

УДК 621.762

**НАГРЕВ И ПРОПЛАВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КОНТАКТОВ ПРИ КОММУТАЦИИ**

**А. П. Калинов, И. А. Нестеров**

Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского  
ул. Первомайская, 20, г. Кременчуг, 39600, Украина. E-mail: scenter@kdu.edu.ua

Приведены исследования зависимости мощности, выделяющейся энергии и глубины проплавления контактов в зависимости от величины тока, индуктивности нагрузки, а также теплофизических свойств материала контакта. Показана зависимость энергии, выделяющаяся на контактах, и глубины проплавления контактов от характера нагрузки и времени размыкания. Приведенные расчеты дают возможность подбирать контактные материалы для низковольтных электроаппаратов с учетом характера нагрузки, обеспечивающие минимальную эрозию контактных поверхностей.

**Ключевые слова:** контакт, коммутация, температура плавления, глубина проплавления.

**НАГРІВ І ПРОПЛАВЛЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ КОНТАКТІВ ПРИ КОМУТАЦІЇ**

**А. П. Калінов, І. О. Нестеров**

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського  
вул. Першотравнева, 20, м. Кременчук, 39600, Україна. E-mail: scenter@kdu.edu.ua

Наведено дослідження залежності потужності, енергії, що виділяється, і глибини проплавлення контактів залежно від величини струму, індуктивності навантаження, а також теплофізичних властивостей матеріалу контакту. Показано залежність енергії, що виділяється на контактах, і глибини проплавлення контактів від характеру навантаження й часу розмикання. Наведені розрахунки дають можливість підбирати контактні матеріали для низьковольтних електроапаратів з урахуванням характеру навантаження, що забезпечує мінімальну ерозію контактних поверхонь.

**Ключові слова:** контакт, комутація, температура плавлення, глибина проплавлення.

**АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ.** Работоспособность электромеханического коммутационного аппарата, его надежность в значительной мере зависят от физико-механических свойств материала контактных деталей [1]. Независимо от типа, электроконтактные материалы должны иметь высокие показатели тепло- и электропроводности, которые могут колебаться в заданных границах в зависимости от области применения.

Конструктивные размеры электрических контактов зависят от энергии, выделяющейся в межконтактном промежутке, их материала, характера нагрузки, рода тока. Поэтому актуальной является задача исследования процессов при коммутации для подбора контактных материалов для низковольтных электроаппаратов с учетом характера нагрузки, обеспечивающие минимальную эрозию контактных поверхностей.

Целью работы является исследование зависимости выделяющейся энергии и определяемой этим глубины проплавления контактов в зависимости от величины тока, индуктивности нагрузки, а также теплофизических свойств материала контакта.

**МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ.**

1. *Мощность и энергия, выделяющаяся на поверхности контактов.*

Сопротивление размыкающихся контактов  $R_t$  изменяется от 0 до  $\infty$  и зависит от времени  $t$  ( $0 \leq t \leq t_0$ ):

$$R_t = R \frac{t}{t_0 - t},$$

где  $R$  – активное сопротивление отключаемой нагрузки;  $t_0$  – время размыкания контакта.

Поэтому процесс размыкания цепи с индуктивностью  $L_U$  и сопротивлением  $R$  равноценен введе-

нию последовательно в такую цепь сопротивления  $R_t$  в соответствии с рис. 1.

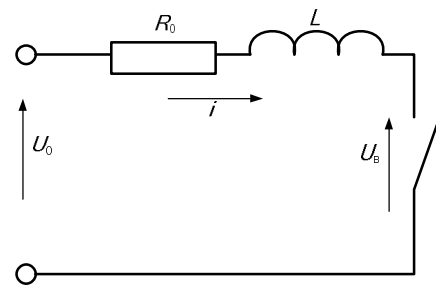


Рисунок 1 – Расчетная схема для исследования процессов при размыкании контакта

В этом случае закон изменения тока в цепи описывается дифференциальным уравнением:

$$iR + L \frac{di}{dt} + U_V = U_0, \tag{1}$$

где  $U_V = iR_t$  – напряжение на контактах выключателя.

Предполагаем, что ток в цепи и напряжение на контактах при отключении чисто активной нагрузки изменяются пропорционально времени.

В этом случае уравнение (1) – линейное и его решение имеет следующий вид:

$$i = I_0 \frac{t_0 - t}{t_0} B; \quad U_V = U_0 \frac{t}{t_0} B, \tag{2}$$

где  $I_0$  и  $U_0$  – ток нагрузки и напряжение на ней до размыкания контактов.

Коэффициент  $B$ , зависящий от характера цепи (соотношения  $R$  и  $L$ ) и от времени  $t_0$ , определяется как

$$B = \frac{\left(\frac{t_0-t}{t_0}\right)^{a-1} - \alpha}{1-\alpha}$$

Параметр  $\alpha = Rt_0/L$  представляет, по существу, отношение активной энергии, потребляемой цепью за время размыкания контактов, ко всей энергии, запасенной в индуктивностях цепи в виде энергии магнитного поля ( $W_L = 0,5LI_0^2$ ). Для чистой активной цепи ( $L = 0$ )  $\alpha = \infty$ ; при чисто индуктивной ( $R = 0$ ) нагрузке  $\alpha = 0$ .

Мощность на размыкающихся контактах в каждый момент времени равна

$$P = Ui = U_0I_0 \frac{t_0-t}{t_0} \frac{t}{t_0} B^2$$

Обозначив  $t/t_0 = \beta$ , получим

$$P = U_0I_0\beta(1-\beta) \left[ \frac{(1-\beta)a-1-\alpha}{1-\alpha} \right]^2 = U_0I_0\gamma_1 \quad (3)$$

Для упрощения расчетов изменение мощности на контактах можно принять по закону:

$$P = U_0I_0A\beta^\varepsilon; \eta = A \left(\frac{t}{t_0}\right)^\varepsilon = A \quad (4)$$

Значение коэффициентов  $A$  и  $E$  для определения мощности при разных значениях параметра  $\alpha$  могут быть приближенно найдены из выражений  $A = 5/3\sqrt{a}$ ;  $\varepsilon = 4/3\sqrt[3]{a}$ , а также из графика (рис. 2).

По известной мощности определяется расход энергии на контактах в любой момент времени их размыкания.

Энергия, выделяющаяся на контактах до момента  $t_1$  (меньшего  $t_0$ ), составляет:

$$Q = \int_0^1 U_0I_0A \left(\frac{t}{t_0}\right)^\varepsilon dt,$$

или (5)

$$Q = U_0I_0 \frac{A}{\varepsilon+1} \frac{t^{\varepsilon+1}}{t_0^\varepsilon}$$

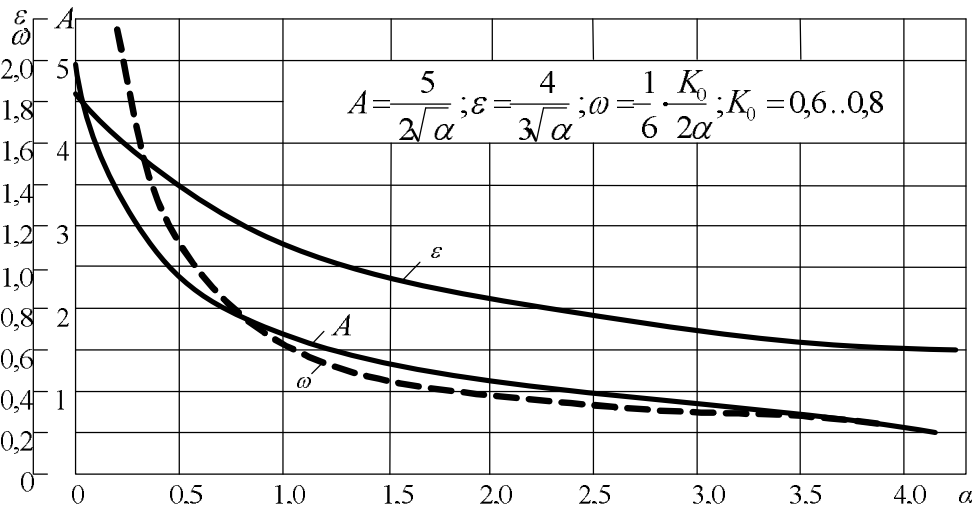


Рисунок 2 – Зависимость коэффициентов  $A$ ,  $\omega$  и  $\varepsilon$  от  $\alpha$

Вся энергия, затрачиваемая в контактах за время коммутации и определяющая их нагрев и эрозию (плавление), составляет

$$W = \int_0^{t_0} uidt = U_0I_0 \int_0^{t_0} \frac{t_0-t}{t_0} \frac{t}{t_0} B^2 dt \quad (6)$$

После интегрирования

$$W = U_0I_0t_0 \frac{1}{(1-\alpha)^2} \left[ \frac{1}{2\alpha(2\alpha+1)} - \frac{2\alpha}{(\alpha+1)(\alpha+2)} + \frac{\alpha^2}{6} \right]$$

Из выражения (6) видно, что общая коммутируемая энергия на контактах за время их размыкания составляет

$$W = \frac{1}{6}U_0I_0t_0 + K_0 \frac{LI_0^2}{2},$$

или

$$W = U_0I_0t_0\omega,$$

где  $K_0$  – коэффициент, учитывающий характер нагрузки ( $K_0=0,7\dots 0,8$ ).

При чисто индуктивной нагрузке  $K_0=1, 0$ ; при чисто активной –  $K_0=0$ .

Составляющая  $\frac{1}{6}U_0I_0t_0$  – это энергия, расходуемая на контактах при отключении чисто активной нагрузки.

Коэффициент  $\omega$  зависит от характера цепи и равен

$$\omega = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{3} + \frac{K_0}{\alpha} \right)$$

Многочисленными исследованиями [2] установлено, что энергия, отдаваемая в тело контактов и расходуемая на их эрозию, составляет примерно 90 % от всей энергии, расходуемой в разрядном промежутке. На излучение расходуется не более 7 %.

Характер нагрева массы контактов, температура точек внутри объема контакта, изменение ее во времени устанавливается на основании решения уравнения теплопроводности [3, 4].

2. *Определение момента наступления плавления контактов.*

Так как сопротивление контактов происходит по поверхности и энергия, выделяющаяся в контактной промежутке, поступает в массу контакта через поверхность, то следует считать, что на поверхности в течение времени  $t$  действует плоский источник теплоты.

Уравнение теплопроводности в этом случае такое, при котором изотермические поверхности являются концентрическими сферами (рис. 3) и температура точек зависит только от координаты  $x$  и времени  $[3, 4]$ , т.е.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{2}{x} \frac{\partial T}{\partial x} \right), \quad (7)$$

где  $T$  – температура точек нагреваемого объема контакта;  $\alpha$  – коэффициент температуропроводности.

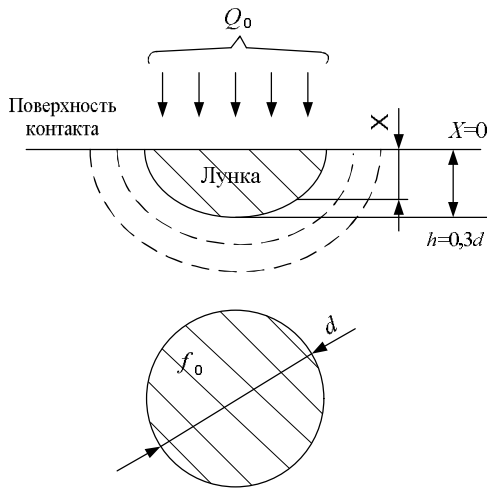


Рисунок 3 – К определению глубины проплавления контакта

В случае действия плоского источника теплоты решение уравнения (7) находится в виде

$$T = \frac{Q}{2\sqrt{\pi \alpha t}} e^{-\frac{x^2}{4 \alpha t}}, \quad (8)$$

где  $Q$  – сила плоского мгновенного источника теплоты, расположенного на плоскости разъема, непосредственно на поверхности контакта при  $x=0$ :

$$Q = \frac{Q_0}{\gamma c}, \quad (9)$$

где  $Q_0$  – количество теплоты, выделяемой единицей поверхности плоского источника;  $\gamma$  и  $C$  – плотность и теплоемкость материала контакта.

Поэтому если энергия, выделяющаяся в двух контактах за период их размыкания  $t_0$ , составляет  $W$ , то сила плоского источника в выражении (9) составляет:

$$Q = \frac{W}{2\gamma c f_0},$$

где  $f_0$  – величина контактной поверхности.

Решение уравнения (7) определяет распределение температуры на глубину  $X$  от поверхности контактов за время  $t$ .

Ввиду того, что плавление контактов наступает на их поверхности (при  $X = 0$ ), из уравнения (7) можно найти силу источника теплоты, при котором за время  $t_1$  температура поверхности достигает температуры плавления  $T_{melt}$ :

$$Q = T_{melt} 2\sqrt{\pi \alpha t_1} = \frac{Q_0}{\gamma c}.$$

Общее количество энергии, поступившее в оба размыкающихся контакта за время  $t_1$ , и есть общий тепловой поток, который доводит температуру их поверхностей до плавления, где  $C_0$  – теплоемкость расплавленного металла,  $q_{ev}$  – скрытая теплота испарения.

Расчетная температура испарения металла

$$T_{calc} = T_b + \frac{q}{c} + \frac{q_{ev}}{c_0}. \quad (10)$$

Принимаем, что все количество теплоты, выделяющееся в зоне размыкания контактов, равно энергии, затрачиваемой в контактной паре за время коммутации.

Становится возможным определить глубину проплавления контактов, исходя из решения уравнения теплопроводности (8), из которого следует:

$$e^{-\frac{h^2}{4 \alpha t_0}} = \frac{T_{calc} 2\sqrt{\pi \alpha t_0}}{Q},$$

где  $h$  – глубина проплавления, координата точек, температура которых достигает  $T_{расч}$  к концу размыкания контактов  $t_0$ . Сила плоского источника, действующего на один контакт через всю энергию, выделяющуюся в контактной промежутке  $W$  за время  $t_0$ :

$$Q = \frac{W}{2\gamma c f_0},$$

то

$$e^{-\frac{h^2}{4 \alpha t_0}} = \frac{W}{4\gamma c T_{calc} \sqrt{\pi \alpha t_0} f_0}, \quad (11)$$

где  $W=U_0 I_0 t_0 \omega$ .

Величина контактной поверхности  $f_0$  при плавлении зависит от глубины проплавления.

Экспериментально установлено соотношение между размерами расплавленной зоны:

$$h = 0,3d_0; f_0 = \frac{1}{4}\pi d_0^2 = 0,95h^2 = \phi h^2.$$

Определение глубины проплавления  $h$  сводится к решению трансцендентного уравнения:

$$h^2 e^{-\frac{h^2}{4 \alpha t_0}} = \frac{U_0 I_0 \omega \sqrt{t_0}}{4\phi b T_{calc}}, \quad (12)$$

где  $b = \sqrt{\pi \lambda c \gamma}$  – коэффициент, который определяется только теплофизическими характеристиками материала контакта.

Практически длительность размыкания электрических контактов находится в пределах  $t_0=0,01-0,03$  с, глубина проплавления составляет  $h=0,1-0,6$  мм.

Поэтому отношение  $\frac{h^2}{4\alpha t_0} = 0,08..0,11$ , т.к. коэффициент температуропроводности для металлов  $d=0,3..0,4$ .  $l = \frac{h^2}{4\alpha t_0}$ .

Глубина проплавления одного контакта может определяться из выражения

$$\frac{1}{2} U_0 I_0 \frac{A}{\varepsilon + 1} \frac{t_1^{\varepsilon+1}}{t_0^\varepsilon} = T_{melt} 2\sqrt{\pi\alpha t_1} \gamma c f_0.$$

Из этого равенства определяется момент, при котором наступает плавление поверхности контактов:

$$t_1^{2\varepsilon+1} = \left[ \frac{t_0^\varepsilon (\varepsilon + 1) 4\sqrt{\pi\alpha} \gamma c T_{melt} f_0}{AU_0 I_0} \right]^2.$$

Так как  $a = \lambda/c\gamma$ , то

$$t_1 = \left[ \frac{4\sqrt{\pi\lambda c} T_{melt} (\varepsilon + 1) t_0^\varepsilon f_0}{AU_0 I_0} \right]^{\frac{2}{2\varepsilon+1}}.$$

При  $\varepsilon=1$

$$t_1 = \sqrt{\pi\gamma c \lambda \left( \frac{8T_{melt} t_0 f_0}{AU_0 I_0} \right)^2}.$$

Чем выше температура плавления  $T_{melt}$ , тем позже наступает оплавление контактной поверхности. Для цепей с индуктивностью, для которых коэффициент  $A$  больше, момент наступления плавления контактов сокращается.

3. Расчет глубины проплавления контактов.

Теплота, поступающая в контакт в течение всего времени коммутации, нагревает его объем и плавит некоторую часть материала, определяемого глуби-

ной проплавления контактов, к моменту окончания их размыкания  $t_0$ .

В отдельных случаях наступает не только плавление, но и кипение металла и его испарение.

Для определения глубины проплавления введем понятие эффективной температуры, определяемой скрытой теплотой плавления металла.

Эффективная температура – это температура, до которой была бы нагрета расплавленная масса металла при затрате на это теплоты, определяемой скрытой теплотой плавления:

$$m_1 c_1 T_{ef} = m_1 q,$$

где  $q$  – скрытая теплота плавления;  $C_1$  – теплоемкость металла.

В первом приближении можно считать, что теплоемкость расплавленного металла равна теплоемкости застывшего:

$$T_{ef} = q/c_1.$$

Расчетная температура плавления:

$$T_{1calc} = T_{melt} + T_{ef} = T_{melt} + q/c_1. \tag{13}$$

Глубина лунки расплавления  $h$  определяется координатой из уравнения (7).

Расчетная температура кипения:

$$T_{2calc} = T_b + q_{ev}/c_0; \tag{14}$$

$$h = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{U_0 I_0 \omega \sqrt{t_0}}{\phi b T_{calc}}}. \tag{15}$$

Коэффициент  $b$  зависит от свойств материала и для разных металлов составляет  $b = (30..70)10^3$  Дж/(м<sup>2</sup>°C<sup>0,5</sup>).

Основные теплофизические характеристики и расчетные температуры плавления для некоторых металлов приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Основные теплофизические характеристики и расчетные температуры плавления

Материал	$c$	$T$	$\lambda$	$b = \sqrt{\pi\lambda c\gamma}$	$T_{melt}$	$T_b$	$q_{ev} \cdot 10^{-3}$	Расчетная температура	
	$\frac{Дж}{кг^\circ C}$	$\frac{кК}{м^2}$	$\frac{Дж}{м^2^\circ Cc}$	$\frac{Дж}{м^2^\circ Cc} \cdot 0,5$	$^\circ C$	$^\circ C$	$\frac{Дж}{кг}$	$T_{1calc}$	$T_{2calc}$
Медь	500	8920	350	70090	1290	2460	213	1710	2880
Серебро	276	10500	372	58240	960	2180	100	1340	2560
Никель	565	8900	58	30310	1460	3000	305	2000	3530
СН-70 (серебро–70 %, никель–30 %)	360	10000	278	56140	960	2430	123	1420	2880

Таблица 2 – Расчетная глубина проплавления контактов

Материал	$T_0 calc$	$I_0=1$ А		$I_0=5$ А		$I_0=10$ А	
		$t_0=0,01$	$t_0=0,03c$	$t_0=0,01c$	$t_0=0,3c$	$t_0=0,01c$	$t_0=0,03c$
		$\omega=0,268$	$\omega=0,197$	$\omega=0,739$	$\omega=0,344$	$\omega=1,342$	$\omega=0,740$
Серебро	$T_{1calc}$	0,1346	0,1518	0,4993	0,4488	0,9519	0,8405
	$T_{2calc}$	0,0473	0,1098	0,3613	0,3244	0,6880	0,6076
Никель	$T_{1calc}$	0,1527	0,1724	0,5673	0,5094	1,0800	0,9546
	$T_{2calc}$	0,1148	0,1298	0,4265	0,3830	0,812	0,71
СН-70 (серебро–70 %, никель–30 %)	$T_{1расч}$	0,0940	0,1061	0,4945	0,4547	0,9423	0,9209
	$T_{2расч}$	0,1332	0,1503	0,3409	0,3188	0,6608	0,6436

В табл. 2 приведены значения рассчитанной глубины проплавления контактов в миллиметрах при  $U_0=200$  В, неизменной индуктивности  $L=0,5$  Гн и токах нагрузки 1; 5; 10 А.

Из табл. 2 следует, что глубина проплавления контактов, изготовленных методами порошковой металлургии типа СН-70, меньше, чем у серебра или никеля.

**ВЫВОДЫ.** 1. Мощность, выделяющаяся на размыкающихся контактах, возрастает с увеличением индуктивности и имеет максимум в конце размыкания. Энергия, выделяющаяся на контактах, зависит от длительности размыкания и в большей степени от характера нагрузки.

2. Глубина проплавления контактов зависит от характера нагрузки (активная, индуктивная). С увеличением индуктивности глубина проплавления увеличивается.

3. Увеличение времени размыкания контактов увеличивает глубину проплавления. Особенно это характерно для активной нагрузки цепи.

4. Приведенные расчеты дают возможность подобрать контактные материалы для низковольтных

электроаппаратов с учетом характера нагрузки, обеспечивающие минимальную эрозию контактных поверхностей.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Герасимов В.Г. Электротехнический справочник: в 4-х томах. – М.: МЭИ, 2003. – Том 1: Общие вопросы. Электротехнические материалы. – 458 с.
2. Чалыков И.П. Исследование эрозии контактных материалов при отключении больших токов // Электрические контакты. Труды Всесоюзного совещания. – М.: Энергия, 1973. – С. 51–54.
3. Справочник по электротехническим материалам / Под ред. Ю.В. Корицкого, В.В. Пасынкова, Б.М. Тареева. – Л.: Энергоатомиздат, 1988. – Т. 3. – 728 с.
4. Третьяк Г.Т., Лысов Н.Е. Основы тепловых расчетов электрических аппаратов. – М.: Изд-во ОНТИ НКТП СССР, 1935. – 432 с.

#### HEATING AND FUSION PENETRATION OF THE ELECTRICAL CONTACTS AT SWITCHING

**A. Kalinov, I. Nesterov**

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University

ul. Pervomayskaya, 20, Kremenchug, 39600, Ukraine. E-mail: scenter@kdu.edu.ua

Research shows the dependences of the power, released energy and the contacts penetration depth from the current, load inductance and thermal properties of the contact material. The dependence of the released energy at the contacts, and the contact penetration depth from the load type and switching time is shown. These calculations make it possible to select contact materials for low voltage electrical equipment, taking into account the load nature to ensure minimal erosion of contact surfaces.

**Key words:** contact, commutation, fusion temperature, depth of fusion.

#### REFERENCES

1. Gerasimov V.G. *Electrotechnical reference book*: in 4 volumes. – M.: MEI, 2003. – Vol. 1: General questions. Electrotechnical materials. – 458 p. [in Russian]
2. Chalikov I.P. Investigation of the contact materials erosion at high currents off // *Electrical contacts. Proceedings of the All-Union Conference*. – M.: Energia. – 1973. – PP. 51–54. [in Russian]
3. *Electrotechnical materials reference book* / Edited by Yu.V. Koritsky, V.V. Pasinkov, B.M. Tareev. – L.: Energoatomizdat, 1988. – Vol. 3. – 728 p. [in Russian]
4. Tretyak G.T., Lisov N.E. *Fundamentals of thermal calculations of electric apparatus*. – M.: ONTI NKTP SSSR, 1935. – 432 p. [in Russian]

Стаття надійшла 17.06.2012.

Рекомендовано до друку

к.т.н., доц. Прусом В.В.