

Методика оценки безотказности РЭА в условиях меняющейся температуры окружающей среды

Methodology for assessing the radioelectronic equipment reliability in conditions of changing ambient temperature

Кириллов Л.Р.^{1,2*}, Лужавин Ю.И.²
Kirillov L.R.^{1,2*}, Luzhavin Yu.I.²

¹ ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет имени Н.И. Лобачевского», Российская федерация, Нижний Новгород

² ООО «Радио Гигабит», Российская федерация, Нижний Новгород

¹ National Research Lobachevsky State University of Nizhni Novgorod, Russian Federation, Nizhni Novgorod

² Radio Gigabit, Russian Federation, Nizhni Novgorod

* leonidkirillov000@gmail.com, luzhavin@rambler.ru



Кириллов Л.Р.



Лужавин Ю.И.

Резюме. Общепринятая методика расчета показателей безотказности радиоэлектронной аппаратуры, предлагаемая российскими и зарубежными стандартами по оценке надежности, не учитывает изменение температуры окружающей среды во времени. Для радиоэлектронной аппаратуры, непрерывно эксплуатируемой в течение года или нескольких лет в меняющихся климатических условиях (например, на улице), данный подход может быть неточным. Это связано с тем, что коэффициент температуры, учитывающий термическую нагрузку, зависит от температуры нелинейно. Поэтому для более точной оценки безотказности радиоэлектронной аппаратуры необходимо учитывать в расчетах вариации температуры. **Цель.** Предложить метод оценки безотказности радиоэлектронной аппаратуры при непрерывной эксплуатации на улице, учитывающий изменения температуры во времени. **Методы.** В статье применяются методы статистической теории надежности, математического анализа и численные методы. **Результаты.** Предложена методика оценки безотказности радиоэлектронной аппаратуры, учитывающая изменения температуры во времени. Представлена математическая модель, описывающая изменения температуры окружающей среды в течение года, на основе которой можно рассчитать интенсивность отказов радиоэлектронной аппаратуры при непрерывной эксплуатации в уличных условиях. С использованием предложенного метода рассчитана эксплуатационная интенсивность отказов микросхемы ПЗУ объемом 16 Мегабит, выполненной по NMOS-технологии, при эксплуатации непрерывно на улице в течение года. Проведена количественная оценка неточности результатов расчета интенсивности отказов при применении методики, не учитывающей вариации температуры. Показана зависимость расхождения результатов от значений энергии активации и рабочей температуры. **Заключение.** Предлагаемый в статье подход позволяет рассчитывать безотказность радиоэлектронной аппаратуры с учетом изменения температуры во времени. На основе предложенной методики можно более точно рассчитать интенсивность отказов радиоэлектронной аппаратуры при непрерывной эксплуатации в уличных условиях.

Abstract. The generally accepted methodology for calculating reliability indicators, proposed by Russian and foreign reliability assessment standards, does not take into account changes in ambient temperature over time. For the radioelectronics that continuously operate for a year or several years in changing climatic conditions (for example, outdoors), this approach may be inaccurate. This is due to the fact that the temperature coefficient, which takes into account the thermal stress, depends on temperature non-linearly. Therefore, for a more accurate assessment of reliability, temperature variations must be taken into account in the calculations. **Aim.** To propose a method for assessing reliability during continuous outdoor operation, taking into account temperature changes over time. **Methods.** The article uses methods of the statistical reliability theory, mathematical analysis and numerical methods. **Results.** A method for assessing the reliability is proposed, taking into account temperature changes over time. A mathematical model is presented that describes changes in ambient temperature throughout the year, on the basis of which it is possible to calculate the failure rate of the radioelectronics during continuous operation in outdoor conditions. Using the proposed method, the operational failure rate of a 16 Megabit ROM chip made using NMOS technology is calculated when operating continuously outdoors for a year. A quantitative assessment of the discrepancy between the results of calculating the failure rate when using a technique that does not take into account temperature variations has been carried out. The dependence of the discrepancy between the results and the values of the activation energy and the operating

temperature is shown. **Conclusion.** The approach proposed in the article makes it possible to calculate the reliability, taking into account temperature changes over time. Based on the proposed methodology, it is possible to more accurately calculate failure rate during continuous operation in outdoor conditions.

Ключевые слова: надежность, безотказность РЭА, интенсивность отказов, термическая нагрузка.

Keywords: dependability, radioelectronic equipment reliability, failure rate, thermal stress.

Для цитирования: Кириллов Л.Р., Лужавин Ю.И. Методика оценки безотказности РЭА в условиях меняющейся температуры окружающей среды // Надежность. 2026. №1 С. 44-48. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2026-26-1-44-48>

For citation: Kirillov, L.R., Luzhavin, Yu.I. Methodology for assessing the radioelectronic equipment reliability in conditions of changing ambient temperature. Dependability 2026;1: 44-48. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2026-26-1-44-48>

Поступила: 01.10.2025 / **После доработки:** 12.11.2025 / **К печати:** 01.02.2026

Received on: 01.10.2025 / **Revised on:** 12.11.2025 / **For printing:** 01.02.2026

Введение

В связи с постоянным развитием радиоэлектроники растет актуальность задач, связанных с проектированием радиоэлектронной аппаратуры (РЭА). Одной из приоритетных задач на всех стадиях жизненного цикла РЭА является обеспечение надежности. Важность данной задачи обусловлена тем, что надежность во многом определяет экономическую эффективность разработки и серийного производства изделия.

Существует два основных подхода к оценке надежности технических устройств. В одном случае отказы рассматриваются как случайные события и описываются методами теории вероятности и статистической теории надежности [1, 2]. В другом случае отказ рассматривается не как случайное событие, а как результат потери материалами своих свойств при протекании в них физических и химических процессов. На основе прогнозирования таких изменений строится теория, называемая физикой отказов [3]. В рамках данной работы рассматриваются вопросы статистической теории надежности.

Одним из ключевых аспектов надежности является безотказность. Безотказность – свойство объекта сохранять работоспособное состояние в течение некоторого времени или наработки [4]. В данной работе предлагается подход, позволяющий проводить более точную оценку безотказности РЭА, эксплуатируемой в условиях меняющейся температуры. В качестве частного случая рассмотрена эксплуатация аппаратуры в уличных условиях.

1. Общепринятый подход к оценке безотказности РЭА

Основные количественные показатели безотказности – это интенсивность отказов и наработка на отказ. Они связаны между собой следующим соотношением [5]:

$$T = \frac{1}{\lambda_s},$$

где T – средняя наработка на отказ, λ_s – эксплуатационная интенсивность отказов.

Поток отказов РЭА складывается из независимых потоков отказов электрорадиоизделий (ЭРИ), расчет интенсивности отказов проводится по формуле:

$$\lambda = \sum_{i=1}^n \lambda_i,$$

где λ_i – эксплуатационная интенсивность отказов i -го ЭРИ.

Данная формула подразумевает, что отказ любого ЭРИ приводит к отказу аппаратуры в целом.

В соответствии с общепринятой методикой, рекомендуемой отечественными и зарубежными стандартами по надежности [6–8], эксплуатационная интенсивность отказов ЭРИ может быть определена по формуле:

$$\lambda_s = \lambda_0 \cdot K_{np} \cdot K_p \cdot K_T \cdot K_{\varepsilon},$$

где λ_0 – базовая интенсивность отказов конкретного типа ЭРИ;

K_{np} – коэффициент приемки, отражающий уровень качества изготовления ЭРИ;

K_p – коэффициент электрической нагрузки;

K_T – коэффициент термической нагрузки;

K_{ε} – коэффициент жесткости условий эксплуатации, учитывающий механическую нагрузку.

Коэффициент температуры можно определить по формуле, основанной на модели Аррениуса [6–8]:

$$K_T = e^{\frac{E_a}{k} \left[\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T_1} \right]},$$

где $T_0 = 40 + 273 = 313$ – референсная температура (в Кельвинах);

T_1 – рабочая температура (в Кельвинах);

E_a – энергия активации, эВ;

$k = 8,62 \cdot 10^{-5}$ эВ/К – постоянная Больцмана.

Более подробную информацию о параметрах λ_0 , K_{np} , E_a , K_{ε} и K_T можно найти в литературных источниках [6–8].

2. Учет вариаций температуры окружающей среды при оценке безотказности ЭРИ

Показатели безотказности принято оценивать при постоянной температуре окружающей среды. Данный подход вполне подходит для изделий, эксплуатируемых в помещениях, где температура с течением времени почти не меняется. Применение такого подхода также разумно для РЭА авиационного назначения, поскольку аппаратура непрерывно работает короткие промежутки времени (как правило, несколько часов). При эксплуатации в таких условиях вполне целесообразно не учитывать динамические изменения термической нагрузки.

Для аппаратуры, непрерывно эксплуатируемой в течение года или нескольких лет в меняющихся климатических условиях (например, на улице), данный подход может быть неточным. Это связано с тем, что коэффициент температуры, учитывающий термическую нагрузку, зависит от температуры нелинейно. Таким образом, при проведении расчетов показателей безотказности необходимо учитывать вариации температуры.

Применив теорему о среднем, можем найти среднюю интенсивность отказов ЭРИ на интервале времени $[t_1, t_2]$ при меняющемся коэффициенте температуры:

$$\bar{\lambda}_3 = \frac{\int_{t_1}^{t_2} \lambda_6 \cdot K_{np} \cdot K_p \cdot K_T(t) dt}{t_2 - t_1},$$

где $K_T(t)$ – закон изменения температурного коэффициента на интервале времени $[t_1, t_2]$.

Рассмотрим случай, когда электрическая нагрузка на ЭРИ постоянна в течение эксплуатации. Тогда

$$\bar{\lambda}_3 = \lambda_6 \cdot K_{np} \cdot K_p \cdot K_3 \cdot \frac{\int_{t_1}^{t_2} K_T(t) dt}{t_2 - t_1} = \lambda_6 \cdot K_{np} \cdot K_p \cdot K_3 \cdot \bar{K}_T,$$

где $\bar{K}_T$ – средний коэффициент температуры на интервале времени $[t_1, t_2]$.

Задав функцию изменения температуры во времени $T_1(t)$, можно определить средний температурный коэффициент:

$$\bar{K}_T = \frac{\int_{t_1}^{t_2} e^{\frac{E_a}{k} \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T_1(t)} \right)} dt}{t_2 - t_1}.$$

Таким образом, формула интенсивности отказов ЭРИ примет вид:

$$\bar{\lambda}_3 = \lambda_6 \cdot K_{np} \cdot K_p \cdot \frac{\int_{t_1}^{t_2} e^{\frac{E_a}{k} \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T_1(t)} \right)} dt}{t_2 - t_1}.$$

3. Влияние вариаций температуры на безотказность ЭРИ при непрерывной эксплуатации в уличных условиях

Рассмотрим случай непрерывной эксплуатации РЭА на улице. Изменение температуры ЭРИ в таких условиях предлагается представить следующим образом:

$$T_1(t) = T_{cp} + T_{дн} \sin(2\pi t) + T_{лз} \sin\left(\frac{2\pi t}{365} - \frac{\pi \cdot t_m}{365}\right),$$

где T_{cp} – среднегодовая рабочая температура ЭРИ;

$T_{лз}$ – амплитуда колебаний средней температуры «лето-зима»;

$T_{дн}$ – амплитуда колебаний температуры «день-ночь»;

t_m – самый теплый день в году.

Данная математическая модель учитывает общий характер колебаний температуры при эксплуатации в уличных условиях. Безусловно, температура окружающей среды – случайная величина, однако, представив ее в виде детерминированной функции, можно, производя несложные вычисления, получить достаточно правдоподобную оценку средней термической нагрузки.

Рассмотрим климат города Нижнего Новгорода [9]:

- среднегодовая температура воздуха – около 5°C ;
- самый теплый месяц – июль;
- средняя температура в июле – около 20°C .
- среднесуточный максимум в июле – около 25°C .
- среднесуточный минимум в июле – около 15°C .

На основе данных сведений можем считать, что $T_{дн} = 5^\circ\text{C}$, $T_{лз} = 15^\circ\text{C}$, $t_m = 182$. Примем допущение,

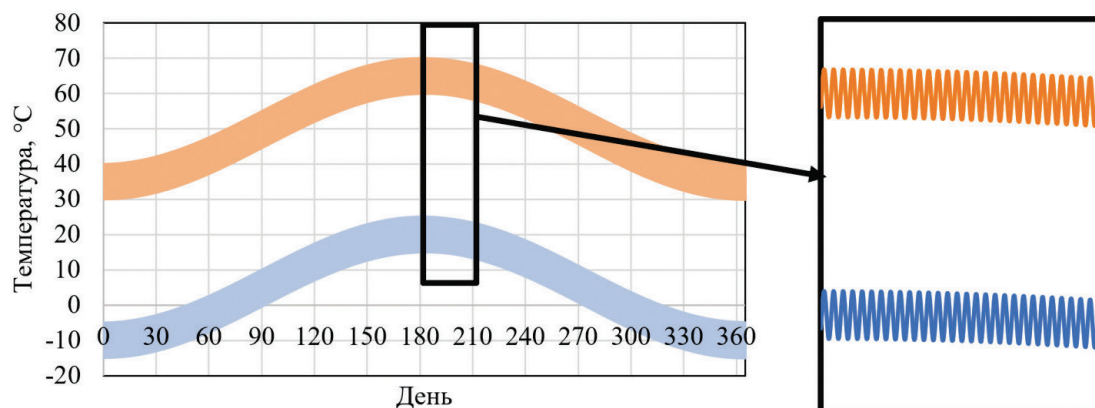


Рис. График вариаций температуры в течение года

Табл. Неточность общепринятой методики

$T_{cp}, ^\circ C$	$E_a, \text{эВ}$									
	0,05	0,10	0,15	0,22	0,28	0,35	0,40	0,45	0,56	0,7
	Неточность, %									
50	< 1	< 1	1	3	5	8	11	14	23	37
60	< 1	< 1	1	2	4	7	9	12	20	32
70	< 1	< 1	1	2	4	6	8	11	18	29
80	< 1	< 1	1	2	3	6	7	10	15	25

что средняя рабочая температура ЭРИ $T_{cp} = 50^\circ C$ (при температуре воздуха $5^\circ C$). Тогда закон изменения температуры ЭРИ во времени можно представить следующим образом:

$$T_1(t) = 50 + 5 \cdot \sin(2\pi t) + 15 \cdot \sin\left(\frac{2\pi t}{365} - \frac{\pi \cdot 182}{365}\right).$$

На рис. проиллюстрированы вариации температурного режима ЭРИ, где голубым цветом показано изменение температуры окружающей среды, а оранжевым – изменение температуры ЭРИ.

Попробуем рассчитать интенсивность отказов ПЗУ объемом 16 Мегабит, выполненной по NMOS-технологии. В соответствии с [6] для выбранного типа ЭРИ: $\lambda_0 = 65 \text{ FIT}$ (FIT – единица измерения интенсивности отказов, равная 10^{-9} 1/ч), $E_a = 0,7 \text{ эВ}$. Коэффициент электрической нагрузки для данного типа ЭРИ не задается, коэффициент качества и коэффициент эксплуатации примем равными 1.

Проведем расчет без учета вариаций температуры. Коэффициент термической нагрузки при рабочей температуре $50^\circ C$ равен $K_T = 2,2$. Эксплуатационная интенсивность отказов в таком случае $\lambda_s = 143 \text{ FIT}$.

Проведем расчет по методике, учитывающей вариации температуры. Средний коэффициент термической нагрузки при средней рабочей температуре $50^\circ C$ равен $K_T = 3$. Эксплуатационная интенсивность отказов в таком случае $\lambda_s = 195 \text{ FIT}$.

Разница в результатах около 37%. Таким образом, для выбранного типа ЭРИ расхождение в результатах довольно ощутимо. Стоит отметить, что для других типов ЭРИ отличие может быть не так существенно. Разница зависит от средней рабочей температуры и энергии активации. Неточность результатов общепринятой методики при различных значениях энергии активации и средней рабочей температуры приведена в табл.

Таким образом, для расчета интенсивности отказов типов ЭРИ с $E_a < 0,3 \text{ эВ}$ допустимо использовать метод, не учитывающий вариации температуры, поскольку неточность составит не более 5%.

Выводы

Предложен метод расчета безотказности РЭА, учитывающий изменения температуры окружающей среды во времени. Представлена математическая модель изменения температуры, которая позволяет рассчитывать интенсивность отказов ЭРИ при эксплуатации РЭА в

уличных условиях. Рассчитана интенсивность отказов микросхемы ПЗУ объемом 16 Мегабит, выполненной по NMOS-технологии. Проведена количественная оценка неточности результатов расчета интенсивности отказов при применении общепринятой методики, не учитывающей вариации температуры. Показана зависимость расхождения результатов от значений энергии активации и рабочей температуры.

Список литературы

1. Маликов И.М., Половко А.М., Романов Н.А. и др. Основы теории и расчета надежности: Изд. 2-е, доп. Л.: Судпромгиз, 1960. 144 с.
2. Половко А.М., Гуров С.В. Основы теории надежности. СПб.: БХВ-Петербург, 2006. 702 с.
3. Меламедов И.М. Физические основы надежности (Введение в физику отказов). Л.: Энергия, 1970. 152 с.
4. ГОСТ 27.002-89 Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения (Статус: заменен). М.: ИПК Издательство стандартов, 2002. 32 с.
5. ГОСТ Р 27.013-2019 Надежность в технике. Методы оценки показателей безотказности. М.: Стандартинформ, 2019. IV, 41 с.
6. Telcordia SR-332 Reliability Prediction Procedure for Electronic Equipment / Telcordia Technologies, Inc. Issue 4. March 2016.
7. MIL-HDBK-217F Military Handbook. Reliability Prediction of Electronic Equipment. Notice 2. December 1991.
8. Надежность электрорадиоизделий, 2002: справочник / С.Ф. Прытков [и др.] М.: ФГУП «22 ЦНИИ МО РФ», 2004. 574 с.
9. Нижний Новгород [Электронный ресурс]: Википедия. Свободная энциклопедия. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Нижний_Новгород (Дата обращения: 26.09.2025).

References

1. Malikov I.M., Polovko A.M., Romanov N.A. et al. [Fundamentals of the theory and calculation of reliability: 2nd ed., extended]. Leningrad: Sudpromgiz; 1960. (in Russ.)
2. Polovko A.M., Gurov S.V. [Fundamentals of reliability theory]. St. Petersburg: BHV-Petersburg; 2006. (in Russ.)
3. Melamedov I.M. [The physical foundations of reliability (Introduction to the physics of failures)]. Leningrad: Energiya; 1970. (in Russ.)

4. ГОСТ 27.002-89. Industrial product dependability. General concepts. Terms and definitions. Moscow: Izdatelstvo standartov; 2002. (in Russ.)

5. GOST 27.013-2019. Dependability in technics. Reliability assessment methods. Moscow: Standartinform; 2019. (in Russ.)

6. Telcordia SR-332 Reliability Prediction Procedure for Electronic Equipment. Telcordia Technologies, Inc. Issue 4. March 2016.

7. MIL-HDBK-217F Military Handbook. Reliability Prediction of Electronic Equipment. Notice 2. December 1991.

8. Prytkov S.F. et al. [Reliability of electrical and radio products, 2002: a handbook. Moscow: FSUE 22 TsNII of the RF MoD; 2004. (in Russ.)

9. Nizhny Novgorod. Wikipedia. (accessed: 26.09.2025). Available at: https://ru.wikipedia.org/wiki/Nizhni_Novgorod.

Сведения об авторах

Леонид Романович Кириллов – аспирант, ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет имени Н.И. Лобачевского»; младший инженер по моделированию, ООО «Радио Гигабит». leonidkirillov000@gmail.com, Адрес: г. Нижний Новгород, ул. Салганская, д.24.

Юрий Иванович Лужавин – руководитель отдела моделирования физических процессов., ООО «Радио Гигабит». Бывший начальник отдела надежности АО «НПП«Полет». luzhavin@rambler.ru, Адрес: г. Нижний Новгород, ул. Салганская, д. 24.

About authors

Leonid Romanovich Kirillov – a postgraduate student, Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod; junior modeling engineer, Radio Gigabit LLC. leonidkirillov000@gmail.com

Yuri Ivanovich Luzhavin – Head of the Department of modeling physical processes, Radio Gigabit LLC. Ex-head of the Reliability Department of Polyot JSC. luzhavin@rambler.ru

Вклад авторов в статью

Л.Р. Кириллов – разработка методики, проведение расчетов, оформление текста статьи.

Ю.И. Лужавин – постановка задачи, экспертная консультация, оформление текста статьи.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.