

Что нужно знать об испытаниях на выполнение требований ЭМС для изделий военного и аэрокосмического назначения. Краткий обзор

Гери ПЕТИТ (Ghery PETTIT)
Ghery@PettitEMCConsulting.com

Перевод и комментарии:
Владимир РЕНТЮК

В рамках второй из анонсированных в [1] статей нас будут интересовать общие требования по электромагнитной совместимости (ЭМС) изделий военного и аэрокосмического назначения. Испытания на ЭМС такого оборудования охватывают весьма широкий спектр самых разнообразных продуктов данного направления техники. И хотя стандарты, включая ограничения и методы тестирования, могут различаться, все они в части проверки на соответствие требованиям ЭМС имеют общие черты. Используемое оборудование и схемы измерений во многом похожи на оборудование и схемы, приведенные в первой статье цикла [2], однако у них есть свои особенности. Впервые оригинальная статья [3] опубликована в выпуске [4]. Читателям она предлагается в авторском переводе с комментариями, дополнениями и уточнениями согласно действующим международным стандартам и нормативным документам, используемым на территории Российской Федерации.

Что касается оборудования военного и аэрокосмического назначения, здесь основные требования в части ЭМС, так же как и для продуктов коммерческого назначения, — это соответствие задаваемым ограничениям на уровни наводимых и излучаемых помех, а также на уровни чувствительности к воздействиям электромагнитных полей с учетом области применения

и специфики конкретного оборудования. Для оборудования военного и аэрокосмического назначения испытания на уровне помех и связанные с ними ограничения предназначены в первую очередь для обеспечения надежного функционирования всех остальных систем конечного изделия в условиях наведенных и излучаемых помех по цепям подключения, а также взаимной эмиссии

и воздействия внешних электрических, электромагнитных и магнитных полей. Эти нормы жестче и более детально проработаны. Причем и оборудование, и системы не обязательно содержат те или иные радиоприемные или радиопередающие устройства. Важность решения данной проблемы наглядно иллюстрируют примеры, демонстрирующие последствия неадекватной с точки зрения ЭМС конструкции, приведенные, в частности, в публикации [5].

Хотя во многих типах военного и аэрокосмического оборудования проблемы ЭМС могут быть устранены внесением оперативных изменений (что греха таить, зачастую из-за сложности подобного оборудования и насыщенности систем так и поступают), но для выявления слабых мест по-прежнему требуется проведение испытаний не только на уровне НИОКР, но и сертификации изделий. Обнаружение отклонений на начальных этапах разработки значительно сократит затраты на последующую увязку всей системы в целом. Поэтому без испытаний невозможно обойтись, однако они, как известно, не являются некой самоцелью, а должны проводиться по стандартизованной методике и опираться на соответствие установленным граничным нормативам.

Примеры аварий и проблем, связанных с нарушениями требований в части ЭМС

В период между 1981 и 1987 годами несколько вертолетов Blackhawk UH-60 потерпели аварии, в которых погибли 22 военнослужащих. Как оказалось, аварии были связаны с недостаточной устойчивостью навигационного оборудования к воздействию внешних электромагнитных полей при пролете геликоптеров вблизи антенн мощных радиовещательных станций. Именно их воздействие и приводило к неконтролируемому самопроизвольному смертельному пикрованию.

Еще один пример касается штурмовика с вертикальным взлетом и посадкой AV-8B Harrier. Самолет был потерян, а пилот погиб в результате косвенных последствий от удара молнии, вызвавшего большие наведенные электрические токи внутри крыла самолета. Соединитель внутри системы топливных баков крыла не был способен выдерживать подобные нагрузки, в результате протекающий через него ток вызвал искру, которая в свою очередь и привела к взрыву топлива.

Согласно информации из отраслевых источников, Военно-воздушные силы США вынуждены были устраниТЬ потенциальную проблему от излучаемых высокочастотных сигналов бомбардировщиков B-2. Анализ показал потенциальные помехи радарной системы Raytheon AN/APQ-181, размещенной на B-2A и оказывающей влияние на системы коммерческой спутниковой связи, вводимой в эксплуатацию после 2007 года. В результате проведенных исследований было установлено, что радиолокатор B-2 может не только нарушить их функционирование, но и повредить коммерческие спутники связи, за что BBC США будут нести прямую ответственность. Ожидаемая общая сметная стоимость переработки была оценена в \$1,3 млрд.

Таблица 1. Установленные MIL-STD-461G требования к эмиссии и восприимчивости

Метод / требование	Описание
CE101	Conducted Emissions, Audio Frequency Currents, Power Leads Кондуктивные помехи, токи звуковой частоты, провода подключения питания
CE102	Conducted Emissions, Radio Frequency Potentials, Power Leads Кондуктивные помехи, радиочастотные потенциалы, провода подключения питания
CE106	Conducted Emissions, Antenna Port Кондуктивные помехи, антенные порты
CS101	Conducted Susceptibility, Power Leads Кондуктивная восприимчивость, провода подключения питания
CS103	Conducted Susceptibility, Antenna Port, Intermodulation Кондуктивная восприимчивость, антенные порты, интермодуляция
CS104	Conducted Susceptibility, Antenna Port, Rejection of Undesired Signals Кондуктивная восприимчивость, антенные порты, подавление паразитных (нежелательных) сигналов
CS105	Conducted Susceptibility, Antenna Port, Cross-Modulation Кондуктивная восприимчивость, антенные порты, перекрестная модуляция
CS109	Conducted Susceptibility, Structure Current Кондуктивная восприимчивость, наведенные токи
CS114	Conducted Susceptibility, Bulk Cable Injection Кондуктивная восприимчивость, влияние помех, наведенных на кабелях
CS115	Conducted Susceptibility, Bulk Cable Injection, Impulse Excitation Кондуктивная восприимчивость, влияние помех, наведенных на кабелях, импульсные помехи
CS116	Conducted Susceptibility, Damped Sinusoidal Transients, Cables and Power Leads Кондуктивная восприимчивость, затухающие колебательные помехи, кабели и провода подключения питания
CS117	Conducted Susceptibility, Lightning Induced Transients, Cables and Power Leads Кондуктивная восприимчивость, переходные процессы, инициированные ударом молнии, кабели и провода подключения питания
CS118	Conducted Susceptibility, Personnel Born Electrostatic Discharge Кондуктивная восприимчивость, электростатические разряды от персонала
RE101	Radiated Emissions, Magnetic Field Электромагнитная эмиссия, магнитные поля
RE102	Radiated Emissions, Electric Field Электромагнитная эмиссия, электрические поля
RE103	Radiated Emissions, Antenna Spurious and Harmonic Outputs Электромагнитная эмиссия, гармонические и побочные сигналы антенн
RS101	Radiated Susceptibility, Magnetic Field Электромагнитная восприимчивость, магнитные поля
RS103	Radiated Susceptibility, Electric Field Электромагнитная восприимчивость, электрические поля
RS105	Radiated Susceptibility, Transient Electromagnetic Field Электромагнитная восприимчивость, переходные процессы электромагнитных полей

Примечание переводчика. Просу обратить внимание, что в ряде текущих публикаций на тему стандарта MIL-STD-461 используются устаревшие данные из версии F и ниже, которые содержат меньше критерии оценки оборудования. При необходимости уточнить различия в версиях стандарта следует обратиться к [8] и к полным описаниям версий стандарта.

Тестирование по выполнению регламентов ЭМС для оборудования военного и аэрокосмического назначения выполняется на уровне системы и подсистемы. Требования на уровне оборудования или подсистемы обеспечивает последняя версия стандарта MIL-STD-461G [6], а требования на уровне системы или платформы размещения оборудования (носителя) устанавливает стандарт MIL-STD-464C [7]. В публикации [5] приведены подробные сведения по обоим весьма объемным стандартам. Задача данной статьи, не вникая в подробности и излишнюю детализацию, дать общие сведения по основным испытаниям на выполнение требований ЭМС, в частности те, которые устанавливают базовый стандарт MIL-STD-461G на интересующие нас оборудование и подсистемы.

Почему для обзора были выбраны именно стандарты США — MIL-STD-461G и MIL-STD-464C? Дело в том, что на практике они давно стали международными и соответствие их требованиям часто указывается

в документации не только на оборудование или изделия оборонного и аэрокосмического направления, но и там, где нужно подтвердить высокую надежность и устойчивость к внешним воздействиям, в том числе и относительно ЭМС. Чаще всего они используются в области разработки систем управления, вычислительных систем, компонентов авиационной и автомобильной техники и изделий двойного назначения. Кроме того, с ними сталкиваются и при закупке импортных комплектующих изделий и оборудования, в том числе не только оборонного назначения.

Система испытаний, положенная в основу стандарта MIL-STD-461G в части соответствия по ЭМС, включает поверку на уровня излучаемых электромагнитных помех (эмиссию) и восприимчивости к ним, а также на уровня кондуктивных (наведенных) помех и на восприимчивость к таким помехам. Стандарт MIL-STD-461G разделяет эти требования на четыре основные категории. Категория CE — кондуктивные помехи;

CS — восприимчивость к кондуктивным помехам; RE — излучаемые электромагнитные помехи (эмиссия) и RS — восприимчивость к электромагнитной эмиссии. В каждой категории имеется несколько типов испытаний, которые сведены в таблицу 1, соответствующую таблице IV Emission and susceptibility requirements стандарта MIL-STD-461G. Неоспоримым достоинством стандарта, как и большинства стандартов MIL-STD, является четкость и однозначность не только всех норм и методик, но и толкования результатов. Вместе с тем данный стандарт не ограничивает разработчика жесткими рамками там, где не требуется. Последнее наблюдалось в советских стандартах, которые в отношении военной тематики нередко были отраслевыми (ОСТы, причем часть из них существует и в настоящее время), засекреченными, имели как минимум гриф ДСП (для служебного пользования) и хранились не в отделе стандартизации, а в первом отделе.

Здесь важно точно знать определения, для этого воспользуемся их трактовкой соответствующими стандартами, действующими на территории РФ:

1. Понятие «кондуктивные помехи» (англ. continuous conducted emissions) подразумевает напряжения/токи помех непрерывного характера, существующие на проводах источника питания и других проводах элемента/модуля, которые могут создавать помехи работе бортового приемника.

2. Понятие «кондуктивная восприимчивость» (англ. conducted susceptibility) предполагает восприимчивость системы к кондуктивным (наведенным) сигналам в кабелях, подключенных к системе.

3. Понятие «электромагнитная эмиссия», или «электромагнитная помеха» (англ. radiated emissions), подразумевает электромагнитную помеху, распространяющуюся в пространстве.

4. Понятие «электромагнитная восприимчивость» (англ. radiated susceptibility) определяет способность рецептора реагировать на электромагнитную помеху.

Краткое описание каждого из этих видов испытаний будет приведено ниже. Они взяты из стандарта MIL-STD-461G и обобщены с помощью информации, которая содержится в [5, 10 и 11]. Кстати, полный текст MIL-STD-461G составляет 280 страниц, поэтому все, что изложено в данной статье, должно восприниматься исключительно как справочная информация. Для практических целей следует использовать оригинальную редакцию стандарта MIL-STD-461G [6], причем после самого тщательного ее изучения. Официальная текущая версия, или, как мы говорим, «учтенная копия» стандарта, как и его предыдущие версии C, D, E и F, бесплатно доступна на сайте: http://quicksearch.dla.mil/qsDocDetails.aspx?ident_number=35789.

Виды испытаний по стандарту MIL-STD-461G

Категория CE101.

Кондуктивные помехи, токи звуковой частоты, провода подключения питания

Категория CE101 применима для оценки помех в полосе частот 30 Гц – 10 кГц, наводимых на проводах, по которым оборудование получает мощность от источников питания, не являющихся частью испытуемого оборудования (ИО). Эти требования не устанавливают нормы на выходных клеммах непосредственно источниками питания. Уровни помех (они предусмотрены в дБмкА) определяются измерением тока на каждом проводе, в том числе и в общем проводе. Требования, установленные этой категорией, имеют различия, основанные на характере использования оборудования и его специфике. Конкретные ограничения обусловлены областью применения оборудования, входным напряжением, частотой, мощностью и силой тока.

Категория CE102.

Кондуктивные помехи, радиочастотные потенциалы, провода подключения питания

Категория CE102 устанавливает ограничения по уровню кондуктивных помех в полосе частот 30 кГц – 10 МГц для проводов, по которым оборудование получает мощность от источников питания, не являющихся частью испытуемого оборудования. Эти требования не устанавливают нормы на выходных клеммах источников питания. Оценка помех в низкочастотной области направлена на обеспечение того, чтобы ИО неискажало качество питания, для чего регламентируются допустимые уровни искажения напряжения на шинах питания всего комплекта оборудования. Искажение напряжения служит основой для оценки качества электроэнергии, поэтому пределы, указанные в категории CE102, соответствуют именно уровням напряжения и установлены в дБмкВ. Уровни напряжения кондуктивных помех определяются их измерением на выходе эквивалента сети LISN (англ. LISN — Line Impedance Stabilization Network, схема стабилизации полного импеданса линии или эквивалент полного сопротивления сети, ЭПСС, подробно [2]). В отличие от предельных значений по току, описанных в категории CE101, пределы CE102, как уже было сказано, базируются на напряжении. Основной предел по максимальному уровню помех установлен в соответствии с номинальным напряжением питания и не зависит от силы тока. Несоблюдение ограничений, налагаемых категорией CE102, касается импульсных стабилизаторов напряжения и генерируемых ими гармоник.

Категория CE106.

Кондуктивные помехи, антенные порты

Категория CE106 устанавливает ограничения по уровню кондуктивных помех в полосе частот 10 кГц – 40 ГГц (зависит от рабочей частоты оборудования) и содержит требования по уровням помех для антенных входов/выходов передатчиков, приемников и усилителей. Цель проверки — подтверждение устойчивости приемников, размещенных как в составе, так и вне тестируемого оборудования, от возможного нарушения их функционирования в результате излучения от антенны ИО. Требования категории CE106 не распространяются на стационарные установленные антенны.

Категория CS101.

Кондуктивная восприимчивость, провода подключения питания

Категория CS101 устанавливает уровни восприимчивости к кондуктивным помехам входных проводов подачи питания в диапазоне частот 30 Гц – 150 кГц для оборудования, работающего от напряжения переменного и постоянного тока. В общем случае эта категория применяется для оборудования с потреблением менее 30 А на фазу, но также предназначена и для систем с питанием от сети переменного тока с потреблением более 30 А на фазу, но лишь тогда, когда такая система имеет рабочую частоту, не превышающую 150 кГц, и чувствительность не хуже 1 мкВ (например, 0,5 мкВ). Если ИО работает на постоянном токе, данное требование применимо в диапазоне частот 30 Гц – 150 кГц. Если же ИО работает на переменном токе, это требование применимо начиная со второй гармоники рабочей частоты ИО (для частоты 50 Гц – 100 Гц, для 60 Гц соответственно 120 Гц) и до 150 кГц. Цель испытаний — гарантировать, что технические характеристики ИО не ухудшаются от наличия помех в указанном диапазоне частот на данной форме выходного напряжения источника питания.

Категории CS103, CS104 и CS105.

Кондуктивная восприимчивость, антенные порты, интермодуляция, подавление паразитных (нежелательных) сигналов, перекрестная модуляция

Эта серия испытаний для первичных приемников включает методы тестирования для проверки входа приемника на чувствительность к интермодуляции (CS103), подавлению паразитных (нежелательных) сигналов (CS104) и перекрестной модуляции (CS105). Первоначально такие типы испытаний не были разработаны для традиционных перестраиваемых радиоприемников супергетеродинного типа. В текущей версии рассматриваемого стандарта нормативы по вос-

приимчивости предусмотрены для такого оборудования и подсистем, как приемники связи, радиочастотные усилители, приемопередатчики, радиолокационные приемники, акустические приемники и приемники радиоэлектронной борьбы (РЭБ). Здесь необходимо указать требования, которые согласуются с характеристиками обработки сигнала для подсистемы и конкретными процедурами тестирования, предназначенными для проверки соответствующего регламента.

Процедура тестирования ИО по выполнению требований CS103 используется для определения наличия продуктов интермодуляции, которые могут быть вызваны нежелательными сигналами на входных портах антенны ИО. Испытания проводятся в диапазоне частот 15 кГц – 10 ГГц, причем на выходе ИО при соблюдении предельных требований, предусмотренных в отдельной спецификации на поставку оборудования, не должны фиксироваться уровни от продуктов интермодуляции, выходящие за пределы заданных допусков.

Процедура тестирования ИО по выполнению требований CS104 применяется для оценки подавления паразитных (нежелательных) сигналов на входных портах антенны ИО. Испытания проводятся в диапазоне частот 30 Гц – 20 ГГц. В отличие от требований CS103 для аппаратуры морских кораблей и подводных лодок этот норматив относится ко всем типам приемников. Указанные частоты являются функцией внешнего интерфейса оцениваемого устройства, при этом на выходе ИО при соблюдении предельных требований, предусмотренных в отдельной спецификации на поставку оборудования, не должны фиксироваться уровни от продуктов интермодуляции, выходящие за пределы заданных допусков.

Что касается восприимчивости к перекрестной модуляции, определенной требованием CS105, здесь испытания проводят, как и для категории CS104, в диапазоне частот 30 Гц – 20 ГГц, но только для приемников, работающих с амплитудной модуляцией, что должно быть указано в спецификации на поставку оборудования. Проверка, как и для требований CS103 и CS104, осуществляется подачей соответствующих сигналов на антенный порт (с контролем их уровня на входе) и оценкой продуктов перекрестной модуляции на выходе ИО.

Категория CS109.

Кондуктивная восприимчивость, наведенные токи

Требования CS109 — это узкоспециализированный тест для оценки устойчивости оборудования к наведенным токам в полосе частот помехи 60 Гц – 100 кГц. Испытания по CS109 выполняются для очень чувствительного корабельного

оборудования военно-морского флота, с чувствительностью не хуже 1 мкВ (например, 0,5 мкВ), в случае, когда приемники работают в частотном диапазоне данного теста. Носимое оборудование освобождено от выполнения требований CS109. Цель испытаний — гарантировать, что оборудование не реагирует на магнитные поля, вызванные токами, протекающими в структуре платформы (носителя), на которой установлено оборудование. Пределные уровни чувствительности (в дБмкА) были выявлены как следствие эксплуатационных проблем из-за токов, наводимых на шкафах (корпусах) оборудования, и детерминированы в ходе лабораторных измерений характеристик отклика на данное воздействие выбранных типов приемников. Испытания проводят внесением паразитных сигналов непосредственно на корпус ИО.

Категория CS114.

Кондуктивная восприимчивость, влияние помех, наведенных на кабелях

Требования по CS114 предназначены для проверки способности тестируемого устройства выдерживать заданные уровни радиочастотных сигналов в полосе частот 10 кГц – 200 МГц, наведенных на кабелях. Используются для всех электрических кабелей, подключенных к корпусам ИО.

Категория CS115.

Кондуктивная восприимчивость, влияние помех, наведенных на кабелях, импульсные помехи

Требования по CS115 используются для проверки восприимчивости по электрическим кабелям, подключенными к корпусам ИО. Основная задача заключается в оценке защиты оборудования от быстрых переходных процессов, особенно с крутыми фронтами (передним и задним), которые могут возникнуть во время переключения оборудования или в результате внешних воздействий, таких как молния и электромагнитный импульс. Параметры импульса установлены в А/с, частота повторения 30 Гц, минимальная длительность воздействующего импульса 30 нс.

Категория CS116.

Кондуктивная восприимчивость, затухающие колебательные помехи, кабели и провода подключения питания

Требования по CS116 применимы для проверки восприимчивости по всем электрическим кабелям, подключенными к корпусам ИО, а также на каждом проводе подключения питания. Концепция заключается в моделировании электрических сигналов тока и напряжения, возникающих на корпусах от возбуждения естественных резонансов с помощью управляемого затухающего сигнала синусоидальной формы, приведенного на рис. 1.



Рис. 1. Нормализованный испытательный сигнал для проверки требований по CS116

Категория CS117.

Кондуктивная восприимчивость, переходные процессы, инициированные ударом молнии, кабели и провода подключения питания

CS117 является одним из двух новых методов испытаний, добавленных в MIL-STD-461G. Требования по CS117 используются для проверки восприимчивости по всем электрическим кабелям, подключененным к корпусам ИО, а также на каждом проводе подключения питания и распространяются на судовое оборудование, расположенное над палубой или содержащее соединительные кабели, проходящие над палубой. Концепция заключается в устранении косвенных последствий от удара молнии на уровне оборудования, как указано в стандарте MIL-STD-464, и не предназначена для устранения прямых эффектов от удара молнии или близких ударов молнии. Тестирования проводят различными нормализованными испытательными сигналами, в том числе и сложной формы.

Категория CS118.

Кондуктивная восприимчивость, электростатические разряды от персонала

Требования по CS118 предусматривают проверку устойчивости оборудования к электростатическим разрядам. Тестированию подлежат электрические, электронные и электромеханические подсистемы и оборудование, имеющие контакт с персоналом. Следует отметить, что нормы CS118 не применимы к таким предметам, как боеприпасы. Концепция заключается в моделировании электростатического разряда, вызванного контактом с человеком, а контрольные точки выбирают на основе наиболее вероятных мест такого контакта. На поверхностях для испытаний определяется несколько точек, которые при нормальной эксплуатации легкодоступны операторам оборудования. Типичные контрольные точки — это области кнопочной клавиатуры, переключатели, регуляторы, индикаторы

и оболочки разъемов, расположенные на каждой поверхности ИО. Стандарт предусматривает четыре уровня устойчивости.

Категория RE101.

Электромагнитная эмиссия, магнитные поля

Критерий RE101 применяется для идентификации излучения в диапазоне 30 Гц – 100 кГц от оборудования и корпусов подсистем, в том числе подключаемых электрических кабелей. RE101 является специальным требованием, предназначенным для оценки и управления магнитными полями для приложений, в которых такое оборудование устанавливается, потенциально чувствительных к магнитным полям низкой частоты.

Категория RE102.

Электромагнитная эмиссия, электрические поля

Критерий RE102 применяется для идентификации излучения в диапазоне частот 10 кГц – 18 ГГц и излучаемых помех от ИО и связанных с ним кабелей. Оценивается защита чувствительных приемников от радиопомех, поступающих через антенны.

Категория RE103.

Электромагнитная эмиссия, гармонические и побочные сигналы антенн

Критерий RE103 может применяться в качестве альтернативы для CE106 при тестировании передатчиков с их предполагаемыми антennами. Это требование считается выполненным, если уровни излучения не превышают допустимый предел в режиме передачи, установленный по критерию RE102. Однако предпочтительным является критерий CE106, который следует использовать всегда, когда это возможно. Однако для систем, использующих активную antennу, или когда antennа установлена стационарно и не снимается, или мощность передачи слишком вы-

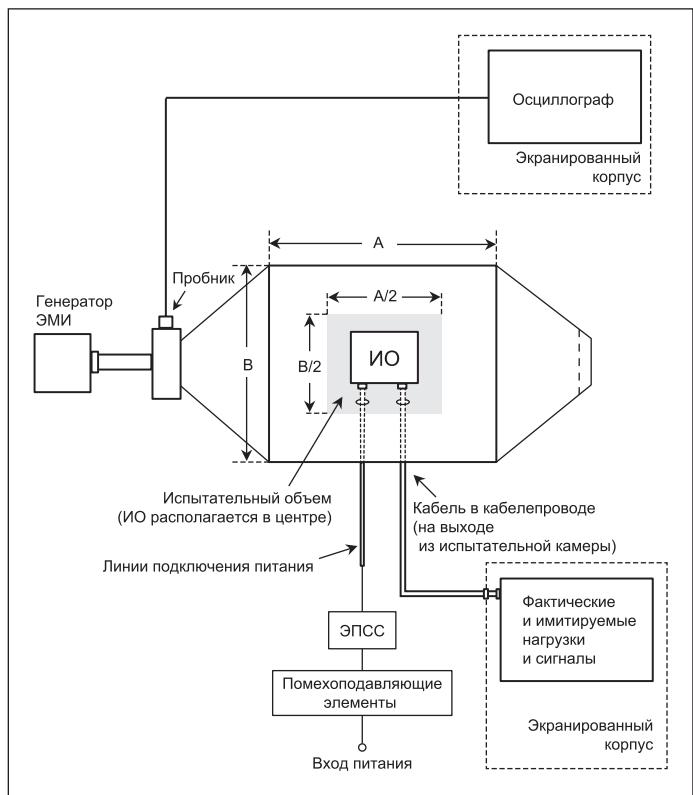


Рис. 2. Типичная испытательная установка для поверки оборудования на воздействие электромагнитного импульса с использованием плоскопараллельной излучающей системы (вид сверху)

сока, необходимо обратиться к критерию RE103. Испытания по RE103 применимы и по существу идентичны CE106 для передатчиков в режиме передачи в заданных диапазонах частот и пределах мощностей. Частотный диапазон данного типа испытаний основан на рабочей частоте ИО.

Категория RS101.

Электромагнитная восприимчивость, магнитные поля

Требования по RS101 — узкоспециализированные испытания. Они определяют восприимчивость наземного оборудования армии и флота, предназначенного для разминирования или обнаружения мин, к магнитным полям в полосе частот 30 Гц – 100 кГц. Кроме того, данные нормы применяются для оборудования кораблей и подводных лодок ВМФ с рабочей частотой 100 кГц или менее и чувствительностью не хуже 1 мВ (например, 0,5 мкВ), для военно-морского авиационного оборудования, установленного на самолетах с использованием воздушного охлаждения, и внешнего оборудования на самолетах, которые могут запускаться электромагнитными пусковыми системами. Это требование не применимо для оборудования радиосвязи с работой через антенны. Проверка по критерию RS101 должна подтвердить, что характеристики оборудования, подверженного воздействию низкочастотных магнитных полей, не ухудшаются в процессе эксплуатации.

Категория RS103.

Электромагнитная восприимчивость, электрические поля

Требования по RS103 устанавливаются в диапазоне частот 2 МГц – 18 ГГц, но верхняя частота может достигать 40 ГГц, если это определено закупающей организацией. Условия в рамках RS103 предусмотрены как для корпусов ИО, так и для связанных с ними кабелей. Основная задача заключается в обеспечении того, чтобы оборудование работало без ухудшения своих характеристик при наличии электромагнитных полей, создаваемых передающими антennами, расположенным как на борту, так и снаружи. Пределы зависят от кон-

кретной области применения и основаны на уровнях, которые, как ожидается, будут встречаться в течение срока службы оборудования. Следует отметить, что требования в рамках RS103 необязательно будут наихудшими из возможных относительно той окружающей среды, в которой данное оборудование может использоваться.

Категория RS105.

Электромагнитная восприимчивость, переходные процессы электромагнитных полей

Требования RS105 призваны продемонстрировать способность тестируемого устройства выдерживать воздействия электромагнитных импульсов (ЭМИ) с большой крутизной фронта (нарастания), другими словами, ЭМИ, возбуждающие переходный процесс в виде электромагнитной волны в свободном пространстве. Испытания по RS105 применяются для оборудования в корпусах, располагаемого вне носителя, на котором размещено оборудование, подвергаемое воздействию ЭМИ, или для внутреннего оборудования в случае плохой экранированности или неэкранированных носителей. Однако кабели такого оборудования во время испытаний должны быть защищены и помещены в экранированный кабелепровод. В отличие от испытаний, описанных выше, проверка на воздействие ЭМИ не имеет близкого коммерческого аналога, но устойчивость к подобным воздействиям критична для оборудования военного и аэрокосмического назначения. Обобщенная блок-схема установки для проведения испытаний на воздействие электромагнитного импульса показана на рис. 2, а форма возбуждающего воздействующего импульса — на рис. 3 [6].

Не все тесты необходимы для каждого типа устройства или предполагаемой среды использования. Для того чтобы разделить устройства по типам и областям эксплуатации, в стандарте MIL-STD-461G имеется таблица, представленная в виде матрицы (TABLE V. Requirement matrix). Таблица 2 показывает, как применяются требования стандарта на основе предполагаемого использования устройства.

Для получения более подробной информации можно обратиться к [5, 9, 10] или непосредственно к стандарту MIL-STD-461G [6]. Кроме того, в руководствах [4 и 5] представлены перечни стандартов, применяемых к различным типам военного оборудования, а также список литературы по данной проблематике.

Что касается аэрокосмического оборудования, популярным и распространенным нормативным документом в части ЭМС, требуемым FAA (Federal Aviation Administration, Федеральное управление гражданской авиации — центральный орган государственного управления США в области гражданской авиации) для коммерческих самолетов, являются квалификационные требования DO-160 "Environmental Conditions and Test Procedures for Airborne Equipment" [11]. Они были разработаны RTCA (Radio Technical Commission for Aeronautics, Радиотехническая комиссия по аэронавтике) на граж-

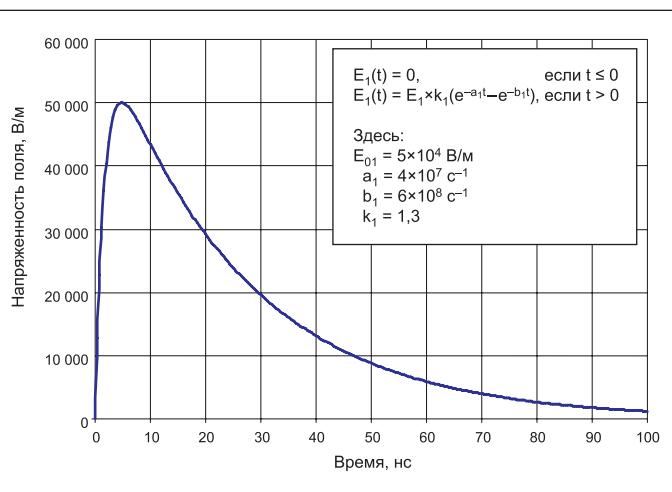


Рис. 3. Испытательный импульс при проверке на воздействие ЭМИ

данские самолеты и регламентируют условия окружающей среды и процедуры испытаний для бортового оборудования. В настоящее время действует версия DO-160G в редакции 8 декабря 2010 года с изменением 1 от 16 декабря 2015 года. В РФ используется аналогичный документ КТ-160D (QR-160D) в редакции от 8 декабря 2004 года [12], введенный в действие с 1 октября 2005 года. Он входит в перечень Авиационного регистра МАК «Сертификация авиационной техники и ее производств». Решая комплексную задачу обеспечения летной годности гражданской авиационной техники, МАК создал эту нормативную базу сертификации, состоящую из Авиационных правил (АП), гармонизированных с аналогичными правилами США (FAR) и Объединенной Европы (JAR/CS).

Исходя из сказанного, основными в данном направлении являются требования DO-160G. Так что производители, выпускающие продукты для этого рынка, должны использовать действующую на текущий момент официальную копию требований и полностью понимать содержание данного документа (КТ-160D содержит 327 страниц), а испытательная лаборатория для поверки их продукции должна быть надлежащим образом аккредитована.

Требования DO-160 охватывают гораздо больший круг вопросов, чем проблемы, касающиеся нормативов по ЭМС, которым посвящена настоящая статья. Тем не менее регламенты по ЭМС включают в себя кондуктивные помехи в цепях питания и восприимчивость оборудования к таким помехам, восприимчивость к переходным процессам, провалам и перерывам в подаче питающего напряжения. Устанавливаются испытания, позволяющие определить, сможет ли оборудование противостоять воздействию пиков напряжения, поступающих на оборудование и на его цепи подачи питания, причем для систем с питанием как от напряжения переменного, так и постоянного тока. Устанавливается восприимчивость к электромагнитным помехам звуковой частоты по цепям питания, что позволяет определить, будет ли оборудование адекватно реагировать на помехи с частотами составляющими, которые обычно имеют место для систем летательных аппаратов. Оценивается восприимчивость оборудования и всей конфигурации его подключения к помехам индукции, действующим через провода линий связи и корпус оборудования, что связано с особенностями среды установки оборудования. Кроме того, оценивается радиочастотная восприимчивость (радиоизлучение и проводимость), восприимчивость к удару молнии и чувствительность к электростатическому разряду.

Тестирование авионики требует сложных решений, поскольку габариты конечных изделий могут быть весьма внушительными (рис. 4).

Таблица 2. MIL-STD-461G. Матрица соответствия требованиям

Оборудование и подсистемы, установленные в, на или запускаемые от следующих носителей оборудования или мест установки	Применимость требования к оборудованию																		
	CE101	CE102	CE106	CS101	CS103	CS104	CS105	CS109	CS114	CS115	CS116	CS117	CS118	RE101	RE102	RE103	RS101	RS103	RS105
Надводные корабли	A	A	L	A	S	L	S	L	A	S	A	L	S	A	A	L	L	A	L
Субмарины	A	A	L	A	S	L	S	L	A	S	L	S	S	A	A	L	L	A	L
Самолеты, наземные войска, включая аэродромы	A	A	L	A	S	S	S		A	A	A	L	A	A	A	L	A	A	L
Самолеты, ВМФ	L	A	L	A	S	S	S		A	A	A	L	A	L	A	L	L	A	L
Самолеты, BBC	A	L	A	S	S	S			A	A	A	L	A		A	L		A	
Космические системы, включая ракеты-носители	A	L	A	S	S	S			A	A	A	L			A	L		A	
Наземное оборудование, наземные войска	A	L	A	S	S	S			A	A	A	S	A		A	L	L	A	
Наземное оборудование, ВМФ	A	L	A	S	S	S			A	A	A	S	A		A	L	L	A	L
Наземное оборудование, BBC	A	L	A	S	S	S			A	A	A		A		A	L		A	

Примечание.

А: Применимо.

Л: Ограничено, как указано в отдельных разделах настоящего стандарта.

С: Требования должны указываться в закупочной документации.

Хотя в начале статьи было сказано, что методики испытания и базовые схемы подключения испытательного оборудования для проверки требований в части ЭМС коммерческого и военного оборудования схожи, тем не менее существуют различия, которые необходимо учитывать. Выше уже были представлены некоторые отличия в части испытательных импульсов и схемы испытаний (рис. 2–4), далее также приведен ряд важных моментов, требующих внимания.

Если для испытаний по выполнению требований по ЭМС коммерческого оборудования общепринятым является применение эквивалента сети (ЭПСС, LISN) индуктивностью 50 мГн, то для испытаний по CE101 и CE102 существуют особые случаи, в которых необходим эквивалент сети с индуктивностью 5 мГн. Как уже говорилось, уровни для испытаний по нормам CE101 приведены в дБмкА. Здесь ЭПСС используются только для стабилизации линейного импеданса, а сами измерения выполняются с помощью датчиков токов. В то же время уровни по CE102 установлены в дБмкВ, измерения проводятся так же, как и для коммерческих продуктов, с приемником, подключенным к выходному порту ЭПСС, а другой выходной порт или порты нагружаются эквивалентом 50 Ом. Следует отметить, что MIL-STD-461G предусматривает на выходе ЭПСС аттенюатор на 20 дБ, защищающий измерительное оборудование от переходных процессов. Это не является обязательным условием в стандартах для коммерческого оборудования, но его имеет смысл учитывать при лабораторных испытаниях коммерческих продуктов.

Военные стандарты, описывающие регламенты и методики испытаний на соответствие ЭМС, такие как MIL-STD-461G, для тестирования на уровнях собственного излучения предполагают использование различных антенн. В отличие от них стандарты на коммерческое оборудование, например CISPR 32 и ANSI C63.4, требуют наличия лишь антенн с линейной поляризацией (вертикальной

и горизонтальной) и не настаивают на испытаниях на переменное магнитное поле.

В MIL-STD-461G, в отличие от коммерческих стандартов, для выполнения требования RE101 указан датчик в виде катушки диаметром 13,3 см, содержащий 36 витков провода. Также должен присутствовать приемник, способный проводить измерения в диапазоне частот 30 Гц – 100 кГц.

В том же стандарте требование RE102 устанавливает оценку излучения в полосе частот от 10 кГц. Для этого в диапазоне 10 кГц – 30 МГц применяется штыревая антenna длиной 104 см (41"). Этот диапазон частот вообще не рассматривается в CISPR 32 или Правилах FCC для излучения. Таким образом, требования к антенне и приемнику здесь иные. В полосе 30–200 МГц используется биконическая антenna, широко распространенная и при испытаниях коммерческих продуктов. В полосе частот 200 МГц – 1 ГГц согласно стандарту MIL-STD-461G предусмотрен двойной гребенчатый рупор. Это совершенно иная антenna, чем те, что предназначены для тестирования коммерческих продуктов, — настраиваемые dipольные антennы или логопериодическая антenna решетка симметричных вибраторов.

Для испытаний на уровнях электромагнитных излучений различаются и схемы тестов. При этом нужны не только различные схемы подключения, но и само оборудование. Так, для стандарта MIL-STD-461G не понадобится настраиваемая по высоте установка антennы или специальная мачта, способная перемещать антенну.

Что касается устойчивости или, как это определяет MIL-STD-461G, восприимчивости к электромагнитному излучению, в рамках испытаний по категории RS103 могут быть необходимы значительно более высокие напряженности электромагнитных полей. Если стандарт CISPR 35 определяет напряженность 3 В/м в полосе частот 80 МГц – 1 ГГц и на нескольких дискретных частотах до 5 ГГц (с возможностью тестирования нескольких

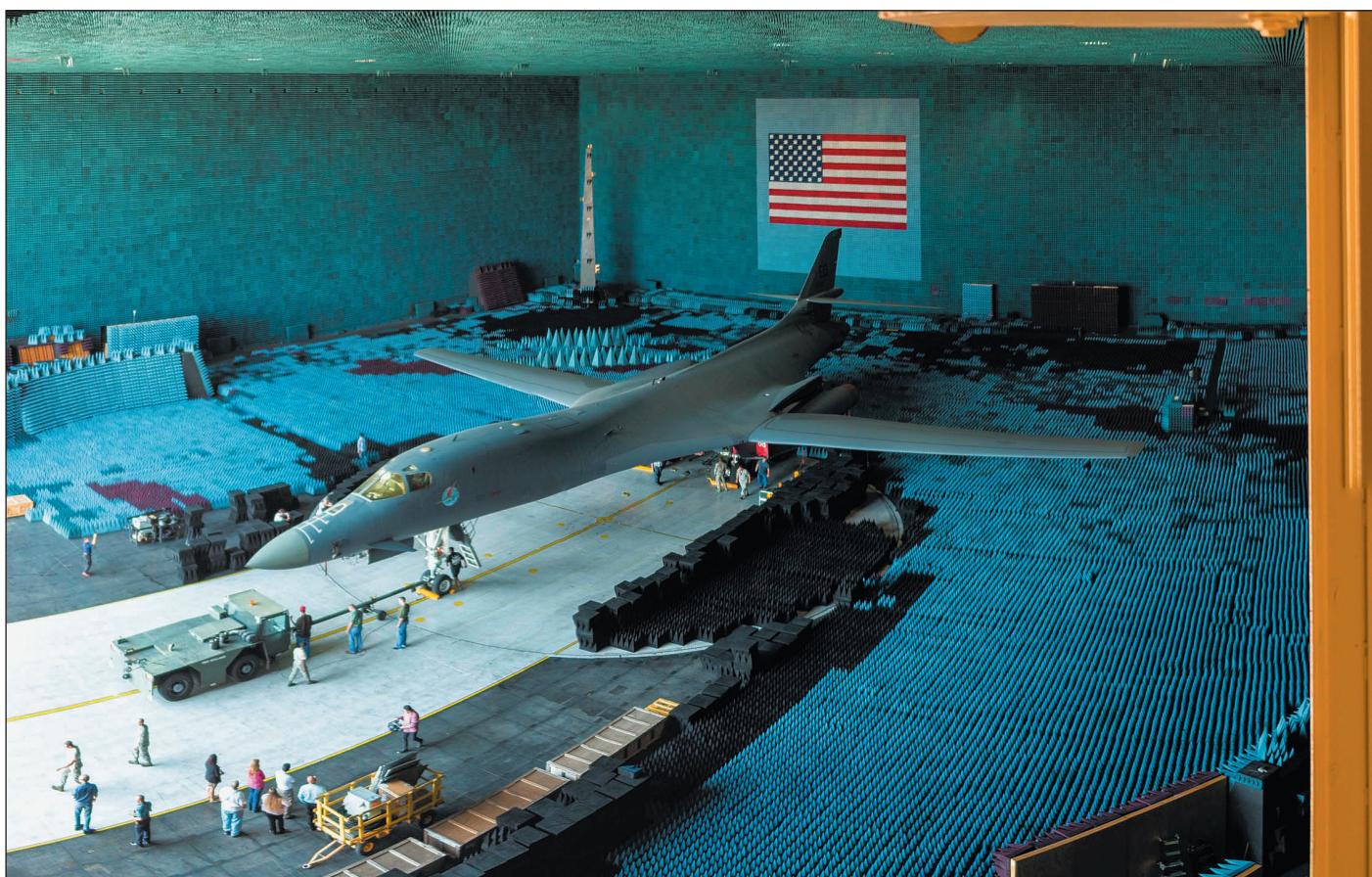


Рис. 4. Тестирование бомбардировщика B1-B Lancer на уровень ЭМП в крупнейшей в мире полностью безэховой камере, имитирующей условия свободного пространства [13]

дискретных частот при уровнях напряженности до 30 В/м), то для определенного оборудования в рамках стандарта MIL-STD-461G следует проводить тестирования на уровнях 20–200 В/м в диапазоне частот 2 МГц – 40 ГГц. Здесь также должно присутствовать дополнительное тестовое оборудование (генераторы сигналов, усилители, антенны и т.д.), не обязательное для испытаний коммерческих продуктов.

Каждый тест в рамках стандарта MIL-STD-461G требует особого испытательного оборудования, часть которого может использоваться и для тестирования коммерческих продуктов. Кроме указанной цели исключить влияние систем и оборудования военного и аэрокосмического назначения друг на друга, подобные испытания решают еще одну, косвенную задачу — уменьшение вероятности обнаружения военной техники по остаточному электромагнитному излучению, например РЛС типа «Кольчуга». Эта уникальная в своем роде пассивная РЛС была разработана и серийно выпускалась в Украине донецким заводом «Топаз», ныне ее производство восстанавливается на НПК «Искра» в Запорожье. При организации испытаний на соответствие MIL-STD-461G важно не только его точное понимание. Необходимо убедиться и в том, что оборудование вашей лаборатории или той, которой вы доверили проверку своих изделий, пригодно для ее проведения. Это совсем не лишний шаг, необходимо быть полностью уверенным, что испытания будут выполнены тщательно, должным образом, а их результат позволит принять правильные решения.

В настоящей публикации и в [2] были рассмотрены требования и особенности испытаний продуктов коммерческого, военного и частично аэрокосмического назначения относительно их соответствия по электромагнитной совместимости. Такие испытания — сложный и ответственный процесс, который не может бытьпущен на самотек. Как же подготовить оборудование и самого себя к столь непростому процессу? Этому будет посвящена следующая часть анонсированного в [1] цикла статей по выполнению требований ЭМС. ■

Литература

1. Рентюк В. Электромагнитная совместимость: проблема, от решения которой не уйти // Компоненты и технологии. 2017. № 7.
2. Рентюк В. Что нужно знать об испытаниях на выполнение требований по ЭМС для изделий коммерческого назначения // Компоненты и технологии. 2017. № 7.
3. Pettit G. Summary of Military and Aerospace EMC Tests. Pettit EMC Consulting, 2017.
4. 2017 EMC Testing Guide. Interference Technology Guide Series. 2017 ITEM Media. www.learn.interferencetechnology.com/2017-emc-testing-guide/
5. 2016 Military EMC Guide. Interference Technology. www.interferencetechnology.com/wp-content/uploads/2016/10/2016-IT-Military-EMC-Guide.pdf
6. MIL-STD-461G Requirements for the Control of Electromagnetic Interference Characteristics of Subsystems and Equipment, Revision G. Defense Acquisition System. 11 December. 2015.
7. MIL-STD-464C Interface Standards Electromagnetic Environmental Effects, Requirements for Systems, Revision G. Defense Acquisition System. 1 December. 2010.
8. Смирнов А., Басалаев К. Тест на совместимость // Эксперт+. 2015. № 1.
9. Javor K. MIL-STD-461G: The Compleat Review // Interference Technology. April 2016.
10. Javor K. Why Is There AIR (in MIL-STD-461G)? // Interference Technology, April 2016.
11. RTCA/DO-160G. RTCA. December 2010. www.my.rtca.org/nc_store?search=DO-160G
12. КТ-160Д/14Д. Условия эксплуатации и окружающей среды для бортового авиационного оборудования (Внешние воздействующие факторы). Требования, нормы и методы испытаний. 08.12.2004.
13. www.en.wikipedia.org/wiki/Benefield_Anechoic_Facility