-
2–30	200	200
30–150	20	20
150–225	10	10
225–400	25	25
400–700	1940	260
700–790	15	15
790–1000	2160	410
1000–2000	2600	460
2000–2700	6	6
2700–3600	27460	2620
3600–4000	9710	310
4000–5400	160	160
5400–5900	3500	160
5900–6000	310	310
6000–7900	390	390
7900–8000	860	860
8000–8400	860	860
8400–8500	390	390
8500–11000	13380	1760
11000–14000	2800	390
14000–18000	2800	310
18000–40000	7060	140
40000–45000	570	570

В стандартах НАТО [6], рассматриваются параметры электромагнитных излучений РЛС и РПС, которые будут воздействовать на самолет и вооружение на внешних подвесках. В табл. 2 и 3 приведены рекомендованные STANAG 3614 ed.4 уровни внешних электромагнитных помех, обусловленных воздействием излучений РЛС и РПС.

Молниевые разряды

Стандарт [3] устанавливает, что система должна удовлетворять требованиям по воздействию прямого и близкого ударов молнии, представляющих собой физическое и ЭМ действие, соответственно. Физические эффекты МР приводят к взрыву, структурной деформации, ударным волнам высокого давления, магнитодвижущим силам, производимым токами большой амплитуды, и акустическим эффектам. Электромагнитное действие МР заключается во взаимодействии ЭМП с оборудованием и системами.

Взрывчатые вещества во время и после воздействия прямого удара молнии должны сохранять свою безопасность. Амплитудно-временная форма импульса тока прямого удара молнии задается многокомпонентной моделью, приведенной на рис. 1.

В табл. 4 и 5 на рис. 3 приведены амплитудно-временные параметры форм испытательных импульсов, характеризующих эффекты непрямого воздействия молнии на образец ВВТ, задаваемого многокомпонентной формой (рис. 1).

Таблица 2

Основные рекомендованные уровни воздействий РЛС и РПС

Частота, Гц	Обычная ЭМО, В/м		Жесткая ЭМО, В/м	
	Амплитуда	Ср.значение	Амплитуда	Ср.значение
10–100 кГц	20	20	50	50
100–500 кГц	20	20	60	60
500 кГц–2МГц	30	30	70	70
2–30 МГц	100	100	200	200
30–100 МГц	10	10	30	30
100–200 МГц	30	10	90	30
200–400 МГц	10	10	70	70
400–700 МГц	700	40	730	80
700 МГц–1 ГГц	700	40	1400	240
1–2 ГГц	1300	160	3300	160
2–4 ГГц	3000	120	4500	490
4–6 ГГц	3000	160	7200	300
6–8 ГГц	400	170	1100	170
8–12 ГГц	1230	230	2600	330
12–18 ГГц	730	190	2000	330
18–40 ГГц	600	150	1000	420

Таблица 3

Особая ЭМО при воздействии РЛС и РПС

Частота, Гц	Обычная ЭМО, В/м		Жесткая ЭМО, В/м	
	Амплитуда	Ср.значение	Амплитуда	Ср.значение
10–500 кГц	28	28	28	28
500 кГц – 2 МГц	28	28	42	42
2–30 МГц	47	47	240	240
30–70 МГц	3.5	3.5	17	17
70–100 МГц	260	13	360	18
100–200 МГц	12	12	49	49
200–400 МГц	870	41	2600	120
400 МГц – 1 ГГц	17	11	170	55
1–2 ГГц	3900	900	13000	3000
2–4 ГГц	13000	120	22000	220
4–6 ГГц	3500	3500	7000	7000
6–8 ГГц	1800	280	3100	820
8–12 ГГц	7900	1400	7900	1400
12–20 ГГц	2600	130	2600	190
20–40 ГГц	6700	73	6700	170

Таблица 4

Параметры амплитудно-временных форм испытательных импульсов, характеризующих эффекты непрямого воздействия многокомпонентного импульса тока МР на образец ВВТ

Компонента тока	Описание	Форма импульса: $i(t) = Io(e^{-\alpha t} - e^{-\beta t})$ где t – время, с		
		Io (Ампер)	α (с ⁻¹)	β (с ⁻¹)
A	Жесткий удар	218810	11354	647265
B	Промежуточный ток	11300	700	2000
C	Длительно текущий ток	400 за 0.5 с	Не применяется	Не применяется
D	Обратный удар	109405	22708	1294530
D/2	Множественные удары	54703	22708	1294530
H	Множественные пачки импульсов	10572	187191	19105100

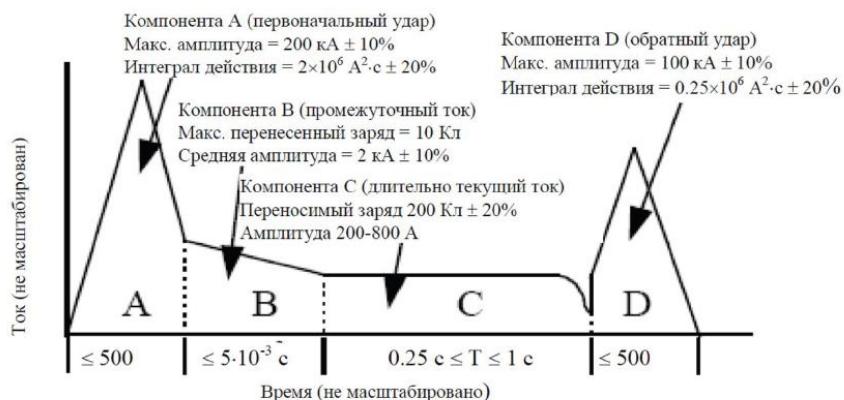


Рис. 1. Многокомпонентная испытательная форма импульса тока прямого удара молнии

Таблица 5

Характеристика форм импульсов, описывающих эффекты непрямого действия МР на образцы ВВТ и их системы

Компонента тока	Максимальная амплитуда тока, кА	Интеграл действия по току, $\text{A}^2 \cdot \text{с}$	Затухание до уровня 50%, мкс	Время до уровня 10%, мкс	Время до уровня 90%, мкс	Время достижения максимума, мкс	Скорость нарастания, А/с	Макс. скорость нарастания $t = 0+$, А/с
A	200	$2 \cdot 10^6$	69	0,15	3,0	6,4	$1 \cdot 10^{11}$ за 0,5 мкс	$1,4 \cdot 10^{11}$
B								
Среднее значение тока 2 кА за период 5 мс								
C								
D	100	$0,25 \cdot 10^6$	34,5	0,08	1,5	3,18	$1 \cdot 10^{11}$ за 0,25 мкс	$1,4 \cdot 10^{11}$
D/2	50	$6,25 \cdot 10^4$	34,5	0,08	1,5	3,18	$0,5 \cdot 10^{11}$ за 0,25 мкс	$0,7 \cdot 10^{11}$
H	10	—	4,0	0,0053	0,11	0,24	—	$2 \cdot 10^{11}$

В Руководстве по применению стандарта MIL-STD-464E указано, что параметры ЭМП в близкого удара молнии должны воспроизводиться моделированием молниевого разряда (МР) в виде канала вертикального разряда.

При испытаниях на близкий удар максимальное значение крутизны нарастания тока компоненты А, равной $1,4 \cdot 10^{11}$ А/с, значение крутизны нарастания магнитного поля $2,2 \cdot 10^{11}$ А/м·с формируются на расстоянии 10 м от канала разряда.

В [3] указано, что токи в экранах кабелей БКС при воздействии МР на самолет с цельнометаллическим корпусом составляют десятки ампер, а для самолета, имеющего корпус из графито-эпоксидных материалов – могут достигать величины 10 кА. Защита от воздействия прямого удара молнии для цельнометаллического самолета обычно заключается в защите обтекателя, топливных систем и антенн. При ударе в самолет молнии с током порядка 200 кА, при сопротивлении металлизации порядка 2,5 мОм, напряжение, наведенное в бортовой кабельной сети составит порядка 500 В.

В MIL-STD-464A отмечается, что все более значимой становится и защита от непрямого действия МР, по причине использования чувствительных электронных компонентов в аппаратуре управления полетом и двигательных системах. Для самолета, выполненного из композитных ма-

териалов, имеющих незначительное электромагнитное экранирование, необходима защита всех значимых систем.

Самолет должен быть разработан и пройти испытания на безопасность к действию прямого и близкого ударов молнии. Модель ЭМО при воздействии молнии на образцы авиационной техники определена в стандарте НАТО STANAG-4236, приведена в приложении С к стандарту STANAG 3614 и почти полностью соответствует модели, приведенной в американском военном стандарте MIL-STD-464. Отличие заключается в том, что в документах НАТО не приведены крутизны электрического и магнитного полей близкого молниевого разряда.

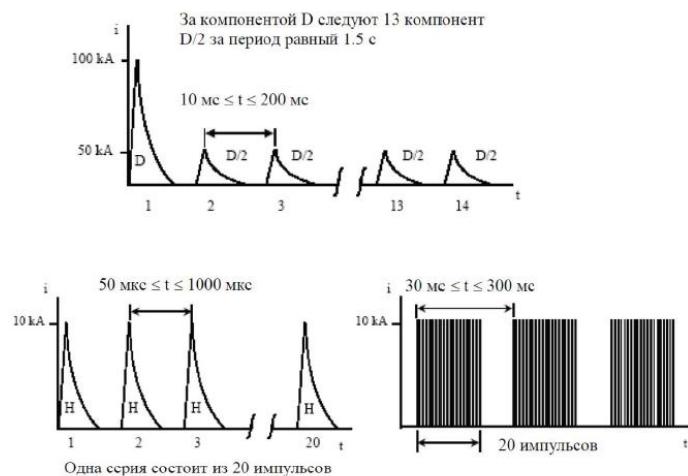


Рис. 2. Амплитудно-временные параметры форм испытательных импульсов

Электромагнитный импульс высотного ядерного взрыва

За рубежом вопросы стойкости образцов, систем и аппаратуры к воздействию высокочастотной составляющей ЭМИ высотных ядерных взрывов (ВЯВ) традиционно занимают одно из ведущих мест в проблеме обеспечения электромагнитной стойкости, что находит отражение в нормативно-технической документации (НТД) как военного, так и гражданского назначения. Как правило, при этом требования стойкости задаются по амплитудно-временным параметрам электромагнитных полей ЭМИ ВЯВ, а также токов (напряжений), наведенных на входах аппаратуры, подключаемой к проводным и кабельным линиям. В общем виде, ЭМИ ВЯВ рассматривается как совокупность трех компонент E1, E2 и E3, имеющих разное физическое происхождение [3, 5] (рис. 3).

Базовые зарубежные НТД [3–10] по стойкости к высокочастотной составляющей ЭМИ ВЯВ задают обобщенную амплитудно-временную форму испытательного воздействия ЭМИ ВЯВ в виде двухэкспоненциального импульса с параметрами $E_{\max} (H_{\max}) = 50 \text{ кВ/м} (133 \text{ А/м})$, $t_{\Phi}^{0.1-0.9} / t_{\Phi}^{0.5} = 2,5 \text{ нс} / 25 \text{ нс}$, применяемую к образцам и системам в целом, а также к аппаратуре с низкими значениями эффективности ЭМ экранирования.

Требования стойкости к аппаратуре по ЭМП в [3–6] задаются с учетом измеренных значений эффективности ЭМ экранирования в месте ее расположения на этапе испытаний или теоретических исследований.

Стандарт МЭК 61000-2-11 [11] в зависимости от расположения аппаратуры и характеристик электромагнитного экранирования вводит категории защищенности аппаратуры, определяющие значения испытательных параметров ЭМП, токов и напряжений. В табл. 6 представлены испытательные уровни электромагнитных полей ЭМИ ВЯВ для различных категорий защищенности аппаратуры.

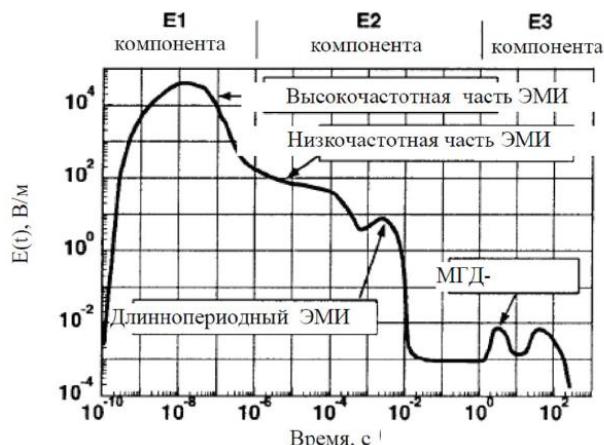


Рис. 3. Амплитудно-временная форма ЭМИ высотного ядерного взрыва

Таблица 11

Категории защищенностя аппаратуры и испытательные уровни

Характеристика категорий защищенностя аппаратуры	Испытательный уровень	E_{\max} , В/м (H_{\max} , А/м)
1 Аппаратура размещена внутри плохо экранированной конструкции или помещения; уровень ослабления ЭМП и токов 0 дБ	R5 R6 R7	10000 (26,5) 20000 (53) 50000 (133)
2 Аппаратура размещена внутри конструкции с экранированием из арматурного профиля; уровень ослабления ЭМП 20 дБ, токов 0 дБ		
3 Аппаратура размещена в экранированной конструкции с минимальной эффективностью электромагнитного экранирования в радиочастотном диапазоне. Типовой корпус оборудования, имеющий небольшие отверстия. Номинальная защита от молниеных перенапряжений и защита от кондуктивных помех (фильтрация). Уровень ослабления ЭМП 20 дБ, токов 40 дБ	R2 R3 R4	1000 (2,65) 2000 (5,3) 5000 (13,3)
4 Аппаратура размещена внутри помещения или конструкции с экранированием на РЧ от номинального до хорошего и номинальной защитой от перенапряжений и радиопомех; уровень ослабления ЭМП и токов 40 дБ	R1	500 (1,33)
5 Аппаратура размещена внутри помещения или конструкции с хорошим РЧ -экранированием и защитой каналов проникновения ЭМ энергии; уровень ослабления ЭМП и токов 60 дБ	—	50 (0,133)
6 Аппаратура размещена внутри помещения или конструкции с высококачественным экранированием в радиочастотном диапазоне и защитой вводов (перенапряжения и фильтрация); уровень ослабления ЭМП и токов 80 дБ	—	0,5 (0,0133)

Руководством по применению стандарта MIL-STD-464A устанавливается, что основой для задания требований по стойкости к ЭМИ аппаратуры образца ВВТ должны являться нормы и методы, определяемые стандартом MIL-STD-461F и приведенные в методиках CS115, CS116 и RS105. Требования стойкости к токам (напряжениям), наводимым высокочастотной составляющей ЭМИ ВЯВ на входах аппаратуры, подключаемой к проводным и кабельным линиям управления, энергоснабжения и связи, представлены в табл. 12 [4, 8–14].

Параметры ЭМП, токов (напряжений), наводимых ЭМИ на входах подключаемой аппаратуры, приведенные в зарубежной НТД, позволяют заказывающим организациям проводить конкурсы в промышленности с учетом предъявляемых требований по электромагнитной стойкости, а компаниям, работающим на рынке ЭМС-технологий – организовывать серийное производство средств испытаний.

Таблица 12

Требования стойкости аппаратуры к наводкам ЭМИ ВЯВ

Наименование документа. Область действия	Форма испытательного воздействия	I_{\max} , А (U_{\max} , В)	Фронт $T_{\Phi}^{(0.1-0.9)}$ нс	Длительность на уровне 0,5 T_i , нс	F , МГц	Кратность
Стандарт МО США MIL-STD-461E						
Норма CS115 «Помехоустойчивость к кондуктивным импульсным помехам». Аппаратура АТ ВН, ЭМИ ВЯВ	Трапецидальная	5 А – аппаратура АТ, 10 А – аппаратура НТ и МТ	≤ 2 нс	≥ 30 нс (по уровню 0,9)	–	30 имп/мин
Норма CS116 «Помехоустойчивость к кондуктивным помехам вида затухающей синусоиды» Аппаратура АТ ВН, ЭМИ ВЯВ	Затухающая синусоида (логарифмич. декремент $Q=15$)	5 А – аппаратура АТ, 10 А – аппаратура НТ и МТ	1,6 нс (100 МГц) ... 16 мкс (0,01 МГц)	3,3 нс (100 МГц) ... 33 мкс (0,01 МГц)	0.01 0.1 1 10 30 100	≤ 1 имп/с ≥ 1 имп/(2 с) в течение 5 мин
Стандарт МО Великобритании Def Stan 59-41						
Норма DCS 08 «Нестационарные электрические переходные процессы вследствие внешнего воздействия». Аппаратура АТ ВН, ЭМИ ВЯВ и высокочастотные переходные процессы при МР	Затухающая синусоида	40 А (4000 В), 20 А (2000 В)	80 нс (2 МГц) ... 3,2 нс (50 МГц)	170 нс (2 МГц) ... 6,7 нс (50 МГц)	2–30 30–50	15–30 имп/мин
Стандарт МО США MIL-STD-188-125-1						
Помехоустойчивость к наводкам ЭМИ ВЯВ, открыто расположенные внешние проводники. Аппаратура стационарных военных объектов наземного базирования	Двухэкспоненциальная	5000 А («проводники-земля»); 2500 А («отдельный провод-земля»)	20 нс	500 нс	–	
Помехоустойчивость к наводкам ЭМИ ВЯВ, заглушенные внешние проводники. Аппаратура стационарных военных объектов наземного базирования	Двухэкспоненциальная	800 А				Уровни нагрузки: 0,1, 0,2, 0,4, 0,6, 0,8, 1,0 однократн
Помехоустойчивость к наводкам ЭМИ ВЯВ, внешние проводники, остаточный ток. Аппаратура стационарных объектов наземного базирования	Требования установлены к току после устройства защиты по: 1) макс. току, I_{\max} , А; 2) макс. значению производной на участке от 0 до 10^{-3} с, dI/dt , А/с;	$I_{\max} \leq 10$ А	$dI/dt \leq 10^7$ А/с			
Помехоустойчивость к наводкам ЭМИ ВЯВ, внутренние проводники, остаточный ток. Аппаратура стационарных военных объектов наземного базирования		$I_{\max} \leq 0,1$ А	$dI/dt \leq 10^7$ А/с			

Наименование документа. Область действия	Форма испытательного воздействия	I_{max} , A (U_{max} , В)	Фронт $T_{\Phi_p}^{(0.1-0.9)}$ нс	Длитель- ность на уровне 0,5 T_i , нс	F , МГц	Крат- ность					
Стандарт МО США MIL-STD-188-125-2											
Помехоустойчивость к наводкам ЭМИ ВЯВ, внешние проводники. Аппаратура подвижных военных объектов наземного базирования	Двухэкспоненциальная	1000 A	20 нс	550 нс	—	Уровни нагружения: 0.1, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0 однократн					
Помехоустойчивость к наводкам ЭМИ ВЯВ, внешние и внутренние проводники, остаточный ток. Аппаратура подвижных военных объектов наземного базирования		Требования заданы аналогично стандарту MIL-STD-188-125-1									
Стандарты МЭК 61000-2-10, 61000-2-11 и 61000-4-25											
Помехоустойчивость к наводкам ЭМИ ВЯВ, воздушные / заглубленные проводники класса до 1000 В. Системы гражданского назначения следующих категорий:											
1A	Двухэкспоненциальная	320 A, 16 кВ	10 нс	100 нс	Дву- кратн. на каждом из трех послед- них уровней нагруж- ения						
		200 A, 25 кВ	25 нс	500 нс							
1B	Двухэкспоненциальная	160 A, 8 кВ	10 нс	100 нс							
		160 A, 8 кВ	25 нс	500 нс							
2A	Двухэкспоненциальная	320 A, 20 кВ	10 нс	100 нс							
		200 A, 25 кВ	25 нс	500 нс							
2B	Двухэкспоненциальная	160 A, 8 кВ	10 нс	100 нс							
		160 A, 8 кВ	25 нс	500 нс							
3	Затухающая синусоида	5, 15, 40 (A); 500, 1500, 4000 (B)	16 нс	33 нс	10						
		5 A, 500 В									
		5, 15, 40 (A); 500, 1500, 4000 (B)									
4	Затухающая синусоида	5 A, 500 В	16 нс	33 нс	10						
		0.5, 1.5, 4 (A); 50, 150, 400 (B)									
		0.5 A, 50 В									
5	Затухающая синусоида	0.05, 0.15, 0.4 (A); 5, 15, 40 (B)	16 нс	33 нс	10						
		0.05 A, 5 В									
		0.05 A, 5 В									
Требования стойкости кистребителю EF-2000 «Тайфун»											
EFA DSW NEMP	Затухающая синусоида	80 A / 4 кВ; 100 A / 5 кВ; 100 A / 10 кВ	3 нс (50 МГц) ... 80 нс (2 МГц)	6,7 нс (50 МГц) ... 170 нс (2 МГц)	2–50	нет данных					

Заключение

Рассмотрение требований по стойкости и безопасности, изложенных в зарубежных стандартах в области мощных электромагнитных воздействий, для военных и гражданских систем позволяет сделать следующие выводы:

Стандарты – важные нормативно-технические документы, содержащие требования как для военных, так и гражданских систем, чтобы обеспечить внутрисистемную электромагнитную совместимость и защитить оборудование от электромагнитных эффектов среды, полей высокой интенсивности, молний, электромагнитного импульса ядерного взрыва.

Стандарты определяют электромагнитные параметры среды, включают также требования к проектированию систем, определяют процедуры, которые должны продемонстрировать степень защиты от внешних электромагнитных воздействий. Кроме этого стандарты содержать мероприятия для обеспечения гарантии достаточной защиты в течение всего жизненного цикла системы.

Стандартизация в области мощных электромагнитных факторов охватывает все более широкий спектр внешних электромагнитных воздействий и перечень специфических воздействий, охваченных стандартами, непрерывно расширяется.

Электромагнитная среда и формирующие ее электромагнитные эффекты непрерывно усложняются: повышается интенсивность электромагнитных полей, расширяется частотный диапазон, что увеличивает круг опасностей, вызванных неадекватно функционирующими системами и оборудованием.

Список литературы

1. Стрежелинский О.А. Требования зарубежных нормативно-технических документов по стойкости к воздействию высокочастотной составляющей ЭМИ высотного ядерного взрыва. Сборник научных трудов МИЭМ, – М: МИЭМ, 2008. – С. 37–45.
2. Стрежелинский О.А. Методология оценки электромагнитной стойкости авиационной техники за рубежом. Сборник научных трудов МИЭМ, – М: МИЭМ, 2008. – С. 31–35.
3. Стандарт МО США MIL-STD-464A «Department of Defense Interface Standard. Electromagnetic Environmental Effects for Systems», 19.12.2002.
4. Стандарт МО США MIL-STD-461E «Department of Defense Interface Standard. Requirements For The Control Of Electromagnetic Interference Characteristics Of Subsystems And Equipment», 20.08.1999.
5. Стандарт АК СВ США ADS-37A-PRF «Aeronautical Design Standard. Electromagnetic Environmental Effects (E3) Performance Requirements», US Army Aviation and Troops Command», St.Louis, Missouri, 28.05.1996.
6. NATO STANAG 3614 Ed.4 «Standardization Agreement. Electromagnetic Compatibility (EMC) of Aircraft Systems and Equipment», NATO Military Agency for Standardization (MAS), 9.05.2000.
7. Стандарт МЭК IEC 61000-2-9 «International Electrotechnical Commission. International Standard. Electromagnetic Compatibility (EMC). Part 2: Environment. Section 9: Description of HEMP Environment – Radiated Disturbance. Basic EMC Publication, Ed.1», IEC Central Office, Switzerland, 02-1996.
8. Стандарт МЭК IEC 61000-2-10 «International Electrotechnical Commission. International Standard. Electromagnetic Compatibility (EMC). Part 2: Environment. Section 10: Description of HEMP Environment – Conducted Disturbance. Basic EMC Publication, Ed.1», IEC Central Office, Switzerland, 11-1998.
9. Стандарт МЭК 61000-4-25 «Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4-25: Testing and measurement techniques - HEMP immunity test methods for equipment and systems», 1 ed, IEC Central Office, Geneva, Switzerland, 11-2001.
10. 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.; илл..
11. Стандарт МЭК 61000-2-11 «Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 2-11: Environment - Classification of HEMP environments», 1 ed, IEC Central Office, Geneva, Switzerland, 10-1999.
12. Стандарт МО Великобритании Def Stan 59-41 Electromagnetic Compatibility, Ministry of Defence, Directorate of Standardization, Glasgow, 6.10.1995 г.

13. Стандарт МО СИИА MIL-STD-188-125-1 «Department of Defense Interface Standard. HEMP Protection for Ground-Based C4I Facilities Performing Critical, Time-Urgent Missions, Part 1. Fixed Facilities», 17.07.1998.
14. Стандарт МО СИИА MIL-STD-188-125-2 «Department of Defense Interface Standard. HEMP Protection for Ground-Based C4I Facilities Performing Critical, Time-Urgent Missions, Part 2. Transportable Systems», 3.03.1999.

*Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»
Статья поступила 12.09.2014.*

Данное научное исследование (проект 14-01-0072) выполнено при поддержке Программы «Научный фонд НИУ ВШЭ» в 2014/2015гг.

This study (research grant 14-01-0072) supported by The National Research University-Higher School of Economics' Academic Fund Program in 2014/2015

Kechiev L.N., Baljuk N.V.

**Requirements of foreign standards on firmness and safety of objects
to powerful electromagnetic influences**

Requirements of modern foreign standards on firmness and safety in the field of powerful electromagnetic influences for military and civil systems are stated. Standards define requirements as result of influence of electromagnetic conditions on the equipment, systems and carriers, cover all electromagnetic factors, including electromagnetic compatibility, electromagnetic fields of high intensity, lightning categories and an electromagnetic impulse of nuclear explosion.

Keywords: standardization, firmness requirements, military systems, protection

National Research University Higher School of Economics