

УДК 629.7.018

**ОСНОВНЫЕ МЕТОДЫ ОЦЕНКИ НАДЕЖНОСТИ  
БОРТОВОГО РАДИОЭЛЕКТРОННОГО ОБОРУДОВАНИЯ СОВРЕМЕННЫХ  
ГРАЖДАНСКИХ СУДОВ ПЕРЕД ЭТАПОМ СЕРИЙНОГО ПРОИЗВОДСТВА**

© 2018 А.В. Комиссаров<sup>1</sup>, В.В. Шишкин<sup>2</sup>, С.А. Зайцев<sup>1</sup>, В.А. Коженков<sup>1</sup>, Д.С. Захаров<sup>3</sup>

<sup>1</sup> АО «УКБП», г. Ульяновск

<sup>2</sup> ИАТУ УлГТУ, г. Ульяновск

<sup>3</sup> ВП МО РФ

Статья поступила в редакцию 01.11.2018

Целью статьи является анализ методов оценки надежности бортового радиоэлектронного электронного оборудования (БРЭО) в ходе этапа опытно-конструкторских работ, их практического применения, достоверности полученных результатов, предложение альтернативного подхода к проведению эквивалентно-циклических испытаний БРЭО гражданских воздушных судов.

*Ключевые слова:* бортовое электронное оборудование, надежность, наработка на отказ, испытания на надежность, эквивалентно-циклические испытания, HALT (High Accelerated Life (Limited) Tests), ESS (Environmental Stress Screening).

В XXI веке российская гражданская авиационная промышленность начала предлагать продукцию для международных рынков, при этом возникла необходимость использовать международные правила и требования в проектировании и обеспечении надежности бортовой электроники, за счет внедрения [1-5]. Обеспечение безопасности, как производной функции надежности является одной из основных задач в процессах разработки и сертификации оборудования воздушных судов, таких как SSJ-100 и MC-21, требующих от предприятий авиационной отрасли достаточно больших ресурсов и временных затрат.

В настоящий момент основной платформой разработки БРЭО гражданского назначения является V –образная модель. Оценка надежности осуществляется за счет периодического контроля каждого этапа проектирования (начиная с верхнего уровня, при получении требований к летательному аппарату и закачиванию верификацией и валидацией данных требования на уровне разработанного воздушного судна), что в конечном итоге позволяет снизить до минимума вероятность появления ошибок и некорректных технических решений [5].

*Комиссаров Александр Владимирович, начальник отдела.  
E-mail: komissarov@ukbp.ru*

*Шишкин Вадим Викторович, кандидат технических наук, профессор, директор ИАТУ УлГТУ.*

*Зайцев Сергей Александрович, начальник бригады.*

*Коженков Виталий Анатольевич, заместитель главного конструктора АО «УКБП», соискатель кафедры «Измерительно-вычислительные комплексы» УлГТУ.*

*Захаров Дмитрий Сергеевич, аспирант кафедры «Измерительно-вычислительные комплексы» УлГТУ.*

Методы оценки надежности, используемые в ходе разработки, условно можно разделить на два основных направления обеспечения безопасности разработки БРЭО: количественная и качественная оценка.

Количественная оценка базируется на методиках прогнозирования интенсивности отказов, статистических методах контроля надежности и ресурсных испытаниях, таких как эквивалентно-циклические, испытания на долговечность и сохраняемость, регламентированных различными справочниками (таблица 1) и базой нормативно-технических документов (НТД).

Однако в ходе анализа таких справочников, при практическом применении, были определены некоторые расхождения в данных, получаемых с использованием математических моделей по оценке надежности:

- завышенная интенсивность отказов;

- критически малые показатели надежности, по сравнению с реально полученными экспериментальными значениями в период эксплуатации, или наоборот, завышенные показатели надежности, при периодических отказах на борту.

Одной из причин этого является отсутствие своевременной актуализации справочников синхронно, с постоянным обновлением электронной продукции на рынке, в связи с длительностью испытаний при различных внешних воздействующих факторах (ВВФ). Недостоверная оценка показателей надежности явилась причиной расхождения заявленных тактико-технических характеристик истребителя F-22 Raptor и вертолета RAH-66 Comanche с полученными значениями в ходе летных испытаний и эксплуатации [6].

**Таблица 1.** Справочники и стандарты

Наименование НТД	Разработчик	Год разработки
Надежность ЭРИ	МО РФ	2006
MIL-HDBK-217 F	МО США	1995
MIL-HDBK-781	МО США	1996
SR-332 (Issue 4)	Telcordia, США	2016
Siemens SN 29500	Siemens, Германия	2013
217 Plus	МО США	2007
IEC TR 62380	ЕС	2007
FIDES 2009	Франция	2009

В основе качественной оценки лежат методы априорного анализа, состоящего из следующих процессов [4,5]:

Оценка функциональных опасностей (ОФО/ FNA);

Предварительная оценка безопасности системы (PSSA):

- Анализ дерева неисправности (FTA);
- Анализ логической схемы (DD);
- Марковский анализ (МА).

Оценка безопасности систем (SSA):

- Список отказных состояний и их классификация (FNA, PSSA);

- Качественный и количественный анализ отказных состояний (FTA, DD, MA, FMEA(S));

- Анализ общих причин отказов (CCA);

- Верификация учета требований предварительной оценки безопасности в проекте и испытаниях;

- Испытания.

Анализ общих причин отказов (CCA):

- Анализ общих режимов (CMA);
- Анализ зонной безопасности (ZSA);
- Анализ специфических рисков (PRA).

Достоверность данных качественной оценки определяется множеством факторов:

- зависимостью от экспоненциального распределения, несвойственного периоду разработки и начальному этапу эксплуатации, при максимальном потоке отказов;

- последовательностью появления отказных событий, при этом не учитывается независимость (параллельность) появления отказных состояний;

- трудоемкостью анализа отказных событий БРЭО с большим количеством составных частей с учетом степени важности и исключении менее вероятных отказных состояний.

Статистические методы расчета показателей надежности предполагают наличие достаточного объема информации об изделиях аналогах и элементах, что не всегда доступно при разра-

ботке новых изделий, не имеющих какой-либо значимой статистической информации. Первоисточником данных о показателях надежности и оценки безопасности разработанного БРЭО являются испытания на ВВФ и надежность [3,7].

Таким образом, можно с достаточной степенью точности предположить, что наиболее действенными и достоверными являются ресурсные испытания БРЭО на этапе опытно-конструкторских работ, проводящиеся в настоящее время по методикам ускоренных испытаний, результатом которых является актуальная оценка надежности разработки и принятых технических решений, способности ПО обрабатывать и выдавать информацию в условиях внешних воздействий близких к эксплуатационным. Наиболее широкое применение в авиации получили методы эквивалентно-циклических испытаний (ЭЦИ), основанные на процедурах стресс-скрининга. Продолжительность таких испытаний для изделий из состава БРЭО МС-21 указана в таблице 2.

Концепция процедур стресс-скрининга ESS базируется на том факте, что разработанное вновь изделие изначально имеет конструктивные, схемотехнические и производственные недостатки.

Процедуры стресс-скрининга предполагают превышение (форсирование) уровней внешних воздействующих факторов, приводящих к более раннему проявлению результатов, как процесса деградации (старения), так и к отказным состояниям изделия, в максимально короткие периоды времени, решая тем самым обширный круг задач:

- по выявлению значимых недостатков разработки;

- по компенсации этапа приработки изделия в эксплуатации в ходе производственного цикла;

- по обнаружению потенциальных отказов.

При проведении современных процедур стресс-скрининга отсутствует имитация рабочих условий эксплуатации, изделие испытывается в максимально возможных приложенных внеш-

Таблица 2. Продолжительность ЭЦИ БРЭО МС-21

Обозначение	Функциональное назначение	Продолжительность, ч (сут)
БУК-17	Управление системой кондиционирования воздуха	4526 (189)
БЗК-1	Коммутация электропитания БРЭО	1951 (82)
БУОС-1	Управление обогревом стекол кабины пилотов	5707 (238)
БВК-12	Вычислитель бортовой	5707 (238)
БПС-14	Преобразователь сигналов	1985,1 (83)

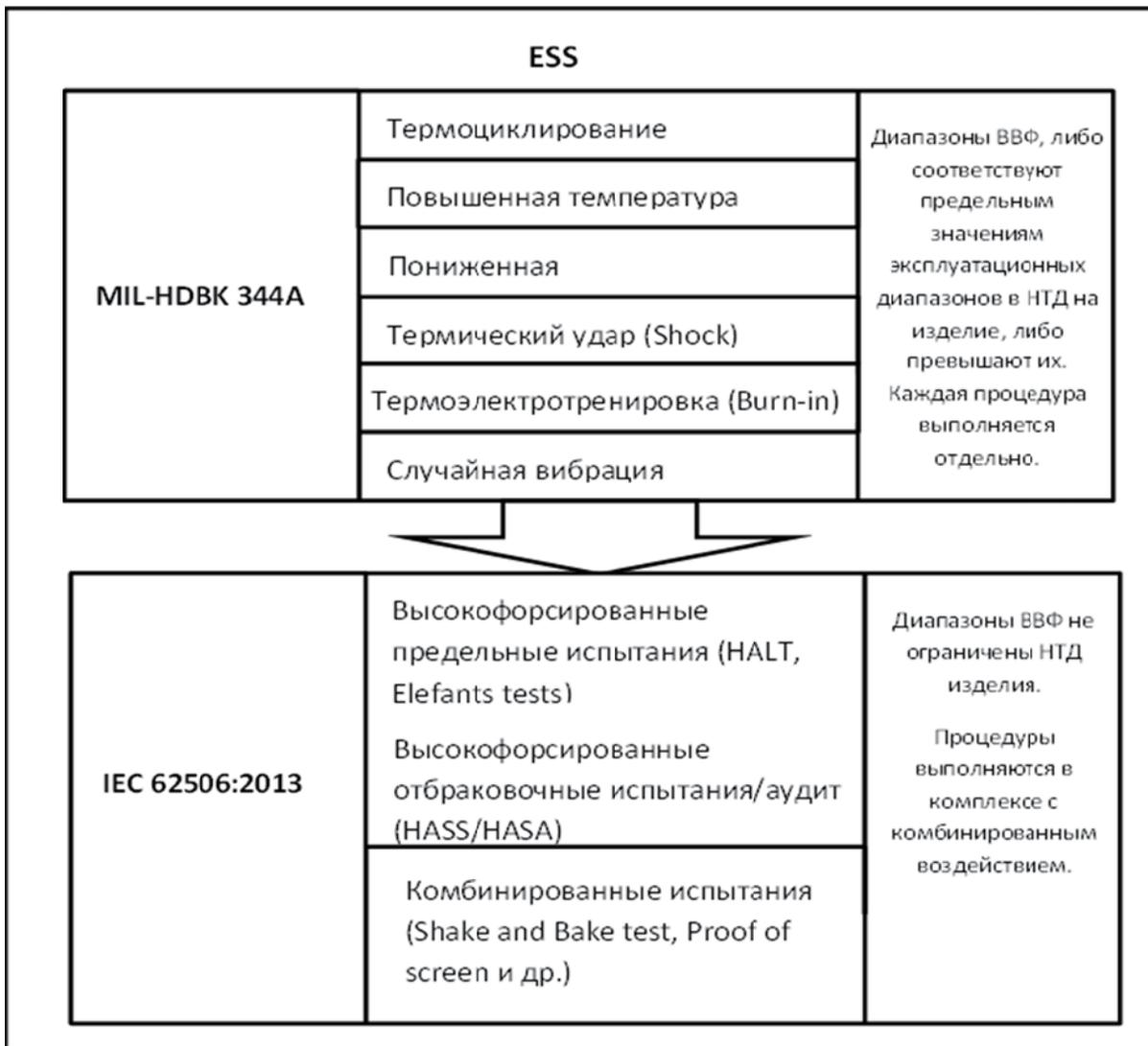


Рис. 1. Развитие нормативно-технической базы в части ESS-процедур

них режимах работы, за счет чего и происходит интенсификация отказного состояния [10].

На рисунке 1 изображен процесс развития в нормативно-технической документации таких подходов. На первом этапе был выпущен стандарт ВМФ США NAVMAT P-9492 регламентирующий порядок проведения таких испытаний, с накоплением статистической информации и экспериментального опыта эксплуатации, прошед-

шей ESS-процедуры, были выпущены стандарты MIL-STD-2164 и DOD-HDBK-344, применяемые в настоящее время в комплексе с MIL-STD-810 (методы 514.3 и 502.2). Однако в настоящее время наблюдается широкое развитие тенденций к комплексному подходу в части внешних воздействий в процессе проведения процедур.

Отличительной чертой таких изменений в процедурах ESS является концепция высоко-

форсированных испытаний с нерегламентированными уровнями ВВФ.

Компания Commercial Aviation Electronics (США) определила следующие требования к ВВФ в зависимости от типов применения электронной аппаратуры (таблица 3).

Современное использование процедур стресс-скрининга в авиационной промышленности западных стран, таких как HALT (High Accelerated Life Tests) отличается от методов, используемых в настоящее время в отечественной электронной промышленности. Испытания не предназначены для количественной оценки показателей надежности, основной целью является повышение качества разработки и технологии производства изделия, за счет определенной выработки ресурса в сжатые сроки и пролонгации периода гарантийного износа, за счет максимального воздействия ВВФ, перекрывающих область прочности изделия.

Испытания HALT состоят из нескольких отдельных процедур [11]:

- ступенчатое изменение повышенной и пониженной температуры;
- термоциклирование со скоростью набора температуры 10-60°С/мин на уровнях воздействий, превышающих на 10-20 % диапазон предельных значений эксплуатации;
- широкополосная случайная вибрация (ШСВ) с равномерным спектром для определения предела разрушения;
- комплексного воздействия циклического изменения температуры и ШСВ.

В таблице 4 приведены предельные значения для высокофорсированных испытаний HALT для различных типов аппаратуры.

Основным недостатком использования высокофорсированных отбраковочных испытаний HALT является малое количество методик количественной оценки их результатов и высокая стоимость оборудования [7, 11].

В настоящее время методики перевода результатов HALT предполагают физико-статистический подход с использованием, как нейронных сетей, так и законов, основанных на процессе деградации. Однако не всегда возможно использовать имеющиеся методы в новых разработках бортового электронного оборудования в связи с отсутствием экспериментальных и статистических данных для получения достоверной оценки наработки на отказ.

Результаты проведения процедур ESS по методике HALT показывают, что большинство выявленных несоответствий (суммарно около 60%) связано с некачественной пайкой соединений и отказом ЭРИ (таблица 5), а деградация элементов происходит только в 2% случаев, поэтому использование моделей основанных на эмпирических законах старения (физико-статистический подход), по мнению автора является нецелесообразной применительно к бортовой электронике. Анализ надежности эксплуатации после завершения опытно-конструкторских работ и серийного выпуска блока-концентратора EIU-100, разработанного в соответствии с [1-5], из состава самолета RRJ-95B показал следующее [9]:

- 50% отказов выявлено в процессе входного контроля перед постановкой заводом-изготовителем на воздушное судно;
- 44% отказов связано с производственными дефектами (паяные соединения по бессвинцо-

Таблица 3. Уровни воздействия ВВФ в ESS-процедурах

Тип применения	Требования по температуре	Требования по вибрации
Бытовая	От 0 до +40 °С	Отсутствует
Транспортная	От -40 до +75 °С	1-2 Grms, 0-200 Гц
Военная	От -40 до +60 °С	Отсутствует
Авиационная	От -40 до +75 °С	1-2 Grms, 0-500 Гц

Таблица 4. Уровни ВВФ при процедурах HALT для различных видов аппаратуры

Тип применения	Температура, °С				ШСВ, Grms	
	$T_{lim(-)}^{Раб}$	$T_{lim(-)}^{Разр}$	$T_{lim(+)}^{Раб}$	$T_{lim(+)}^{Разр}$	$T_{lim(Grms)}^{Раб}$	$T_{lim(Grms)}^{Разр}$
Бытовая	-62	-80	92	118	46	52
Транспортная	-69	-78	116	123	121	124
Военная	-66	-81	106	124	66	69
Авиационная	-60	-90	110	128	18	29

вой технологии микросхем в BGA-корпусах, нарушения при электромонтажных операциях);

- 14% отказов связано с конструктивными ошибками, допущенными в ходе ОКР;

- 15% отказов связано с электронными компонентами и установкой несоответствующих версий ПО;

- 26% изделий, забракованных в 2016 году, отказало с наработкой более 1000 часов, 26% с наработкой более 3000 часов.

Необходимо обратить внимание, что 14% отказов, связанных с конструктивными ошибками, допущенными в ходе ОКР, не были выявлены не в ходе испытаний, не в ходе серийного освоения и производства, а проявились только на этапе продолжительной эксплуатации ВС.

Основными внешними воздействующими факторами, провоцирующими большинство отказных состояний, включая паяные соединения, и выход из строя бракованных ЭРИ являются:

- широкополосная случайная вибрация (ШСВ);

- повышенная температура;

- комплексное воздействие ШСВ и термоциклирования (более 70%).

Как видно из таблицы 5, статистика выявленных отказов при проведении процедур ESS коррелируется с результатами, полученными из эксплуатации, где контроль разработки и испытания проводились по методикам, основанным на принципах форсирования уровней внешних воздействующих факторов [14].

Основываясь на полученных данных, актуальной является задача по разработке нового метода ЭЦИ с количественной оценкой показателя наработки на отказ БРЭО. Решение задачи предполагает:

- 1) сокращение времени проведения испытаний за счет применения следующих методов:

- интенсификации уровней воздействия режимов ВВФ (температуры, вибрации);

- комплексного (одновременного) воздействия ВВФ: циклического изменения температуры и ШСВ.

- 2) разработку модели эквивалентности режимов ВВФ базовому году эксплуатации воздушного судна (ВС);

- 3) выявление конструктивных и электронных элементов изделий БРЭО, ограничивающих надежность и долговечность (ресурс) изделия;

- 4) определение возможности установления требуемого ресурса и оценка мероприятий по его увеличению;

Программа испытаний основана на классическом подходе, состоящем из следующих этапов:

Этап 1. Предварительные исследования.

Этап 2. Разработка и обоснование модели испытаний.

Этап 3. Оценка результатов испытаний и их достоверности.

Для решения поставленной задачи предполагается такая модель испытаний, включающая в себя следующие параметры комплексного воздействия внешних факторов, исходя из базового

**Таблица 5.** Результаты испытаний с использованием процедур ESS (HALT)

Отказ изделия или его компонентов		Температура			ШСВ	Комплексное воздействие вибрации и температуры
		«-»	«+»	Термоцикл		
Пайка	62	-	-	-	48	14
Отказ ЭРИ	28	9	11	1	3	4
Разрушение механического крепления	9	-	-	-	9	-
Ошибки разработки	8	3	4	-	-	1
Отказ соединителей блока	12	-	-	1	12	-
Деформация печатной платы	4	-	-	-	4	-
Выход за допустимое отклонение параметров	4	-	-	-	4	-
Плавающий отказ ЭРИ	3	1		1	1	
Различные предельные значения у 2-х испытываемых изделий	3	3	-	-	-	-
Отказ в соединителях на плате	2	-	-	1	1	-
Деградация ЭРИ	2	-	2	-	-	-
Короткое замыкание ЭРИ	3	-	-	-	2	1
Разрыв в печатном проводнике платы	1	-	-	-	-	1
Прочее	8	-	1	-	5	2
Итого	149	16	18	4	89	23
%	100	11	12	3	60	14

цикла эксплуатации ВС за 1 год:

- размах термоцикла на уровнях превышающих заданные в технических требованиях, от -100 до +100 °С, при скорости изменения температуры в цикле 60-70 °С в минуту;
- ШСВ с уровнем 50-70 Grms.

В ходе экспериментальной отработки методик форсированных испытаний HALT были проведены предварительные исследования комбинированного воздействия на трех образцах цифрового графического индикатора, проверка прочности жидкокристаллического экрана, используемого в БРЭО гражданской авиации, к многоуровневым термическим и вибрационным воздействиям.

Индикаторы были подвергнуты одновременному воздействию 5 циклов циклической смены температуры в диапазоне от -75 до +100 °С и вибрации, как показано на рисунке 2.

Для первого температурного цикла уровень вибрации был установлен в 10 Grms со ступенчатым повышением на 10 Grms перед каждым следующим циклом. При температуре -27°С по-

требление тока увеличилось с 0,38 А до 1,8 А, заморозание жидкокристаллического экрана выявлено на минус 80 °С.

В результате тестирования подтвердилось соответствие конструкции и технологии производства жестким условиям эксплуатации, были определены предельные параметры эксплуатации (таблица 6), а также вектор дальнейших исследований [13].

При серийном выпуске продукции перспективным направлением, по мнению автора, является использование методов испытаний HALT для процедур технологической приработки и тренировки в целях снижения потока отказов и обнаружения скрытых дефектов при производстве, а также проведение входного контроля импортной электронной компонентной базы, используемой в БРЭО.

На следующем этапе прорабатывается модель эквивалентности влияния ВВФ на базовый цикл эксплуатации воздушного судна и ее апробация по программе ЭЦИ для определения наработки на отказ БРЭО за счет комплексного

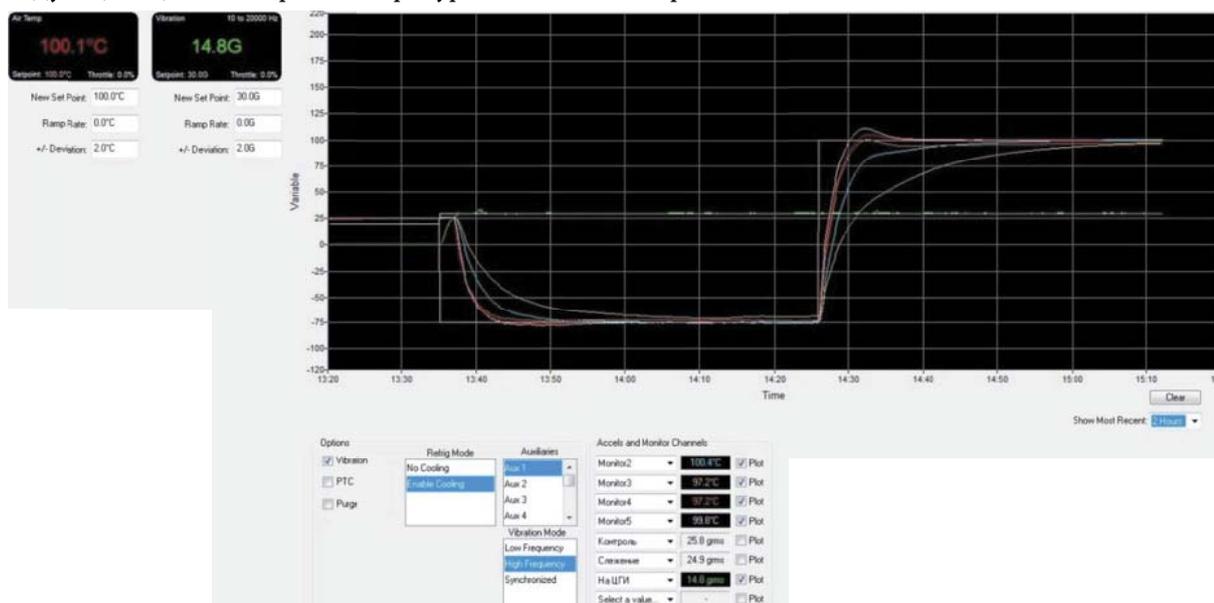


Рис. 2. Комбинированное воздействие циклического изменения температуры и ШСВ

Таблица 6. Результаты: Предел работоспособности (OL) и предел разрушения (DL)

Условие воздействия	Параметр
OL при низких температурах	-75 °С
OL при высоких температурах	+100 °С
OL при вибрации	60 G
DL при низких температурах	Отказов не выявлено
DL при высоких температурах	Отказов не выявлено
DL при вибрации	Отказов не выявлено

воздействия циклического изменения температуры и широкополосной вибрации на предельных уровнях за счет применения испытательного оборудования и методик HALT.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В статье изложены методы оценки надежности БРЭО применяемые в современной авиационной промышленности для гражданских воздушных судов, проведен их краткий анализ и результаты эксплуатации.

2. Изложена концепция процедур стресс-скрининга ESS, а также статистические результаты испытаний HALT.

3. Приведены результаты апробации испытаний HALT при комбинированном воздействии термоциклирования и ШСВ. Подтвержден метод испытаний на уровнях превышающих температурное и вибрационное воздействие, заложенное в технических требованиях на изделие на примере цифрового графического индикатора.

4. Определено направление развития дальнейших исследований в части разработки математической модели эквивалентно-циклических испытаний на предельных уровнях за счет применения испытательного оборудования и методик HALT.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Руководство по гарантии конструирования бортовой электронной аппаратуры КТ-254.
2. Квалификационные требования КТ-178В (КТ-178С) «Требования к программному обеспечению бортовой аппаратуры и систем при сертификации авиационной техники».
3. Квалификационные требования КТ-160D (КТ-160G) «Условия эксплуатации и окружающей среды для бортового авиационного оборудования. Требования, нормы и методы испытаний».
4. Руководство 4754А по процессам сертификации высокоинтегрированных сложных бортовых систем воздушных судов гражданской авиации. Издание 2010 г.
5. Руководство 4761 по методам оценки безопасности систем и бортового оборудования воздушных судов гражданской авиации – М.: ОАО Авиаиздат, 2010. – 264 с.
6. Комиссаров А.В., Виноградов А.Б. Проблематика методов определения показателей надежности бортового радиоэлектронного оборудования авиационной техники // Известия Самарского научного центра РАН. - 2017. Т. 19. № 1(2). - С. 346-351
7. Hobbs G.K. Accelerated Reliability Engineering: HALT & HASS, Hobbs Engineering, 2005. 229 с.
8. Виноградов А.Б., Комиссаров А.В. Методика управления качеством бортового оборудования изделий авиационной и наземной технике. Известия Самарского научного центра РАН. Том 18, №4(3). - 2016. - С. 571 - 577.
9. Отчет по анализу надежности изделий АО «УКБП» эксплуатируемых в составе объектов RRJ-95В за 2016 год. Версия 1.0. -2017. С.17
10. Silverman M. Summary of HALT and HASS results at an Accelerate Reliability test center. Reliability Engineering Services HALT and Classical Techniques "Reliability Integration". Ops A La Carte LLC.-1998.С.11.
11. H.W. McLean, HALT, HASS and HASA Explained: Accelerated Reliability Techniques, revised edition, ASQ Quality Press, 2009. 208 С.
12. Майоров А.В., Потюков Н.П. Планирование и проведение ускоренных испытаний на надежность устройств электронной автоматики. М.: Радио и связь, 1982. - С. 34-35.
13. Промежуточный отчет по испытаниям типа HALT. АО «УКБП»-2018. С.13
14. Комиссаров А.В., Шишкин В.В. и др. Оценка безопасности бортового электронного оборудования воздушных гражданских судов в ходе опытно-конструкторских работ // Итоги диссертационных исследований. Том 1.- Материалы X Всероссийского конкурса молодых ученых. - М.: РАН, 2018. - С. 56-65

### THE MAIN METHODS FOR ASSESSING THE RELIABILITY OF ON-BOARD RADIO-ELECTRONIC EQUIPMENT OF MODERN CIVIL COURTS BEFORE THE SERIES PRODUCTION

© 2018 A.V. Komissarov<sup>1</sup>, V.V. Shishkin<sup>2</sup>, S.A. Zaitsev<sup>1</sup>, V.A. Kozhenkov<sup>1</sup>, D.S. Zaharov<sup>3</sup>

<sup>1</sup> UIMDB JSC, Ulyanovsk

<sup>2</sup> IATM USTU, Ulyanovsk

<sup>3</sup> MDRF

The purpose of this article is to analyze the methods for assessing the reliability of on-board radio electronic equipment (EIR) during the development stage, their practical application, the reliability of the results, a proposal of an alternative approach to conducting equivalent-cyclical tests of EIR of civil aircraft. Keywords: avionics electronic equipment, reliability, time to failure, reliability tests, equivalent-cyclical tests, HALT (High Accelerated Life (Limited) Tests), ESS (Environmental Stress Screening).

Alexander Komissarov, Head of the Department.

E-mail: komissarov@ukbp.ru

Vadim Shishkin, Candidate of Technics, Associate Professor, Director.

Sergey Zaitsev, Brigade Chief.

Vitaly Kozhenkov, Deputy Chief Designer of JSC «UKBP», the Applicant of the Department «Measuring and Computing Complexes» of UISTU.

Dmitry Zakharov, Graduate Student of the Department «Measuring and Computing Complexes» of UISTU.