

17. Patrick Sincebaugh, William Green. A neural network based diagnostic test system for armored vehicle shock absorbers expert systems with applications, 1996, Vol. 11 No. 2, pp. 237-244.
18. Krug P.G. Neyronnye seti i neyrokomp'yutery: ucheb. posobie po kursu «Mikroprotssory» [Neural networks and neurocomputers: a textbook on the course "Microprocessors"]. Moscow: Izd-vo MEI, 2002.
19. Burakov M.V. Neyronnye seti i neyrokontrollery: ucheb. posobie [Neural networks and neurocontrollers: textbook]. St. Petersburg: GUAP, 2013.
20. Gafarov F.M. Iskusstvennye neyronnye seti i prilozheniya: ucheb. posobie [Artificial neural networks and applications: textbook]. Kazan': Izd-vo Kazan. un-ta, 2018.
21. Logunov A.V., Beresnev A.L. Vibroakusticheskaya diagnostika transportnykh sredstv [Vibroacoustic diagnostics of vehicles], *Problemy sovremennoy sistemotekhniki sbornik nauchnykh statey* [Problems of modern system engineering collection of scientific papers], 2020, Issue XIV, pp. 118.
22. Logunov A.V., Beresnev A.L. Vozmozhnosti vibroakusticheskogo issledovaniya i diagnostiki podveski transportnykh sredstv [Possibilities of vibroacoustic study and diagnostics of vehicles suspension], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2021, No. 1 (218), pp. 165-174.
23. Logunov A.V., Beresnev A.L. Vibromonitoring dvigatelya vnutrennego sgoraniya [Vibromonitoring of internal combustion engine], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2021, No. 6 (223), pp. 160-170.
24. Vakulenko S.A., Zhikhareva A.A. Prakticheskiy kurs po neyronnym setyam [Practical course on neural networks]. St. Petersburg Universitet ITMO, 2018.

Статью рекомендовал к опубликованию к.т.н. А.Ю. Будко.

Логунов Артём Владимирович – Южный федеральный университет; e-mail: artem-logunov@yandex.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: +79054586468, аспирант,

Береснев Алексей Леонидович – e-mail: alex_tr6@mail.ru; кафедра электротехники и механики; к.т.н.; доцент.

Logunov Artem Vladimirovich – Southern Federal University; e-mail: artem-logunov@yandex.ru; Taganrog, Russia; phone: +79054586468; postgraduate.

Beresnev Alexey Leonidovich – e-mail: alex_tr6@mail.ru; the departments of electrical engineering and mechatronics; cand. of eng. sc.; associate professor

УДК 621.371

DOI 10.18522/2311-3103-2022-6-222-234

В.П. Можайцев, Д.В. Семенихина

ВОЗДЕЙСТВИЕ ПОРТАТИВНЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ НА БОРТОВОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ВОЗДУШНОГО СУДНА

Статья посвящена актуальной проблеме анализа рисков, возникающих при эксплуатации воздушных судов в случаях нахождения на борту самолета портативных электронных устройств, и выбору методов проверки устойчивости бортового оборудования к воздействию таких устройств. В статье рассмотрены все возможные пути распространения паразитных и преднамеренных излучений от портативных электронных устройств к бортовым радиоэлектронным системам и проанализированы два основных аспекта воздействия портативных электронных устройств на бортовое оборудование воздушного судна. Первый аспект определяет самолетную систему и рекомендации по квалификации оборудования, подверженного радиоизлучению, которые обеспечивают устойчивость к радиоизлучению от намеренно передающих переносных электронных устройств. Обычно это трактуется, как защита от воздействия портативных электронных устройств «через заднюю дверь». Вторым аспектом определяются приемлемые помехи, вызывающие потери в полосе пропускания между самолетными радиоприемниками и переносными электронными устройствами с паразитным радиоизлучением.

Это принято называть защитой от воздействия переносных устройств «через переднюю дверь». На основе анализа основных рисков, связанных с помехами, создаваемыми портативными радиоэлектронными устройствами самолетным системам, определены системы самолета, для которых должна быть выполнена демонстрация соответствия стойкости к воздействию портативных электронных устройств. Для демонстрации соответствия стойкости самолетного оборудования к воздействию «через переднюю дверь» необходимо оценить уровни возможных помех, создаваемых портативными электронными устройствами в полосе приема самолетного оборудования. Демонстрация соответствия самолетного оборудования к воздействию «через заднюю дверь» аналогична демонстрации стойкости к воздействию высокоинтенсивным электромагнитным полям и косвенным ударам молнии. Необходимо выполнить одним из двух предлагаемых методов для установления их восприимчивости к радиоизлучению и контрольные уровни восприимчивости систем самолета к радиоизлучению. Первый метод связан с доставкой оборудования на стенд испытаний по радиочастотному излучению, второй метод – с выполнением испытания систем, которые установлены на применимом самолете. Выработаны рекомендации по выбору методов для верификации устойчивости систем самолета к воздействию портативных устройств. Проанализированные аспекты воздействия помогут определить объем и методики проведения испытаний для снятия ограничений использования портативных электронных устройств на борту воздушного судна.

Портативные электронные устройства; высокоинтенсивные электромагнитные поля.

V.P. Mozhaytsev, D.V. Semenikhina

IMPACT OF PORTABLE ELECTRONIC DEVICES ON AIRCRAFT AVIONICS

The article is devoted to the topical problem of analyzing the risks that arise during the operation of aircraft in cases where portable electronic devices are on board the aircraft, and the choice of methods for checking the resistance of onboard equipment to the effects of such devices. The article considers all possible ways of propagation of spurious and intentional emissions from portable electronic devices to avionics systems and analyzes two main aspects of the impact of portable electronic devices on aircraft avionics. The first aspect defines the aircraft system and qualification guidelines for radio-exposed equipment that provide immunity to radio emissions from intentionally transmitting portable electronic devices. This is usually interpreted as protection against the impact of portable electronic devices "through the back door." The second aspect defines acceptable interference that causes bandwidth loss between aircraft radios and spurious portable electronic devices. This is commonly referred to as "front door" protection against portable devices. Based on an analysis of the main risks associated with interference from portable electronic devices to aircraft systems, aircraft systems have been identified for which a demonstration of compliance with the resistance to the effects of portable electronic devices must be performed. In order to demonstrate the suitability of the front door immunity of aircraft equipment, it is necessary to assess the levels of possible interference from portable electronic devices in the reception band of aircraft equipment. Demonstrating the compliance of aircraft equipment for "through the back door" exposure is similar to demonstrating resistance to high-intensity electromagnetic fields and indirect lightning strikes. It is necessary to perform one of the two proposed methods to establish their susceptibility to radio emission and control levels of the susceptibility of aircraft systems to radio emission. The first method is related to the delivery of equipment to the test bench for RF emissions, the second method is to test the systems that are installed on the applicable aircraft. Recommendations have been developed on the choice of methods for verifying the resistance of aircraft systems to the impact of portable devices. The impact aspects analyzed will help determine the scope and methodology for conducting tests to remove restrictions on the use of portable electronic devices on board aircraft.

Portable electronic devices; high-intensity radiated fields.

Введение. Эксплуатантов воздушных судов, изготовителей самолетов и представителей регулятивных органов с конца 1950-х стал беспокоить вопрос о возможном воздействии на электрические и электронные самолетные системы переносных электронных устройств, которые приносят пассажиры и члены экипажа на борт са-

молета. Специальный Комитет 88 RTCA был одним из первых, который опубликовал свои исследования и рекомендации в документе RTCA DO-119 в 1963 году [1]. После этого последовали другие нормативные документы: рекомендации специального Комитета 202 RTCA – RTCA DO-294B [2], специального Комитета 156 RTCA – RTCA DO-199 [3], специального Комитета 177 – RTCA DO-233 [4].

Одной из постоянных рекомендаций в данных отчетах является рекомендация о том, что переносные электронные устройства не должны использоваться на борту самолета во время критических этапов полета. Однако исследования показывают, что пассажиры и члены экипажа продолжают использовать переносные электронные устройства, намеренно либо случайно, даже во время взлета и посадки [5, 6].

Портативные (переносные) электронные устройства, которые могут принести пассажиры и члены экипажа на борт самолета, повсеместно распространены. Эти переносные электронные устройства становятся все меньше, обладают более мощными вычислительными возможностями и содержат многие свойства и функции. Например, на данный момент ноутбуки обладают тактовой частотой в несколько гигагерц и оснащены многочисленными беспроводными РЧ-приёмопередатчиками. Другой пример, мобильные телефоны могут работать в многочисленных диапазонах, с большим количеством протоколов связи и обладают различными опциями, такими как gps, планировщик задач, календарь и камеры. Многие пользователи портативных электронных устройств не подозревают, что их устройства работают, или что их встроенные радиопередатчики активны.

Все портативные электронные устройства (PED) имеют неопределённый уровень непреднамеренного радиоизлучения или паразитные нежелательные сигналы. Эти ложные радиоизлучения образуются в результате внутренней работы электрооборудования. К тому же многие портативные электронные устройства намеренно передают энергию в радиочастотном диапазоне, так как используют сигналы для передачи сообщения или данных. Если устройство PED соединяется по проводам с самолетным источником питания или сетью данных самолета, то подсоединённое устройство также производит паразитные радиочастотные излучения, которые могут распространяться по цепям питания и линиям связи самолета. На практике, для устройств PED, которые напрямую подключаются к электропитанию самолета или систему данных через провода, на интерфейс провода распространяются требования по проектированию и сертификации, учитывающие кондуктивные паразитные излучения. Таким образом, аспект излучений устройств PED через цепи питания и линии связи не рассматривается в данном проекте.

Любые рекомендации по проектированию и сертификации самолета должны учитывать воздействия, как преднамеренно передающих портативных электронных устройств (T-PED), так и непреднамеренных радиочастотных излучений от всех устройств PED.

Существует четыре условия, при которых возможно воздействие портативных электронных устройств на электрические и электронные системы самолета. Все четыре условия должны выполняться для воздействия на самолетные системы:

- ◆ портативное электронное устройство должно производить радиочастотные излучения, когда самолетная система может быть восприимчива к излучению;
- ◆ самолетная система должна быть чувствительна к излучениям портативных электронных устройств на определенных частотах излучения;
- ◆ излучения портативного электронного устройства должны иметь радиочастотное излучение с достаточным уровнем поля преодоления надлежащего уровня восприимчивости при замере на необходимой точке;

♦ должна быть полоса пропускания для излучения или проводимости на потенциально восприимчивую самолетную систему.

Другие детали определяют возможные воздействия устройств, чье излучение может быть оказано на электрические и электронные системы, и последствия этих воздействий. Эти детали включают в себя характеристики модуляции излучений устройств PED, и последствия для безопасности в случае отказа и неисправности бортового оборудования.

Правила сертификации самолета не регулируют радиочастотные излучения портативных электронных устройств. Поэтому подход по сертификации и проектированию самолета в части устойчивости к воздействию PED должен быть сконцентрирован либо на контроле полосы пропускания от портативных электронных устройств до самолетных систем, либо на контроле восприимчивости самолетной системы или защищенности от излучений устройств PED.

В настоящей статье проведен анализ основных рисков, связанных с помехами, создаваемыми портативными радиоэлектронными устройствами самолетным системам, анализ воздействия «через переднюю» и «через заднюю дверь», а также систем самолета, которые должны быть испытаны одним из двух предлагаемых методов для установления их восприимчивости к радиоизлучению и уровней восприимчивости систем самолета к радиоизлучению.

1. Анализ путей воздействия радиосигналов на радиоаппаратуру переносных электронных устройств

1.1. Термин «путь воздействия». Радиосигналы, перемещаясь из одной точки в другую, могут передаваться при помощи проводов и излучения в пространстве. Кондуктивные помехи от устройства PED могут возникать, только если устройство PED напрямую подключено к самолету через провод или конструкцию. Излучения от устройства PED могут воздействовать на самолетные системы через отверстия в оборудовании самолета, наводить ток на жгуты БО или приниматься антеннами, обеспечивая прямой путь к бортовому оборудованию воздушного судна.

Термин «путь воздействия» используется для описания того, как распространяются излучения и воспринимаются системами. Для паразитных и преднамеренных излучений от устройств PED существуют два пути воздействия.

«Воздействие через заднюю дверь»: Радиочастотная энергия излучается от устройства PED и проникает напрямую в электрооборудование и электронику или в проводку, которая подсоединена к этому оборудованию. «Воздействие через заднюю дверь» может оказывать эффект на любое электрооборудование и электронное оборудование самолета. «Воздействие через заднюю дверь» также включает в себя радиочастотную энергию, излучаемую напрямую от портативного электронного устройства, где есть прямое проводное подключение от устройства PED к источнику электропитания самолета, системе данных, или системе управления. Такое воздействие может произойти через источники питания, встроенные в сиденья, или местные проводные сети на самолете.

«Воздействие через переднюю дверь»: Радиочастотная энергия излучается от устройства PED и принимается антенной радиоприемного устройства. «Воздействие через переднюю дверь» применяется только к радиоприемникам самолета.

Когда пути воздействия сочетаются с типами излучений устройств PED, то можно выделить восемь классов воздействия устройств PED, которые определены в документе RTCA DO-294B и документе EUROCAE/ED-118 [7]. В табл. 1 представлены классы воздействия устройств PED, которые можно выделить из анализа EUROCAE/ED-118.

Таблица 1

Классы воздействия РЕД

Тип излучения устройства РЕД	Путь воздействия	Номенклатура	Способ воздействия	Выводы на основе предыдущих исследований
Преднамеренные излучения (полезные сигналы)	Воздействие через апертуру антенны	Преднамеренные излучения, связанные с антеннами оборудования	Через «Переднюю дверь»	Воздействие маловероятно в любом случае
	Прямое воздействие на агрегаты оборудования	Преднамеренные излучения, связанные с блоками оборудования	Через «заднюю дверь»	Следует рассмотреть
	Воздействие на интерфейсы оборудования и кабели	Преднамеренные излучения, связанные с кабелями оборудования	Через заднюю дверь	Следует рассмотреть
Непреднамеренные излучения (паразитные излучения)	Воздействие через апертуру антенны	Непреднамеренные излучения, связанные с антеннами оборудования	Через переднюю дверь	Следует рассмотреть
	Прямое воздействие на блоки оборудования	Непреднамеренные излучения, связанные с блоками оборудования	Через заднюю дверь	Воздействие маловероятно в любом случае
	Воздействие на интерфейсы оборудования и кабели	Непреднамеренные Излучения, связанные с кабелями оборудования	Через заднюю дверь	Воздействие маловероятно в любом случае
Кондуктивные паразитные излучения	Воздействие на интерфейсы оборудования	Кондуктивные паразитные излучения при перекрестном кабельном соединении	Через заднюю дверь	Уже рассматривается, как часть сертификации установки оборудования
	Перекрестные помехи (воздействие с кабеля на кабель)	Кондуктивные паразитные излучения, связанные с входными сигналами оборудования	Через заднюю дверь	Уже рассматривается, как часть сертификации установки оборудования

1.2. Непреднамеренные излучения, связанные с антеннами оборудования.

В эксплуатационном диапазоне приемников паразитные излучения от устройств РЕД, полученные от антенн самолетных радиоприемников, могут повлиять на работу радиоприемников самолета по двум причинам:

- ◆ самолетные радиоприемники выполнены таким образом, что могут обнаружить сигналы с очень малой амплитудой в пределах диапазона с настроенной частотой, и, следовательно, являются очень чувствительными к помехам с очень малой амплитудой в этих диапазонах;
- ◆ паразитные излучения от устройств PED могут находиться в пределах диапазона, настроенной частоты радиоприемников самолета.

Паразитные излучения с шумоподобными характеристиками увеличивают уровень шума соответствующих радиоприемников, искажая заданные сигналы низкого уровня так, что они становятся бесполезными. Это эффективно увеличивает уровень заданного сигнала, необходимого для надлежащей связи или указания, тем самым уменьшая максимальный эксплуатационный диапазон для самолетной радиосистемы. Паразитные излучения от устройств PED с длительными (незатухающими) характеристиками могут быть также получены от самолетных радиоприемников и обнаружены в виде действительного сигнала, который приводит к ложным ответам радиоприёмников.

Проводимый анализ в документе DO-233 [4] и процесс оценки помех, описанный в Разделе 6 документа DO-294B [2] указывают на то, что ложные излучения низкого уровня на частотах вне ширины полосы пропускания по промежуточной частоте приемника, сигнал которого подавляется помехой, не вызовут значительных помех.

Анализ различных международных стандартов [8–10] указывают на то, что помехи должны рассматриваться, когда будет установлена устойчивость самолета к излучениям устройств PED.

1.3. Преднамеренные излучения, связанные с антеннами оборудования.

Преднамеренные излучения от передающих устройств PED происходят либо в лицензированных диапазонах частот (как, например, диапазоны, относящиеся к мобильной телефонии), в строго ограниченных и особо нелицензированных диапазонах (как, например, нелицензированные национальные диапазоны информационной инфраструктуры), или в чрезвычайно широких диапазонах с ограниченными по мощности ограничителями (как, например, системы сверхшироких диапазонов). Во всех случаях эти диапазоны принадлежат международным и национальным властям по телекоммуникациям. Частотные диапазоны радиосвязи, навигации и наблюдения согласованы на международном уровне посредством договоров, и регулятивные органы телекоммуникаций гарантируют, что никакая другая радиочастотная служба не может иметь таких диапазонов.

Поэтому передающие устройства PED преднамеренно не передают в диапазонах частот, используемых для радиосвязи, навигации и наблюдения за самолетом. Самолетные радиоприемники для связи, навигации и наблюдения защищены от помех передатчиков вне их эксплуатационного диапазона. Лабораторные испытания по воздействию радиочастотных излучений на радиоприемники доказывают устойчивость к преднамеренным излучениям. Поэтому «воздействие через переднюю дверь» от преднамеренных излучений, связанных с антеннами оборудования уменьшено, и не требует отдельного рассмотрения в части устойчивости к излучениям устройств PED.

1.4. Преднамеренные излучения, связанные с кабелями, блоками оборудования. Преднамеренные радиочастотные излучения от передающих портативных электронных устройств могут влиять на электрические и электронные системы, воздействуя на провода или непосредственно на самолетное оборудование. Возможность воздействия зависит от уровня сигнала передающего устройства PED, и подверженности самолетной системы воздействию портативных устройств на определенной частоте.

Электрические и электронные системы самолета защищены от воздействия электромагнитных помех, особенно от высокоинтенсивных электромагнитных полей (HIRF), и как прямых, так и косвенных воздействий молнии. Устойчивость системы к радиочастотным полям зависит от критичности системы и ее положения в самолете. Диапазон уровня среднего поля тестируемой радиочастотной системы составляет от 1 В/м до 300 В/м. Устойчивость бортового оборудования к воздействию HIRF [11–13] и защита от молнии [14–16] обеспечивают защищенность от «воздействия устройств PED через заднюю дверь».

Для частот ниже 400 МГц, радиочастотное подключение к системе, соединяющей провода, обеспечивает основной путь от устройства к самолетной системе. Поэтому в этом диапазоне частот амплитуда паразитных излучений устройств PED, воздействующая на провод, может непосредственно сравниваться с амплитудами функционального сигнала электрических и электронных систем. Выше 400 МГц, воздействие происходит непосредственно через соединительный провод ориентировочно в пределах расстояния длины волны от соединителя на электронном или электрическом оборудовании самолета, или через физически открытые отверстия непосредственно на электрическое или электронное оборудование.

Рядом с источником PED передающие устройства PED могут образовать силу электрического поля порядка десятка вольт на метр, таким образом, существует значительная вероятность сигналов передающих устройств воздействовать на электрические и электронные системы самолета. Это «воздействие через заднюю дверь» от преднамеренных излучений устройств PED должно определенно учитываться для оценки устойчивости к воздействию устройств PED.

1.5. Непреднамеренные излучения, связанные с кабелями, блоками оборудования. Паразитные излучения устройств PED производят поля излучения с очень малой амплитудой, обычно менее 0,1 В/м на расстоянии одного метра от устройства PED. Паразитные излучения от сотового телефона обычно в тысячу раз меньше, чем преднамеренный передающийся сигнал, сформированный телефоном для установки связи. По этой причине «воздействие через заднюю дверь» от преднамеренных радиочастотных паразитных излучений маловероятно, и не должно рассматриваться в части воздействия устройств PED на самолет.

1.6. Помехи от кондуктивных излучений. Воздействие кондуктивных паразитных сигналов устройств PED, физически подсоединенных к питанию самолета или линии данных, считается маловероятным, потому что:

1) самолетное питание и сети данных, предназначенные для подключения к устройствам PED, должны быть изолированы от питания самолета и сетей данных, требуемых для обеспечения безопасности самолета;

2) в эти источники питания и сети данных встроены электромагнитные фильтры для ограничения паразитных излучений от устройств PED, которые могут воздействовать на питание и данные.

Кондуктивные паразитные излучения должны рассматриваться, как часть проектирования и сертификации установленной системы электропитания или данных самолета, позволяющей выполнить подключение устройств PED. Устойчивость к излучениям специально рассматривается в ходе проектирования и сертификации источников электропитания и сетей данных, поэтому на эти классы воздействия устройств PED внимание в данном документе не акцентируется.

2. Анализ устойчивости самолетных систем к воздействию намеренно передающих портативных электронных устройств (соответствие «воздействия через заднюю дверь»)

2.1. Риски, связанные с помехами самолетным системам. Проанализируем теперь более подробно основные аспекты воздействия.

Согласованное и несогласованное применение передающих переносных электронных устройств (Т-РЕД) широко распространено на пассажирских самолетах. Отчеты системы информации о безопасности полетов (ASRS) NASA [6] и исследования университета Карнеги-Меллона [5] указывают на то, что работа устройств Т-РЕД во время эксплуатации транспортного самолета является общепринятой. Передающие устройства РЕД широко распространены среди пассажиров и членов экипажа, представлены в различных формах и имеют множество функций. Во многих случаях в устройство РЕД встроена передающая радиостанция, так что работа радиопередатчика не является очевидной для пользователя устройства РЕД. Данные передающие устройства РЕД работают во многих диапазонах частот и с широким спектром передаваемой радиочастотной мощности радиоустройств. Распространенные передающие устройства РЕД и их передаваемая радиочастотная мощность перечислены в отчете DO-294В [2].

Нормы распределения спектра делают маловероятным то, что передающие устройства РЕД будут мешать радиоприемным устройствам самолета «воздействием через переднюю дверь». Однако передающие устройства РЕД обладают потенциалом для создания помех другим самолетным системам «воздействием через заднюю дверь». Риск, связанный с помехами самолетным системам от передающих устройств РЕД, зависит от следующего:

- 1) частоты, излучаемая устройством Т-РЕД;
- 2) мощности, излучаемая устройством Т-РЕД;
- 3) потерь на трассе между устройством Т-РЕД и потенциально чувствительными системами самолета;
- 4) чувствительности систем самолета к радиопередаче устройств Т-РЕД;
- 5) последствий помех для конкретных систем самолета.

Может быть предложено несколько вариантов для снижения риска создания помех системам самолета со стороны передающих устройств РЕД. Первый вариант – контроль потерь на трассе от передающих устройств РЕД внутри самолета к системам самолета. Однако передающие устройства РЕД могут находиться и работать в кабине самолета, кабине экипажа или кабине пилотов, либо в грузовом или багажном отсеках. В данных местах передающие устройства РЕД могут находиться очень близко к системам самолета и электропроводке. Это приводит к очень малым потерям на трассе, а увеличение потерь на трассе путем применения экранирующих материалов в целом считается практически нецелесообразным из-за трудностей, связанных с производством и продлением летной годности.

Второй вариант – уменьшить радиочастотную мощность, которую излучают передающие устройства РЕД путем изменения ограничений по радиочастотной мощности бытовой электроники. Однако производители самолетов не имеют никакого контроля над стандартами устройств РЕД, в особенности с вариациями в национальных стандартах для бытовых радиочастотных передающих электронных устройств.

Третий вариант – увеличить радиочастотную устойчивость систем самолета. Если обеспечена достаточная радиочастотная устойчивость систем самолета, то оборудование систем самолета малочувствительно к воздействию передающих устройств РЕД. Это тот аспект, который производители самолетов и авиационные разрешительные органы могут непосредственно контролировать. Этот подход аналогичен тому, который уже применяется для защиты систем самолета от HIRF.

Следовательно, процесс для определения соответствующей радиочастотной устойчивости систем самолета и предоставляет требования к рекомендуемой радиочастотной устойчивости систем самолета, результат чего – устойчивость к воздействию передающих устройств РЕД. С применением вышеперечисленных тре-

бований к радиочастотной устойчивости систем оборудование и системы самолета могут быть спроектированы так, чтобы сделать очень маловероятным риск, связанный с передающими устройствами PED.

Радиочастотная среда самолета, создаваемая передающими устройствами PED, отличается от радиочастотной среды самолета, связанной с HIRF. Основные различия заключаются в следующем:

1) передающие устройства PED могут работать очень близко к системам самолета и электропроводке в пределах кабины экипажа, кабины самолета и багажного отсека, в то время как излучатели HIRF работают на некотором расстоянии снаружи от самолета;

2) самолеты обычно пролетают зоны с максимальными уровнями HIRF RF за несколько секунд, в то время как передающие устройства PED работают внутри самолета в течение большей части полета;

3) источники HIRF – это обычно передатчики очень большой мощности с конкретным географическим местоположением, в то время как передающие устройства PED могут работать во множестве мест внутри самолета, включая кабину, кабину экипажа, а также багажный или грузовой отсеки.

2.2. Системы самолета, которые должны быть проанализированы. Любые места внутри самолета, где могут работать передающие устройства PED, должны быть проанализированы.

Системы и оборудование самолета, которые требуют, чтобы соискатель сертификата продемонстрировал устойчивость к воздействию передающих устройств PED, должны быть идентифицированы. К ним относятся те электрические и электронные системы и оборудование самолета, которые требуются для сертификации типа или согласно правилам эксплуатации. В их состав также входят системы и оборудование, которые были определены как выполняющие функции со следующими категориями отказных состояний: сложная ситуация, аварийная ситуация или катастрофическая ситуация по действиям анализа безопасности, таким как соответствие 14 CFR 25.1309 [17] и EASA CS 25.1309 [18].

Примеры электрических и электронных систем самолета, которые требуются по сертификации типа самолета или согласно регламенту эксплуатации, – это авиационные часы на приборной доске, магнитный компас и высотомер, которые требуются согласно правилам сертификации типа 14 CFR 25.1303 [17] и EASA CS 25.1303 [18], а также регистраторы параметров полета, которые требуются согласно регламенту эксплуатации 14 CFR 121.344 [17].

2.3. Требования к радиочастотной устойчивости систем самолета для стойкости к воздействию устройств T-PED. Для оборудования и систем, указанных в таблице 2, можно установить рекомендуемые минимальные контрольные уровни восприимчивости систем самолета к радиоизлучению для демонстрации устойчивости к воздействию устройств T-PED, используя методы проверки восприимчивости к радиоизлучению и категории, определенные в RTCA DO-160 (Раздел 20) [19] или EUROCAE ED-14 [20].

Данные уровни были разработаны в результате рассмотрения информации, приведенной в приложении В отчета DO-294. Как обозначено в рамках данного документа, возможно, что более высокая пиковая напряженность поля присутствует как результат непосредственной близости к устройству T-PED. Однако из-за методов проверки, примененных в рамках стандартных тестовых документов, таких как DO-160, где все испытываемое оборудование и по крайней мере половина длины волны проводки должны подвергаться воздействию требуемого поля излучения, полная итоговая энергия связи является в десятки раз больше, чем значение при связи с неэффективной антенной устройства T-PED. Поэтому был достигнут компромисс о том, чтобы принять по умолчанию стандартные методы проверки и уровни.

2.4. Рекомендации по выбору методов для верификации устойчивости систем самолета к воздействию устройств PED. Как и в большинстве областей удостоверения соответствия заданным требованиям, существует множество методов достижения цели по верификации устойчивости систем самолета.

Первым шагом необходимо выполнить идентификацию систем и оборудования. После того как системы и оборудование идентифицированы, соискатель должен подтвердить, что оборудование соответствует требованиям из табл. 2. Если оборудование ранее было признано пригодным по требованиям к устойчивости, приведенным в таблице, то данная характеристика может быть представлена в отчете о соответствии в FAA или другому соответствующему авиационному сертифицирующему органу в качестве способа демонстрации соответствия требованиям по «воздействию через заднюю дверь» для передающих устройств PED.

Одним из способов адаптации методов проверки отчета DO-160 может быть то, что соискатель прокалибрует требуемую напряженность поля в экранированном помещении, применяя методику калибровки, взятую и адаптированную из отчета DO-160 (Раздел 20.5 и Рисунок 20-10). Уровни прямой мощности, требуемые для создания напряженности поля (Категория R или Категория W), должны быть зафиксированы, контрольно-измерительное оборудование – перенесено на самолет, а испытания проведены на требуемых системах самолета с использованием зафиксированной прямой мощности. Однако радиочастотные поля являются чрезвычайно опасными при высоких уровнях мощности, и для данного типа методов проверки могут потребоваться специальные лицензии от властей по системам связи, таким как FCC.

Существует возможность подтвердить устойчивость оборудования с помощью комбинации методов, определенных выше. Например, могут возникнуть ситуации, в которых некоторое оборудование ранее было признано пригодным по требованиям табл. 2 либо по испытаниям, либо в результате проведенного анализа. Тем не менее для некоторого оборудования могут потребоваться дополнительные лабораторные испытания и/или испытания на самолете. Верификацию необходимо будет задокументировать и предоставить соответствующим авиационным сертифицирующим органам для утверждения.

Таблица 2

Рекомендации по испытаниям восприимчивости систем самолета к радиоизлучению

Классификация функциональных отказных состояний систем	Расстояние между T-PED и системным LRU ≥ 20 см	Расстояние между T-PED и системным LRU < 20 см
Катастрофическая ситуация	DO-160E / ED-14E Раздел 20 Категория XR	DO-160E / ED-14E Раздел 20 Категория XW ограничено до 8 ГГц
Аварийная ситуация	DO-160E / ED-14E Раздел 20 Категория XR	DO-160E / ED-14E Раздел 20 Категория XR
Сложная ситуация	DO-160E / ED-14E Раздел 20 Категория XR	DO-160E / ED-14E Раздел 20 Категория XR
Требуется по нормам и не охвачено выше	DO-160E / ED-14E Раздел 20 Категория XR	DO-160E / E ED-14E Раздел 20 Категория XR
Ухудшение условий полета и без последствий, не требуется по нормам	Требования отсутствуют	Требования отсутствуют

Однако если проверка квалификационных внешних воздействий оборудования обнаруживает, что уровни недостаточны, то необходимо провести дополнительные испытания или анализ для данных систем по требованиям, определенным в табл. 2.

Анализ также может быть использован для демонстрации соответствия. В некоторых случаях, например, для электромеханических устройств, таких как лампы и клапаны, устойчивость к воздействию излучаемой энергии, генерируемой устройствами T-PED, демонстрируется относительно просто. Это происходит вследствие того, что подобные устройства изначально устойчивы к низким уровням радиочастотной энергии. Тем не менее анализ может быть применен для более сложных электрических/электронных устройств, но подход с применением анализа должен быть утвержден, рассмотрен и одобрен соответствующими авиационными сертифицирующими органами.

Если требуется проведение испытаний, необходимо соблюдать стандартные требования квалификационных испытаний, такие как утвержденные методики испытаний, требования пригоден/непригоден, соответствие стендового образца, а также засвидетельствование испытаний. Как правило, существует два метода проверки, которые необходимо использовать, чтобы провести данные испытания.

Первый метод – доставить системы или оборудование на стенд испытаний по радиочастотному излучению и выполнить стандартные испытания на чувствительность к радиочастотному воздействию в соответствии с требованиями табл. 2.

Второй метод – выполнить испытания систем, которые установлены на применимом самолете. Данный тип испытаний изложен в отчете DO-294B, Приложение 6.D, и ED-130, Приложение 6 [21]. Методики в данных документах дают общие указания, такие как идентификация систем, местоположение передающих антенн и напряженность полей относительно выхода устройств T-PED, которые используются при проведении испытания. Поскольку данный отчет предоставляет контрольные уровни в Таблице 2, то способы проверки из отчета DO-160 для испытаний на самолете могут быть адаптированы для данных испытаний на самолете.

Заключение. По результатам проведенного анализа можно сделать вывод о том, что основными аспектами воздействия портативных электронных устройств на бортовое оборудование воздушного судна являются воздействия «через переднюю» и «через заднюю дверь». И если оценку воздействия «через заднюю дверь» можно провести анализом соответствия бортового оборудования к воздействию HIRF, то для оценки воздействия «через переднюю дверь» необходимо провести испытания. Методика оценки помех, создаваемых портативными электронными устройствами, которые могут возникнуть на входе приемников радиоэлектронных средств воздушного судна, будет разработана для проведения таких испытаний.

Рассмотренные аспекты воздействия помогут в дальнейшем определить объем и разработать методики проведения таких испытаний с дальнейшей ее отработкой в составе воздушного судна. Положительные результаты испытаний позволят эксплуатантам воздушных судов данного типа разрешить пассажирам использование на борту портативных электронных устройств без ограничения.

Работа выполнена в ЦКП «Прикладная электродинамика и антенные измерения» Южного федерального университета.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. RTCA DO-119, Interference to aircraft electronic equipment from devices carried aboard, RTCA, April 1963.
2. RTCA DO-294B, Guidance on allowing transmitting portable electronic devices (t-peds) on aircraft, December 2006.

3. RTCA DO-199, Potential interference to aircraft electronic equipment from devices carried aboard, RTCA, September 1988.
4. RTCA DO-233, Portable electronic devices carried on board aircraft, August 1996, Errata August 1999.
5. *Strauss W.* Portable electronic devices onboard commercial aircraft: assessing the risks. Ph.D. Thesis, Carnegie Mellon University, 2005 Carnegie-Mellon report.
6. NASA ASRS Database Report Set, "passenger electronic devices", Update Number 11.0, January 23, 2007.
7. EUROCAE ED 118, Report on electromagnetic compatibility between passenger carried portable electronic devices (peds) and aircraft systems, November 2003.
8. Руководство по управлению безопасностью полетов (РУБП) ИКАО Doc 9859 AN/474, издание третье – 2013.
9. Руководство по организации контроля за обеспечением безопасности полетов Doc 9734 AN/959.
10. Руководство по проведению проверок организации контроля Doc 9735 AN/960.
11. ARP5583. Guide to certification of aircraft in a high intensity radiated field (hurf) environment. 2010.
12. EUROCAE ED 107. Guide to certification of aircraft in a high-intensity radiated field (HIRF) environment. 2010.
13. AC/AMJ 20.1317. The certification of aircraft electrical and electronic systems for operation in the high intensity radiated field (HIRF) environment, 1998.
14. SAE ARP 5416 Revision A - aircraft lightning test methods, SAE Aerospace, 2013.
15. SAE ARP 5412 Revision B - aircraft lightning environment and related test waveforms, SAE Aerospace, 2013.
16. AC 20 136 Revision B - Aircraft electrical and electronic system lightning protection, Federal Aviation Administration, 2011.
17. 14 CFR. Code of Federal Regulations CFR). Title 14. Aeronautics and space.
18. CS-25 EASA. Certification Specification. Large aeroplanes.
19. RTCA DO-160E. Environmental conditions and test procedures for airborne equipment, December 2004.
20. EUROCAE ED 14. Environmental conditions and test procedures for airborne equipment training, revision G, January 2015.
21. EUROCAE ED-130. Guidance for the development of portable electronic devices (ped) tolerance for civil aircraft, revision b, June 2022.

REFERENCES

1. RTCA DO-119, Interference to aircraft electronic equipment from devices carried aboard, RTCA, April 1963.
2. RTCA DO-294B, Guidance on allowing transmitting portable electronic devices (t- peds) on aircraft, December 2006.
3. RTCA DO-199, Potential interference to aircraft electronic equipment from devices carried aboard, RTCA, September 1988.
4. RTCA DO-233, Portable electronic devices carried on board aircraft, August 1996, Errata August 1999.
5. *Strauss W.* Portable electronic devices onboard commercial aircraft: assessing the risks. Ph.D. Thesis, Carnegie Mellon University, 2005 Carnegie-Mellon report.
6. NASA ASRS Database Report Set, "passenger electronic devices", Update Number 11.0, January 23, 2007.
7. EUROCAE ED 118, Report on electromagnetic compatibility between passenger carried portable electronic devices (peds) and aircraft systems, November 2003.
8. Rukovodstvo po upravleniyu bezopasnost'yu poletov (RUBP) ИКАО Doc 9859 AN/474, izdanie tret'e – 2013 [ICAO Safety Management Manual Doc 9859 AN/474, third edition – 2013].
9. Rukovodstvo po organizatsii kontrolya za obespecheniem bezopasnosti poletov Doc 9734 AN/959 [Guidelines for the organization of control over flight safety Doc 9734 AN/959].
10. Rukovodstvo po provedeniyu proverok organizatsii kontrolya Doc 9735 AN/960 [Guidelines for conducting inspections of the organization of control Doc 9735 AN/960].

11. ARP5583. Guide to certification of aircraft in a high intensity radiated field (hurf) environment. 2010.
12. EUROCAE ED 107. Guide to certification of aircraft in a high-intensity radiated field (HIRF) environment. 2010.
13. AC/AMJ 20.1317. The certification of aircraft electrical and electronic systems for operation in the high intensity radiated field (HIRF) environment, 1998.
14. SAE ARP 5416 Revision A - aircraft lightning test methods, SAE Aerospace, 2013.
15. SAE ARP 5412 Revision B - aircraft lightning environment and related test waveforms, SAE Aerospace, 2013.
16. AC 20 136 Revision B - Aircraft electrical and electronic system lightning protection, Federal Aviation Administration, 2011.
17. 14 CFR. Code of Federal Regulations CFR). Title 14. Aeronautics and space.
18. CS-25 EASA. Certification Specification. Large aeroplanes.
19. RTCA DO-160E. Environmental conditions and test procedures for airborne equipment, December 2004.
20. EUROCAE ED 14. Environmental conditions and test procedures for airborne equipment training, revision G, January 2015.
21. EUROCAE ED-130. Guidance for the development of portable electronic devices (ped) tolerance for civil aircraft, revision b, June 2022.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Б.Г. Коноплев.

Можайцев Виталий Павлович – Южный федеральный университет; e-mail: mvp_emc@inbox.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: +79094302590; аспирант.

Семенихина Диана Викторовна – e-mail: d_semenikhina@mail.ru; тел.: + 79094412058; кафедра АиРПУ; д.т.н.; профессор.

Mozhaytsev Vitaliy Pavlovich – Southern Federal University; e-mail: mvp_emc@inbox.ru; Taganrog, Russia; phone: +79094302590; postgraduate student.

Seменikhina Diana Viktorovna – e-mail: d_semenikhina@mail.ru; phone: + 79094412058; the department of A&RTD; dr. of eng. sc.; professor.

УДК 624.372.632

DOI 10.18522/2311-3103-2022-6-234-244

А.Н. Зикий, П.Н. Зламан, А.В. Помазанов

БАЛАНСНЫЙ СМЕСИТЕЛЬ

Проведено экспериментальное исследование балансного смесителя на диодах 2A116A-1. Измерены потери преобразования в диапазоне входных частот 2450±45 МГц при преобразовании вниз на промежуточную частоту 2125 МГц. Потери преобразования не превышают 20 дБ в узкой полосе 2440±10 МГц. Снята амплитудная характеристика смесителя, из которой видно, что она линейна для входных сигналов до 0 дБм (1 мВт). Исследована зависимость потерь преобразования от мощности гетеродина. Показано, что минимальные потери наблюдаются при мощности гетеродина 13 дБм (20 мВт). Спектр комбинационных частот на выходе смесителя не содержит паразитных продуктов преобразования выше минус 50 дБ по отношению к полезному сигналу в полосе 100 МГц. Смеситель рекомендуется использовать в приемно-передающей аппаратуре и измерительной технике. Сравнение с другими смесителями показывает заметное преимущество – высокую избирательность по отношению к внеполосным сигналам. Это достигнуто путем применения двух полосовых фильтров и фильтра нижних частот. Проведено моделирование трех фильтров в пакете прикладных программ Microwave Office. Даны модели и амплитудно-частотные характеристики трех фильтров, полученные в Microwave Office. Смеситель выполнен в корпусе рамочного типа из алюминия. В нем установлены две керамические