

В.В. КНЯЗЕВ, канд. техн. наук, зав.отд., НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ»;
А.Ю.СКОБЛИКОВ, аспирант, НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ»

АЛЬТЕРНАТИВНАЯ МЕТОДИКА ИСПЫТАНИЙ УСТОЙЧИВОСТИ БОРТОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ К ВОЗДЕЙСТВИЮ ВЫСОКОИНТЕНСИВНЫХ РАДИОЧАСТОТНЫХ ПОЛЕЙ

В статті наведено обґрунтування методики випробувань несприйнятливості бортового обладнання літаків до дії високо інтенсивних електромагнітних полів. Методика базується на застосуванні випробувального обладнання, яке є у наявності в лабораторіях України. Методика дозволяє суттєво зменшити вартість таких випробувань при тій же достовірності отриманого результату відносно рівня несприйнятливості. Методика базується на застосуванні методу діагностики електромагнітних екранів, який розроблено авторами.

In the article a ground over of methodology of tests of immunity of side equipment of airplanes is brought to the action highly intensive electromagnetic fields. Methodology is based on application of proof-of-concept equipment, which a presence in the laboratories of Ukraine has. Methodology allows substantial to bring down the cost of such tests, for storage of authenticity of the got result in relation to the level of immunity. Methodology is based on application of method of diagnostics of electromagnetic screens, which is worked out by authors.

В статье приведено обоснование методики испытаний невосприимчивости бортового оборудования самолетов к действию высоко интенсивных электромагнитных полей. Методика базируется на применении испытательного оборудования, которое есть в наличии в лабораториях Украины. Методика позволяет существенное снизить стоимость таких испытаний, при сохранении достоверности полученного результата относительно уровня невосприимчивости. Методика базируется на применении метода диагностики электромагнитных экранов, который разработан авторами.

Введение. Безопасность полета летательного аппарата (ЛА) зависит от устойчивости бортового оборудования к внешним воздействиям. Управление современными ЛА, как правило, осуществляется в автоматическом режиме. Решения, принимаемые бортовым компьютером, основываются на показаниях устройств контроля (датчиков) параметров функционирования элементов ЛА. Датчики, которые обеспечивают оперативную передачу информации о текущем состоянии оборудования, расположены по всему ЛА. Линии связи между датчиками и устройствами обработки информации от датчиков выполняются в виде неэкранированных проводов, с использованием фюзеляжа ЛА в качестве общей «земли». Сигналы управления от бортового компьютера к исполнительным механизмам, также передаются по проводным неэкранированным линиям. Длина линий связи может достигать десятков метров. Указанные выше обстоятельства делают систему контроля и управления полетом потенциально чувствительной к внешним электромагнитным помехам. Наибольшую опасность представляют мощные импульсные электромагнитные помехи, сопровождающие молниевый разряд и высокоинтенсивные радиочастотные электромагнитные поля (HIRF),

создаваемые радарными, в том числе аэродромными. Поэтому, подтверждение устойчивости бортового оборудования к действию таких электромагнитных помех являются обязательным требованием при сертификации ЛА. Амплитудно-временные параметры рассматриваемых электромагнитных помех задаются рядом нормативных документов, действующих в Украине:

Межгосударственный стандарт ГОСТ 30585-98 [1] определяет амплитудно-временные параметры электрического, магнитного и электромагнитного полей, сопровождающих молниевый разряд. Основные значения этих параметров представлены в табл. 1.

Таблица 1 – Основные параметры ЭМП молниевый разряда [1]

Вид поля	Форма волны	Граничная частота, кГц	Длина волны, м	Максимальный уровень
Е	0,1/10 мс	7,2	41782	300 кВ/м
Н	2/50 мкс	778	386	300 А/м
ЭМП (Е) ЭМП (Н)	0,1/1 мкс	7200	42	100 кВ/м 250 А/м

Авиационный нормативный документ Квалификационные требования КТ-160D [2], устанавливает требования к уровням испытательного электромагнитного поля в диапазоне от 300 МГц до 12 ГГц. В качестве иллюстрации, в табл. 2 приведены наиболее «жесткие» параметры HIRF для оборудования категории L, в диапазоне частот от 1 ГГц до 1 ГГц.

Таблица 2 – Параметры HIRF для оборудования категории L [2]

Диапазон частот, ГГц	1-2	2-4	4-6	6-8	8-12	12-18
Амплитуда, В/м	5000	6000	7200	1100	5000	2000

Для проведения требуемых испытаний уровня устойчивости бортового оборудования необходимо обеспечить создание электромагнитных полей с указанными выше параметрами. Импульсные поля, сопровождающие молниевый разряд, в полной мере воспроизводятся парком высоковольтных установок, эксплуатируемых в НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ» [3]. Создание полей, с параметрами, указанными в табл. 2, является весьма сложной и достаточно дорогостоящей задачей. Сегодня она решена только в наиболее экономически развитых странах. Кроме того, такие испытания каждой отдельной системы бортового оборудования не дают полной гарантии надежной работы всего комплекса ЛА. Подтверждение летной годности осуществляется только в процессе испытаний ЛА в целом. Однако, для разработчиков чрезвычайно важно иметь возможность проведения исследований, которые могут дать оценку уровня устойчивости оборудования к таким полям. Следовательно,

разработка альтернативной методики испытаний, базирующихся на имеющейся материальной базе Украины, является актуальной.

Цель статьи — Обоснование альтернативной методики испытаний устойчивости бортового оборудования летательных аппаратов к действию высокоинтенсивных радиочастотных полей HIRF.

1 Концепция методики

Обеспечение высокого уровня устойчивости радиоэлектронного оборудования к действию сторонних электромагнитных помех невозможно без использования корпуса оборудования в качестве электромагнитного экрана [4–6]. Эффективность экранирования электромагнитных полей (особенно высокочастотных) практически полностью определяется степенью электромагнитной герметичности корпуса. Авторами, предложен метод [7], основанный на измерении эффективности экранирования корпусом электромагнитного поля с частотой, совпадающей с одной из резонансных частот (обычно первой) корпуса. Метод позволяет определить эффективность экранирования с учетом реальной системы передачи информации. Если корпус не содержит структурных неоднородностей стенок, то его защитные свойства улучшаются с ростом частоты воздействующего электромагнитного поля. Следовательно, нет необходимости проводить испытания устойчивости к действию сверхвысокочастотных интенсивных полей, если их уровень в результате ослабления экраном становится соизмерим с уровнем полей мобильной и космической радиосвязи.

2 Основные положения методики

Методика испытаний устойчивости бортового оборудования летательных аппаратов к воздействию высокоинтенсивных радиочастотных полей включает в себя следующие этапы:

2.1 Испытание устойчивости оборудования к действию высокоинтенсивного электромагнитного поля с параметрами, указанными далее:

- электромагнитное поле монохроматическое модулированное колебанием типа «меандр» глубиной не менее 90% с частотой следования 1 кГц;
- напряженность электрического поля (50 ± 5) В/м;
- диапазон изменения частоты от 80 МГц до 3 ГГц.

2.2 Расчетная оценка экранирующих свойств корпусов блоков оборудования. Прогноз уровня напряженности электрического поля внутри корпусов блоков оборудования.

2.3 Определение расчетным методом резонансных частот корпусов блоков. Экспериментальная оценка степени электромагнитной герметичности корпусов блоков. Оценка соответствия эффективности экранирования корпуса рассчитанным значениям.

2.4 Испытание устойчивости оборудования к действию электромагнитного поля с напряженностью $(10 \pm 0,5)$ В/м при открытых панелях всех корпусов блоков.

3 Реализация методики

3.1 Перечень определяемых показателей.

3.1.1 Работоспособность оборудования в соответствии с установленной для него категорией функционирования при проведении испытаний по пункту 2.1.

3.1.2 Коэффициент экранирования корпуса каждого блока в зависимости от частоты воздействующего электромагнитного поля по пункту 2.2.

3.1.3 Степень электромагнитной герметичности типового образца корпуса блока по пункту 2.3 данной.

3.1.4 Работоспособность оборудования в соответствии с установленной для него категорией функционирования при проведении испытаний по пункту 2.4.

3.2 Номинальные значения показателей.

Показатели по п.п. 3.1.1 и 3.1.4 имеют критерий «выдержал - не выдержал» в соответствии с установленной категорией функционирования.

Показатель по п. 3.1.2 – коэффициент экранирования $S = E_i / E_0$ во всем частотном диапазоне должен быть не более $10 / E_0$ (E_0 – напряженность воздействующего электрического поля, заданная [2]; E_i – напряженность поля внутри корпуса-экрана; 10 В/м – напряженность поля при испытаниях п. 2.4).

Показатель по п.3.1.3 – коэффициент экранирования S на частоте основного (первого) резонанса корпуса должен быть не более $10 / E_0$.

3.3 Оборудование для определения каждого показателя.

3.3.1 Работоспособность оборудования при воздействии электрического поля напряженностью 50 В/м (по п. 2.1) и 10 В/м (по п. 2.4) в диапазоне частот от 80 МГц до 3 ГГц может определяться в испытательной камере TESEQ GTEM 1500 (рис. 1). Напряжение, подаваемое на вход испытательной камеры, формируется задающим генератором R&S[®]SMC100A и усилителем мощности BONN BLWA 0830-100/80D. Испытательная камера аттестована на частотный диапазон от 0 Гц до 18 ГГц. Генератор работает в полосе частот от 10 кГц до 3,2 ГГц, а усилитель в полосе частот от 80 МГц до 3,0 ГГц. Мощность усилителя 100/80 Вт, что обеспечивает возможность получения поля с напряженностью до 50 В/м в рабочем объеме камеры в диапазоне частот от 80 МГц до 3,0 ГГц. Для измерения уровня электрического поля используется Измерительный зонд электрического поля FL7006Kit (рис. 2) и тестовый приемник R&S[®]ESCI (рис. 3).

3.3.2 Определение коэффициента экранирования на резонансной частоте корпуса (по п. 2.3) может осуществляется с помощью оборудования, указанного выше, или альтернативного комплекта: высокочастотный генератор Agilent 9310A; анализатор спектра FSL3; излучающая антенна (рупорная или

дипольная); измерительный зонд Е поля типа ИНЭП - Р.

3.4 Формулы расчета показателей

3.4.1 Параметры воздействий по п.2.1 и п.2.4 в процессе проведения испытаний измеряются с помощью сертифицированного автоматизированного измерительного комплекса и дополнительной обработке не подлежат.



Рисунок 1 – Общий вид испытательной камеры TESEQ GTEM 1500



Рисунок 2 – Измерительный зонд электрического поля FL7006Kit



Рисунок 3 –Тестовый приемник R&S®ESCI



Рисунок 4 – Измерительный зонд Е поля типа ИНЭП - Р

3.4.2 Показатель по п.2.2 (коэффициент экранирования корпуса) рассчитывается:

- в диапазоне частот, удовлетворяющих квазистационарному приближению, с помощью компьютерной программы «Молния-Н» (гармонический режим) [8]. Для корпусов блоков, имеющих максимальный размер 0,3 м, квазистационарное приближение может быть использовано до частоты 300 МГц;

– для частот от 300 МГц до 18 ГГц оценка затухания осуществляется по формуле (1) и графику (рис. 5), полученным для волнового приближения [9].

$$A = 3,34 \cdot d \cdot (f \cdot \mu \cdot \gamma)^{1/2} \quad (1)$$

где: d – толщина экрана в дюймах; f – частота, Гц; γ – относительная электропроводность (относительно меди $\gamma_{\text{мед}} = 1$); μ – относительная магнитная проницаемость (относительно проницаемости вакуума).

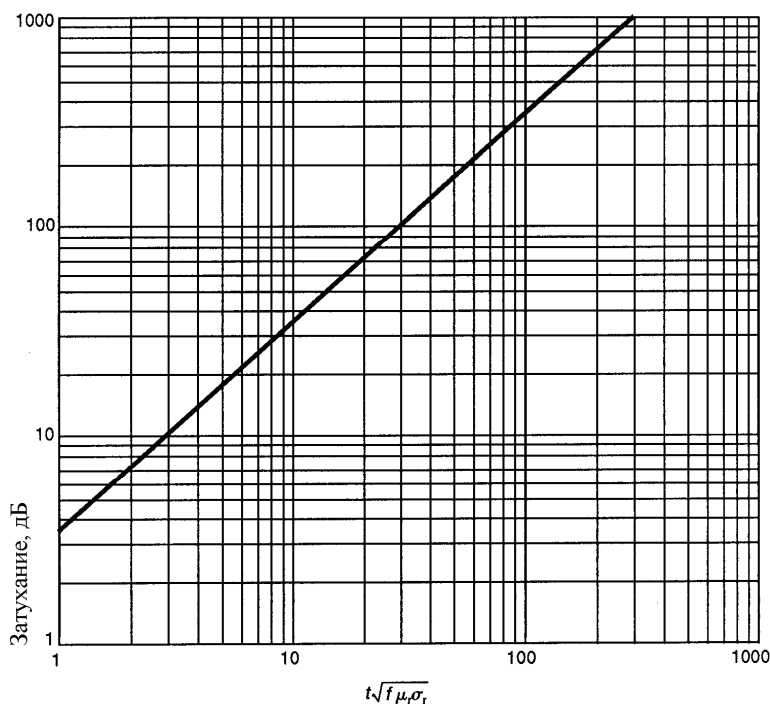


Рисунок 5 – Обобщенный параметр

3.4.3 Показатель по п. 2.3 (коэффициент экранирования корпуса на резонансной частоте) определяется на основании результатов измерения напряженности (E_0) действующего электрического поля и поля (E_i) внутри корпуса в одной и той же точке пространства. Значения напряженности E (дБ·мкВ/м) рассчитывается по показаниям анализатора спектра по формуле:

$$E = U_{\text{ин}} + K_a, \quad (2)$$

где $U_{\text{ин}}$ – показания измерительного приемника FSL3, дБ; K_a – коэффициент калибровки измерительной антенны, дБ.

Выводы

1 Методика испытаний основана на использовании расчетных и экспериментальных методов, с учетом рекомендаций, изложенных в нормативном документе КТ 160D (раздел 20) [2].

2 Экспериментальный метод по п.2.1 позволяет определить фактический уровень устойчивости оборудования к воздействию радиочастотного поля напряженностью 50 В/м в частотном диапазоне от 80 МГц до 3 ГГц. (Параметры воздействующего поля ограничены возможностями имеющегося в наличии испытательного оборудования).

3 Расчетные методы по п. 2.2 позволяют оценить защитные свойства корпусов блоков в предположении, что между элементами корпусов обеспечен идеальный гальванический контакт.

4 Экспериментальный метод по п.2.3 позволяет определить степень электромагнитной герметичности типового корпуса блока, обеспечиваемую принятыми техническими решениями. В случае, когда корпус блока является герметичным, результаты расчетной оценки, полученные по п.2.2 могут быть использованы для прогноза устойчивости системы к действию электромагнитных полей напряженностью поля, например, $E_T = 100$ В/м в частотном диапазоне до 18 ГГц. Как правило, уровень электромагнитного поля, проникающего внутрь такого корпуса, значительно ниже 0,01 уровня воздействующего поля, и его дестабилизирующее действие пренебрежимо мало. В этом случае, напряженность испытательного поля $E_{исп}$ для испытаний по п.2.4 устанавливается равной (10 ± 1) В/м.

5 Экспериментальный метод по п.2.4 позволяет определить восприимчивость электронного оборудования без корпуса к полям излучения по методике раздела 3.3.1, но при напряженности испытательного поля $E_{исп} < E_T$. Где: E_T – соответствующая требованиям [2] напряженность поля. В рассматриваемом случае $E_T = 100$ В/м. Величина $E_{исп}$ определяется на этапе 2.3, однако не может быть менее 10 В/м. Для удобства проведения испытаний, весь частотный диапазон от 80 МГц до 3 ГГц разбивают на два поддиапазона: 80 МГц - 1 ГГц; 1-3 ГГц; Оценку восприимчивости оборудования без корпуса к полям излучения выполняют последовательно для каждого поддиапазона; если хотя бы на одной частоте оборудование восприимчиво к полям излучения, то весь поддиапазон считают восприимчивым к помехам.

После проведения этого испытания, в каждом поддиапазоне возможно два результата:

- электронное оборудование не восприимчиво к помехам излучения при напряженности испытательного поля $E_{исп}$, В этом случае испытания БО на восприимчивость в данном поддиапазоне заканчивают с констатацией положительного результата;
- электронное оборудование, на отдельных частотах i -го поддиапазона восприимчиво к помехам излучения. В этом случае испытания БО по вос-

приемчивости продолжают и определяют ту минимальную (пороговую) напряженность поля $E_{\min}$, на которой обеспечиваются заданные параметры качества функционирования БО внутри всего поддиапазона.

В результате получаем ряд из (j) частотных поддиапазонов с пороговым значением восприимчивости более или равным $E_{\text{исп}}$ и ряд из (i) частотных поддиапазонов с пороговыми значениями $E_{\min}(f_i)$.

Результаты испытаний оборудования по пп. 2.1 и 2.4 считаются положительными, если в процессе испытаний не было ни одного случая отказа работоспособности изделия сверх установленного критерия функционирования.

Список литературы: 1. ГОСТ 30585-98. Совместимость технических средств электромагнитная. Стойкость к воздействию грозовых разрядов. Технические требования и методы испытаний. 2. Квалификационные требования КТ-160D. Условия эксплуатации и окружающей среды для бортового авиационного оборудования. Требования, нормы и методы испытаний. Раздел 20.0 Радиочастотная восприимчивость. 3. *Кравченко В.И., Колишко Г.М., Князев В.В.* Возможности испытательных полигонов Украины по реализации новых требований к параметрам мощных электромагнитных помех // Вестник НТУ «ХПИ». – № 7. – 2002. – С. 15-18. 4. *Vajim D.* Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств и непреднамеренные помехи: Пер. с англ. / Вып. 3 / Под ред. *А.Д. Князева*. – М.: Сов радио, 1979. – 464 с. 5. *Каден Г.* Электромагнитные экраны в высокочастотной технике и технике электросвязи / Пер. с нем. *В.М. Лаврова*. – М.-Л.: ГЭИ, 1957. – 327 с. 6. *Шваб А.Й.* Электромагнитная совместимость. – М.: Энергоатомиздат, 1998. – 423 с. 7. *Князев В.В., Скобликов А.Ю.* Метод диагностики электромагнитной герметичности электромагнитных экранов // Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних сил «Системи обробки інформації». – Вип. 6(96) Метрологія та вимірювальна техніка. – 2011. – С. 123-128. 8. Компьютерная программа для расчета результатов проникновения магнитного поля в металлический корпус объекта «Молния-Н», свидетельство о регистрации авторского права №35382 от 14.10.2010 г. 9. *Ott Henry W.* Electromagnetic Compatibility Engineering. Wiley & Sons Inc., 2009, 862p.

Поступила в редколлегию 12.10.2011