

# Ускоренные испытания на сохраняемость электронной компонентной базы

А. Кулибаба<sup>1</sup>, А. Савин, к. т. н.<sup>2</sup>, О. Юшин<sup>3</sup>

УДК 621.3.019.34 | ВАК 05.11.01

Исследуется проблема отсутствия справочных данных для расчета коэффициента ускорения испытаний на сохраняемость электронной компонентной базы. Предлагается методика определения параметров физико-математической модели. Согласно данной методике выборки изделий испытываются в разных режимах, затем путем анализа деградации параметров-критериев годности оценивается срок сохраняемости в каждом режиме. Далее численным методом определяются оптимальные параметры для вычисления коэффициента ускорения.

**Т**ребования к показателям сохраняемости изделий электронной компонентной базы (ЭКБ), используемых в аппаратуре ракетно-космической техники, постоянно растут. Для подтверждения этих требований проводят ускоренные испытания на сохраняемость, которые за счет форсирования режима испытаний обладают значительно меньшей длительностью по сравнению с неускоренными (нормальными) испытаниями. При этом длительность испытаний рассчитывается согласно следующей формуле:

$$t_{\text{уск. исп.}} = K_{\text{уск.}} \left( T_{\text{уск.}}, RH_{\text{уск.}}, T_{\text{хр.}}, RH_{\text{хр.}}, p_0, p_1, \dots, p_n \right) \cdot t_{\text{исп.}},$$

где  $t_{\text{уск. исп.}}$  – длительность ускоренных испытаний при температуре  $T_{\text{уск.}}$  и относительной влажности  $RH_{\text{уск.}}$ ;  $t_{\text{исп.}}$  – длительность неускоренных (нормальных) испытаний при температуре  $T_{\text{хр.}}$  и относительной влажности  $RH_{\text{хр.}}$ ;  $K_{\text{уск.}}(\dots)$  – коэффициент ускорения;  $p_0, p_1, \dots, p_n$  – параметры физико-математической модели (например, энергия активации  $E_a$  для модели Аррениуса [1]).

Из-за многообразия приведенных в литературе физико-математических моделей, на основе которых рассчитывается коэффициент ускорения [1, 2], и отсутствия справочных данных для них возникают трудности при проведении испытаний.

Решение проблемы многообразия физико-математических моделей приведено в статье [3]. В ней предлагается использовать методику сравнения физико-математических моделей с известными справочными данными (параметрами  $p_0, p_1, \dots, p_n$ ) для определения наиболее подходящей модели. Однако в ряде случаев, например, для вновь созданных или плохо изученных изделий, справочные данные для модели могут отсутствовать.

В данной статье предлагается методика определения параметров физико-математической модели и приводятся результаты ее апробации.

Для определения параметров физико-математической модели общая выборка изделий ЭКБ разделяется на  $M$  равных выборок и испытывается по методике ускоренных испытаний на сохраняемость на основе прогнозирования деградации параметров-критериев годности (ПКГ) изделий по временной зависимости (на основе анализа возникновения постепенных отказов) [4]. Далее изложены основные положения данной методики.

## МЕТОДИКА УСКОРЕННЫХ ИСПЫТАНИЙ НА СОХРАНЯЕМОСТЬ

Перед проведением испытаний проводится сериализация (присвоение индивидуальных номеров) изделий и контроль их ПКГ. Затем изделия испытывают на комбинированное воздействие повышенной температуры среды и повышенной влажности воздуха. В процессе испытаний для всех изделий проводятся многократные измерения ПКГ в определенные моменты времени (временные сечения). Количество временных сечений должно быть не менее 3 шт.

После испытаний на комбинированное воздействие повышенной температуры среды при хранении

<sup>1</sup> АО «Российские космические системы», начальник отдела, ncseo@spacecorp.ru.

<sup>2</sup> АО «Российские космические системы», ведущий инженер-исследователь, ncseo@spacecorp.ru.

<sup>3</sup> АО «Российские космические системы», инженер-исследователь, ncseo@spacecorp.ru.

и повышенной влажности воздуха проводится статистическая обработка данных, включающая в себя:

- исключение аномальных выбросов в результатах измерений согласно критерию Граббса [5];
- определение параметров линии регрессии для средних значений ПКГ по методу наименьших квадратов [6];
- определение наличия деградации ПКГ путем статистического сравнения найденной линии регрессии со средним значением ПКГ по всем временным сечениям по критерию Фишера [7];
- проверка линейности деградации ПКГ путем сравнения дисперсий [8];
- расчет доверительной зоны для линии регрессии с заданной доверительной вероятностью [9];
- оценка гамма-процентного срока сохраняемости в условиях проведения испытаний с учетом стандартного отклонения по выборке с заданной вероятностью  $\gamma$ .

В конце испытаний на сохраняемость проводятся кратковременные испытания на безотказность

и заключительную проверку изделий. При положительных результатах расчетов, кратковременных испытаний на безотказность и заключительной проверке гамма-процентный срок сохраняемости в условиях проведения испытаний считается подтвержденным. Порядок проведения ускоренных испытаний приведен на рис. 1.

### МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

Согласно изложенной методике ускоренных испытаний на сохраняемость испытываются  $M$  равных выборок в разных режимах. В результате испытаний для каждой выборки  $m$  рассчитывается оценка гамма-процентного срока сохраняемости в условиях проведения испытаний  $T_{уск. \text{cy } m}$ . Тогда гамма-процентный срок сохраняемости в нормальных климатических условиях  $T_{\text{cy } m}$  для выборки  $m$  равен:

$$T_{\text{cy } m} = K_{\text{уск. } m} \left( T_{\text{уск. } m}, RH_{\text{уск. } m}, T_{\text{хр.}}, RX_{\text{хр.}}, p_0, p_1, \dots, p_n \right) \cdot T_{\text{уск. } m}$$

где  $K_{\text{уск. } m}(\dots)$  – коэффициент ускорения для режима  $m$ ;  $T_{\text{уск. } m}$  – температура при проведении испытаний выборки  $m$ ;

$RH_{\text{уск. } m}$  – относительная влажность при проведении испытаний выборки  $m$ .

Далее необходимо найти значения параметров модели  $p_0, p_1, \dots, p_n$ , при которых будет минимальным разброс значений  $T_{\text{cy } m}$  относительно среднего значения  $T_{\text{cy ср.}}$ , равного:

$$T_{\text{cy ср.}} = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M K_{\text{уск. } m} \cdot T_{\text{уск. } m}$$

Таким образом, оптимальными параметрами  $p_0, p_1, \dots, p_n$  являются параметры, для которых будет минимально стандартное отклонение  $S_T$ , равное:

$$S_T = \sqrt{\frac{1}{M \cdot (M-1)} \sum_{m=1}^M (T_{\text{cy ср.}} - T_{\text{cy } m})^2}$$



Рис. 1. Порядок проведения ускоренных испытаний на сохраняемость

ООО СМП

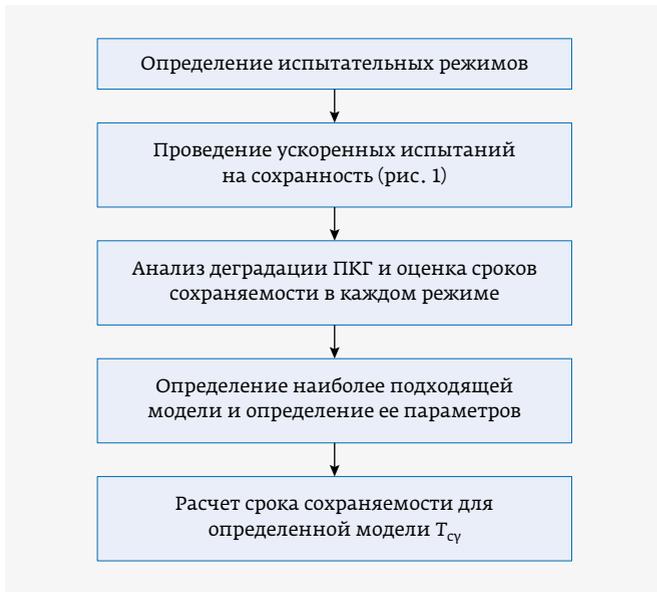
ИНТЕРНЕТ-МАГАЗИН  
**www.SMD.ru**

**электронные компоненты для поверхностного монтажа**

**НОВОЕ В ПРОГРАММЕ ПОСТАВОК**

- Разборные металлические EMI SMD экраны
- Кварцевые генераторы 0532 на частоты до 125 МГц

Москва, Ленинградский пр., 80 к. 32, e-mail: sale@smd.ru  
 Тел.: (499) 158-7396, (495) 940-6244, (499) 943-8780



**Рис. 2.** Порядок определения параметров модели и расчета срока сохраняемости

Тогда для определения параметров модели необходимо решить задачу параметрической оптимизации при условии минимума стандартного отклонения  $S_T$ :

$$S_T = \sqrt{\frac{1}{M \cdot (M-1)} \sum_{m=1}^M \left( \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M K_{уск. м} \cdot T_{уск. сy м} - K_{уск. м} \cdot T_{уск. сy м} \right)^2}$$

Задача оптимизации решается численным методом Нелдера-Мида [10]. Суть метода заключается в формировании симплекса и последующего его деформирования в направлении минимума.

После определения оптимальных параметров вычисляется оценка срока сохраняемости  $T_{cy}$ , при этом для расчета коэффициента ускорения  $K_{уск. м}$  используются ранее определенные параметры:

$$T_{cy} = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M K_{уск. м} \cdot T_{уск. сy м}$$

Последовательность действий для определения параметров модели и расчета срока сохраняемости приведена на рис. 2.

### УСКОРЕННЫЕ ИСПЫТАНИЯ НА СОХРАНЯЕМОСТЬ ПАССИВНОЙ ЭКБ

Согласно изложенной методике ускоренных испытаний на сохраняемость были проведены ускоренные испытания на сохраняемость чип-резисторов. Для имитации хранения в составе аппаратуры резисторы были смонтированы на печатную плату. В процессе испытаний было установлено, что срок хранения зависит только от температуры

**Таблица 1.** Режимы испытаний чип-резисторов

Параметр режима испытаний	Характеристики режима для выборки, №					
	1	2	3	4	5	6
Температура среды, $T_{исп.}, ^\circ C$	25	85	125	85	25	25
Относительная влажность воздуха, $RH_{исп.}, \%$	$\leq 2$	$\leq 2$	$\leq 2$	85	85	98

окружающей среды и не зависит от относительной влажности. При этом зависимость срока хранения от температуры описывается моделью Аррениуса [11], согласно которой коэффициент ускорения испытаний равен:

$$K_{уск.} = \exp \left[ \frac{E_a}{k_b} \left( \frac{1}{T_{HKY}} - \frac{1}{T_{исп.}} \right) \right]$$

где  $E_a$  – энергия активации, эВ;

$k_b = 8,617 \cdot 10^{-5}$  – постоянная Больцмана, эВ/К;

$T_{HKY}$  – значение температуры при хранении в нормальных климатических условиях, К;

$T_{исп.}$  – значение температуры при ускоренных испытаниях, К.

Для определения параметров модели и проверки гипотезы об отсутствии зависимости срока сохраняемости от относительной влажности были проведены испытания на комбинированное воздействие повышенной температуры и влажности среды в шести испытательных режимах на выборке 60 шт. резисторов для каждого режима. Режимы испытаний на комбинированное воздействие повышенной температуры и влажности приведены в табл. 1.

**Таблица 2.** Оценки срока сохраняемости чип-резисторов в условиях испытаний

Номер режима	Оценка срока сохраняемости в условиях испытаний при $P_{дов.} = 90\%$ и $\gamma = 95\%$		График зависимости ПКГ от времени
	$T_{уск. сy}, ч$	$T_{уск. сy}, лет$	
1	Нет деградации ПКГ		–
2	38358,40	4,38	Рис. 3
3	21074,91	2,41	Рис. 4
4	40442,80	4,62	Рис. 5
5	Нет деградации ПКГ		–
6	Нет деградации ПКГ		–

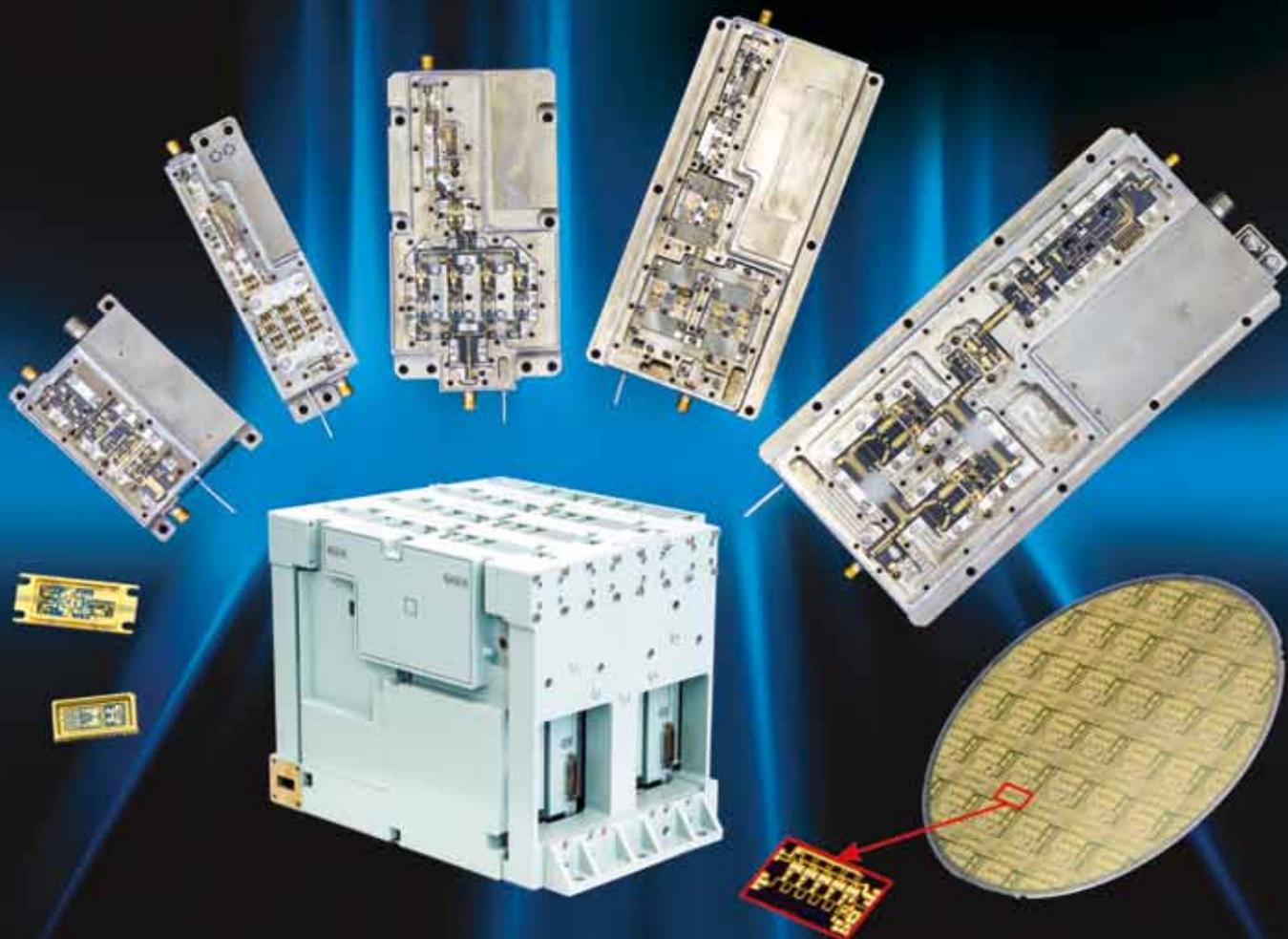


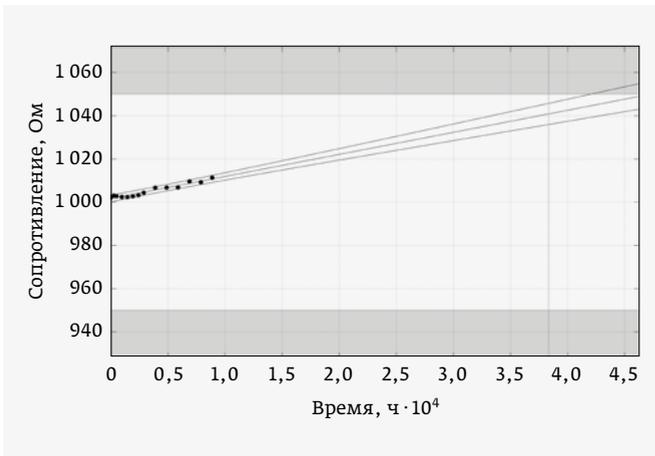
## ИНТЕЛЛЕКТ. КАЧЕСТВО.

АО «МИКРОВОЛНОВЫЕ СИСТЕМЫ»  
Москва, Щелковское шоссе, д.5, стр.1  
Тел. (499) 644-21-03, (499) 644-25-62  
(многоканальный)  
Факс +7(499) 644-19-70  
E-mail: [mwsystems@mwsystems.ru](mailto:mwsystems@mwsystems.ru)  
[www.mwsystems.ru](http://www.mwsystems.ru)

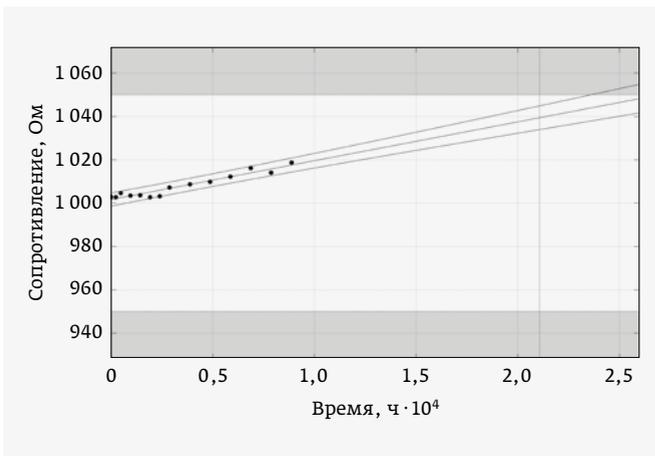
- СОВРЕМЕННОЕ ПРОИЗВОДСТВО И ТЕХНОЛОГИИ
- ОПТИМАЛЬНОЕ СООТНОШЕНИЕ ЦЕНА/КАЧЕСТВО
- ПОЛНЫЙ СПЕКТР УСЛУГ ПО ПРОЕКТИРОВАНИЮ И ПРОИЗВОДСТВУ МОНОЛИТНЫХ И ГИБРИДНЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ, ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ МОДУЛЕЙ, МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СВЧ-УСТРОЙСТВ И БЛОКОВ РЭА (0,3 - 22 ГГц)

## АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО «МИКРОВОЛНОВЫЕ СИСТЕМЫ»

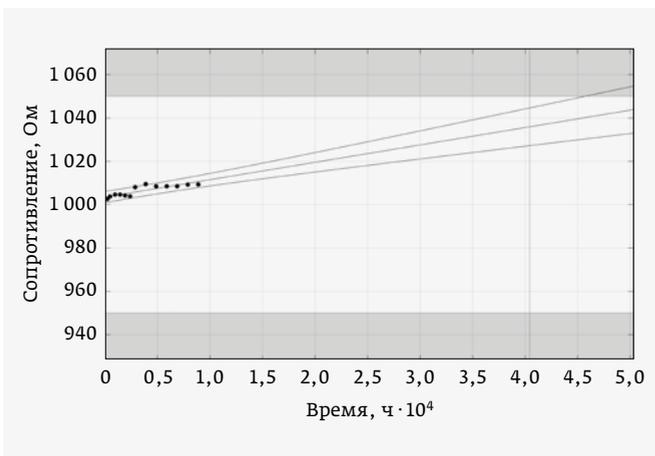




**Рис. 3.** Деградация ПКГ в режиме № 2 ( $RH_{исп.} \leq 2\%$ ;  $T_{исп.} = 85^\circ C$ )



**Рис. 4.** Деградация ПКГ в режиме № 3 ( $RH_{исп.} \leq 2\%$ ;  $T_{исп.} = 125^\circ C$ )



**Рис. 5.** Деградация ПКГ в режиме № 4 ( $RH_{исп.} = 85\%$ ;  $T_{исп.} = 85^\circ C$ )

Таким образом, контрольная выборка № 1 хранится при нормальной температуре, выборки № 2, 3 испытываются в режимах с одинаковой влажностью ( $RH_{исп.} \leq 2\%$ ), выборки № 5, 6 испытываются в режимах с одинаковой температурой ( $T_{исп.} = 25^\circ C$ ). Выборка № 4 испытывается в режиме с повышенной влажностью и температурой.

Суммарная длительность испытаний для каждого режима составила 8880 ч, при этом проводился четырехкратный контроль ПКГ в 14 временных сечениях.

Результаты измерений были обработаны согласно изложенной методике ускоренных испытаний. Рассчитанные оценки сроков сохраняемости в условиях проведения испытаний для каждого режима приведены в табл. 2.

Графики зависимости ПКГ от времени приведены на рис. 3–5. В режимах с повышенной влажностью (№ 5, 6) и контрольном режиме (№ 1) деградация ПКГ не проявилась, следовательно, срок сохраняемости припаянных чип-резисторов не зависит от относительной влажности.

Для приведенных в табл. 2 сроков сохраняемости, согласно изложенной методике определения параметров, оптимальным является значение энергии активации  $E_a = 0,19$  эВ. Данный параметр найден численным методом Нелдера-Мида за 42 итерации при минимальной среднеквадратической ошибке  $S_T = 0,1694$  лет.

Для рассчитанной энергии активации оценка гамма-процентного срока сохраняемости в нормальных климатических условиях  $T_{cy}$  при  $P_{дов} = 90\%$  и  $\gamma = 95\%$  равна:

$$T_{cy} = \frac{1}{3}(3,4727 \cdot 4,38 + 6,4648 \cdot 2,41 + 3,4727 \cdot 4,62) = 15,61 \text{ лет.}$$

Полученные значения энергии активации близки к табличным значениям 0,2 эВ, приведенным в справочнике [11] для типового представителя.

\* \* \*

Используя предложенную методику определения параметров, можно найти оптимальные параметры используемой физико-математической модели ускорения испытаний, имитирующих хранение изделий ЭКБ, и тем самым увеличить точность оценки показателей сохраняемости. Также данная методика в сочетании с методикой сравнения физико-математических моделей может быть использована для выбора оптимальной модели, если дано исходное множество моделей.

Согласно описанной методике были проведены ускоренные испытания смонтированных чип-резисторов. В результате установлено, что срок сохраняемости припаянных чип-резисторов не зависит от относительной влажности, а зависимость от температуры описывается уравнением Аррениуса с энергией активации, равной 0,19 эВ.

# Высокая производительность, решение большого круга задач, ТОЧНЫЙ ВЫБОР

Познакомьтесь с новым осциллографом R&S серии RTP (4, 6, 8, 13, 16 ГГц)

- Учет и компенсация цепи измерительного тракта в реальном масштабе времени
- Несколько инструментов в одном приборе
- Компактный размер и бесшумная работа

Осциллограф R&S RTP  
Новый стандарт высокоточных измерений



Хотите узнать подробности?  
[www.rohde-schwarz.com/ru/rtp](http://www.rohde-schwarz.com/ru/rtp)



**ROHDE & SCHWARZ**  
Make ideas real



## ЛИТЕРАТУРА

1. JEDEC. JEP122H. Failure Mechanisms and Models for Semiconductor Devices, 2016. 104 p.
2. **Ишков А. С., Зуев В. Д.** Методы статистического моделирования показателей надежности базовых элементов радиоэлектронных систем // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2014. № 4 (10). С. 35–38.
3. **Кулибаба А. Я., Штукарев А. Ю., Юшин О. В.** Исследование физико-математической модели ускорения испытаний на сохраняемость электронной компонентной базы // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. 2021. Т. 8. Вып. 1. С. 95–103.
4. **Кулибаба А. Я., Суконкин М. К., Штукарев А. Ю., Юшин О. В.** Методика оценки сохраняемости электронной компонентной базы на основе анализа деградации ее параметров // Материалы XXIII Международной научно-практической конференции, посвященной памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика М. Ф. Решетнева. Красноярск: ФГБОУ ВО «СибГУ им. М. Ф. Решетнева», 2019. С. 355–357.
5. ГОСТ Р ИСО 5725-2-2002. Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. Ч. 2. Основной метод определения повторяемости и воспроизводимости стандартного метода измерений.
6. **Горяинов В. Б., Павлов И. В., Цветкова Г. М. и др.** Математическая статистика: Учебник для вузов / Под ред. В. С. Зарубина, А. П. Крищенко; 3-е изд., исправл. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2008. 424 с.
7. ГОСТ Р 50779.10-2000. Статистические методы. Вероятность и основы статистики. Термины и определения.
8. ГОСТ Р 51372-99. Методы ускоренных испытаний на долговечность и сохраняемость при воздействии агрессивных и других специальных сред для технических изделий, материалов и систем материалов.
9. **Львовский Е. Н.** Статистические методы построения эмпирических формул: Учеб. пособие для вузов / 2-е изд., перераб. и доп. М.: Высш. шк., 1988. 239 с.
10. **Gao F., Han L.** Implementing the Nelder-Mead simplex algorithm with adaptive parameters. 2012. Computational Optimization and Applications. 51:1. P. 259–277.
11. RIAC-HDBK-217Plus «Handbook of 217Plus™ Reliability Prediction Models», 2015. 186 p.

**interlight**  
RUSSIA

**intelligent building**  
RUSSIA

16+

Международная выставка освещения,  
автоматизации зданий, электротехники  
и систем безопасности

**13–16.09.2021**

ЦВК «Экспоцентр», Москва

interlight-building.ru

 messe frankfurt

Бесплатный билет  
по промокоду:

**IL21-790GM**

