

УДК 629.7.018

DOI: 10.46548/21vek-2020-0951-0010

**РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА УСКОРЕНИЯ  
МНОГОФАКТОРНЫХ ЭКВИВАЛЕНТНО-ЦИКЛИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ НА ОСНОВЕ  
ПРОЦЕДУР HALT ДЛЯ ОЦЕНКИ ДОЛГОВЕЧНОСТИ И БЕЗОТКАЗНОСТИ БРЭО**

©2020

**Комиссаров Александр Владимирович**, главный конструктор

*АО «Ульяновское конструкторское бюро приборостроения»*

*(432071, Россия, Ульяновск, ул. Крымова, д.10«А»)*

**Шишкин Вадим Викторович**, кандидат технических наук, профессор,

*директор Института авиационных технологий и управления*

*Ульяновский государственный технический университет*

*(432059, Ульяновск, проспект Созидателей, 13)*

**Коженков Виталий Анатольевич**, заместитель главного конструктора

**Степашкина Елена Валерьевна**, заместитель начальника серийно-конструкторского отдела

*АО «Ульяновское конструкторское бюро приборостроения»*

*(432071, Россия, Ульяновск, ул. Крымова, д.10«А»)*

**Аннотация.** В настоящей статье авторами рассмотрены вопросы в части уточнения модели многофакторных эквивалентно-циклических испытаний (МФЭЦИ) на долговечность и безотказность бортового авиационного оборудования воздушных судов, был произведен расчет коэффициента ускорения МФЭЦИ, основанного на применении принципов усечения спектра воздействующих факторов, такие как температура и широкополосная случайная вибрация, увеличение частоты рабочих циклов, экстраполяция по времени (фундаментальных моделях физики отказов) и нагрузка (превышение уровней воздействующих факторов, заданных в технических требованиях к бортовому радиоэлектронному оборудованию) с целью сокращения продолжительности МФЭЦИ с сохранением основных положений об автомодельности испытаний. Авторами статьи представлены выявленные в ходе исследований отличительные особенности разработанной модели МФЭЦИ, в частности был применен учет априорной, экспериментальной и эксплуатационной информации при проведении настоящих МФЭЦИ, также применено соотношение на основе базовых принципов физики отказов, учитывающее их взаимное влияние на расходование ресурсных показателей эквивалентное определенному этапу жизненного цикла БРЭО. Также авторами представлена взаимосвязь уровней форсирования воздействующих факторов (температуры, скорости изменения температуры, ИСВ) и методики исследовательских испытаний, состоящей из процедур HALT. Разработанная модель МФЭЦИ учитывает априорную и эксплуатационную информацию при проведении испытаний. В статье были получены оценки общего коэффициента ускорения при МФЭЦИ при трех основных этапах, используемых при МФЭЦИ: транспортирования, функционирования на борту и сохраняемости, что соответствует статистике компании Боинг.

**Ключевые слова:** HALT, многофакторные эквивалентно-циклические испытания, коэффициент ускорения испытаний, БРЭО, надежность, показатели надежности, коэффициент ускорения, метод оценки надёжности.

**DEVELOPMENT OF A METHOD FOR DETERMINING THE ACCELERATION COEFFICIENT OF  
MULTI-FACTOR EQUIVALENT-CYCLIC TESTS BASED ON HALT PROCEDURES FOR EVALUATING  
THE DURABILITY AND RELIABILITY OF AVIONICS**

©2020

**Komissarov Alexander Vladimirovich**, chief designer

*JSC "Ulyanovsk Instrument Design Bureau"*

*(432071, Russia, Ulyanovsk, street Krymova, 10 "A")*

**Shishkin Vadim Viktorinovich**, candidate of Technical Sciences, professor,

*director of Institute of Aviation Technologies and Management*

*Ulyanovsk State Technical University*

*(432059, Ulyanovsk, Prospect Sozidateley, 13)*

**Kozhenkov Vitaly Anatolievich**, deputy Chief Designer

**Stepashkina Elena Valerievna**, deputy head of the serial design department

*JSC "Ulyanovsk Instrument Design Bureau"*

*(432071, Russia, Ulyanovsk, street Krymova, 10 "A")*

**Abstract.** In this paper, the authors considers the issues in terms of clarifying the multi-factor model is equivalent to cyclic tests (MPATI) on the longevity and reliability avionics aircraft was the calculation of the acceleration factor of MFACE based on the application of the principles of the truncation of the spectrum of influencing factors such as temperature and broadband random vibration, an increase in the frequency of cycles, an extrapolation in time (fundamental models of physics of failure) and load (excess levels of influencing factors, specified in the technical requirements for on-Board radio-electronic equipment) in order to reduce the duration of the MFECI while maintaining the main

provisions on self-similarity of tests. The authors of the article present the distinctive features of the developed MFECI model identified in the course of research, in particular, they used a priori, experimental and operational information when conducting these MFECI, and also applied a ratio based on the basic principles of failure physics, taking into account their mutual influence on the expenditure of resource indicators equivalent to a certain stage of the avionics life cycle. The authors also present the relationship between the levels of forcing of influencing factors (temperature, rate of temperature change, SHS) and the research test methodology consisting of HALT procedures.

**Keywords:** HALT, multi-factor equivalent-cyclic tests, test acceleration coefficient, avionics, reliability, reliability indicators, acceleration coefficient, reliability assessment method.

**Введение.** Бортовое радиоэлектронное оборудование (БРЭО) гражданского самолета является сложной технической системой, от надежности которого напрямую зависит безопасность полетов. Последние авиационные происшествия с отказами электронной системы улучшения характеристик управления самолетом (MCAS) у модели 737 MAX8 компании Boeing привели, предварительно, к двум фатальным инцидентам, приостановки эксплуатации и продаж самолета, нанесению серьезного удара по престижу американской компании. С другой стороны, в отечественной гражданской авиации, также существуют проблемы в части безотказности БРЭО, как одного из основных показателей надежности, например, низкий налет в 3,6 летных часа в сутки самолетов Сухой SuperJet-100 по сравнению с аналогичными зарубежными воздушными судами, где показатель составляет 8-10 летных часов, многие эксперты связывают с периодическими отказами оборудования. Все современные гражданские самолеты оснащаются системами элетродистанционного управления (*Fly-by-Wire*), уровень автоматизации которой практически исключает непосредственное участие пилота в управлении [1]. По словам президента США Д. Трампа самолеты настолько стали сложны, что вместо пилота необходимы специалисты IT-сферы с уровнем образования Массачусетского технологического университета [2]. Как следствие, необходимо гарантировать надежность БРЭО на всем протяжении его жизненного цикла: от проектирования и отработки опытных образцов до изготовления и сертификации [3-4], надёжность БРЭО формируется в процессе проектирования, гарантируется при изготовлении и обеспечивается в эксплуатации [5].

**Целью** работы является разработка методики определения коэффициента ускорения многофакторных эквивалентно-циклических испытаний на основе процедур *HALT* для оценки долговечности и безотказности БРЭО. Контроль показателей надежности на этапе научно-исследовательских опытно-конструкторских работ БРЭО осуществляется различными методами, одними из которых являются экспериментальная отработка опытных образцов в ходе испытаний, которая, фактически, дает предварительную оценку безотказности и возможность исключения ряда проблем при эксплуатации [6, 7]. Улучшение качества контроля и эффективности таких испытаний является главной задачей настоящего исследования.

**Материалы и методы исследования.** Ранее, в публикации [8], представлена методика многофактор-

ных эквивалентно-циклических испытаний (МФЭЦИ) на основе процедур отбраковочных испытаний *HALT* (*High accelerated life/limited test*) для оценки показателей долговечности и безотказности БРЭО, разработанного с учетом требований нормативных документов АП-21, АП-25, Р-4754А, Р-4761 и др. [9-11]. Методика испытаний базируется на модели ускоренных многофакторных испытаний, разработанной на основе моделей различных механизмов отказа теории накопления усталости, таких как модели Аррениуса, Коффина-Мэнсона и Майнера [12].

Расчет суммарного фактора ускорения  $\Phi_{\text{комб}}$  (коэффициент ускорения) осуществляется следующим образом:

$$\Phi_{\text{комб}} = \frac{1}{N_{\Phi}} \sum_{i=1}^{N_{\Phi}} \Phi_i \cdot \prod_k \Phi_k \quad (1)$$

где  $\prod_k \Phi_k$  – произведение факторов ускорения, влияющих на режим появления отказного состояния изделия;  $\Phi_i$  – коэффициент ускорения для каждого из форсирующего фактора;  $N_{\Phi}$  – количество факторов в МФЭЦИ.

Однако, в ходе проведения моделирования и получения расчетных соотношений были выявлены значения коэффициентов ускорения порядка нескольких тысяч. Поэтому, в [13] предполагается, что для более достоверной оценки общего коэффициента ускорения при МФЭЦИ, необходимо отдельно учитывать каждый доминирующий механизм отказа, посредством введения относительной доли вероятности отказа  $q_{ij}$ , нашедшую отражение, например, в ГОСТ Р 57394-2017:

$$q_{ij} = \frac{d_{ij}}{N} \quad (2)$$

где  $d_{ij}$  – число отказов изделий, связанных с отказом  $i$ -го элемента (допускается  $i=1$ ) вследствие развития  $j$ -го механизма отказа при воздействии определенного форсирующего фактора;  $N$  – число отказов.

Использование выражения (2) с точки зрения уточнения фактора ускорения в МФЭЦИ БРЭО имеет следующий физический смысл: каждый форсирующий фактор может вызвать только ту долю отказов, которая свойственна деградиационным процессам, вызванным их воздействием. Например, под воздействием фактора циклического изменения температуры, отказ БРЭО вызван усталостью при растяжении материалов, что приводит к появлению сдвиговых нагрузок, и разрушение наступает вследствие усталости при сдвиге и релаксации напряжений в паяных соединениях элементов печатных плат [14]. По результатам предварительных исследований по определению уровней форсирования ВВФ согласно методике МФЭЦИ [8-11]

предложено использовать несколько уточненное соотношение для определения доли вероятности отказа для каждого ВВФ отдельно:

$$q_i = \frac{d_i}{N_{\text{ПП}}} \quad (3)$$

где  $d_i$  – число отказов изделий при воздействии  $i$ -го форсирующего фактора при проведении предварительных исследований;  $N_{\text{ПП}}$  – общее число отказов, обнаруженных в ходе предварительных исследований.

Тогда соотношение (1) принимает вид:

$$\Phi_{\text{комб}} = \frac{1}{N_{\Phi}} \sum_{i=1}^{N_{\Phi}} q_i \cdot \Phi_i \cdot \Pi_k \Phi_k \quad (4)$$

**Результаты исследования.** Анализ данных распределения количества отказов компании *Qualmark Corporation* [15], выявленных в ходе процедур отбраковочных испытаний *HALT* до 2015 г. представлены в таблице 1.

Таблица 1 - Доля отказов при различных ВВФ в ходе испытаний по процедурам *HALT*

Тип ВВФ	$q_i$
Пониженная температура	0,19
Повышенная температура	0,21
ЦИТ	0,09
ШСВ	0,19

Результаты проведения предварительных исследований при определении уровней форсирования ВВФ для проведения МФЭЦИ блока концентратора данных (БКД) разработки АО УКБП представлены в таблице 2.

Таблица 2 - Доля выявленных отказов в ходе предварительных исследований БКД.

Тип ВВФ	$q_i$
Пониженная температура	0,09
Повышенная температура	0,18
ЦИТ	0,27
ШСВ	0,45

Транспортирование:

$$\Phi_{\text{трансп}} = \frac{P_{\text{трансп}}}{2} \left[ \left( q_{\text{темпл}} \frac{\left( \frac{T_{\text{lim}}^{\text{Max}}(+)-T_{\text{lim}}^{\text{Max}}(-)}{\Delta T_{\text{колебаний}}^{\text{трансп}}} \right)^{-k_x} \times \left( \frac{V_{\Delta T_{\text{HALT}}}}{V_{\Delta T_{\text{трансп}}}} \right)^{\frac{1}{3}}}{2} \right) \times q_{\text{вибр}} \frac{\sqrt{G_{\text{трансп}}^b}}{\sqrt{(G_{\text{XX}}^{\text{HALT}} + G_{\text{YY}}^{\text{HALT}} + G_{\text{ZZ}}^{\text{HALT}})^b}} \right] \quad (6)$$

Функционирование:

$$\Phi_{\text{функц}} = \frac{P_{\text{полет}}}{2} \left[ q_{\text{вибр}} \frac{\left( \frac{\sqrt{(G_{\text{XX}}^{\text{П}} + G_{\text{YY}}^{\text{П}} + G_{\text{ZZ}}^{\text{П}})^b}}{\sqrt{(G_{\text{XX}}^{\text{HALT}} + G_{\text{YY}}^{\text{HALT}} + G_{\text{ZZ}}^{\text{HALT}})^b}} \right)}{2} \cdot q_{\text{темпл}} \left( \frac{\left( \frac{T_{\text{исп}}^{\text{П}} - T_{\text{исп}}^{\text{П}}}{\Delta T_{\text{колебаний}}^{\text{эксп}}} \right)^{-k_x} \times \left( \frac{V_{\Delta T_{\text{HALT}}}}{V_{\Delta T_{\text{колебаний}}}} \right)^{\frac{1}{3}}}{2} + \frac{\left( \frac{\Delta T_{\text{HALT}}}{\Delta T_{\text{колебаний}}^{\text{и}}} \right)^{-k_{\text{П}}} \times \left( \frac{V_{\Delta T_{\text{HALT}}}}{V_{\Delta T_{\text{колебаний}}}} \right)^{\frac{1}{3}}}{2} \right] \quad (7)$$

Сохраняемость:

$$\Phi_{\text{сохр}} = \frac{P_{\text{сохр}}}{2} \left[ \left( q_{\text{темпл}} \frac{\left( \frac{T_{\text{Max}}^{\text{Раб}}(+)-T_{\text{Max}}^{\text{Раб}}(-)}{\Delta T_{\text{хц}}^{\text{и}}} \right)^{-k_x} \times \left( \frac{V_{\Delta T_{\text{HALT}}}}{V_{\Delta T_{\text{колебаний}}^{\text{с}}}} \right)^{\frac{1}{3}}}{2} + q_{\text{темпл}} \frac{\left( \frac{T_{\text{Max}}^{\text{Раб}}(+)-T_{\text{Max}}^{\text{Раб}}(-)}{\Delta T_{\text{хц}}^{\text{и}}} \right)^{-k_x} \times \left( \frac{V_{\Delta T_{\text{HALT}}}}{V_{\Delta T_{\text{колебаний}}^{\text{и}}}} \right)^{\frac{1}{3}}}{2} \right) \times q_{\text{вибр}} \frac{\sqrt{(G_{\text{XX}}^3 + G_{\text{YY}}^3 + G_{\text{ZZ}}^3)^b}}{\sqrt{(G_{\text{XX}}^{\text{HALT}} + G_{\text{YY}}^{\text{HALT}} + G_{\text{ZZ}}^{\text{HALT}})^b}} \right] \quad (8)$$

где  $T_{\text{lim}}^{\text{Max}}(+)$  и  $T_{\text{lim}}^{\text{Max}}(-)$  – предельные температуры испытаний, определенные в ходе процедур *HALT*;  $\Delta T_{\text{колебаний}}^{\text{трансп}}$  – диапазон изменения колебаний температуры в период транспортирования БРЭО;  $G_{\text{XX}}^{\text{HALT}}$ ,  $G_{\text{YY}}^{\text{HALT}}$ ,  $G_{\text{ZZ}}^{\text{HALT}}$  – скорость изменения температуры в течении периода транспортирования;  $V_{\Delta T_{\text{трансп}}}$  – максимальное значение уровня широкополосной случайной вибрации по каждой из осей X, Y, Z, опре-

Однако, выражение (3) не учитывает априорную информацию об отказах в ходе жизненного цикла БРЭО предполагается, что для более достоверной оценки общего коэффициента ускорения при МФЭЦИ. В [8] были определены три основных этапа, используемых при МФЭЦИ:

1. Транспортирования (предполагающие доставку БРЭО, входной контроль, установку и монтаж БРЭО, отработку на борту, воздействие обслуживающего персонала и пр.);

2. Функционирования на борту (рулежка, взлет-посадка, полет-маневрирование);

3. Сохраняемость (буксировка, хранение во время стоянки на борту ВС, проведение регламентных работ по техническому обслуживанию).

Тогда коэффициент ускорения (3) при МФЭЦИ с учетом вероятности  $P_j$  на каждом  $j$ -этапе жизненного цикла примет следующий вид:

$$\Phi_{\text{МФЭЦИ}} = \frac{1}{N_{\Phi}} \sum_{i=1}^{N_{\Phi}} P_j \cdot q_i \cdot \Phi_i \cdot \Pi_k \Phi_k \quad (5)$$

Расчет коэффициента ускорения МФЭЦИ (4) основывается на применении принципов усечения спектра воздействующих факторов (температура и широкополосная случайная вибрация), увеличение частоты рабочих циклов, экстраполяции по времени (фундаментальные модели физики отказов) и нагрузке (превышение уровней воздействующих факторов, заданных в технических требованиях к БРЭО) [16]. Применение расчетной модели коэффициента ускорения может существенно сократить продолжительность МФЭЦИ с сохранением основных положений об автоматизации испытаний (принципы Седякина и «наследственности» Карташова, условия Игнатова [17]).

Коэффициенты ускорения МФЭЦИ на каждом этапе [8]:

делённые в ходе процедур *HALT*;  $G_{\text{трансп}}$  – номинальное (заданное) значение ШСВ при транспортировании;  $V_{\Delta T_{\text{HALT}}}$  – скорость изменения температуры во время МФЭЦИ, определенные в ходе процедур *HALT*;  $\Delta T_{\text{хц}}$  – диапазон изменения температуры в течении суток;  $V_{\Delta T_{\text{колебаний}}^{\text{и}}}$  – скорость изменения температуры в течении суток;  $\Delta T_{\text{хц}}$  – диапазон изменения температуры в течении; года;  $V_{\Delta T_{\text{колебаний}}^{\text{и}}}$  – скорость изменения темпе-

ратуры в течении года;  $G_{xx}^3, G_{yy}^3, G_{zz}^3$  - номинальное (заданное) значение ПСВ при режиме сохранения;  $T_{Max(+)}^{Pab}, T_{Max(-)}^{Pab}$  - номинальные значения заданной максимальной и минимальной температур;  $k_x$  - показатель наклона линии долговечности в режиме транспортирования (сохраняемости);  $\Delta T_{колебанийM}$  - диапазон изменения колебаний температуры в отсеке ВС в течении календарного месяца;  $V_{\Delta T_{колебанийM}}$  - скорость изменения колебаний температуры в отсеке ВС в течении календарного месяца;  $k_{fl}$  - показатель наклона линии долговечности в режиме полета;  $G_{xx}^p, G_{yy}^p, G_{zz}^p$  - номинальное (заданное, либо полученное из профиля полета ВС) значение ПСВ в режиме функционирования на борту;  $T_{Исп}^+, T_{Исп}^-$  - расчетное значение уровней температуры при МФЭЦИ.

Коэффициент ускорения МФЭЦИ представляет

собой сумму коэффициентов ускорения всех этапов испытаний:

$$\Phi_{МФЭЦИ} = \Phi_{трансп} + \Phi_{функц} + \Phi_{сохр} \quad (9)$$

При проведении МФЭЦИ в расчетных соотношениях рекомендуется использование статистической информации как из открытых источниках, так и по данным эксплуатации аналогичных БРЭО на гражданских воздушных судах.

Например, по данным сайта [planecrashinfo.com](http://planecrashinfo.com) [18] около 23% авиационных катастроф связаны с отказом оборудования. По статистике, проведенной компанией *Boeing* в части распределения отказов в ходе расследования авиационных происшествий за последние 60 лет (рис. 1) наиболее сложными являются взлет и посадка воздушного судна, 13% и 48% соответственно.

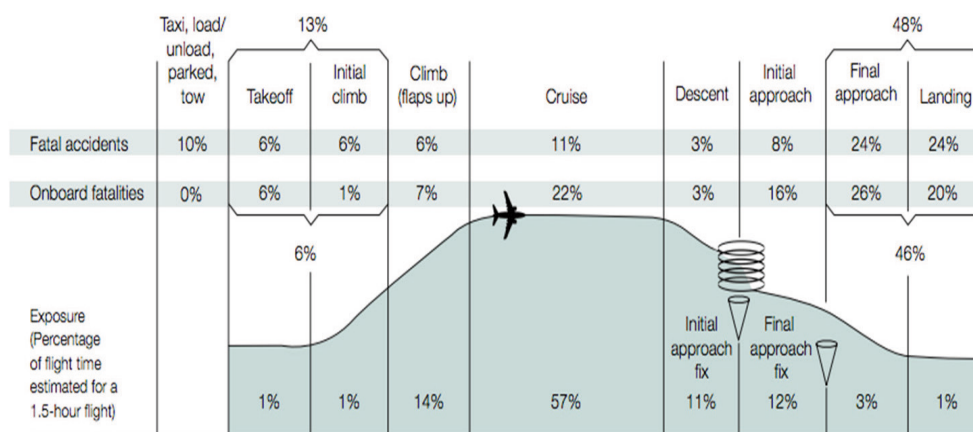


Рисунок 1 - Статистика компании Boeing по отказам на этапе функционирования БРЭО

По результатам анализа надежности БКД, проведенного в рамках конференций по качеству АО УКБП, распределение вероятностей отказа на каждом этапе указаны в таблице 3.

Таблица 3 - Вероятность отказа БКД на этапах жизненного цикла

Этап	Транспортирование	Функционирование	Сохраняемость
$P_j$	0,25	0,74	0,01

В таблице 4 приведены расчетные значения полученных коэффициентов ускорения МФЭЦИ для БКД при разных подходах, отраженных в выражениях (1), (2) и (4).

Таблица 4 - Расчетные значения коэффициентов ускорения при различных моделях МФЭЦИ

Коэффициент ускорения	Модель (1)	Модель (4)	Модель (5)
$\Phi_{функц}$	395,6	292,8	35,6
$\Phi_{сохр}$	10040,0	100,4	12,2
$\Phi_{трансп}$	180,1	45,0	5,5
$\Phi_{МФЭЦИ}$	10615,7	438,2	53,3

**Заключение.** В статье разработана методика проведения определения коэффициента ускорения многофакторных эквивалентно-циклических испытаний на основе процедур *HALT* для оценки долговечности и

безотказности БРЭО на основе модели МФЭЦИ.

При разработке модели использовались следующие принципы:

1. Физические модели расходования ресурса: Майнера, Коффина-Мэнсона и Аррениуса [12].
2. Условия Игнатов и принцип «наследственности» Карташова [19].
3. Вероятностный подход (вероятность отказа при воздействии внешних факторов и вероятности отказа при различных этапах жизненного цикла).
4. Усечения спектра воздействующих факторов, при которых наиболее явно наблюдается расходование ресурса (деградация) БРЭО [20].
5. Увеличение частоты рабочих циклов (интервалы между включением-выключением сокращены до минимальных значений и соответствуют определенным режимам испытаний).
6. Цензурирование испытаний: по заданной наработке и заданном количестве отказов.
7. Процесс деградации однороден, а его составляющие независимы между собой.

Отличительными особенностями представленной модели МФЭЦИ является: учет априорной и эксплуатационной информации при проведении испытаний, применение соотношений отказов, учитывающее их взаимное влияние на расходование ресурсных пока-

зателей, уровни форсирования воздействующих факторов.

В статье были получены оценки общего коэффициента ускорения при МФЭЦИ при трех основных этапах, используемых при МФЭЦИ: транспортирования, функционирования на борту и сохраняемости, что соответствует статистике компании Боинг.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

- 1) Gnadt, A.R. Technical and environmental assessment of all-electric 180-passenger commercial aircraft / A.R. Gnadt, R.L. Speth, J.S. Sabnis, S.R.H. Barrett // *Progress in Aerospace Sciences*. – 2019. No 105. – Pp.1–30. <https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2018.11.002>.
- 2) Trump Says Planes ‘Too Complex’ For Pilots, But Experts Say Technology Has Made Planes Safer. [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.wbur.org/bostonmix/2019/03/14/airplane-technology-trump-mit> (дата обращения 21.06.2020).
- 3) Джанджгава, Г.И. Моделирование комплексов БРЭО боевых летательных аппаратов / Г.И. Джанджгава, М.И. Орехов, А.В. Бабиченко // *Труды ГОСНИИАС. Серия: Вопросы авионики*. – 2019. – № 2(42). – С. 14-27.
- 4) Поляков, В.Б. Архитектура перспективных комплексов управления бортовым оборудованием / В.Б. Поляков, Е.С. Неретин, А.С. Иванов, А.С. Будков, С.А. Дяченко, С.О. Дудкин // *Труды МАИ*. – 2018. – № 100. – С.27.
- 5) Geoff, A. W. Do modern tools utilized in the design and development of modern aircraft counteract the impact of lost intellectual capital within the aerospace industry / A. W. Geoff // *Master of Science. Engineering and Management*. – Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts, United States. – 2001. – 83 p.
- 6) Клягин, В.А. Методика решения задачи автоматизированной компоновки блоков БРЭО последовательными приближениями на основе дискретной модели их размещения на базовых плоскостях отсеков / В.А. Клягин, И.А. Петров, С.А. Серебрянский, Д.А. Лаушин // *Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника*. – 2018. – №54. – С. 78-89.
- 7) Klyatis, Lev M. Accelerated reliability and durability testing technology / Lev M. Klyatis. p. cm. – (Wiley series in systems engineering and management) / A. John Wiley & Sons, INC., Publication. – 7 December 2011. – 407 p.
- 8) Комиссаров, А.В. Разработка методики многофакторных эквивалентно-циклических испытаний на основе процедур HALT для оценки долговечности БРЭО / Комиссаров А.В., В.А. Коженков, С.А. Зайцев, Д.С. Захаров, В.В. Шишкин // *Автоматизация в промышленности*. – 2019. – № 5. – С. 56-61.
- 9) Комиссаров, А.В. Основные методы оценки надежности бортового радиоэлектронного оборудования современных гражданских судов перед этапом серийного производства / А.В. Комиссаров, В.В. Шишкин, С.А. Зайцев, В.А. Коженков, Д.С. Захаров // *Известия Самарского научного центра РАН*. – Т. 20. – 2018. – №4(3). – С. 319 - 326.
- 10) Комиссаров, А.В. Методика управления качеством бортового оборудования изделий авиационной и наземной техники / А.В. Комиссаров, А.Б. Виноградов // *Известия Самарского научного центра РАН*. – Т. 18. – 2016. – №4(3). – С. 571-577.
- 11) Комиссаров, А.В. Проблематика методов определения показателей надежности бортового радиоэлектронного оборудования авиационной техники / А.В. Комиссаров, А.Б. Виноградов // *Известия Самарского научного центра РАН*. – 2017. – Т. 19. – №1(2). – С. 346-351.
- 12) W. W. D. van Driel, X. J. Fan (Ed). Solid State Lighting Reliability. Components to Systems. Solid State Lighting Technology and Application Series / van Driel W. W. D., Fan X. J. Springer. 2013th edition (September 6, 2012). – 628 p.
- 13) IEC 62506. Methods for product accelerated testing. Edition 1.0 2013-06. – 188 p.
- 14) Майоров, А.В. Планирование и проведение ускоренных испытаний на надежность устройств электронной автоматики / А.В. Майоров, Н.П. Потюков. – М.: Радио и связь. – 1982. – 144 с.
- 15) Kirk, A. G. Next Generation HALT and HASS / A.G. Kirk, J.J Paschkewitz. – UK: John Wiley & Sons, Ltd. – 2016. – 276 p.
- 16) Гиясов, Б.И. Стендовые ускоренные испытания технических систем на надежность / Б.И. Гиясов, Н.Г. Серёгин, Д.Н. Серёгин, В.А. Беляков. – М: АСВ. – 2017. – 74 с.
- 17) Vera, de Paula. Review of Practices to Integrate Aircraft Mass Properties Management and Development Processes / de Paula Vera, Rosa Maiara, Rozenfeld Henrique // *Aerosp. Technol. Manag.* – São José dos Campos. – 2020. – Vol. 12. – e3720.
- 18) Planecrashinfo.com, 2020. [Электронный ресурс] URL: <http://www.planecrashinfo.com/cause.htm> (дата обращения 17.05.2020).
- 19) Грибов, В.М. Оценивание и прогнозирование надежности бортового аэрокосмического оборудования / В.М. Грибов, Ю.Н. Кофанов, В.П. Стрельников. М.: НИУ ВШЭ. – 2013. – 495 с.
- 20) Kraft, E.M. Integrating Computational Science and Engineering with Testing to Re-engineer the Aeronautical Development Process. – Paper presented at: 48th AIAA Aerosp. – Sci – Meet. – Orlando, FL, USA. – 2010. <https://doi.org/10.2514/6.2010-139>

*Статья поступила в редакцию 10.11.2020*

*Статья принята к публикации 11.12.2020*