

УДК 62-9

ВЛИЯНИЕ ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ТЕМПЕРАТУР НА ПОКАЗАТЕЛИ БЕЗОТКАЗНОСТИ ПРЕЦИЗИОННЫХ РЕЗИСТОРОВ

Уркунов А.К., Евсеева Н.А.

Национальный исследовательский университет «Высшая Школа Экономики»,
г. Москва, Российская Федерация

Научный руководитель: Королев П.С. – канд.техн.наук, старший преподаватель ДЭИ МИЭМ НИУ ВШЭ

Аннотация. В рамках работы проведен обзор и анализ существующих математических моделей показателей безотказности резисторов группы «Прецизионные». Проанализированы зависимости эксплуатационной интенсивности отказов и коэффициента режима от температуры. Осуществлены прогнозирование и теоретическая валидация показателей надежности на отрицательном диапазоне температур с использованием метода машинного обучения.

Ключевые слова: прецизионный резистор, надежность, эксплуатационная интенсивность отказов, коэффициент режима, отрицательные температуры.

Введение. В радиоэлектронной промышленности резисторы являются изделиями массового производства и составляют около 50% от общего объема всех комплектующих радиоэлектронных устройств (РУ) [1], которые используются повсеместно при различных условиях, в том числе – отрицательных температурах. Следовательно, актуальной становится задача обеспечения стабильного и надежного функционирования РУ, в состав которой входят электрорадиоизделия (ЭРИ), в частности, резисторы.

Проведено множество научных исследований и определены математические модели (ММ) расчета показателей надежности [2]-[4]. Температура окружающей среды является одной из важнейших характеристик, оказывающей влияние на показатели безотказности. Сравнительно устойчивыми к изменению температуры являются тонкопленочные резисторы группы «Прецизионные» (ТПР).

В справочниках надежности ЭРИ [2]-[4] приведены математические модели (ММ) для оценки эксплуатационной интенсивности отказов (ЭИО) $\lambda_{\text{э}}$. Кроме того, научные исследования в сфере физики отказов ЭРИ подтверждают наличие деградационных процессов ЭРИ при отрицательных температурах [7]. Стоит заметить, что ММ, представленные в существующих справочниках [2]-[4] ограничены положительной областью температур.

Несмотря на все это, промышленность в северных регионах, таких как Ямало-Ненецкий Автономный округ, Новая Земля или Аляска, стремительно развивается. Следовательно, важно иметь ММ, достоверные как для положительных, так и для отрицательных температур. Таким образом, целью данной работы является увеличение достоверности ММ оценки показателей надежности ТПР для обеспечения целевого уровня надежности РУ, используемых в условиях низких температур. Новизна данной работы заключается в формировании уникальной ММ коэффициента режима, достоверной для расширенного диапазона температур (от $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+125\text{ }^{\circ}\text{C}$). Объектами исследования являются представленные в научной литературе [2]-[4] ММ оценки ЭИО резисторов и ТПР.

Обзор и анализ существующих ММ ЭИО ТПР. В рамках данной работы рассмотрены 3 справочника по надежности [2]-[4]. Основным параметром надежности является ЭИО $\lambda_{\text{э}}$. В [2]-[4] приведены математические модели ЭИО $\lambda_{\text{э}}$ для диапазонов температур: $+25\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+100\text{ }^{\circ}\text{C}$, $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+125\text{ }^{\circ}\text{C}$ и от $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+170\text{ }^{\circ}\text{C}$, соответственно.

ММ ЭИО ТПР в [2]-[4] имеют отличия. Наиболее подходящая для данного исследования ММ ЭИО представлена в справочнике [2] и приведена далее (1).

$$\lambda_{\text{э}} = \lambda_{\text{б}} K_{\text{р}} K_{\text{R}} K_{\text{э}} K_{\text{пр}}, \quad (1)$$

где λ_b – базовая интенсивность отказов, определяется по таблице характеристик надежности, [1/ч];

K_R – коэффициент сопротивления, зависящий от величины номинального сопротивления отдельных групп резисторов;

$K_{\text{Э}}$ – коэффициент эксплуатации, зависящий от степени жесткости эксплуатационных условий и определяющий отношение интенсивности отказов ЭРИ в аппаратуре конкретного класса (группы эксплуатации по ГОСТ Р В 20.39.304-98 [7]) для определенной группы изделий при прочих равных к интенсивности отказов в наземной стационарной аппаратуре (группа 1.1 по [7]);

K_{np} – коэффициент приемки;

K_P – коэффициент режима, зависящий от температуры и электрической нагрузки.

На рисунке 1 представлены зависимости ЭИО ТПР из [2]-[4] на диапазоне от $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+125\text{ }^{\circ}\text{C}$. При отрицательных температурах интенсивность отказов не увеличивается, что доказывает ограниченность существующих ММ.

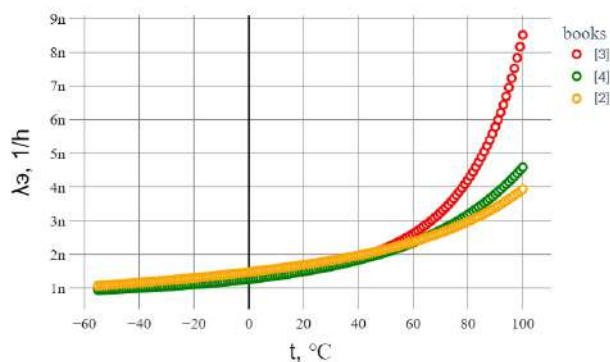


Рисунок 1 – График зависимости ЭИО ТПР из [2]-[4] на диапазоне от $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+125\text{ }^{\circ}\text{C}$

ММ ЭИО из [2] представляет собой произведение различных коэффициентов, зависящих от разных факторов. Единственным множителем, зависящий от температуры, является коэффициент режима K_P , формула расчета которого представлена на (2). График зависимости K_P от температуры и электрической нагрузки K_H приведен на рисунке 2.

$$K_P = A * e^{B * \left(\frac{t+273}{N_t}\right)^G} * e^{\left[\frac{P/P_H}{N_S} * \left(\frac{t+273}{273}\right)^J\right]^H}, \quad (2)$$

где $A = 0.0985$ – поправочный коэффициент;

$B = 0.4$ – параметр формы;

$N_t = 373$ – температурная постоянная;

G, N_S, J и H – постоянные ускорения и равны 8.643, 0.559, 1.5 и 1.147, соответственно.

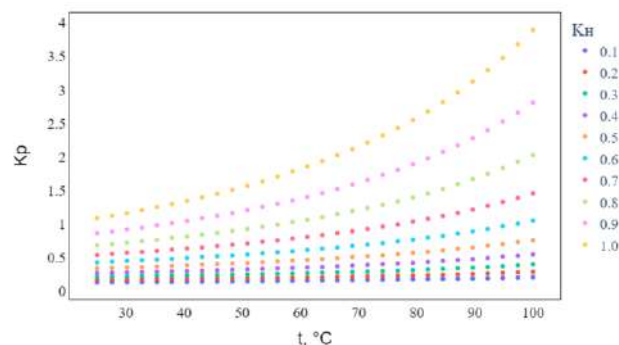


Рисунок 2 – График зависимости K_P от температуры t и электрической нагрузки K_H

Таким образом, рассмотрены и проанализированы 3 справочника по надежности ЭРИ [2]-[4] и доказан факт ограниченности представленных в них ММ ЭИО ТПР по температуре.

Далее в работе расчеты будут проводиться с электрической нагрузкой $K_H = 0.5$, так как это наиболее часто встречающееся у резисторов группы «Прецизионные» значение.

Зависимость температурного коэффициента и сдвига сопротивления от температуры на расширенном диапазоне. ТПР обладают множеством характеристик, зависящих от температуры. В том числе, температурный коэффициент сопротивления (ТКС), показывающий стабильность работы резистора при различных температурах, и сдвиг сопротивления (СС), являющийся первообразной ТКС. Формулы ТКС и СС представлены далее (3) и (4):

$$\text{ТКС} = \frac{\Delta (|R_T - R_0|/R_0)}{|T - T_0|} = \frac{\Delta (R/R_0)}{\Delta T}, \quad (3)$$

$$\text{СС} = |R_T - R_0|/R_0 = \Delta R/R_0, \quad (4)$$

где R_T – сопротивление резистора при температуре T ;

R_0 – сопротивление резистора при нормальной температуре T_0 (в данной работе нормальной температурой считается $T_0 = +25$ °С).

В исследованиях [5]-[6] приведены значения ТКС и СС на диапазоне температур от -55 °С до $+125$ °С для восьми различных ТПР. На основе множества экспериментов авторами [5]-[6] определено, что зависимость ТКС от температуры является линейно-возрастающей/убывающей функцией. На рисунке 3 визуализированы представленные в [5] значения ТКС и их аппроксимированные прямые. На рисунке 4 представлены графики СС резисторов из [5] и [6] с наложенным на них нормально распределенным шумом. Ввиду малого набора входных данных (6 значений ТКС и СС для каждого резистора) шум может позволить улучшить результативность тренировок и точность модели, так как обучение с малым набором данных приводит к тому, что система запоминает примеры данных, а не обобщает их, вследствие чего может возникнуть, так называемое, переобучение модели [8].

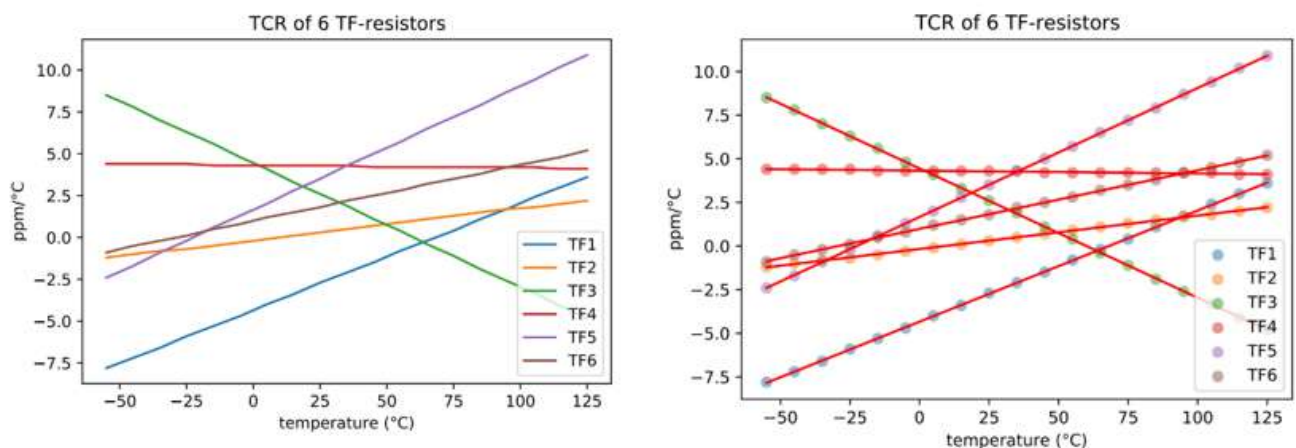


Рисунок 3 – Данные из [5] – значения ТКС на расширенном диапазоне температур

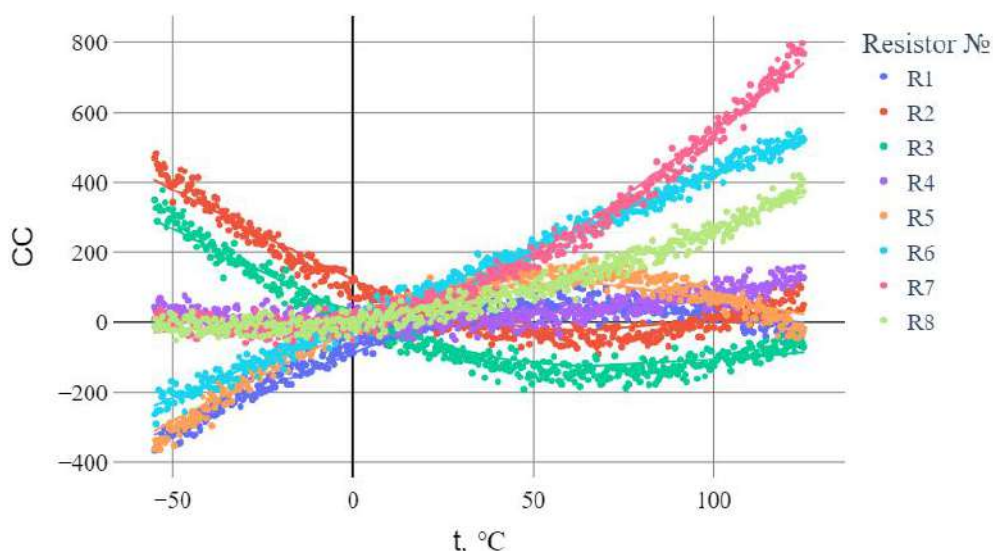


Рисунок 4 – Значения CC с наложенным нормально распределенным шумом и линиями трендов на расширенном диапазоне температур

Таким образом, с помощью существующих исследований [5]-[6], в которых описаны результаты ТКС и CC , полученных в ходе многочисленных реальных испытаний – сформированы данные и наложен нормально распределенный шум для уточнения дальнейшего прогнозирования показателей надежности резисторов на расширенном температурном диапазоне.

Прогнозирование коэффициента режима на расширенном диапазоне. В предыдущих пунктах работы было определено, что существующие ММ ЭИО ТПР [2]-[4] ограничены положительным диапазоном температур. Также есть данные зависимости CC ТПР от температуры на расширенном диапазоне (от -55 °C до $+125$ °C). Однако возникает вопрос, объясняют ли значения CC – значения коэффициента режима. Для проверки была построена корреляционная матрица, показывающая коэффициенты корреляции между значениями CC и K_p на диапазоне температур от $+25$ °C до $+100$ °C, так как ММ, представленная в [2] работает для данного диапазона, как написано в самом справочнике. Среднее значение модуля корреляции получилось равным 0.62, медианное – 0.71. Значения CC для резисторов № 4, 6, 7 и 8 из [5] и [6] коррелируют с K_p наиболее сильно – коэффициенты корреляции равны 1, 0.98, 1 и 0.99 соответственно. Поэтому они были выбраны для добавления в набор данных для обучения модели.

Таким образом, доказана связь между CC и K_p .

Далее была разработана программа на языке программирования *Python* на основе модели машинного обучения «*Linear Regression*» [9] для прогнозирования значения K_p . В качестве аргументов и значений обучающей выборки были взяты 0.8 значений температур в диапазоне $+25$ °C до $+100$ °C, значения CC для резисторов № 4, 6, 7 и 8 из [5] и [6] и K_p из [2].

По окончании обучения модели, были спрогнозированы K_p на диапазоне температур от -55 °C до $+125$ °C. Для валидации полученных значений вычислены коэффициент детерминации r^2 , среднеквадратичное отклонение $RMSE$ и средняя абсолютная ошибка MAE [10] спрогнозированных и справочных значений K_p . Полученные результаты записаны в таблицу 1.

Таблица 1 – Значения метрик для валидации прогноза

Резистор №	r^2	$RMSE$	MAE
4	0,9987	0,004198883843342822	0,0036142262133992114
6	0,9987	0,004198883843342728	0,00361422621339958
7	0,9987	0,004198883843342815	0,0036142262133991966
8	0,9987	0,004198883843342794	0,003614226213399189

Метрики из таблицы 1 показывают высокую точность предсказаний. Следовательно, прогноз модели можно считать относительно точным. На рисунке 5 показаны спрогнозированные (оранжевая линия) и справочные (зеленые кольца) значения. По графику видно, что при отрицательных температурах коэффициент режима возрастает, вследствие чего увеличивается интенсивность отказов прецизионных резисторов, что подтверждается возникающими в резисторе деградиационными процессами [8].

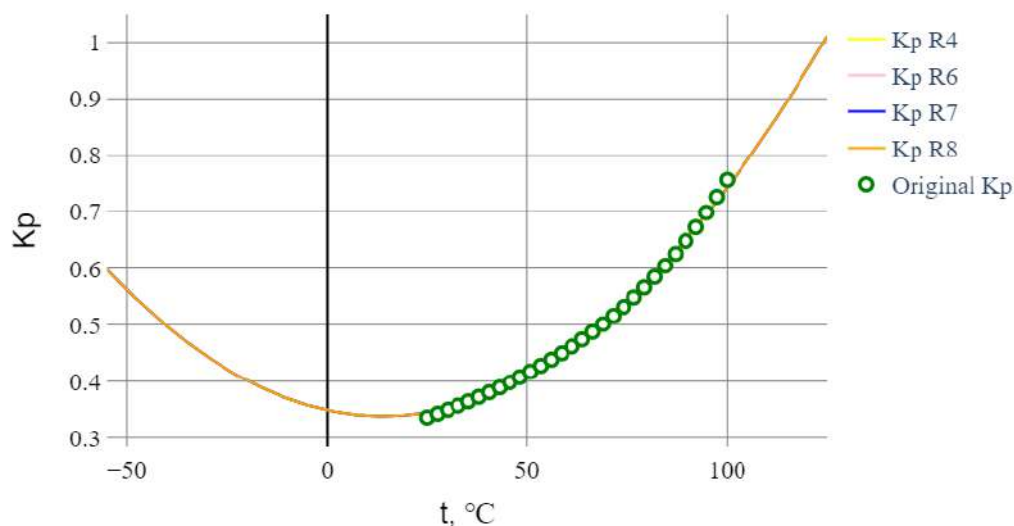


Рисунок 5 – График зависимости спрогнозированных и справочных значений K_p от температуры

Полученные значения K_p были аппроксимированы до полинома 2 степени, так как это наиболее подходящая функция с $RMSE$ и MAE от полученных значений $1.651 \cdot 10^{-15}$ и $1.124 \cdot 10^{-15}$ соответственно. ММ K_p приведена далее (5):

$$K_p = 5.5 \cdot 10^{-5} \cdot t^2 - 1.5 \cdot 10^{-3} \cdot t + 0.35. \quad (5)$$

В отличие от зависимости ММ ЭИО (1) от температуры, новая модель учитывает увеличение вероятности возникновения отказов ТПР при отрицательных температурах, что делает ее более достоверной на отрицательном диапазоне.

Заключение. В рамках данной работы рассмотрены и проанализированы три справочника по надежности ЭРИ [2]-[4], проведены исследования зависимости температурного коэффициента сопротивления и сдвига сопротивления от температуры окружающей среды. Разработана математическая модель коэффициента режима K_p , повышающая достоверность оценки эксплуатационной интенсивности отказов λ_{Σ} тонкопленочных резисторов группы «Прецизионные» при отрицательных температурах. Математическая модель коэффициента режима является полиномом второй степени (5). Таким образом, цель данной работы достигнута. Благодаря уточненной оценке коэффициента режима увеличивается достоверность оценки показателей надежности ТПР для обеспечения целевого уровня надежности РУ, эксплуатирующихся при низких температурах.

Список литературы

1. C. Platt, *Encyclopedia of Electronic Components Volume 1: Resistors, Capacitors, Inductors, Switches, Encoders, Relays, Transistors*, 1st ed., Santa Rosa, CA: Make Community, LLC, 2012. 296 p.
2. Надежность ЭРИ 2006: справочник. – М.: МО РФ, 2006. – 641 с.
3. Reliability prediction handbook for electronic equipment. Chinese Standard GJB/Z 299C-2001.
4. Military Handbook. Reliability prediction of electronic equipment. MIL-HDBK-217F, 1991.
5. F. Zandman and J. Szwarc, "Non-Linearity of Resistance/Temperature Characteristic: Its Influence on Performance of Precision Resistors," Vishay Foil Resistors, Tech. Note 108, pp.1-10, 2018.
6. R. Goldstein, "Interpretation of TCR Specifications for Precision Resistors," Vishay Foil Resistors, Tech. Note 111, pp.1-6, 2018.

7. ГОСТ РВ 20.39.304-98. Менеджмент риска. Комплексная система общих технических требований. Аппаратура, приборы, устройства и оборудование военного назначения. Требования стойкости к внешним воздействующим факторам [Дата введения 1998-07-09]. - М.: МО РФ, 1998. (Руководящий документ).

8. R. B. Watson, "Effects of Material Properties and Heating/Cooling Rate on Strain Gage Thermal Output Observations," In Proc. ICBM12-12th International Conference on Experimental Mechanics, 2004.

9. J. D. Kelleher and B. M. Namee, *Fundamentals of Machine Learning for Predictive Data Analytics: Algorithms, Worked Examples, and Case Studies*. Cambridge, MA: The MIT Press, 2015.

10. G. James, D. Witten, T. Hastie, and R. Tibshirani, *An Introduction to Statistical Learning: with Applications in R*. New York: Springer, 2021.

UDC 62-9

THE INFLUENCE OF NEGATIVE TEMPERATURES ON THE RELIABILITY INDICATORS OF PRECISION RESISTORS

Urkunov A.K., Evseeva N.A.

«HSE University», Moscow, The Russian Federation

Korolev P.S. – PhD, Senior Lecturer, School of Electronic Engineering MIEM HSE

Annotation. Within the framework of this work, a review and analysis of existing mathematical models of the reliability indicators of the "Precision" group's resistors were carried out. Dependences of the operational failure rate and the mode coefficient on temperature are analyzed. Forecasting and theoretical validation of the reliability indicators in the negative temperature range using the machine learning method have been carried out.

Keywords: precision resistor, reliability, operational failure rate, mode factor, negative temperatures