

II-я ВСЕРОССИЙСКАЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ  
ТЕХНОЛОГИИ, ИЗМЕРЕНИЯ И ИСПЫТАНИЯ  
В ОБЛАСТИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ  
СОВМЕСТИМОСТИ


Техно  
ЭМС  
2015



МОСКВА

1 – 2 апреля 2015 г.

 **TK30**  
«Электромагнитная  
совместимость»

 **ДИПОЛЬ**

 **МИЭМ**

 **TESEQ**

 **САМТЭС**

**Организаторы конференции:**

Федеральное агентство  
по техническому регулированию и метрологии

TK 30 «Электромагнитная совместимость»

Компания «Диполь»

Московский институт электроники и математики  
НИУ «Высшая школа экономики»

Метрологическая ассоциация промышленников  
и предпринимателей

ЗАО «НИЦ «САМТЭС»

TESEQ

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.



Кечнев Л.Н.,  
НИУ «Высшая школа экономики», г. Москва;  
Тел.: +7(917)572-27-27; e-mail: [kln1940@gmail.com](mailto:kln1940@gmail.com)

Михеев В.А.,  
ИМЦ «Концерн «Вега», г. Москва;  
e-mail: [mikheev\\_v@mail.ru](mailto: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, широкоэшелонных 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 антенны 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 обеспечение 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 переопределены 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 помехозащиты 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 характеристикам 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 рассматривать 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 сбой 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 помехозащиты 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.