

ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВАКУУМНЫХ ПРЕЦИЗИОННЫХ РЕЗОНАТОРОВ, ПРИМЕНЯЕМЫХ В РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЕ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Архипова Ирина Владимировна,
аспирант Балтийского государственного
технического университета
«ВОЕНМЕХ» имени Д.Ф. Устинова,
г. Санкт-Петербург, Россия,
arkhipova@elstandart.spb.ru

Голубева Ирина Алексеевна,
руководитель службы государственного
оборонного заказа акционерного общества
«Российский научно-исследовательский институт»
«Электронстандарт»,
г. Санкт-Петербург, Россия,
i.a.melnikova@elstandart.spb.ru

Батурин Антон Владимирович,
директор по качеству акционерного общества
«Российский научно-исследовательский институт»
«Электронстандарт»,
г. Санкт-Петербург, Россия,
baturin@elstandart.spb.ru

Митюшов Александр Иванович,
к.т.н., доцент, профессор Балтийского
государственного технического университета
«ВОЕНМЕХ» имени Д.Ф. Устинова,
г. Санкт-Петербург, Россия,
bgty_e6@mail.ru

АННОТАЦИЯ

Значимость надежности как инженерной науки при производстве радиоэлектронной аппаратуры обусловлена техническим прогрессом, усложнением и повышением наукоемкости изделий и технических систем, ужесточением условий их эксплуатации в окружающей среде. К настоящему моменту требования к гамма-процентной наработке электронной компонентной базы достигают 150 000 часов, требования к гамма-процентному сроку сохраняемости — 25 лет. Задача обеспечения вышеуказанных требований не может быть решена разовыми испытаниями на этапе запуска производства. Предписываемые отечественными стандартами квалификационные испытания электронной компонентной базы на надежность в течение 3 000 часов, даже представительной дорогостоящей выборки (от 1 000 шт.), решают задачу количественной (с использованием инструментов математической статистики), но не качественной оценки соответствия требованиям надежности. Испытания больших выборок или ускоренные испытания на надежность на этапе запуска производства подтверждают статистически обоснованную, а не реальную возможность наработки электронной компонентной базы в течение сотен тысяч часов. Это неизбежно приводит к необходимости использовать и развивать новые идеи и методы теории надежности. Предметом данной работы является оценка надежности резонаторов с жесткими требованиями к эксплуатационным характеристикам по стойкости к воздействию внешних воздействующих факторов. На основании обобщения статистики длительных и кратковременных испытаний резонаторов на безотказность, испытаний на сохраняемость, на воздействие климатических факторов и результатов их эксплуатации в составе радиоэлектронной аппаратуры были определены: уточненная оценка интенсивности отказов резонаторов при наработке; уточненная оценка гамма-процентной наработки до отказа резонаторов; уточненная оценка интенсивности отказов резонаторов при хранении; уточненная оценка гамма-процентного срока сохраняемости резонаторов. Уточнение интенсивностей отказов резонаторов при наработке и хранении проводилось с использованием теоремы Байеса. Накопленная на протяжении 19 лет статистика позволила повысить значения показателей надежности, которые на данный момент содержатся в технических условиях.

Ключевые слова: надежность; электронная компонентная база; байесовская методология; статистика испытаний и эксплуатации; теорема Байеса.

Теория надежности прочно вошла в жизнь современной техники. Эта инженерная наука сделала первые шаги на базе задач радиотехники и электроники. На этой же базе формировались основные понятия и направления исследований. В последние годы проблема исследования надежности приобретает все большее значение. Она ставится на первое место при проектировании и разработке ответственных технических систем.

Технически и экономически обоснованное подтверждение требований надежности электронной компонентной базы (ЭКБ) целесообразно реализовывать через программу обеспечения надежности на предприятии – программу, охватывающую и обобщающую информацию о результатах приемо-сдаточных и периодических испытаний, длительных испытаний на надежность и сведений о применении ЭКБ в составе радиоэлектронной аппаратуры (РЭА). Обобщение накопленной статистики испытаний должно проводиться с использованием принципов преемственности конструктивно-технологических решений. Кроме того, отдельные виды испытаний, традиционно не относящиеся к испытаниям на надежность (на повышенную влажность, на повышенную температуру и др.), могут обобщаться в группы испытаний на безотказность и сохраняемость в зависимости от их вклада в активацию различных механизмов отказов ЭКБ. Сверх предписанного систематического сбора данных об удовлетворенности потребителей качеством поставляемой ЭКБ необходимо налаживать тесное сотрудничество в части предоставления информации о длительной эксплуатации аппаратуры, информации о результатах исследований аппаратуры, выведенной из эксплуатации. Надежность РЭА космических аппаратов (КА) напрямую зависит от надежности используемой ЭКБ. Применяемая ЭКБ должна обеспечивать жесткие требования к сроку активного существования (САС) КА при полном отсутствии возможностей ремонта. Это означает, что к ЭКБ должны предъявляться сверхжесткие требования надежности и стойкости к дестабилизирующим факторам космического пространства и механическим воздействиям.

При разработке РЭА необходимо уделять большое внимание надежности комплектующей ее ЭКБ, т.к. отказ ЭКБ в процессе эксплуатации может привести к огромным финансовым и временным потерям. Поэтому проблема обеспечения надежности не только не снимается с повестки дня, но становится еще более актуальной с увеличением САС. На этапе проектирования комплектующая ЭКБ для РЭА выбирается в том числе и по критерию надежности. ЭКБ выбирается на основании накопленного положительного опыта использования в предыдущих разработках и с учетом выполнения условия, что заявленные показатели надежности ЭКБ превосходят требования надежности РЭА.

Пьезоэлектрические вакуумные прецизионные резонаторы (далее – резонаторы) широко применяются в составе прецизионных кварцевых генераторов, которые, как и двигатели, являются «сердцем» многих электронных систем КА, обеспечивают надежность работы спутниковых систем связи, навигации, телеметрии, метеорологии и выполняют специальные задачи.

Для расчетных промежуточных операций и в качестве промежуточной оцениваемой по результатам испытаний и применений величины в данной статье используется интенсивность отказов (ИО) резонаторов. Использование ИО значительно упрощает расчетно-экспериментальную оценку, т.к., во-первых, λ является параметром экспоненциального распределения, не зависящим от времени, а во-вторых, λ напрямую количественно характеризует результаты испытаний и эксплуатации (отношение числа отказов к объему исследований). Ввиду достаточно малого количества отказов резонаторов достоверно определить закон распределения показателей надежности не представляется возможным. Экспоненциальное распределение выбрано как рекомендуемое для ЭКБ. ИО для всех операций выбрана постоянной независимой от времени величиной на основании допущения, что используемая интенсивность расположена на участке нормальной эксплуатации «ваннообразной» кривой [1].

В рамках данной статьи была проведена работа по оценке надежности резонаторов РК429С, РК459С и РК475 с жесткими требованиями к эксплуатационным характеристикам по стойкости к воздействию внешних воздействующих факторов. Высокий уровень надежности резонаторов заложен на всех стадиях проектирования и обеспечен соответствующими технологическими процессами и их контролем при серийном производстве. За весь период производства претензий к качеству резонаторов не поступало. Отказов резонаторов в процессе эксплуатации в составе РЭА не было. Результаты периодических испытаний резонаторов, а также данные эксплуатации

резонаторов в составе РЭА подтверждают их высокое качество. На основании обобщения статистики длительных и кратковременных испытаний резонаторов на безотказность, испытаний на сохраняемость, на воздействие климатических факторов и результатов их эксплуатации в составе РЭА были определены:

- уточненная оценка ИО резонаторов при наработке;
- уточненная оценка гамма-роцентной наработки до отказа резонаторов;
- уточненная оценка ИО резонаторов при хранении;
- уточненная оценка гамма-процентного срока сохраняемости резонаторов.

Уточненная ИО резонаторов при наработке по результатам испытаний и эксплуатации рассчитывается с использованием теоремы Байеса [2] по формуле:

$$\lambda_{\text{УИ}} = \frac{\chi^2_{\alpha; 2 \cdot d+1}}{2 \cdot \left(N_{\text{дл}} \cdot \tau_{\text{дл}} + \sum_{i=1}^x N_{\text{кр},i} \cdot \tau_{\text{кр},i} + \frac{1}{\lambda_{\Sigma \text{э}, \text{накоп}}} \right)}, \quad (1)$$

где $\chi^2_{\alpha; 2 \cdot d+1}$ – квантиль распределения χ -квадрат для заданных условий и полученных результатов (α , d); значение доверительной вероятности α должно быть не менее 0,6;

$N_{\text{дл}} \cdot \tau_{\text{дл}}$ – накопленная статистика элементочасов длительных испытаний резонаторов на безотказность;

$\sum_{i=1}^x N_{\text{кр},i} \cdot \tau_{\text{кр},i}$ – накопленная статистика элементочасов кратковременных испытаний резонаторов на безотказность;

$\lambda_{\Sigma \text{э}, \text{накоп}}$ – ИО резонаторов по результатам применения в составе РЭА.

В период с 1998 по 2015 г. были проведены длительные испытания на безотказность:

- 5 резонаторов РК429С в течение 140 000 ч;
- 5 резонаторов РК459С в течение 100 000 ч;
- 5 резонаторов РК475 в течение 70 000 ч.

Отказы по результатам длительных испытаний на безотказность отсутствовали.

В рамках периодических испытаний в период с 1999 по 2014 гг. были проведены кратковременные испытания на безотказность:

- 3 резонаторов РК429С, испытания проводились 48 раз;
- 3÷5 резонаторов РК459С, испытания проводились 18 раз;
- 3÷5 резонаторов РК475, испытания проводились 6 раз.

Продолжительность проведения испытаний составила 1000 ч, отказы по результатам испытания отсутствовали.

При уточнении оценки ИО по результатам натурных испытаний – эксплуатации в составе РЭА, было установлено, что общая продолжительность эксплуатации составляет:

- для резонаторов РК429С – 566 666 880 элементочасов (серийные поставки с 1999 г.);
- для резонаторов РК459С – 129 087 360 элементочасов (серийные поставки с 2003 г.);
- для резонаторов РК475 – 17 108 280 элементочасов (серийные поставки с 2008 г.).

Отказы по результатам эксплуатации резонаторов в составе РЭА отсутствуют.

Уточненная ИО резонаторов при хранении по результатам испытаний и эксплуатации рассчитывается с использованием теоремы Байеса [2] по формуле:

$$\lambda_{\text{УХР}} = \frac{\chi^2_{\alpha; 2 \cdot d+1}}{2 \cdot \left(N_{\text{дл}, \text{хр}} \cdot \tau_{\text{дл}, \text{хр}} + \sum_{i=1}^z N_{\text{кр}, \text{вл}, i} \cdot \tau_{\text{кр}, \text{вл}, i} \cdot K_{\text{УХ}} + \frac{N_{\text{дл}} \cdot \tau_{\text{дл}} + \sum_{i=1}^x N_{\text{кр}, i} \cdot \tau_{\text{кр}, i} + \frac{1}{\lambda_{\Sigma \text{э}, \text{накоп}}}}{K_{\text{Х}}} \right)}, \quad (2)$$

где $\chi^2_{\alpha;2d+1}$ – квантиль распределения χ -квадрат для заданных условий и полученных результатов (α, d); значение доверительной вероятности α должно быть не менее 0,6;

$N_{\text{дл.хр}} \cdot \tau_{\text{дл.хр}}$ – накопленная статистика элементочасов длительных испытаний резонаторов на сохраняемость;

$\sum_{i=1}^z N_{\text{кр.вл.}i} \cdot \tau_{\text{кр.вл.}i}$ – накопленная статистика элементочасов кратковременных испытаний резонато-

ров на комплексное воздействие температуры и влаги;

$K_{\text{УХ}}$ – коэффициент ускорения испытаний на комплексное воздействие влаги (98 %) и температуры (40 °С) относительно режимов нормального хранения (25 °С), для приборов пьезоэлектрических составляет 1,34;

$K_{\text{Х}}$ – коэффициент отношения ИО при хранении к ИО при наработке, для прецизионных резонаторов составляет 0,023.

В период с 2000 по 2015 гг. были проведены длительные испытания резонаторов РК429С на сохраняемость. Суммарная наработка по результатам испытаний составила 3 066 000 элементочасов. Отказы по результатам испытаний отсутствовали.

В рамках периодических испытаний в период с 1999 по 2014 гг. были проведены испытания на воздействие климатических факторов – комплексное воздействие температуры и влаги, что равносильно ускоренным испытаниям на сохраняемость. Накопленная статистика по результатам испытаний составила:

- для резонаторов РК429С – 150 528 элементочасов;
- для резонаторов РК459С – 99 456 элементочасов;
- для резонаторов РК475 – 28 224 элементочасов.

Обобщенные по формулам (1) и (2) данные о накопленной статистике длительных и кратковременных испытаний резонаторов на безотказность, испытаний на сохраняемость, испытаний к воздействию климатических факторов и результатов их эксплуатации в составе РЭА приведены в таблице.

Уточненные значения гамма-квантиля и гамма-процентного срока сохраняемости резонаторов по результатам накопленной статистики

Требования по ТУ		Уточненные значения		
Наименование параметра	Норма	Гамма-квантиль	Интенсивность отказов, ч ⁻¹	Гамма-процентный срок сохраняемости
РК429С				
Требования по ТУ		Уточненные значения		
Минимальная наработка резонаторов в режимах, допускаемых ТУ, при $\gamma = 37\%$	150 000	0,999	$1,47 \cdot 10^{-9}$	
Минимальный срок сохраняемости резонаторов	30			30 лет при $\gamma = 0,9999910$
				35 лет при $\gamma = 0,9999895$
				40 лет при $\gamma = 0,9999880$

Требования по ТУ		Уточненные значения		
РК459С				
Минимальная наработка резонаторов в режимах, допускаемых ТУ, при $\gamma = 37\%$	150 000	0,999	$6,47 \cdot 10^{-9}$	
Минимальный срок сохраняемости резонаторов	30			30 лет при $\gamma = 0,9999608$
				35 лет при $\gamma = 0,9999543$
				40 лет при $\gamma = 0,9999477$
РК475				
Минимальная наработка резонаторов в режимах, допускаемых ТУ, при $\gamma = 37\%$	150 000	0,99	$4,81 \cdot 10^{-8}$	
Минимальный срок сохраняемости резонаторов	25			25 лет при $\gamma = 0,9997576$
				30 лет при $\gamma = 0,9997091$
				35 лет при $\gamma = 0,9996607$
				40 лет при $\gamma = 0,9996122$

Таким образом, накопленная на протяжении 17 лет статистика, позволяет при обобщении информации обо всех испытанных, испытываемых и эксплуатируемых в настоящее время резонаторах оценить ИО при верхней доверительной границе с вероятностью 0,6.

Кроме вышеуказанного, накопленная статистика элементочасов позволяет подтвердить значения гамма-квантиля $\gamma = 0,99$ (в отдельных случаях 0,999) при заданном значении гамма-процентной наработки до отказа $T_\gamma = 150\,000$ ч, а также увеличить значения гамма-процентного срока сохраняемости $T_{\gamma c}$ с одновременным повышением значения гамма-квантиля, что является важным требованием, предъявляемым к ЭКБ комплектующей высоконадежную РЭА.

Литература

1. *Половко А.М.* Основы теории надежности. СПб.: БХВ-Петербург, 2006. 34 с.
2. *Савчук В.П.* Использование байесовского подхода в теории форсированных испытаний на надежность // Надежность и контроль качества. 1985. № 2. С. 46–51.

ASSESSMENT OF THE RELIABILITY OF PIEZOELECTRIC VACUUM PRECISION RESONATORS USED IN ELECTRONIC EQUIPMENT OF SPACECRAFTS

Irina V. Arkhipova,
Saint-Petersburg, Russia,
arkhipova@elstandart.spb.ru

Anton V. Baturin,
Saint-Petersburg, Russia,
baturin@elstandart.spb.ru

Irina A. Golubeva,
Saint-Petersburg, Russia,
i.a.melnikova@elstandart.spb.ru

Aleksandr I. Mityushov,
Saint-Petersburg, Russia,
bgty_e6@mail.ru.

ABSTRACT

The main reasons for the increasing importance of reliability due to technological progress, increasing complexity and increasing scientific content of products and technical systems, the tightening of conditions in the environment. To date, the requirements for gamma-percentile time to failure of the electronic component base reach 150,000 hours, the requirements for gamma-percentile storageability time reach 25 years. The task of ensuring the above requirements cannot be solved with one-time testing during the startup phase of production. Qualification tests of electronic component base for the reliability over 3,000 hours prescribed by domestic standards, even on expensive representative sample (from 1,000 samples), solve the problem of quantitative (using tools of mathematical statistics), but not qualitative assessment of compliance with reliability requirements. Testing large samples or accelerated reliability tests, on the startup stage of production, confirm statistically reasonable, but not a real operation time of electronic component base for hundreds of thousands of hours. This inevitably leads to the need of use and develop new ideas and methods of reliability theory. The subject of this work is assessment the reliability of the resonators with strict requirements to the performance characteristics for resistance to external influencing factors. On the basis of summarization of long and short term statistics of the test resonators on dependability, testing for the persistence of the effect of climatic factors and their use in the electronic equipment have been identified: amended estimate of the failure rate of the resonator at an operating time; amended estimate of gamma-percentile time to failure of the resonator; amended estimate of the failure rate of the resonators in storage; amended estimate of gamma-percentile storageability time of the resonators. Amendment of failure rate of the resonator at an operating and storage were carried out using Bayesian methodology. Accumulated statistics over 19 years have improved values of indicators of reliability, which at the moment contained in the technical specifications.

Keywords: reliability; electronic components; Bayesian methodology; statistics; testing and operation.

References:

1. Polovko A.M. *Osnovy teorii nadezhnosti* [Fundamentals of Reliability Theory]. Saint-Peterburg: BHV-Peterburg, 2006. 34 p. (In Russian).
2. Savchuk V.P. Ispol'zovanie bajesovskogo podhoda v teorii forsirovannyh ispytaniy na nadezhnost' [Use of the Bayesian approach in the Theory of forced reliability tests]. *Nadezhnost i kontrol kachestva* [Reliability and quality control]. 1985. No. 2. Pp. 46–51 (In Russian).

Information about authors:

Arkhipova I.V., postgraduate student, Baltic state technical university «VOENMEH»;
Baturin A.V., quality director, Russian Research Institute «Electronstandart»;
Golubeva I.A., chief of State defence order service, Russian Research Institute «Electronstandart»;
Mityushov A.I., PhD, associate professor, Baltic state technical university «VOENMEH».