

## Исследование физико-математической модели ускорения испытаний на сохраняемость электронной компонентной базы

**А. Я. Кулибаба**, *ncseo@spacecorp.ru*

*АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация*

**А. Ю. Штукарев**, *ncseo@spacecorp.ru*

*АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация*

**О. В. Юшин**, *ncseo@spacecorp.ru*

*АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация*

**Аннотация.** В статье предлагается решение проблемы многообразия физико-математических моделей ускорения испытаний на сохраняемость электронной компонентной базы с использованием методики, основанной на анализе результатов ускоренных испытаний в разных режимах. Объект исследования — герконовые реле.

В статье приведены основные физико-математические модели, используемые для расчета коэффициента ускорения при имитации хранения, а также описана методика сравнения данных моделей. Согласно данной методике изделия испытываются в разных режимах, и по методике ускоренных испытаний на сохраняемость, основанной на прогнозировании деградации параметров по временной зависимости, оценивается срок хранения. Затем для каждой модели рассчитывается оценка срока хранения в нормальных климатических условиях и стандартное отклонение, модель с наименьшим стандартным отклонением считается наиболее подходящей для испытываемого типа изделий.

При помощи данной методики были исследованы физико-математические модели ускорения механизмов отказов герконовых реле при хранении, наиболее подходящей является обратно-экспоненциальная модель.

**Ключевые слова:** сохраняемость, радиоэлектронная аппаратура, электронная компонентная база, ускоренные испытания на сохраняемость

## The Study of a Physico-Mathematical Model of the Acceleration of Storage Life Tests of Electrical and Electronic Equipment

**A. Ya. Kulibaba**, *ncseo@spacecorp.ru*

*Joint Stock Company “Russian Space Systems”, Moscow, Russian Federation*

**A. Yu. Shtukarev**, *ncseo@spacecorp.ru*

*Joint Stock Company “Russian Space Systems”, Moscow, Russian Federation*

**O. V. Yushin**, *ncseo@spacecorp.ru*

*Joint Stock Company “Russian Space Systems”, Moscow, Russian Federation*

**Abstract.** The article proposes a solution to the problem of the variety of physico-mathematical models of EEE-storage life test acceleration by implementing a method based on the analysis of the results of accelerated tests in different modes. The objects of the study are reed relays.

The article presents the main physico-mathematical models used for calculating the acceleration factor when simulating storage, as well as sets forth a description of a method for comparing these models. According to this method, the product is tested in various modes and, in accordance with the procedure for accelerated storage life testing based on the prediction of parameter time-dependent degradation, the storage period is estimated. Then, for each model, the storage period estimate is obtained for normal climatic conditions together with the standard deviation. The model with the least standard deviation is considered to be the most suitable for the tested type of product.

The physico-mathematical models of the acceleration of reed relay failure mechanisms during storage were studied with the help of this technique; the most suitable is the reverse exponential model.

**Keywords:** storage life, radio electronic equipment, electrical and electronic equipment, accelerated storage life tests

## Введение

Сегодня имеется тенденция увеличения сроков службы аппаратуры ракетно-космической техники, которые могут превышать 25 лет. Как следствие, растут требования к сроку сохраняемости используемых изделий электронной компонентной базы (ЭКБ). Для подтверждения таких сроков необходимо проводить многолетние испытания на сохраняемость, длительность которых может достигать недопустимо больших с практической точки зрения значений.

Для решения проблемы большой длительности испытаний предлагается использовать методику ускоренных испытаний на сохраняемость на основе прогнозирования деградации параметров критериев годности (ПКГ) по временной зависимости, которая позволяет значительно уменьшить длительность за счет использования форсирования режима испытаний и прогнозирования. При этом длительность испытаний уменьшается пропорционально коэффициенту ускорения, который рассчитывается на основе физико-математической модели отказов ЭКБ. Однако из-за многообразия приведенных в литературе моделей и зачастую отсутствия справочных данных для них возникают трудности при расчете коэффициентов ускорения.

В данной статье описаны основные физико-математические модели ускорения испытаний на сохраняемость ЭКБ и предлагается методика их сравнения для определения наиболее подходящей модели.

## 1. Физико-математические модели ускорения испытаний на сохраняемость ЭКБ

Испытание на сохраняемость ЭКБ включает в себя имитацию хранения и кратковременные испытания на безотказность, при этом имитация хранения подтверждает срок хранения  $T_{хр}$ . Коэффициенты ускорения для этапа имитации хранения и для испытаний на безотказность в общем случае рассчитываются по разным моделям, так как для них действуют различные совокупности механизмов отказов. В данной статье рассмотрим основные

общепринятые модели, используемые для расчета коэффициента ускорения при имитации хранения.

В основе большинства моделей лежит гипотеза об уменьшении срока хранения при воздействии повышенной температуры и влажности [1]. Зависимость срока хранения от температуры описывается уравнением Аррениуса (модель обратной экспоненциальной зависимости от температуры [2–5]). Согласно данной модели коэффициент ускорения испытаний равен:

$$K_{\text{уск}} = e^{\frac{E_a}{k_0} \left( \frac{1}{T_{\text{нку}}} - \frac{1}{T_{\text{исп}}} \right)}, \quad (1)$$

где  $E_a$  — энергия активации, эВ;

$k_0 = 8,617 \cdot 10^{-5}$  — постоянная Больцмана, эВ/К;

$T_{\text{нку}}$  — значение температуры при хранении в нормальных климатических условиях, К;

$T_{\text{исп}}$  — значение температуры при ускоренных испытаниях, К.

Уравнение Аррениуса (1) входит в состав большинства физико-математических моделей ускорения испытаний, основные из которых представлены ниже.

1. Модель степенной зависимости от влажности (модель Пэка, power-law humidity model [3,6]), согласно которой коэффициент ускорения испытаний равен:

$$K_{\text{уск}} = e^{\frac{E_a}{k_0} \left( \frac{1}{T_{\text{нку}}} - \frac{1}{T_{\text{исп}}} \right)} \cdot \left( \frac{RH_{\text{исп}}}{RH_{\text{нку}}} \right)^{n_p}, \quad (2)$$

где  $n_p$  — коэффициент влияния влажности для модели Пэка;

$RH_{\text{нку}}$  — значение относительной влажности при хранении в нормальных климатических условиях, %;

$RH_{\text{исп}}$  — значение относительной влажности при ускоренных испытаниях, %.

2. Модель обратной экспоненциальной зависимости от влажности (reciprocal exponential humidity model, модель РЕНМ [7]), согласно которой коэффициент ускорения испытаний равен:

$$K_{\text{уск}} = e^{\frac{E_a}{k_0} \left( \frac{1}{T_{\text{нку}}} - \frac{1}{T_{\text{исп}}} \right) + C_{\text{РЕНМ}} \left( \frac{1}{RH_{\text{нку}}} - \frac{1}{RH_{\text{исп}}} \right)}, \quad (3)$$

где  $C_{\text{РЕНМ}}$  — коэффициент влияния влажности для модели РЕНМ, %.

3. Модель экспоненциальной зависимости от влажности (exponential humidity model, модель ЕНМ [8]), согласно которой коэффициент ускорения испытаний равен:

$$K_{\text{уск}} = e^{\frac{E_a}{k_6} \left( \frac{1}{T_{\text{нкы}}} - \frac{1}{T_{\text{исп}}} \right) + C_{\text{ЕНМ}} (RH_{\text{исп}} - RH_{\text{нкы}})}, \quad (4)$$

где  $C_{\text{ЕНМ}}$  — коэффициент влияния влажности для модели ЕНМ,  $(\%)^{-1}$ .

4. Модифицированная модель экспоненциальной зависимости от влажности (модель Лоусона [9]), согласно которой коэффициент ускорения испытаний равен:

$$K_{\text{уск}} = e^{\frac{E_a}{k_6} \left( \frac{1}{T_{\text{нкы}}} - \frac{1}{T_{\text{исп}}} \right) + C_{\text{Lawson}} (RH_{\text{исп}}^2 - RH_{\text{нкы}}^2)}, \quad (5)$$

где  $C_{\text{Lawson}}$  — коэффициент влияния влажности для модели Лоусона,  $(\%)^{-2}$ .

Таким образом, для одного и того же типа изделий могут использоваться разные модели, которые в одном и том же режиме могут давать разные коэффициенты ускорения по отношению к нормальным климатическим условиям. Отсюда возникает необходимость определения наиболее подходящей физико-математической модели для планирования испытаний.

## 2. Методика ускоренных испытаний на сохраняемость

Для оценки гамма-процентного срока сохраняемости изделий ЭКБ используется методика ускоренных испытаний на сохраняемость на основе прогнозирования деградации ПКГ изделий ЭКБ по временной зависимости (на основе анализа возникновения постепенных отказов) [10].

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  $L$  должно быть не менее

3 шт. В конце испытаний на сохраняемость проводят кратковременные испытания на безотказность и заключительную проверку изделий. Порядок проведения ускоренных испытаний приведен на рис. 1.



Рис. 1. Порядок проведения ускоренных испытаний на сохраняемость

После испытаний на комбинированное воздействие повышенной температуры среды при хранении и повышенной влажности воздуха проводится статистическая обработка данных, включающая:

- исключение аномальных выбросов в результатах измерений,
- определение параметров линии регрессии,
- определение наличия деградации ПКГ,
- проверку линейности деградации ПКГ,
- расчет доверительной зоны для линии регрессии.

Далее представлена последовательность действий при статистической обработке данных. В результате контроля ПКГ получается массив результатов измерений ПКГ  $X_{inl}$ , где  $i$  — текущий номер

измерения в серии многократных измерений ПКГ,  $n$  — текущий номер изделия,  $l$  — текущий номер этапа измерений ПКГ (временного сечения). Исходя из данного массива вычисляются массивы средних значений и стандартных отклонений ПКГ. Вначале они вычисляются по сериям многократных измерений:

$$\overline{X}_{nl} = \frac{1}{I} \sum_{i=1}^I X_{inl}, \quad S_{nl} = \sqrt{\frac{1}{I-1} \sum_{i=1}^I (X_{inl} - \overline{X}_{nl})^2}, \quad (6)$$

где  $\overline{X}_{nl}$  — среднее по серии измерений ПКГ изделия  $n$  во временном сечении  $l$ ;

$S_{nl}$  — стандартное отклонение по серии измерений ПКГ  $X_{inl}$  изделия  $n$  во временном сечении  $l$ ;

$I$  — количество измерений в серии многократных измерений ПКГ ( $I \geq 4$  шт.).

Далее из массива результатов измерений ПКГ  $X_{inl}$ , используя вычисленные значения  $\overline{X}_{nl}$  и  $S_{nl}$  по формуле (6), исключаются аномальные выбросы по критерию Граббса [11].

Затем вычисления производятся по выборке изделий:

$$\overline{X}_l = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \overline{X}_{nl}, \quad S_l = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{n=1}^N (\overline{X}_{nl} - \overline{X}_l)^2}, \quad (7)$$

где  $\overline{X}_l$  — среднее по выборке во временном сечении  $l$ ;

$S_l$  — стандартное отклонение по выборке среднего значения  $\overline{X}_{nl}$  во временном сечении  $l$ ;

$N$  — объем выборки.

Затем вычисления производятся по временным сечениям:

$$\overline{X} = \frac{1}{L} \sum_{l=1}^L \overline{X}_l, \quad S_X = \sqrt{\frac{1}{L-1} \sum_{l=1}^L (\overline{X}_l - \overline{X})^2}, \quad (8)$$

где  $\overline{X}$  — среднее по всем временным сечениям;

$S_X$  — стандартное отклонение по всем временным сечениям среднего значения  $\overline{X}_l$ .

Данная методика распространяется на изделия с ПКГ, деградирующими по линейному закону (проверка гипотезы о линейности приведена далее), поэтому математическое ожидание ПКГ в выборке деградирует по линейному закону  $X_{deg}(t)$  (пример функции  $X_{deg}(t)$  приведен на рис. 2):

$$X_{deg}(t) = \beta_0 + \beta_1 \cdot t, \quad (9)$$

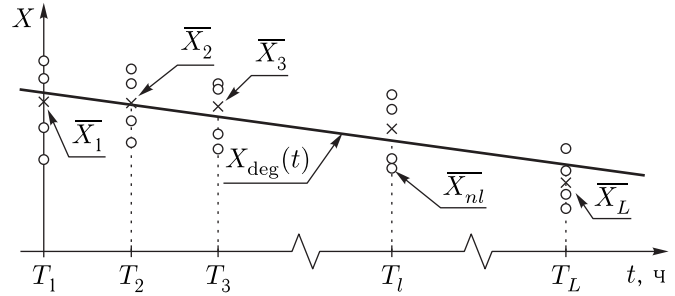


Рис. 2. Пример нахождения линии регрессии ПКГ

где  $\beta_0$  и  $\beta_1$  — коэффициенты, вычисляемые для средних значений ПКГ  $\overline{X}_l$ , формула (7), по методу наименьших квадратов [12].

Наличие деградации математического ожидания ПКГ определяется путем статистического сравнения найденной линии регрессии  $X_{deg}(t)$  со средним значением ПКГ по всем временным сечениям  $\overline{X}$ , формула (8), по критерию Фишера [13].

Затем, если деградация есть, проверяется гипотеза о линейности путем сравнения дисперсий согласно приложению Д ГОСТ Р 51372 [1].

Далее, если гипотеза о линейности подтвердилась, для полученной линии регрессии строится доверительная зона с доверительной вероятностью  $P_{доп}$  (%), которая задается в качестве исходных данных при планировании испытаний. Границы  $X_{min}(t)$  и  $X_{max}(t)$  доверительной зоны вычисляются по формуле [14]:

$$\left\{ \begin{aligned} X_{min}(t) &= \beta_0 + \beta_1 \cdot t - \\ &\quad - S_{res} \cdot t_{cr} \left( 1 - \frac{P_{доб}}{100}; L - 2 \right) \cdot \sqrt{v_*}, \\ X_{max}(t) &= \beta_0 + \beta_1 \cdot t + \\ &\quad + S_{res} \cdot t_{cr} \left( 1 - \frac{P_{доб}}{100}; L - 2 \right) \cdot \sqrt{v_*}, \\ S_{res} &= \sqrt{\frac{1}{L-2} \sum_{l=1}^L (\overline{X}_l - X_{deg}(t_l))^2}, \\ v_* &= \frac{L \cdot t^2 - 2 \cdot t \cdot \sum_{l=1}^L t_l + \sum_{l=1}^L (t_l)^2}{L \cdot \sum_{l=1}^L (t_l)^2 - \left( \sum_{l=1}^L t_l \right)^2}, \end{aligned} \right. \quad (10)$$

где  $t_{ct} \left( 1 - \frac{P_{\text{дов}}}{100}; L - 2 \right)$  — квантили распределения Стьюдента с уровнем значимости  $1 - \frac{P_{\text{дов}}}{100}$  и числом степеней свободы  $L - 2$ ;

$t_l$  — время  $l$ -го этапа измерения ПКГ, ч.

Пример доверительной зоны для линии регрессии  $X_{\text{deg}}(t)$  приведен на рис. 3.

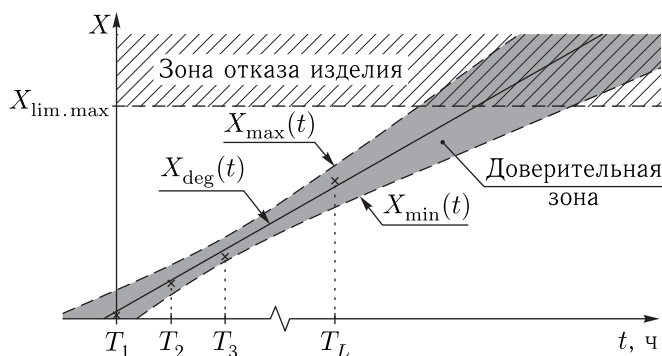


Рис. 3. Пример доверительной зоны для линии регрессии ПКГ

Оценка срока хранения изделия в условиях проведения испытаний  $T_{\text{хр.исп}}$  может быть получена при решении одного из следующих уравнений (графическая интерпретация решения одного из уравнений приведена на рис. 4):

$$X_{\text{min}}(t = T_{\text{хр.исп}}) = X_{\text{lim. min}} - z_{\gamma} \bar{S}, \quad (11)$$

если деградация ПКГ отрицательная;

$$X_{\text{max}}(t = T_{\text{хр.исп}}) = X_{\text{lim. max}} + z_{\gamma} \bar{S}, \quad (12)$$

если деградация ПКГ положительная,

где  $X_{\text{lim. min}}$ ,  $X_{\text{lim. max}}$  — минимальное и максимальное предельно допустимое значение ПКГ в соответствии с документацией на изделие;

$z_{\gamma}$  — значение квантиля нормального распределения (с математическим ожиданием, равным 0, и среднеквадратическим отклонением, равным 1);

$\bar{S}$  — среднее значение стандартного отклонения по выборке и по сериям измерений, равное:

$$\bar{S} = \frac{1}{L \cdot N} \sum_{l=1}^L \sum_{n=1}^N \sqrt{\frac{1}{I-1} \sum_{i=1}^I \left[ X_{inl} - \frac{1}{I} \sum_{i=1}^I X_{inl} \right]^2}. \quad (13)$$

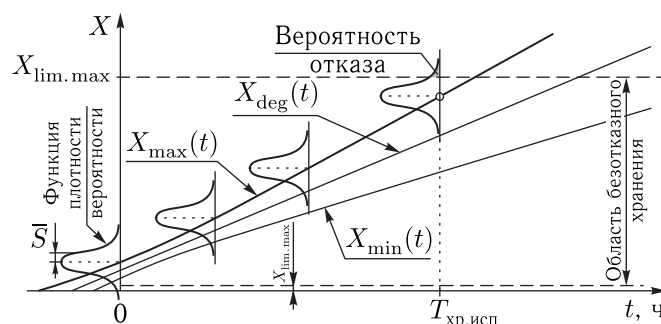


Рис. 4. Определение срока хранения при положительной деградации ПКГ

Значение оценки гамма-процентного срока хранения в нормальных климатических условиях  $T_{\text{хр}}$  вычисляется по формуле:

$$T_{\text{хр}} = K_{\text{уск}} \cdot T_{\text{хр.исп}}, \quad (14)$$

где коэффициент ускорения  $K_{\text{уск}}$  определяется по одной из формул (1)–(5) согласно выбранной физико-математической модели.

После оценки срока хранения проводятся кратковременные испытания на безотказность в соответствии с ГОСТ РВ 20.57.414 и заключительная проверка изделий.

При положительных результатах кратковременных испытаний на безотказность и заключительной проверки гамма-процентный срок сохранности считается подтвержденным.

### 3. Методика сравнения физико-математических моделей

Для сравнения физико-математических моделей общая выборка изделий ЭКБ разделяется на  $M$  равных частей и испытывается по методике ускоренных испытаний на сохраняемость, изложенной в разд. 2, в режимах с разной влажностью и температурой. Далее рассчитывается оценка срока хранения в условиях проведения испытаний для каждой выборки.

Для испытуемого типа изделия выбираются физико-математические модели из стандартов и справочной литературы. Затем по уравнению (14) для каждой модели рассчитывается оценка срока хранения в нормальных климатических условиях.



Для сравнения моделей рассчитываются среднее значение оценки срока хранения в нормальных климатических условиях  $\overline{T_{xp}}$  и стандартное отклонение  $S_T$  [15] для каждой из моделей:

$$\overline{T_{xp}} = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M T_{xp.m},$$

$$S_T = \sqrt{\frac{1}{M \cdot (M - 1)} \sum_{m=1}^M (\overline{T_{xp}} - T_{xp.m})^2}, \quad (15)$$

где  $M$  — количество режимов испытаний;

$m$  — номер режима испытаний;

$T_{xp.m}$  — оценка  $T_{xp}$  для выборки номер  $m$ .

Параметры моделей выбираются из стандартов и справочной литературы, при этом если указаны несколько значений параметров, то используются параметры, обеспечивающие минимальное значение стандартных отклонений.

Модель с наименьшим стандартным отклонением считается наиболее подходящей для испытуемого типа изделий (в пределах диапазонов температуры и относительной влажности, исследованным в рамках предварительного эксперимента), так как полученные для данной модели оценки  $T_{xp.m}$  меньше отклоняются от среднего значения оценки срока хранения в нормальных климатических условиях.

Учитывая чувствительность оценки срока хранения к разбросу ПКГ, целесообразно использовать общепринятые модели, а не аппроксимацию произвольной функцией, которая в конкретном случае может давать нулевое значение стандартного отклонения, однако при этом не будет обладать свойством воспроизводимости (т. е. такую модель не рекомендуется использовать при планировании испытаний аналогичных изделий).

#### 4. Эксперимент по сравнению физико-математических моделей

При помощи методики, изложенной в разд. 3, были исследованы физико-математические модели ускорения механизмов отказов герконовых реле при хранении.

Большинство отказов реле после хранения вызваны ростом сопротивления электрического кон-

такта, что впоследствии приводит к его полной потере [16]. Так, описанная в [16] деградация сопротивления обусловлена следующим. Высоконадежные реле имеют серебряные контакты, покрытые тонким слоем золота. Так как толщина покрытия очень мала, то в нем неизбежно остаются микротрещины, сквозь которые влага и коррозионные газы могут достигнуть серебра. В результате образуется сульфидная пленка с очень высоким сопротивлением, которая и ухудшает контакт. Скорость этого процесса зависит от температуры и влажности.

Для сравнения физико-математических моделей были проведены испытания на комбинированное воздействие повышенной температуры и влажности среды в пяти испытательных режимах на выборке 30 шт. герконовых реле для каждого режима. Режимы испытаний на комбинированное воздействие повышенной температуры и влажности приведены в табл. 1.

Таблица 1. Режимы испытаний герконовых реле

Параметр режима испытаний	Характеристики режима для выборки №				
	1	2	3	4	5
Температура среды, $T_{исп}$ , °C	85	125	85	25	25
Относительная влажность воздуха, $RH_{исп}$ , %	≤ 2	≤ 2	85	85	98

Таким образом, выборки № 1, 2 испытываются в режимах с одинаковой влажностью ( $RH_{исп} \leq 2\%$ ), выборки № 4, 5 испытываются в режимах с одинаковой температурой ( $T_{исп} = 25$  °C). Выборка № 3 испытывается в режиме с повышенными влажностью и температурой.

Суммарная длительность испытаний для каждого режима составила 5400 ч, при этом проводился четырехкратный контроль ПКГ ( $I = 4$ ) в десяти временных сечениях ( $L = 10$ ).

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

Для моделей, рассмотренных в разд. 1, рассчитанные оценки срока хранения в условиях испытаний пересчитываются для нормальных условий.

Таблица 2. Оценки срока хранения герконовых реле в условиях испытаний

Номер режима	Наиболее деградирующий ПКГ	Оценка срока хранения в условиях испытаний при $P_{\text{дов}} = 90\%$ и $\gamma = 95\%$	
		$T_{\text{хр.исп}}, \text{ч}$	$T_{\text{хр.исп}}, \text{лет}$
1	Сопrotивление нормально разомкнутого канала	15 678	1,79
2	Сопrotивление нормально разомкнутого канала	10 824	1,24
3	Сопrotивление нормально разомкнутого канала	6995	0,80
4	Сопrotивление нормально разомкнутого канала	11 838	1,35
5	Сопrotивление нормально разомкнутого канала	11 873	1,35

Таблица 3. Оценка срока хранения для разных моделей

Номер режима, $m$	Название и номер модели	Коэффициент ускорения модели, $K_{\text{уск}}$	Оценка срока хранения в нормальных условиях	
			$T_{\text{хр.}m}, \text{ч}$	$T_{\text{хр.}m}, \text{лет}$
1	Для всех моделей	7,08	111 084	12,68
2	Для всех моделей	18,83	203 802	23,26
3	Пэка, формула (1)	16,37	114 511	13,07
	РЕНМ, формула (2)	30,34	212 256	24,23
	ЕНМ, формула (3)	52,35	366 225	41,80
	Лоусона, формула (4)	22,24	155 594	17,76
4	Пэка, формула (1)	3,24	38 346	4,38
	РЕНМ, формула (2)	6,86	81 160	9,26
	ЕНМ, формула (3)	20,08	237 765	27,14
	Лоусона, формула (4)	6,355	75 135	8,58
5	Пэка, формула (1)	4,76	56 482	6,45
	РЕНМ, формула (2)	10,95	130 011	14,84
	ЕНМ, формула (3)	73,70	875 066	99,89
	Лоусона, формула (4)	18,08	214 661	24,50

Примечание: параметры моделей ускорения испытания согласно стандарту JEP122H [1], обеспечивающие минимальное значение стандартных отклонений:  $E_a = 0,3 \text{ эВ}$ ;  $n_p = 2,7$ ;  $C_{\text{РЕНМ}} = 300\%$ ;  $C_{\text{ЕНМ}} = 0,1\%^{-1}$ ;  $C_{\text{Lawson}} = 0,00044\%^{-2}$ .

Оценки сроков хранения в нормальных условиях ( $T_{\text{нк}} = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $RH_{\text{нк}} = 60\%$ ) для каждой модели приведены в табл. 3. дартные отклонения для каждой модели приведены в табл. 4.

Рассчитанные по (15) средние значения оценок срока хранения в нормальных условиях и стандартные отклонения для каждой модели приведены в табл. 4. Из табл. 4 видно, что полученные результаты для обратно-экспоненциальной модели имеют наименьшее стандартное отклонение и, следовательно,

Таблица 4. Сравнение моделей ускорения испытаний

Название и уравнение модели	$\overline{T}_{xp}$		$S_T$	
	ч	лет	ч	лет
Модель Пэка, power-law $K_{уск} = e^{\frac{0,3}{k_6} \left( \frac{1}{T_{нкы}} - \frac{1}{T_{исп}} \right)} \cdot \left( \frac{RH_{исп}}{RH_{нкы}} \right)^{2,7}$	104 845	11,97	23 584	2,69
Обрато-экспоненциальная модель, РЕНМ $K_{уск} = e^{\frac{0,3}{k_6} \left( \frac{1}{T_{нкы}} - \frac{1}{T_{исп}} \right) + 300 \left( \frac{1}{RH_{нкы}} - \frac{1}{RH_{исп}} \right)}$	147 663	16,86	21 131	2,41
Экспоненциальная модель, ЕНМ $K_{уск} = e^{\frac{0,3}{k_6} \left( \frac{1}{T_{нкы}} - \frac{1}{T_{исп}} \right) + 0,1(RH_{исп} - RH_{нкы})}$	358 789	40,96	110 548	12,62
Модель Лоусона $K_{уск} = e^{\frac{0,3}{k_6} \left( \frac{1}{T_{нкы}} - \frac{1}{T_{исп}} \right) + 0,00044(RH_{исп}^2 - RH_{нкы}^2)}$	152 055	17,36	21 760	2,48

лучше описывают зависимость коэффициента ускорения от температуры и влажности. Данная модель рекомендуется для расчета коэффициента ускорения герконовых реле при имитации хранения.

## Заключение

Используя методику сравнения моделей, предложенную в разд. 3, можно определить наиболее подходящую физико-математическую модель ускорения испытаний, имитирующих хранение изделий ЭКБ, и тем самым увеличить точность оценки показателей сохраняемости. Для герконовых реле наиболее подходящей является обратно-экспоненциальная модель.

Однако при данном подходе полученный коэффициент ускорения может быть завышен. Существует более консервативный подход, который заключается в определении коэффициентов ускорения для каждой пары режимов в рамках эксперимента путем нахождения частного их  $T_{xp,исп}$ . Если в дальнейшем необходимо проводить испытания в новых режимах, то используется значение  $K_{уск}$  между режимами, в которых проводился предварительный эксперимент и которые находятся

внутри диапазона между новыми режимами. Такой подход менее точный, зато минимизирует вероятность завышения  $K_{уск}$  и оценки  $T_{xp}$ .

Таким образом, в статье представлена новая более точная методика оценки срока хранения изделий электронной компонентной базы в рамках испытаний на сохраняемость. Для увеличения точности полученных результатов необходимо:

- исследовать влияние параметров физико-математических моделей с целью уменьшения среднеквадратического отклонения,
- исследовать влияние количества режимов на точность выбора модели и оценки срока хранения,
- провести апробацию модели на других типах ЭКБ.

## Список литературы

1. 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. Общие положения. Принят и введен в действие Постановлением Госстандарта России от 29 ноября 1999 г. №442-ст. Дата введения 2000-07-01. М.: ИПК «Издательство стандартов», 2000. 59 с.



2. ГОСТ Р 57394-2017. Микросхемы интегральные и приборы полупроводниковые. Методы ускоренных испытаний на безотказность. Утвержден и введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 27 февраля 2017 г. № 74-ст. Дата введения 2018-01-01. М.: Стандартинформ, 2017. 42 с.
3. ОСТ В 4Г 0.012.241-84. Аппаратура радиоэлектронная. Методы расчета показателей надежности в режимах хранения и ожидания и определения продолжительности испытаний, имитирующих длительное хранение. Вступил в действие 1986-01-01. Взамен ОСТ В 4Г 0.012.203-77. М.: ВНИИ, 1985. 45 с.
4. ОСТ 11 336.938-83. Приборы полупроводниковые. Методы ускоренных испытаний на безотказность и долговечность.
5. JEDEC. JEP122H. Failure Mechanisms and Models for Semiconductor Devices — 2016.
6. *Peck D.* A Comprehensive Model for Humidity Testing Correlation // IEEE International Reliability Physics Symposium Proceedings, 1986. P. 44–50.
7. *Gunn J., Camenga R., Malik S.* Rapid Assessment of the Humidity Dependence of IC Failure Modes by Use of HAST // IEEE International Reliability Physics Symposium Proceedings, 1983. P. 66–72.
8. *McPherson J., Bishel G., Ondrusek J.* VLSI Corrosion Models: A Comparison of Acceleration Factors // Proceedings of Third International Symposium on Corrosion and Reliability of Electronic Materials and Devices, Electrochemical Society, 1994, vol. 94–29. P. 270.
9. *Lawson R. W.* A review of the status of plastic encapsulated semiconductor component reliability // British Telecommunication Technology Journal, 1984, vol. 2, no 2. P. 95–111.
10. *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.
11. ГОСТ Р ИСО 5725-2-2002. Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. Часть 2. Основной метод определения повторяемости и воспроизводимости стандартного метода измерений. Принят и введен в действие Постановлением Госстандарта России от 23 апреля 2002 г. № 161-ст. Дата введения 2002-11-01. М.: ИПК «Издательство стандартов», 2002. 43 с.
12. *Горяинов В. Б., Павлов И. В., Цветкова Г. М. и др.* Математическая статистика: Учеб. для вузов / Под ред. В. С. Зарубина, А. П. Крищенко. 3-е изд., исправл. Серия «Математика в техническом университете», вып. XVII. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2008. 424 с.
13. ГОСТ Р 50779.10-2000. Статистические методы. Вероятность и основы статистики. Термины и определения. Принят и введен в действие Постановлением Госстандарта России от 29 декабря 2000 г. № 429-ст. Дата введения 2001-07-01. М.: Стандартинформ, 2008. 42 с.
14. *Львовский Е. Н.* Статистические методы построения эмпирических формул: Учеб. пособ. для втузов. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Высшая школа, 1988. 239 с.
15. ГОСТ 8.207-76. Прямые измерения с многократными наблюдениями. Методы обработки результатов наблюдений. Основные положения. Утвержден и введен в действие постановлением Государственного комитета стандартов Совета Министров СССР от 15 марта 1976 г. № 619. Дата введения 1977-01-01. М.: Стандартинформ, 2008. 7 с.
16. Study on Feasibility of Storage Accelerated Testing Based on Parameter Degradation for Aerospace Relays // Zhaobin Wang, Guofu Zhai, Xiaoyi Huang, Xuerong Ve // Prognostics & System Health Management Conference (PHM-2012), Beijing, 2012. С. 1–5.