

С. С. РУДЕНКО, инженер, НТУ «ХПИ»;

А. А. ПЕТКОВ, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., НТУ «ХПИ»

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК РЕЗИСТОРОВ ТВО-10 И ТВО-60

В роботі експериментально-розрахунковим шляхом отримані теплофізичні характеристики резисторів ТВО-10 та ТВО-60. Досліджено залежність теплового режиму роботи від величини їх опору та орієнтації у просторі. Отримано співвідношення для розрахунку теплоємності резистора із даних режиму охолодження при степеневій залежності коефіцієнту тепловіддачі від температури.

In the work the thermal characteristics of the TVO-10 and TVO-60 resistors were determined by experimental-calculation method. The thermal conditions dependence on its resistance magnitude and orientation in space was investigated. The relation for the calculation of the resistor thermal capacity from cooling mode data at the power dependence of the heat-transfer coefficient on the temperature was obtained.

В работе экспериментально-расчетным путем получены теплофизические характеристики резисторов ТВО-10 и ТВО-60. Исследована зависимость теплового режима работы от величины их сопротивления и ориентации в пространстве. Получено соотношение для расчета теплоемкости резистора по данным о режиме охлаждения при зависимости степени коэффициента теплоотдачи от температуры.

Постановка проблемы. Резисторы типа ТВО нашли широкое применение в высоковольтных импульсных испытательных устройствах (ВИИУ) в качестве зарядных, защитных и формирующих элементов. Такая распространенность резисторов обуславливает интерес к их тепловому режиму работы, который, кроме амплитудно-временных параметров протекающего электрического тока, зависит также от теплофизических характеристик (ТФХ) резистора: коэффициента теплоотдачи и теплоемкости. Эти характеристики устанавливают связь между рассеиваемой электрической энергией и температурой.

ТФХ определяются конструкцией резистора и характеристиками материалов, из которых он изготовлен. Также, может иметь место, и косвенная зависимость ТФХ от номинального сопротивления.

Учитывая, что с целью оптимизации ВИИУ резисторы ТВО часто используются в режимах более жестких, чем задано в технической документации, определение ТФХ, обеспечивающих их тепловые расчеты является актуальной задачей.

Анализ публикаций. Общие положения метода определения ТФХ резистора отображены в [1]. При этом показано, что его коэффициент теплоотдачи является сложной функцией многих факторов, в большой степени зависящей от температуры перегрева, а также от шероховатости поверхности, коэффициента ее черноты, температуры окружающей среды. Однако в самом

методе такая зависимость не учитывается.

В [2] показана практическая реализация метода определения ТФХ в применении к мощным резисторам, нашедшим широкое распространение в электротехнике. В частности, приведены ТФХ высоковольтных объемных резисторов типа ТВО, за исключением ТВО-10 и ТВО-60.

В [3] получена экспериментальная зависимость коэффициента теплоотдачи от перегрева и определена теплоемкость резистора ТВО-60-51 Ом. Однако, в работе не учтена зависимость ТФХ от величины сопротивления резистора и способа расположения (вертикально или горизонтально), а полученные ТФХ не подтверждены статистикой.

Целью данной работы является определение теплоемкости резисторов ТВО-10 и ТВО-60, с учетом зависимости коэффициента теплоотдачи от перегрева резистора, а также рассмотрение влияния сопротивления резисторов и способа их расположения на ТФХ.

Результаты исследований. Определение коэффициента теплоотдачи проводилось по известной методике [2] с использованием кривых нагрева. Общий вид и электрическая схема установки для их получения показаны на рис. 1. При проведении экспериментов использовались термоэлектрические преобразователи (ТЭП) типа алюмель-хромель I (см. рис. 1, а), конструктивно собранные в блок термоэлектрических преобразователей (БТЭП) 2. ТЭП размещались в центрах поверхностей резистора 3, подключенного к источнику переменного напряжения. Для контроля величин термоэдс на каждом ТЭП использовался вольтметр 4. Нагрев резисторов ТВО-60 производился при подведенных мощностях 10,4; 20; 30; 40 и 55 Вт, а ТВО-10 – 2; 5; 5,4; 6,4; 7 и 10 Вт, при естественной теплоотдаче без обдува. В течении экспериментов отклонение от приведенных значений мощности не превышало 3%.

В работе исследованы кривые нагрева четырех резисторов ТВО-10 с номинальными сопротивлениями 27 и 82 Ом, а также четырех ТВО-60 с номинальными сопротивлениями 24, 51 и 75 Ом.

Определение ТФХ резистора выполнялось на основании уравнения теплового баланса, который для условий исследования имеет вид [1]:

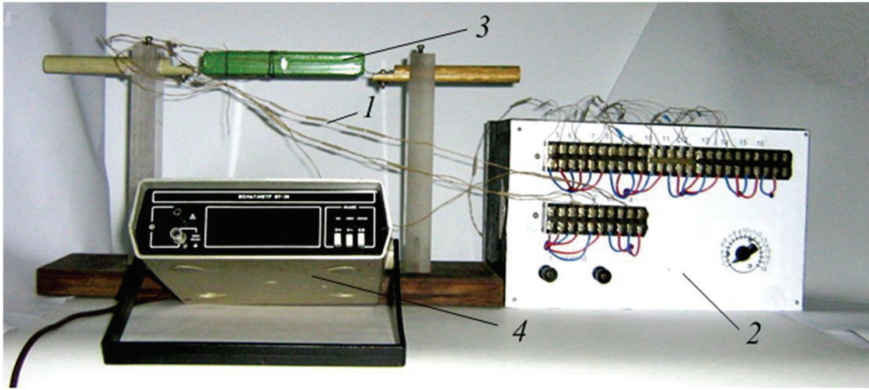
$$cmdT + \alpha STdt = I^2 Rdt, \quad (1)$$

где I – действующее значение тока проходящего через резистор; R – сопротивление резистора; c – удельная теплоемкость резистора; α – коэффициент теплоотдачи; S – площадь поверхности резистора; m – масса резистора.

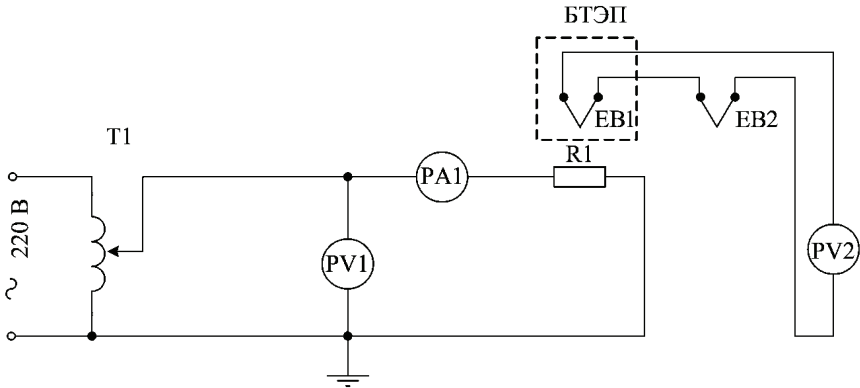
Решение уравнения (1) при условии, что через резистор протекает ток, изменяющийся в начальный момент времени скачком от 0 до I , позволяет рассчитать нагрев поверхности резистора [1]:

$$T = T_0 + \frac{I^2 R}{\alpha S} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right), \quad (2)$$

где T_0 – начальное значение температуры поверхности резистора; t – время протекания тока; τ – постоянная времени нагрева $\tau = cm/\alpha S$.



а



б

Рисунок 1 – Исследовательская установка:
а – общий вид основных элементов; б – электрическая схема

Как известно [1], коэффициент теплоотдачи α определяется по кривым нагрева при условии $t \rightarrow \infty$, как:

$$\alpha = \frac{I^2 R}{S(T_y - T_0)}, \quad (3)$$

где T_y – установившаяся температура, T_0 – температура окружающей среды.

При исследовании влияния расположения резистора и величины его сопротивления на коэффициент теплоотдачи α были получены линейные коэффициенты вариации, при изменении расположения (вертикально или горизонтально) – K_1 и величины сопротивления – K_2 (изменение сопротивления от

24 Ом до 75 Ом и от 27 Ом до 82 Ом для ТВО-60 и ТВО-10 соответственно). При этом коэффициент вариации K_i , %, определялся по соотношению:

$$K_i = \frac{|\alpha_{\max} - \alpha_{\min}|_i}{\bar{\alpha}} \cdot 100, \quad (4)$$

где α_{\max} , α_{\min} и $\bar{\alpha}$ – максимальное, минимальное и среднее значения коэффициента теплоотдачи соответственно.

Полученные значения коэффициента вариации приведены для указанных интервалов изменения перегрева поверхности резистора в табл. 1.

Таблица 1 – Коэффициенты вариации температуры для ТВО-10 и ТВО-60

Интервал перегрева $\Delta T, C^\circ$	ТВО-60		ТВО-10	
	$K_1, \%$	$K_2, \%$	$K_1, \%$	$K_2, \%$
130-110	8,9	10,4	–	–
110-100	–	–	5,6	4,4
90-80	10,9	7,1	–	–
75-65	–	–	5,1	4,5
35-25	9,2	4,0	6,8	6,9

Как видно из табл. 1, у резисторов ТВО-60 и ТВО-10 наблюдается зависимость коэффициента теплоотдачи от способа расположения и сопротивления резистора, однако, коэффициент вариации для всех случаев не превышает 11% и 7,1% соответственно. Указанные обстоятельства позволяют, с целью дальнейшего анализа, объединить экспериментальные данные в единые совокупности по каждому типу резистора (см. рис. 2).

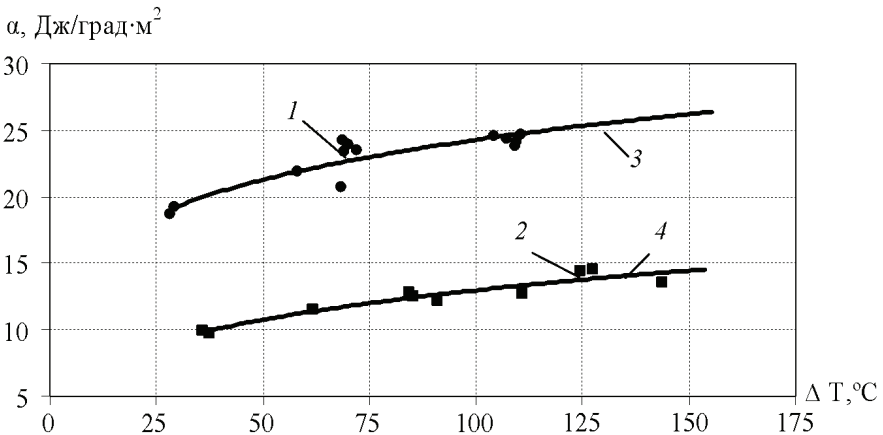


Рисунок 2 – Экспериментальные точки и аппроксимирующие зависимости коэффициента теплоотдачи α соответственно: 1 и 3 – ТВО-10; 2 и 4 – ТВО-60

Расчеты показывают, что экспериментальная зависимость коэффициента теплоотдачи α от перегрева ΔT (см. рис. 2), наиболее точно аппроксимируется степенной функцией (максимальная погрешность не превышает 10 %):

$$\alpha = A \cdot \Delta T^B, \quad (5)$$

где A и B – постоянные коэффициенты.

Процедура получения коэффициентов зависимости (5) из экспериментальных данных реализована в среде электронных таблиц Microsoft Excel.

Для нахождения величины теплоемкости, в отличие от [2], использовались данные не по режиму нагрева, а по режиму охлаждения резисторов. Это обусловлено тем, что резисторы типа ТВО имеют многослойную структуру (см. рис. 3) и их нагрев происходит постепенно: в начале нагревается резистивный элемент 1, далее прогревается керамический слой 2 и в конце лакокрасочное защитное покрытие 3. Таким образом, до достижения установившейся температуры в режиме нагрева, имеет место резко неоднородное распределение температуры в теле резистора и масса вещества, которая поглотила основную величину выделившейся энергии, не равна массе резистора.

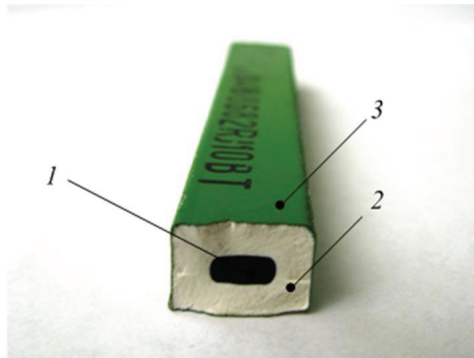


Рисунок 3 – Поперечное сечение резистора ТВО-10

При рассмотрении режима охлаждения (после достижения установившейся температуры при нагреве) вся масса резистора восприняла выделившуюся энергию, распределение температуры более равномерно и полученные ТФХ характеризуют весь объем резистора. В режиме охлаждения правая часть уравнения (1) будет равна нулю. Тогда с учетом зависимости (5), решение уравнения (1), при начальных условиях $t = 0$; $T(0) = T_0 + \Delta T_n$, где ΔT_n – начальный перегрев, будет иметь вид:

$$T = \frac{1}{\sqrt[B]{\frac{ABS t}{cm} + \Delta T_n^{-B}}} + T_0, \quad (6)$$

откуда теплоемкость:

$$cm = \frac{ABSt}{\Delta T^{-B} - \Delta T_{II}^{-B}} \quad (7)$$

В соответствии с полученными экспериментальным путем кривыми охлаждения, из выражения (7) рассчитаны значения теплоемкостей резисторов. При этом, для каждого из ТЭП поставлены в соответствие наборы расчетных значений теплоемкости, для которых были определены среднее значение теплоемкости, среднеквадратическое отклонение σ и сделана оценка грубых ошибок эксперимента в соответствии с методом Грэмбса [4]. При проведении расчетов процент риска принимался равным 5 %.

В табл. 2 приведены результаты статистического анализа по определению средней теплоемкости $(cm)_{cp}$, а также эмпирические выражения для расчета коэффициента теплоотдачи в зависимости от перегрева резисторов типа ТВО–10 и ТВО–60, при изменении номинального сопротивления от 24 до 82 Ом и от 27 до 75 Ом соответственно.

Таблица 2 – Теплофизические характеристики резисторов ТВО-10 и ТВО-60

Тип резистора	Коэффициент теплоотдачи α , Вт/(°С·м ²)	Теплоемкость:		
		среднее значение $(cm)_{cp}$, Дж /°С	σ , Дж/°С	количество данных в выборке, n
ТВО-10	$\alpha = 10,25 \cdot \Delta T^{0,187}$	36,3	3,8	177
ТВО-60	$\alpha = 3,75 \cdot \Delta T^{0,270}$	513	41	95

Выводы:

1. В результате проведения экспериментальных и теоретических исследований стационарных режимов работы резисторов ТВО-10 и ТВО-60, были определены их теплофизические характеристики: зависимость величины коэффициента теплоотдачи от температуры, и средняя теплоемкость.

2. Экспериментальным путем показано, что влияние на температуру поверхности резистора его сопротивления (в указанных в работе пределах) и расположения относительно горизонта не превышают 7,1 и 11% соответственно.

Материалы работы могут быть использованы для дальнейших исследований и тепловых расчетов резисторов, при их эксплуатации в режимах характерных ВИИУ, а также для определения ТФХ других типов резисторов.

Список источников информации: 1. Смирнов С.М. Генераторы импульсов высокого напряжения : монография / С.М. Смирнов, П.В. Терентьев. – М.-Л. : Энергия, 1964. – 240 с. 2. Зинкевич Н.М. Перегрузочная способность резисторов / Н.М. Зинкевич // Электронная техника. – 1970. – № 1. – С. 73-83. 3. Руденко С.С. Экспериментальные исследования теплофизических характеристик высоковольтных резисторов ТВО-60 / С.С. Руденко, А.А. Петков // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Збірник наукових праць. Тематичний випуск : Техніка та електрофізика високих напруг. – Харків : НТУ «ХПІ», 2009. – № 39. – С. 162-168. 4. Колкер Я.Д. Математический анализ точности механической обработки / Я.Д. Колкер. – К : Техника, 1976. – 200 с.

Поступила в редколлегию 25.08.2011.