“Разгон” резисторов

В.В. Некрасов

27 апреля 2021 г.

1 Цель

В ГОСТ 24238-84 [6] п. 2.3.4.4. сказано, что резисторы должны выдерживать воздействие импульсной нагрузки. Параметры допустимой импульсной нагрузки должны быть указаны в стандартах или ТУ на резисторы конкретных типов. Однако в этих стандартах и ТУ обычно нормируется допустимая мощность для импульса одной длительности.

Попробуем с помощью термодинамики определить зависимость допустимой мощности от длительности импульса. Недостатком этой оценки является невозможность учесть влияние местных перегревов, вызывающих постепенную деградацию.

2 Уравнение нагревания

Предположим, что резисторы обладают равномерным рассеиванием тепла со всей поверхности и бесконечно большой теплопроводностью.

Также предположим, что вся подводимая мощность превращается в тепло Q. Эта теплота частично аккумулируется в теле резистора, повышая его температуру, частично отдаётся во внешнюю среду.

При аккумулировании мощности за время dt потребляется энергия $Q{\cdot}dt$. Это приводит к разогреву тела резистора. Величина изменения температуры $d\Theta = \frac{Q \cdot dt}{G \cdot c}$, где G - масса тела, C - его удельная теплоёмкость.

Разность температуры Θ между телом и окружающей средой вызывает теплообмен. Количество теплоты Q, отдаваемое в окружающее пространство за время dt будет $Q{\cdot}dt = S{\cdot}\lambda{\cdot}\Theta{\cdot}dt$, где S-площадь тела, λ-коэффициент теплопередачи.

Тогда:

$$Q{\cdot}dt = G{\cdot}c{\cdot}d\Theta + S{\cdot}\lambda{\cdot}\Theta{\cdot}dt \tag{1}$$

3 Установившаяся температура и постоянная времени нагревания

Когда пройдёт бесконечное время температура тела достигнет установившегося значения. Тогда $d\Theta = 0$ и $\Theta = \Theta_\infty$. Подставив эти значения в выражение (1). Получим:

$$Q{\cdot}dt = S{\cdot}\lambda{\cdot}\Theta_\infty{\cdot}dt \tag{2}$$

откуда:

$$\Theta_\infty = \frac{Q}{S{\cdot}\lambda} \tag{3}$$

разделим обе части выражения (1) на $S{\cdot}\lambda$.

$$\frac{Q}{S{\cdot}\lambda}{\cdot}dt = \frac{G{\cdot}c}{S{\cdot}\lambda}{\cdot}d\Theta + \Theta{\cdot}dt \tag{4}$$

подставим (3)

$$\Theta_\infty{\cdot}dt = \frac{G{\cdot}c}{S{\cdot}\lambda}{\cdot}d\Theta + \Theta{\cdot}dt \tag{5}$$

обозначим

$$T = \frac{G{\cdot}c}{S{\cdot}\lambda} \tag{6}$$

и получим

$$\Theta_\infty \cdot dt = T \cdot d\Theta + \Theta \cdot dt \tag{7}$$

Величина T имеет размерность времени. Она называется **постоянной времени**.

4 Решение уравнения нагревания

Перепишем уравнение (7) в виде:

$$\frac{dt}{T} = \frac{d\Theta}{\Theta_\infty - \Theta} \tag{8}$$

Проинтегрировав по времени получим:

$$\frac{t}{T} = -\log\left(\Theta_\infty - \Theta\right) + C \tag{9}$$

Постоянная C определяется из начального условия: при $t = 0$ имеем $\Theta = \Theta_0$. Подставив в (9) найдём:

$$C = \log\left(\Theta_\infty - \Theta_0\right) \tag{10}$$

Подставим это значение C в (9).

$$\log \frac{\Theta_\infty - \Theta}{\Theta_\infty - \Theta_0} = -\frac{t}{T} \tag{11}$$

Выразим Θ:

$$\Theta_{(t)} = \Theta_\infty \cdot (1 - e^{-\frac{t}{T}}) + \Theta_0 \cdot e^{-\frac{t}{T}} \tag{12}$$

Для упрощения расчётов примем начальную температуру за 0. Тогда Θ и Θ_∞ будут иметь значения превышения над начальной температурой. Уравнение упрощается:

$$\Theta_{(t)} = \Theta_\infty \cdot (1 - e^{-\frac{t}{T}}) \tag{13}$$

Это уравнение показывает зависимость температуры от времени при подаче постоянной мощности. Из (3) видно что Θ_∞ пропорциональна подводимой мощности.

Обозначим допустимую температуру как Θ_{nom}. Перепишем (13) для $\Theta_\infty = \Theta_{nom} \cdot q$

$$\Theta_{(t)} = \Theta_{nom} \cdot q \cdot (1 - e^{-\frac{t}{T}}) \tag{14}$$

Но температура не должна превышать Θ_{nom}. Тогда:

$$\Theta_{nom} = \Theta_{nom} \cdot q \cdot (1 - e^{-\frac{t}{T}}) \tag{15}$$

Теперь можем узнать за какое время достигается Θ при $\Theta_\infty = \Theta_{nom} \cdot q$.

$$t_{(q)} = -T \cdot log(1 - \frac{1}{q}) \tag{16}$$

5 Исходные данные

В АЛЯР.434110.005 ТУ-ЛУ [1] резисторов Р1-12-0,25 в п. 4.3.6.2 рисунке 2 показано, что предельная температура работы этих резисторов равна 155°. Можно предположить, что при импульсном режимах определённых в п. 4.3.6.5 достигается такая же температура. Тогда допустимый перегрев резистора от максимальной рабочей температуры $155 - 50 = 105°$. Т.е. при коэффициенте перегрузке $q = 20$ и длительности импульса в 1000 мкс достигнет предельной температуры.

Из (3) видно, что температура в установившемся режиме Θ_∞ пропорциональна подводимой мощности.

Подставляем эти данные в (13)

$$105 = 105 \cdot 20 \cdot (1 - e^{-\frac{1 \cdot 10^{-3}}{T}}) \tag{17}$$

Получаем значение постоянной времени T резисторов Р1-12-0,25 в секундах.

$$T = \frac{1}{\log{(1-\frac{1e-3}{20})}} = 19,5\cdot10^{-3} \tag{18}$$

Теперь можно узнать зависимость допустимой мощности от длительности импульса.

Список литературы

[1] Резисторы постоянные непроволочные Р1-12. Технические условия АЛЯР.434110.005 ТУ

[2] Резисторы постоянные непроволочные С2-33. Технические условия ОЖО.467.093 ТУ

[3] Резисторы постоянные непроволочные С2-36. Технические условия ОЖО.467.089 ТУ

[4] Резисторы постоянные непроволочные С5-47. Технические условия ОЖО.467.531 ТУ

[5] Резисторы методы испытания импульсной нагрузкой ГОСТ 21342.14-86

[6] Резисторы постоянные общие технические условия ГОСТ 24238-84

[7] Нагревание и охлаждение идеального однородного твердого тела. URL: https://www.electromechanics.ru/direct-current/591-heating-and-cooling-is-ideal-homogeneous-solid.html