

Методика расчета гамма-процентной наработки и интенсивности отказов резистивных датчиков положения управляющих систем

Антон С. Ишков, кафедра «Радиотехника и радиоэлектронные системы» Пензенского государственного университета, Пенза, Россия, e-mail: ishkovanton@mail.ru

Алексей И. Цыганков, ОАО «НИИ электронно-механических приборов» (НИИЭМП), Пенза, Россия, e-mail: cygankv-aleksejj@rambler.ru



Антон С. Ишков



Алексей И.
Цыганков

Резюме. Цель. Традиционно показатели надежности резистивных датчиков положения на основе проволочных потенциометров, применяемые в различных управляющих системах, подтверждаются путем проведения соответствующих испытаний на надежность или на основе испытаний изделий-аналогов. При отсутствии результатов испытаний изделий-аналогов или из-за существенных изменений в конструкции изделия и используемых материалов необходима методика проведения испытаний на кратковременную безотказность и прогнозирования значений их показателей надежности. Расчет показателей надежности должен основываться на использовании статистической информации об изменении свойства и параметров изделий в процессе испытаний на надежность совместно с применением результатов изучения физических закономерностей, описания кинетики процессов, вызывающих эти изменения. **Методы.** Анализ физических процессов, вызывающих катастрофические измерения в резистивных датчиках положения показал, что под влиянием электрической нагрузки образуются тепловые и электрические поля, вызывающие электрокинетические, термоэлектрические, термодиффузионные эффекты. Причем во всех случаях скорость протекания физических и химических процессов является функцией температуры материала и имеет температурную зависимость, определяемую законом Аррениуса. Проведенные исследования позволили установить, что изменение полного сопротивления датчиков положения в значительной степени определяется процессами, происходящими в резистивном элементе. Зависимость изменения сопротивления от времени может быть описана логарифмическим, экспоненциальным или полиномиальным законом. **Результаты.** Применение математических моделей, описывающих физико-химические процессы, происходящие в резистивных датчиках положения в процессе их эксплуатации, позволило разработать научно обоснованную расчетно-экспериментальную методику испытаний на кратковременную безотказность. Методика включает описание температурных и электрических режимов, условий проведения испытаний на износоустойчивость, а также времени их проведения. Показано, что результаты таких испытаний используются для дальнейшей статистической обработки с целью прогнозирования значений критериев надежности, причем оценка гамма-процентной наработки до отказа и интенсивности отказов проводится путем прогнозирования деградации значений параметров критериев годности. Зависимость значений параметров-критериев годности, полученных в ходе испытаний, аппроксимируется прямой, экспонентой или полиномиальным уравнением. Вид аппроксимирующей линии для прогнозирования значения гамма-процентной наработки до отказа, а также интенсивности отказов определяется аналитическим способом на основе рассмотрения принятой модели, описывающей физико-химические процессы, протекающие в потенциометрах при их эксплуатации. Определение значения параметров-критериев годности для значения гамма-процентной наработки до отказа, требуемого в техническом задании, технических условиях, производится путем экстраполяции аппроксимирующей линии, как продолжения выбранной аппроксимирующей кривой (прямой). **Выводы.** Приведенные в статье результаты испытаний на кратковременную и длительную безотказность соответствуют расчетным значениям показателей надежности, что подтверждает возможность применения разработанной методики расчета. Применение предложенной методики позволяет сократить объем и продолжительность дорогостоящих испытаний на надежность.

Ключевые слова: резистивные потенциометры, испытания на кратковременную безотказность, прогнозирование, гамма-процентная наработка до отказа.

Формат цитирования: Ишков А.С., Цыганков А.И., Методика расчета гамма-процентной наработки и интенсивности отказов резистивных датчиков положения управляющих систем // Надежность. 2017. Т. 17, № 1. С. 22-26. DOI: 10.21683/1729-2646-2017-17-1-22-26

Введение

Резистивные (потенциометрические) датчики положения на основе проволочных потенциометров находят широкое применение в автоматизированных системах наведения, контроля и управления и являются первичными источниками информации таких систем. Несмотря на появление в настоящее время цифровых потенциометров, интерес к проволочным потенциометрам не ослабевает. К числу причин сохранения их популярности следует отнести хорошие точностные характеристики и высокую надежность. Износоустойчивость отдельных образцов может достигать 5 млн. циклов работы. В соответствии с нормативной документацией, критериями надежности потенциометров являются гамма-процентная наработка до отказа (T_γ) и интенсивность отказов. Для подтверждения соответствия потенциометров установленным значениям критериев надежности на практике применяются следующие методы: экспериментальный на основе испытаний на кратковременную и длительную безотказность, расчетно-экспериментальный, расчетный на основе результатов испытаний изделий-аналогов [1]. Обычно при разработке изделий на стадии ОКР проводятся испытания на кратковременную безотказность. На основе полученных результатов испытаний или на основе испытаний изделий-аналогов подтверждаются требуемые критерии надежности потенциометров. Однако использование результатов испытаний изделий-аналогов зачастую бывает затруднительным вследствие отсутствия таких данных или из-за существенных изменений в конструкции изделия и используемых материалов.

Очевидно, что методики подтверждения соответствия потенциометров установленным требованиям по надежности должны сочетать использование статистической информации об изменении свойства и параметров изделий в процессе испытаний на надежность совместно с применением результатов изучения физических закономерностей, описания кинетики процессов, вызывающих эти изменения.

Анализ физико-химических процессов, протекающих в изделиях

Корректность результатов расчета определяется тем, насколько принятая модель соответствует действительной картине физико-химических процессов в изделии. Под влиянием электрической нагрузки в потенциометре образуются тепловые и электрические поля, вызывающие электрокинетические, термоэлектрические, термодиффузионные и другие эффекты. Течение физико-химических процессов приводит к изменению электрических параметров потенциометров.

При электрической нагрузке в материале элементов потенциометра возникают дополнительные поля и физико-химические процессы, основными из которых являются:

- искажение теплового поля (неравномерность нагрева) и связанные с ним термомеханические напряжения;
- искажение электрического поля и возникновение градиента полей, создающего локальные перегревы, вызывающие пробой;
- электролиз, ионизация и другие процессы, протекающие в локальных областях.

Изменение электрического сопротивления потенциометра во времени обусловлено процессами окисления, диффузии и реакциями в твердых телах. Во всех случаях скорость протекания в материалах потенциометра физических и химических процессов является функцией температуры материала и имеет температурную зависимость, определяемую законом Аррениуса [2]

$$\tau^{-1} = v_0 \cdot \exp\left(\frac{-Q}{kT}\right),$$

где v_0 – частотный множитель; Q – энергия активации; τ^{-1} – скорость релаксации; k – постоянная Больцмана.

В процессе эксплуатации в материалах, используемых для изготовления потенциометров, происходят различные физико-химические процессы, которые могут привести к значительным уходам электрического сопротивления потенциометра от номинального значения. Так как удельное электрическое сопротивление каркаса и покрытий значительно превосходит по величине удельное электрическое сопротивление материала, из которого изготовлен резистивный элемент, то следует ожидать, что при изменении в широких пределах удельного электрического сопротивления каркаса и покрытия, полное сопротивление потенциометра с точностью до погрешности измерения будет оставаться постоянным. Таким образом, изменение полного сопротивления потенциометра определяется процессами, происходящими в резистивном элементе.

При прохождении электрического тока в потенциометре выделяется тепло. Количество тепла, выделяющего в единицу времени, определяется законом Джоуля-Ленца. По объему потенциометра в стационарном режиме устанавливается некоторое распределение температур, определяемое конструкцией резистора и током, протекающим через него. Любой процесс, приводящий к изменению структуры и состава, определяется перемещением атомов и ионов, т.е. диффузией. Скорость диффузии определяется коэффициентом диффузии, который зависит от температуры и энергии активации.

В случае химической газовой коррозии существует ряд зависимостей, описывающих изменение толщины окисной пленки как функцию времени. Причем полное сопротивление потенциометра является функцией толщины окисных пленок. Рост пленок может быть описан:

а) параболическим уравнением n -го порядка [3]:

$$h^n = kt + \gamma;$$

б) логарифмическим уравнением [3]:

$$h = k \ln(t) + \gamma,$$

где k – коэффициент, зависящий от температуры; n, γ – постоянные.

Зависимость параметров-критериев годности, в частности, изменение сопротивления, от времени и представляется следующими функциональными зависимостями:

- 1) $Z = a \lg(t)$;
- 2) $Z = at + b$;
- 3) $Z = t^a$.

Зависимость изменения сопротивления во времени от температуры, нагрузки и интенсивности ее включения представляется в виде [4]:

$$Z = Z_0 \cdot e^{\frac{-B}{T}} \cdot P^b (1 + \alpha \cdot f) \cdot f(\tau),$$

где Z – параметр критерий годности – относительное изменение полного сопротивления, %; Z_0 – коэффициент, имеющий размерность параметра-критерия годности; B – энергетический коэффициент, характеризуемый энергией активации потенциометра; T – температура, °K; P – электрическая нагрузка, Вт; f – интенсивность включения, 1/час; α – коэффициент цикличности, $f(\tau)$ – параметр времени.

Данная математическая модель путем преобразований и введения дополнительных обозначений записана в виде линейного полинома с кодированными независимыми переменными [3]:

$$y(x) = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3.$$

Методика оценки потенциометров требованиям надежности

Применение математических моделей, описывающих физико-химические процессы, происходящие в проволочных потенциометрах в процессе их эксплуатации, позволяет разработать научно-обоснованную расчетно-экспериментальную методику испытаний на кратковременную безотказность (1 этап). Результаты таких испытаний используются для дальнейшей статистической обработки с целью прогнозирования значений критериев надежности (2 этап).

Испытание потенциометров на кратковременную безотказность (в течение 1000 часов) проводятся в два цикла. Первый цикл включает 3 этапа:

1. Выдержка в камере тепла при температуре (85 ± 3) °C и при нагрузке постоянного тока, соответствующей рассеиваемой мощности, равной 1 Вт, в течение 400 ч. Точность поддержания напряжения ± 5 %.

2. Выдержка в камере влаги в условиях повышенной влажности воздуха по методу 207-2 ГОСТ 20.57.406 без электрической нагрузки в течение 96 ч.

3. Испытание на износостойчивость проводится при вращении оси потенциометра в пределах не менее 90% рабочего угла и скорости вращения 100 оборотов в минуту с числом поворотов оси 41600 для низкоомных потенциометров и 83300 поворотов для высокоомных потенциометров.

Второй цикл испытаний состоит из следующих этапов:

1. Выдержка в камере тепла (режимы аналогичны первому циклу) в течение 400 ч.

2. Выдержка в нормальных климатических условиях при напряжении постоянного тока, соответствующем рассеиваемой мощности, равной 1 Вт, в течение 96 ч. Точность поддержания напряжения ± 5 %.

3. Испытание на износостойчивость аналогично испытанию на износостойчивость, указанному в первом цикле.

Потенциометры считаются успешно выдержавшими испытания на кратковременную безотказность, если относительное изменение полного сопротивления составило не более ± 2 % и отсутствуют механические повреждения.

Оценка гамма-процентной наработки до отказа при $\gamma = 95$ % и интенсивности отказов проводится путем прогнозирования деградации значений параметров критериев годности (ПКГ) потенциометров, полученных по результатам проведенных испытаний на кратковременную безотказность в следующей последовательности.

1. В каждом i -ом ($i = 1, 2, \dots, N$) временном сечении по измеренным значениям ПКГ (относительное изменение полного сопротивления) Y_{ij} ($j = 1, 2, \dots, n$) определяется значение ПКГ в i -ом временном сечении с учетом дисперсии Y_i :

$$Y_i = m_i \pm \frac{KS_i}{\sqrt{n}},$$

где m_i – среднее значение ПКГ; S_i – среднеквадратическое значение ПКГ в i -ом временном сечении; K – квантиль t -распределения Стьюдента, значения которого выбираются с учетом доверительной вероятности $P = 0,95$.

2. Вычисленные значения Y_i используются как экспериментальные точки, которые затем аппроксимируются одним из уравнений:

- а) прямой;
- б) экспонентой;
- в) полиномиальном уравнении.

Для определения значения гамма-процентной наработки до отказа производится экстраполяция аппроксимирующих линий, как продолжение выбранной кривой (прямой), построенной по методу наименьших квадратов.

Значения Y_i могут быть с одним знаком (плюс или минус) или с разными знаками (плюс и минус). В первом случае аппроксимация производится без учета знака, во втором – ведется аппроксимация по абсолютным значениям отклонения ПКГ. Выбор наиболее удовлетворительной аппроксимирующей линии производится по минимальной невязке экспериментальных и расчетных значений отклонений ПКГ с использованием метода наименьших квадратов.

3. Расчет гамма-процентной наработки для случая аппроксимации прямой линией:

$$Y = b_0 + b_1 x. \quad (1)$$

где x – время испытаний изделий; b_0, b_1 – коэффициенты, вычисляемые по формулам:

$$b_0 = \frac{\sum_{i=1}^N y_i \sum_{i=1}^N x_i^2 - \sum_{i=1}^N y_i x_i \sum_{i=1}^N x_i}{N \sum_{i=1}^N x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^N x_i \right)^2},$$

$$b_1 = \frac{N \sum_{i=1}^N y_i x_i - \sum_{i=1}^N y_i \sum_{i=1}^N x_i}{N \sum_{i=1}^N x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^N x_i \right)^2}.$$

Значение Y для заданного значения гамма-процентной наработки до отказа x определяется в соответствии с формулой (1).

В каждом временном сечении определяется значение разности между значениями экспериментальных точек $Y_{\text{э}}$ и значениями $Y_{\text{р}}$, определяемыми по рассчитанной прямой. Вычисляется сумма невязки:

$$\sum_{i=1}^N S_{\text{пр}}^2 = \sum_{i=1}^N (Y_{\text{р}} - Y_{\text{э}})^2.$$

4. Расчет гамма-процентной наработки для случая аппроксимации экспонентой:

$$Y = 1 - e^{-kx},$$

где k – коэффициент, определяющий скорость нарастания экспоненты.

Для двух последних временных сечений определяются значения коэффициентов k_1, k_2 :

$$-k_1 = \frac{\ln(1 - Y_{1\text{НОРМ}})}{x_1}, -k_2 = \frac{\ln(1 - Y_{2\text{НОРМ}})}{x_2},$$

где x_1, x_2 – соответственно предпоследнее и последнее временное сечение; $Y_{1\text{НОРМ}}, Y_{2\text{НОРМ}}$ – нормированные значения отклонения ПКГ соответственно в предпоследнем (Y_1) и последнем временном сечении (Y_2).

Значения Y_1, Y_2 нормируются по отношению к максимально допустимому отклонению ПКГ ($\Delta Y_{\text{доп}}$) согласно значениям, установленным в техническом задании или техническом условиях:

$$Y_{1\text{НОРМ}} = \frac{Y_1}{\Delta Y_{\text{доп}}}, Y_{2\text{НОРМ}} = \frac{Y_2}{\Delta Y_{\text{доп}}}.$$

В качестве расчетного значения k берется среднее арифметическое значение коэффициентов: $k = \frac{k_1 + k_2}{2}$.

Значение Y для заданного значения гамма-процентной наработки до отказа x определяется в соответствии с формулой:

$$Y = (1 - e^{-kx}) + \Delta Y_{\text{нач}},$$

где $\Delta Y_{\text{нач}}$ – значение ПКГ в первом сечении.

Вычисляется сумма невязки: $\sum_{i=1}^N S_{\text{экс}}^2 = \sum_{i=1}^N (Y_{\text{р}} - Y_{\text{э}})^2$.

5. Расчет гамма-процентной наработки для случая аппроксимации полиномом:

$$Y = b_0 + b_1 x + b_2 x^2 + b_3 x^3,$$

где b_0, b_1, b_2, b_3 – коэффициенты полинома.

Для расчета коэффициентов полинома формируется матрица временных сечений (X) и матрица значений ПКГ (Y):

$$\begin{bmatrix} \sum_{i=1}^N Y_i \\ \sum_{i=1}^N Y_i x_i \\ \sum_{i=1}^N Y_i x_i^2 \\ \sum_{i=1}^N Y_i x_i^3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N & \sum_{i=1}^N x_i & \sum_{i=1}^N x_i^2 & \sum_{i=1}^N x_i^3 \\ \sum_{i=1}^N x_i & \sum_{i=1}^N x_i^2 & \sum_{i=1}^N x_i^3 & \sum_{i=1}^N x_i^4 \\ \sum_{i=1}^N x_i^2 & \sum_{i=1}^N x_i^3 & \sum_{i=1}^N x_i^4 & \sum_{i=1}^N x_i^5 \\ \sum_{i=1}^N x_i^3 & \sum_{i=1}^N x_i^4 & \sum_{i=1}^N x_i^5 & \sum_{i=1}^N x_i^6 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_0 \\ b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{bmatrix}.$$

Значение Y для заданного значения гамма-процентной наработки до отказа x определяется в соответствии с выражением:

$$Y = b_0 + b_1 x + b_2 x^2 + b_3 x^3.$$

Вычисляется сумма невязки: $\sum_{i=1}^N S_{\text{пол}}^2 = \sum_{i=1}^N (Y_i - Y)^2$.

6. Проводится сравнение величин $\sum_{i=1}^N S_{\text{пр}}^2$, $\sum_{i=1}^N S_{\text{экс}}^2$ и определяется наименьшее значение. За вычисленное значение Y для заданного значения гамма-процентной наработки до отказа x (в часах) принимается значение, полученное при использовании аппроксимирующего выражения с наименьшей суммой невязки.

7. Выполняется сравнение вычисленного значения Y с максимально допустимым отклонением ПКГ ($\Delta Y_{\text{доп}}$). Если выполняется условие $Y < \Delta Y_{\text{доп}}$, то потенциометры соответствуют установленным требованиям по гамма-процентной наработке до отказа.

8. Проведение проверки результатов расчетов в случае выбора аппроксимации экспериментальных точек прямой линией или полиномиальным уравнением путем вычисления однородности дисперсии с помощью критерия Кохрена, а также проверки адекватности (пригодности) модели с помощью критерия Фишера.

9. Определение интенсивности отказов изделий в течение гамма-процентной наработки до отказа определяется по формуле:

$$\lambda = \frac{1 - P}{T_{\gamma}}.$$

Заключение

С целью подтверждения описанной выше методики были проведены испытания на кратковременную безотказность проволочных потенциометров в количестве 24 штук. В соответствии с результатами кратковременных испытаний на безотказность не выявлено ни одного катастрофического или параметрического отказа, а электрические параметры резисторов соответствуют установленным требованиям.

В соответствии с предложенной методикой далее выполнена оценка гамма-процентной наработки до отказа, равной $T_\gamma = 10000$ часов.

В результате обработки экспериментальных данных для прогнозирования ПКГ потенциометров на время, равное 10000 часов, выбрана аппроксимация экспонентной. Значение ПКГ(Y) в течение наработки $x = 10000$ часов вычислено по формуле:

$$Y = 1 - e^{-kx} = 1,166 \%$$

При сравнении вычисленного значения $Y = 1,166 \%$ с максимально допустимым отклонением ПКГ $\Delta Y_{\text{доп}} = \pm 2\%$ условие $Y < \Delta Y_{\text{доп}}$ выполняется, следовательно, изделия соответствуют установленным требованиям по гамма-процентной наработке до отказа при $\gamma = 95 \%$. График изменения ПКГ в течение наработки, равной 10000 часов, приведен на рисунке 1.

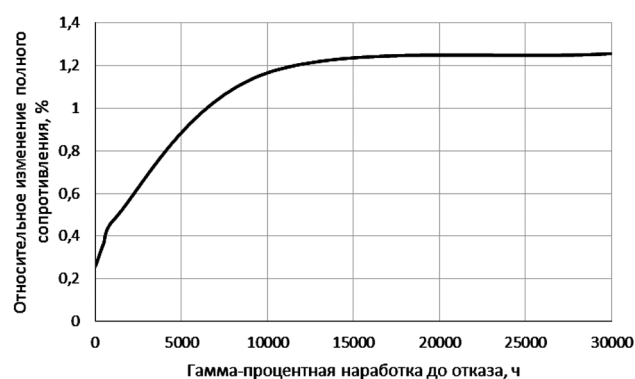


Рисунок 1 – График изменения относительного изменения полного сопротивления в течение наработки, равной 10000 часов

Для подтверждения достоверности расчетов гамма-процентной наработки до отказа были продолжены испытания на длительную безотказность этих же проволочных

потенциометров на время, равное 10000 часов. По результатам испытаний отказов не зафиксировано, значение ПКГ потенциометров не превышает допускаемых значений.

Библиографический список

1. Ишков А.С. Методика оценки гамма-процентной наработки радиоэлектронных компонентов информационно-измерительных систем по результатам кратковременных испытаний / Ишков А.С., Зуев В.Д. // Надежность. – 2015. – № 2, с. 82 – 85.
2. Перроте А.И. Основы ускоренных испытаний радиоэлементов на надежность. – М. – Советское радио, 1969, 229 с.
3. Демидович Б.П. Краткий курс высшей математики: Учеб. пособие для вузов / Б. П. Демидович, В. А. Кудрявцев. – М.: ООО «Издательство Астрель», ООО «Издательство АСТ», 2001. – 656 с.
4. Хауффе К. Реакция в твердых телах и на их поверхности. – М. – Иностранная литература, 1962, 415 с.

Сведения об авторах

Антон С. Ишков – кандидат технических наук, доцент кафедры «Радиотехника и радиоэлектронные системы» Пензенского государственного университета, старший научный сотрудник ОАО «НИИ электронно-механических приборов» (НИИЭМП), Пенза, Россия, тел. +7(841-2) 47-71-19, e-mail: ishkovanton@mail.ru

Алексей И. Цыганков – аспирант Пензенского государственного университета, начальник лаборатории ОАО «НИИ электронно-механических приборов» (НИИЭМП), Пенза, Россия, тел. +7(841-2) 47-71-42, e-mail: cygankv-aleksejj@rambler.ru

Поступила 07.06.2016