

## ТЕХНИКА ПРОВОДНОЙ СВЯЗИ

УДК 621.318.5

О. Г. КАРПОВ, С. П. ПРОТАСЕНЯ

## ИССЛЕДОВАНИЕ НАГРЕВА ОБМОТОК РЕЛЕ В УСЛОВИЯХ ГЛУБОКОГО ВАКУУМА

Теоретически рассмотрена зависимость температуры обмотки реле от внешней температуры для разных коэффициентов излучения и приведены экспериментальные данные по нагреву реле типов РЭС47, РЭС48, РЭС60 в условиях глубокого вакуума при различных температурах.

Исследования нагрева обмоток реле в условиях вакуума [1—4] рассматривались при отсутствии внешнего нагрева. Оценка факторов, влияющих на повышение температуры обмоток в условиях глубокого вакуума при внешнем нагреве, представляет большой практический интерес для изыскания путей уменьшения перегрева и выбора допустимых режимов эксплуатации.

В вакууме практически отсутствует конвективный теплообмен и теплопроводность среды, перенос тепловой энергии от нагретого тела осуществляется излучением. Математически это описывается законом Стефана-Больцмана [5]:

$$P = \varepsilon \sigma_0 T^4,$$

где  $P$  — мощность излучения с поверхности в  $1 \text{ см}^2$ , Вт;

$\varepsilon$  — постоянная излучения;

$\sigma_0$  — постоянная Стефана-Больцмана, равная  $5,67 \times 10^{-12} \text{ Вт} \cdot \text{см}^{-2} \times \text{град}^{-4}$ ;

$T$  — температура излучающей поверхности,  $^{\circ}\text{К}$ .

При теплообмене между двумя поверхностями, когда одна поверхность много больше другой, излучаемая мощность равна

$$P = \varepsilon \sigma_0 (T^4 - T_{\text{окр}}^4),$$

где  $T_{\text{окр}}$  — окружающая температура,  $^{\circ}\text{К}$ .

Для космического пространства  $T_{\text{окр}}$  принимается равной  $4^{\circ}\text{К}$ , т. е.  $T_{\text{окр}} \ll T$ , и тогда

$$P = \varepsilon \sigma_0 T^4.$$

При тепловом равновесии можно считать, что мощность, поступающая на поверхность реле от внешнего источника, равна мощности, излу-

чаемой с его поверхности. Тогда удельная мощность, подводимая к реле от внешнего источника нагрева, равна

$$P_{\text{н}} = \varepsilon \sigma_0 T_1^4, \quad (1)$$

где  $T_1$  — установившаяся температура корпуса, вызванная внешним нагревом.

При включении постоянного напряжения на обмотку выделяемая мощность будет уменьшаться за счет увеличения сопротивления обмотки при нагреве. В установившемся тепловом режиме удельная мощность, подводимая к реле,

$$P_U = \frac{U^2}{R_{\text{н}} \cdot S}, \quad (2)$$

где  $U$  — напряжение на обмотке, В;

$S$  — площадь поверхности, с которой происходит излучение, см<sup>2</sup>,

$R_{\text{н}}$  — сопротивление обмотки нагретого реле, Ом.

Сопротивление обмотки из медного провода определяется по формуле [6]:

$$R_{\text{н}} = R_0 \left[ 1 + \frac{1}{234,5} \frac{1}{t_0 - t_0} (t - t_0) \right], \quad (3)$$

где  $R_0$  — сопротивление обмотки при температуре ( $t_0$ ), Ом;

$t_0$  — температура, при которой измерялось сопротивление обмотки, °C;

$t$  — температура нагретой обмотки, °C.

Заменив в формуле (3) температуру в °C на °K, т. е.  $t_0 = T_0 - 273$  и  $t = T - 273$ , и преобразовав выражение, получим

$$R_{\text{н}} = R_0 \frac{T - 38,5}{T_0 - 38,5}. \quad (4)$$

Подставив значение  $R_{\text{н}}$  в формулу (2), найдем

$$P_U = \frac{U^2 (T_0 - 38,5)}{R_0 (T - 38,5) \cdot S}. \quad (5)$$

Мощность, излучаемая единицей поверхности реле,

$$P_{\text{л}} = \varepsilon \sigma_0 T_{\text{k}}^4,$$

где  $T_{\text{k}}$  — температура поверхности кожуха реле.

Температуру кожуха можно представить как

$$T_{\text{k}} = T - \frac{U^2}{R_{\text{н}}} \cdot R_t,$$

где  $R_t$  — внутреннее тепловое сопротивление кожух-обмотки, град/Вт. Тогда

$$P_{\text{л}} = \varepsilon \sigma_0 \left[ T - \frac{U^2 (T_0 - 38,5)}{R_0 (T - 38,5)} \cdot R_t \right]^4. \quad (6)$$

Составим уравнение теплового баланса реле, исходя из того, что мощность, подводимая к реле от внешнего нагрева и от питания обмотки рабочим напряжением, равна мощности, излучаемой с поверхности реле, т. е.

$$P_{\text{л}} = P_U + P_{\text{н}}$$

или

$$\varepsilon \sigma_0 \left[ T - \frac{U^2 (T_0 - 38,5)}{R_0 (T - 38,5)} \cdot R_t \right]^4 = \frac{U^2 (T_0 - 38,5)}{R_0 (T - 38,5) \cdot S} + \varepsilon \sigma_0 T_1^4. \quad (7)$$

Из данного уравнения можно определить температуру обмотки реле  $T$  при внешнем нагреве и включенном напряжении на обмотке.

Ввиду сложности аналитического решения данного уравнения применим графический метод.

Рассмотрим уравнение (7) для случая нагрева реле РЭС48 при внешней температуре  $t_1 = +125^\circ\text{C}$  ( $T_1 = 398^\circ\text{K}$ ) и при следующих исходных данных:  $R_0 = 600 \Omega$ ,  $t_0 = -20^\circ\text{C}$  ( $T_0 = 293^\circ\text{K}$ ),  $U = 36 \text{ В}$ ,  $S = 15,2 \text{ см}^2$ ,  $\varepsilon = 0,9$  (по данным [5] для лаков и красок),  $R_t = 25 \text{ град/Вт}$ .

Подставим численные значения принятых величин в уравнение (7); и каждый член уравнения, представляющий зависимость удельной мощности от температуры  $T$ , изобразим на графике (рис. 1). Кривая 1, левый член уравнения, представляет зависимость мощности, излучаемой с единицы поверхности, от температуры. Прямая 2, второй

Рис. 1. Графическое определение температуры обмотки реле РЭС48 в условиях вакуума при решении уравнения (7).

член правой части уравнения, соответствует удельной мощности, подводимой к реле для достижения температуры  $T_1 = 398^\circ\text{K}$ . Кривая 3, первый член правой части уравнения, характеризует уменьшение подводимой на обмотку мощности при постоянном напряжении с увеличением температуры.

Из кривой 1 вычтем кривую 3, результирующая зависимость представлена кривой 4. Из полученной кривой 4 вычтем постоянную 2, и точка пересечения результирующей кривой с осью температур даст решение уравнения. Можно упростить данную операцию, сместив ось температур на прямую 2. Точка пересечения  $a$  кривой 4 с перенесенной осью  $T$  является решением уравнения (7) для принятых исходных данных. Этой точке соответствует температура  $+194^\circ\text{C}$ .

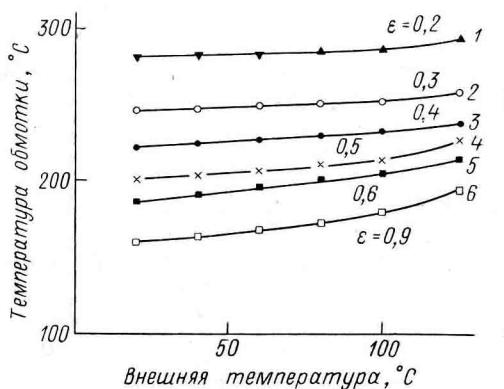
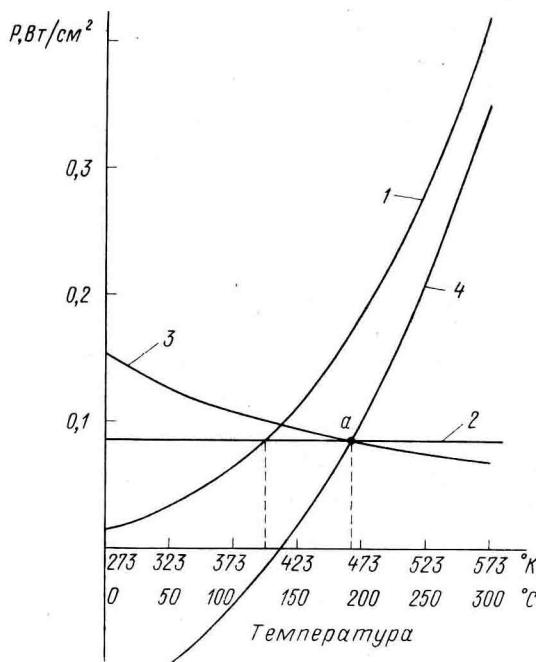


Рис. 2. Расчетные зависимости температуры обмотки реле РЭС48 (при  $U = 36 \text{ В}$ ) от внешней температуры в условиях вакуума для разных коэффициентов излучения.

Аналогично найдем решения данного уравнения для других значений внешних температур  $T_1$  и различных постоянных излучения  $\varepsilon$ .

Найденные решения представлены на графиках (рис. 2), показывающих, как изменяется температура обмотки реле в зависимости от внешней температуры для разных постоянных излучения. Графики показывают влияние коэффициента излучения на уменьшение температуры нагрева реле.

Экспериментальные исследования по нагреву обмоток реле в условиях вакуума при различных внешних температурах проводились в криогенной высоковакуумной камере КВВК-1 Физико-технического института низких температур АН УСР, обеспечивающей имитирование ряда

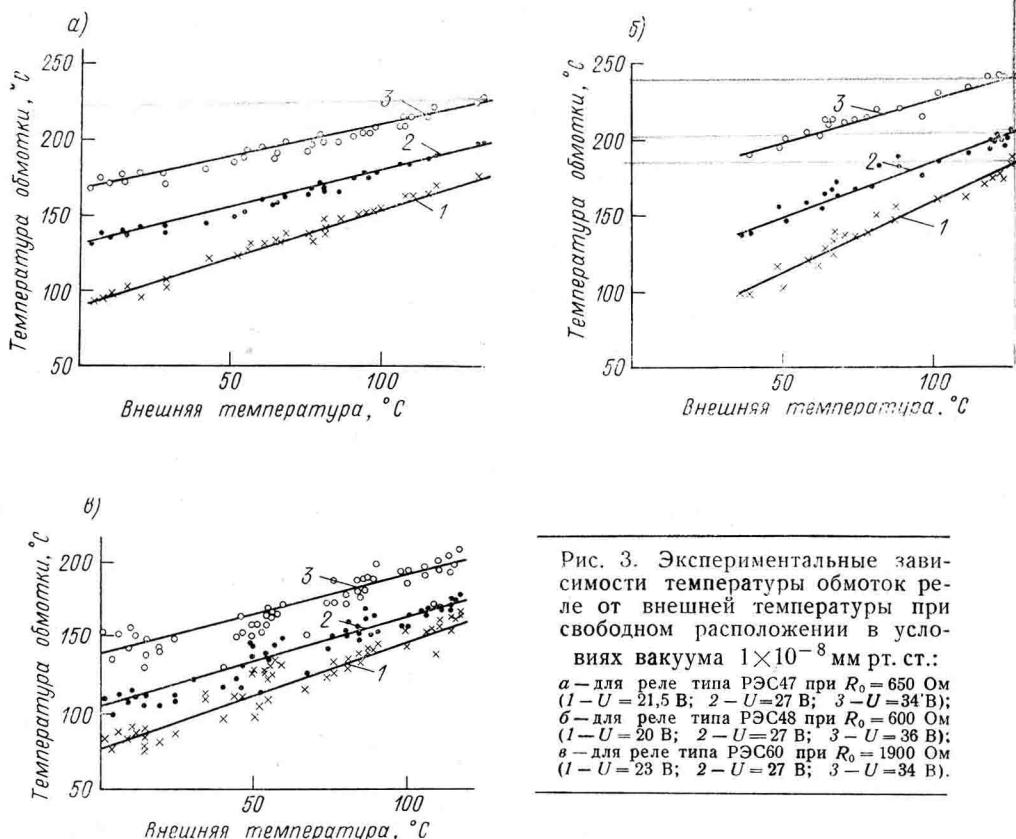


Рис. 3. Экспериментальные зависимости температуры обмотки реле от внешней температуры при свободном расположении в условиях вакуума  $1 \times 10^{-8}$  мм рт. ст.:

*а* — для реле типа РЭС47 при  $R_0 = 650$  Ом ( $1 - U = 21.5$  В;  $2 - U = 27$  В;  $3 - U = 34$  В);  
*б* — для реле типа РЭС48 при  $R_0 = 600$  Ом ( $1 - U = 20$  В;  $2 - U = 27$  В;  $3 - U = 36$  В);  
*в* — для реле типа РЭС60 при  $R_0 = 1900$  Ом ( $1 - U = 23$  В;  $2 - U = 27$  В;  $3 - U = 34$  В).

физических условий космического пространства, а именно: высокий вакуум порядка  $1 \times 10^{-8}$  мм рт. ст., малый коэффициент возврата молекул на испытуемый объект, тепловой сток, эквивалентный теплообмену испытуемого объекта с «холодным космосом», а также позволяющий производить нагрев исследуемых изделий. Нагрев испытуемых реле до заданной температуры обеспечивался кварцевыми излучателями типа КИО-1000, находящимися в камере.

Температура, воздействующая на исследуемые образцы, определялась с помощью пленочного датчика сопротивления типа ИС-544, установленного на одном из реле. Фактическая температура каждого реле находилась по известной формуле [6].

$$t = \frac{R_n - R_0}{R_0} (234,5 + t_0) + t_0 . \quad (8)$$

Исследования проводились на 15 образцах реле трех типов: РЭС48 (покрытых лаком УР231), РЭС47 и РЭС60 (покрытых грунтом ВЛ-02 и лаком УР231). Для предотвращения разгерметизации реле РЭС48 и РЭС60 их герметизация была выполнена припоеем ПСр 2,5. Монтировались реле в два ряда на расстоянии 20 мм друг от друга.

Нагрев обмоток определялся при включении минимального, номинального и максимального рабочего напряжений. Температура обмоток рассчитывалась по изменению их сопротивления в соответствии с формулой (8). Сопротивление нагретого реле измерялось автоматическим омметром не более чем через 3 с после отключения напряжения.

Зависимости температуры обмоток от внешней температуры в условиях вакуума  $1 \times 10^{-8}$  мм рт. ст. для исследуемых типов реле приведены на рис. 3.

При расположении реле в два ряда на минимальном расстоянии друг от друга имеет место взаимный нагрев, вследствие чего температура обмоток реле РЭС48 увеличивается на  $60^\circ\text{C}$ , РЭС60 на  $30^\circ\text{C}$ , РЭС47 на  $10^\circ\text{C}$  в условиях вакуума при внешней температуре  $+125^\circ\text{C}$ .

Температура обмоток в условиях глубокого вакуума при воздействии внешней температуры до  $+125^\circ\text{C}$  значительно превышает допустимое значение для применяемого намоточного провода ПТВр—  $+160^\circ\text{C}$  (опытные данные для реле).

Уменьшить нагрев обмоток в этих условиях можно путем применения импульсных режимов питания обмоток, выбор которых освещен в [7].

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Витенберг М. И. Зависимость температуры перегрева обмоток реле от величины атмосферного давления. «Вопросы радиоэлектроники», сер. ТПС, вып. 3, 1967.
2. Витенберг М. И. Перегрев обмоток реле при низких значениях атмосферного давления. «Вопросы радиоэлектроники», сер. ТПС, вып. 4, 1973.
3. Ройзен В. З., Трофимов О. П., Калашников О. В. Исследование перегрева обмоток реле РЭС49 в условиях пониженного атмосферного давления. «Вопросы радиоэлектроники», сер. ТПС, вып. 4, 1973.
4. Richard J. Bache, Relay coil temperature rise at simulated outer space pressure levels. „17<sup>th</sup> Annual National Relay Conference“, Oklahoma, 1969.
5. Буль Б. К. и др. Основы теории электрических аппаратов. Изд. «Высшая школа», 1970.
6. Витенберг М. И. Расчет электромагнитных реле. Изд. «Энергия», 1966.
7. Ивакин Б. Ф., Гольдман Б. Е. Работа дистанционных поляризованных переключателей в условиях повышенной температуры. «Вопросы радиоэлектроники», сер. ТПС, вып. 4, 1970.

Статья поступила 3 января 1975 г.