

Ю.М. ФЕДЮШКО, д-р техн. наук, профессор., «Гавриийский государственный агротехнологический университет», Мелитополь;
А. Н. МРАЧКОВСКИЙ, канд. техн. наук, доцент., «Национальный университет биоресурсов и природопользования Украины», Киев;
И. П. РАДЬКО, канд. техн. наук, доцент., «Национальный университет биоресурсов и природопользования Украины», Киев;
В. А. КОХАНОВСКИЙ, канд. техн. наук, проф., «Национальный университет биоресурсов и природопользования Украины», Киев.

НАГРЕВ И ПРОПЛАВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КОНТАКТОВ ПРИ КОММУТАЦИИ

Были проведены исследования зависимости выделяющейся энергии и определяемой этим глубины проплавления контактов в зависимости от величины тока, индуктивности нагрузки, а также теплофизических свойств материала контакта.

Ключевые слова: коммутация, электрические контакты.

Конструктивные размеры электрических контактов зависят от энергии, выделяющейся в межконтактном промежутке, их материала, характера нагрузки, рода тока.

1. Мощность и энергия, выделяющаяся на поверхность контактов. Сопротивление размыкающихся контактов R_t изменяется от 0 до ∞ за время размыкания t_0 и зависит от времени ($t(0 \leq t \leq t_0)$)

$$R_t = R \frac{t}{t_0 - t} \tag{1}$$

где R – активное сопротивление отключаемой нагрузки.

Поэтому процесс размыкания цепи с индуктивностью L_u и сопротивлением R равноценен введению последовательно в такую цепь сопротивления R_t в соответствии с рис.1.

В этом случае закон изменения тока в цепи описывается дифференциальным уравнением

$$iR + L \frac{di}{dt} + U_n = U_0 \tag{2}$$

где $U_n = i \cdot R_t$ – 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 (2) – линейное и его решение имеет

© Ю. М. Федюшко, А. Н. Мрачковский, И. П. Радько, В. А. Кохановский, 2013

следующий вид

$$i = I_0 \frac{t_0 - t}{t_0} \cdot B; U_B = U_0 \frac{t}{t_0} \cdot B \tag{3}$$

Коэффициент, зависящий от характера цепи (соотношения R и L) и от времени t_0 .

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

Коэффициент, зависящий от характера цепи (соотношения R и L) и от времени t_0 .

$$B = \frac{\left(\frac{t_0 - t}{t_0} \right)^{\alpha - 1}}{1 - \alpha} \tag{4}$$

Параметр $\alpha = \frac{Rt_0}{L}$ представляет по существу отношение

активной энергии, потребляемой цепью за время размыкания контактов, ко всей энергии, запасенной в индуктивностях цепи в виде энергии магнитного поля

$$\left(W_L = \frac{1}{2} LI_0^2 \right)$$

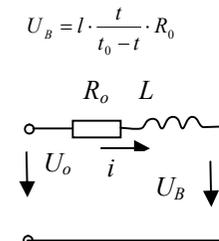


Рис.1 – Схема замещения

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

$$P = U \cdot I = UI_0 \frac{t_0 - t}{t_0} \cdot \frac{t}{t_0} \cdot B^2,$$

Обозначив $\frac{t}{t_0} = \beta$, получим

$$P = U_0 I_0 \beta (1 - \beta) \left[\frac{(1 - \beta)^{\alpha - 1} - \alpha}{1 - \alpha} \right]^2 = U_0 I_0 \eta \tag{5}$$

Коэффициент η зависит от t и α .

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

$$P = U_0 I_0 \beta^\varepsilon, \quad \eta = A \left(\frac{t}{t_0}\right)^\varepsilon = A. \quad (6)$$

Значение коэффициентов A и ε для определения мощности при разных значениях параметра α могут быть приближенно найдены из формул:

$$A = \frac{5}{3\sqrt{\alpha}}, \quad \varepsilon = \frac{4}{3\sqrt[3]{\alpha}}, \quad (7)$$

а также из графика на рис 2.

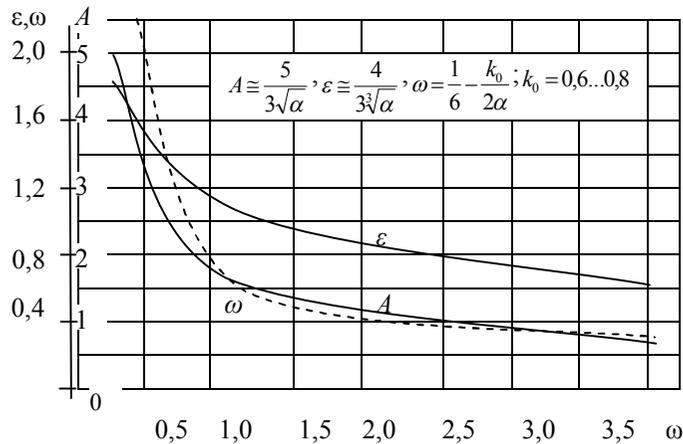


Рис.2 – Зависимость для определения мощности при разных значениях параметра α при различных коэффициентах A и ε

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:

$$Q = \int_0^{t_1} U_0 I_0 A \left(\frac{t}{t_0}\right)^\varepsilon dt \quad \text{или} \quad Q = U_0 I_0 \frac{A}{\varepsilon + 1} \cdot \frac{t^{\varepsilon+1}}{t_0^\varepsilon}. \quad (8)$$

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

$$W = \int_0^{t_0} u i dt = U_0 I_0 \int_0^{t_0} \frac{t_0 - t}{t_0} \cdot \frac{t}{t_0} B^2 dt. \quad (9)$$

После интегрирования:

$$W = U_0 I_0 t_0 \frac{1}{(1-\alpha)^2} \left[\frac{1}{2\alpha(2\alpha+1)} - \frac{2\alpha}{(\alpha+1)(\alpha+2)} + \frac{\alpha^2}{6} \right]. \quad (10)$$

Из выражения (9) видно, что общая коммутируемая энергия на контактах за время их размыкания составляет:

$$W = \frac{1}{6} U_0 I_0 t_0 + K_0 \frac{L I_0^2}{2} \quad (6a11)$$

или

$$W = U_0 I_0 t_0 \omega \quad (6b12)$$

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

$K_0 = 1,0$ - при чисто индуктивной нагрузке;

$K_0 = 0$ - при чисто активной.

Составляющая - есть энергия, расходуемая на контактах при отключении чисто активной нагрузки.

Коэффициент ω , как это видно из формул (9) и (12), 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 t изменение ее во времени устанавливается на основании решения уравнения теплопроводности [3, 4].

Определения момента наступления плавления контактов. Так как сопротивление контактов происходит по поверхности и энергия, выделяющаяся в контактом промежутке, поступает в массу контакта через поверхность, то следует считать, что на поверхности в течении времени t действует плоский источник теплоты.

Уравнение теплопроводности в этом случае такое, при котором изотермические поверхности являются концентрическими сферами (рис.3).

Температура точек зависит только от координаты x и времени t [3, 4], т.е

$$\frac{dT}{dt} = \alpha \left(\frac{d^2T}{dx^2} + \frac{2}{x} \frac{dT}{dt} \right), \quad (713)$$

где T – температура точек нагреваемого объема контакта;

α – коэффициент температуропроводности.

В случае действия плоского источника теплоты решение уравнения (13)

$$T = \frac{Q}{2\sqrt{\pi\alpha t}} \cdot \frac{x^4}{4\alpha t}, \quad (7a14)$$

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

$$Q = \frac{Q_0}{\gamma c} \quad (7615)$$

где Q_0 – количество теплоты, выделяемой единицей поверхности плоского источника; γ и c – плотность и теплоемкость материала контакта.

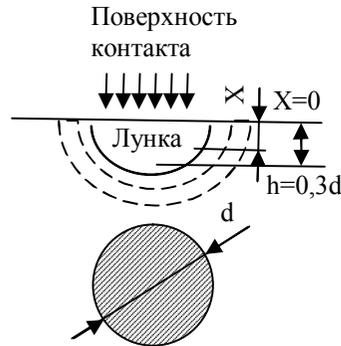


Рис.3 - Определение глубины контакта

Поэтому, если энергия, выделяющаяся в двух контактах за период их размыкания t_0 , составляет W , то сила плоского источника в формуле (76) составляет:

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

где f_0 – величина контактной поверхности.

Решение уравнения (14) 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 (15) можно найти силу источника теплоты,

при котором за время t_1 температура поверхности достигает температуры плавления $T_{пл}$

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

Общее количество энергии, поступившее в оба размыкающихся контакта за время t_1 , и есть общий тепловой поток, который доводит температуру их поверхностей до плавления

$$\frac{1}{2} U_0 I_0 \frac{A}{\varepsilon + 1} \cdot \frac{t_1^{\varepsilon+1}}{t_0^\varepsilon} = T_{пл} \cdot 2\sqrt{\pi\alpha t_1} \gamma c f_0. \quad (16)$$

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

$$t_1^{2\varepsilon+1} = \left[\frac{t_0^\varepsilon (\varepsilon + 1) \cdot 4\sqrt{\pi\alpha} \gamma c T_{пл} f_0}{A U_0 I_0} \right]^2, \quad (17)$$

так как $\alpha = \frac{\lambda}{c\gamma}$, то:

$$t_1 = \left[\frac{4\sqrt{\pi\lambda\gamma c} \cdot T_{пл} (\varepsilon + 1) t_0^\varepsilon \cdot f_0}{A U_0 I_0} \right]^{\frac{2}{2\varepsilon+1}}, \quad (18)$$

при $\varepsilon = 1$

$$t_1 = \sqrt{\pi\lambda\gamma c \left(\frac{8T_{пл} t_0 \cdot f_0}{A U_0 I_0} \right)^2}. \quad (19)$$

Чем выше температура плавления $T_{пл}$, 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 течении всего времени коммутации, нагревает его объем и плавит некоторую часть материала, определяемого глубиной 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 определяется из выражения:

$$m_1 c_1 T_{эф} = m_1 q_1 \quad (20)$$

где q – скрытая теплота плавления;
 c_1 – теплоемкость металла.

В первом приближении можно считать, что теплоемкость расплавленного металла равна теплоемкости застывшего т. е.

$$T_{эф} = \frac{q}{c_1}$$

Расчетная температура плавления

$$T_{1расч} = T_{пл} + T_{эф} = T_{пл} + \frac{q}{c_1} \quad (21)$$

Глубина лунки расплавления h определяется координатой из уравнения (14).

Расчетная температура кипения

$$T_{2расч} = T_{кип} + \frac{q_{исп}}{c_0} \quad (22)$$

где c_0 – теплоемкость расплавленного металла,
 $q_{исп}$ – скрытая теплота испарения.

Расчетная температура испарения металла

$$T_{расч} = T_{кип} + \frac{q}{c} + \frac{q_{исп}}{c_0} \quad (23)$$

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 (14), из которого следует

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

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

$$e^{-\frac{h^2}{4\alpha t_0}} = \frac{W}{4\gamma c T_{расч} \sqrt{\pi\alpha t_0} f_0} \quad (24)$$

где $W = U_0 I_0 t_0 \omega$.

Величина контактной поверхности f_0 при плавлении зависит от глубины проплавления. Экспериментально Л. Джонсом [2] установлено соотношение между размерами расплавленной зоны

$$h = 0,3d_0,$$

$$f_e = \frac{1}{4}\pi d_0^2 = 0,95h^2 = \varphi h^2. \quad (25)$$

Определение глубины проплавления h сводится к решению трансцендентного уравнения

$$he^{\frac{h^2}{4\alpha t_0}} = \frac{U_0 I_0 \omega \sqrt{t_0}}{4\varphi b T_{расч}} \quad (26)$$

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

Практически длительность размыкания электрических контактов находится в пределах $t_0 = 0,01 \dots 0,03$ с, глубина проплавления составляет $h = 0,1 \dots 0,6$ мм, поэтому отношение $\frac{h^2}{4\alpha t_0}$ составляет: $0,08 \dots 0,11$, т.к.

коэффициент температуропроводности для металлов $d = 0,3 \dots 0,4$.

Глубина проплавления одного контакта может определяться из формулы

$$h = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{U_0 I_0 \omega \sqrt{t_0}}{\varphi b T_{расч}}} \quad (27)$$

Коэффициент b зависит от свойств материала и для разных металлов составляет $30 \dots 70 \cdot 10^3$ Дж/м^{2,0}С^{0,5}.

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

Таблица 1- Основные теплофизические характеристики

Материал	c	γ	λ	$b = \sqrt{\pi\gamma\lambda c}$	$T_{пл}$	$T_{кип}$	$q_{пл} \cdot 10^3$	Расчетная температура	
	$\frac{Дж}{м^2 \cdot ^\circ C}$	$\frac{кг}{м^3}$	$\frac{Дж}{м^2 \cdot ^\circ C \cdot с}$	$\frac{Дж}{м^2 \cdot ^\circ C \cdot с} \cdot 0,5$	$^\circ C$	$^\circ C$	$\frac{Дж}{кг}$	$T_{1расч}$	$T_{2расч}$
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

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

Таблица 2 - Расчетные значения глубины проплавления контактов (в миллиметрах)

Материал	$T_{0 \text{ расч}}$	$I_0 = 1 \text{ А}$		$I_0 = 5 \text{ А}$		$I_0 = 10 \text{ А}$	
		$t_0=0,01 \text{ с}$	$t_0=0,03 \text{ с}$	$t_0=0,01 \text{ с}$	$t_0=0,03 \text{ с}$	$t_0=0,01 \text{ с}$	$t_0=0,03 \text{ с}$
		$\omega=0,268$	$\omega=0,197$	$\omega=0,739$	$\omega=0,344$	$\omega=1,342$	$\omega=0,740$
Серебро	$T_{1 \text{ расч}}$	0,1346	0,1518	0,4998	0,4488	0,9519	0,8405
	$T_{2 \text{ расч}}$	0,0973	0,1098	0,3613	0,3244	0,6880	0,6076
Никель	$T_{1 \text{ расч}}$	0,1527	0,1724	0,5673	0,5094	1,0800	0,9546
	$T_{2 \text{ расч}}$	0,1148	0,1298	0,4265	0,3830	0,8120	0,7120
СН-70 (серебро-70%, никель-30%)	$T_{1 \text{ расч}}$	0,0940	0,1061	0,4945	0,4547	0,9423	0,9209
	$T_{2 \text{ расч}}$	0,1332	0,1503	0,3469	0,3188	0,6608	0,6456

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

Выводы: Мощность на размыкающихся контактах с увеличением индуктивности возрастает и имеет максимум в конце размыкания. Энергия, выделяющаяся на контактах, зависит от длительности размыкания и в большей степени от характера нагрузки. Глубина проплавления контактов зависит от характера нагрузки (активная, индуктивная). С увеличением индуктивности глубина проплавления увеличивается. Увеличение времени размыкания контактов увеличивает глубину проплавления. Особенно это характерно для активной нагрузки цепи. Приведенные расчеты дают возможность подбирать контактные материалы для низковольтных электроаппаратов с учетом характера нагрузки обеспечивающие минимальную эрозию контактных поверхностей.

Список литературы: 1. *Томан А.С.* Электроэнергетические показатели разрывных контактов / *А.С. Томан, С.П. Кохановский* Тр. УСХА, 1975, вып. 110. 2. *Намитоков К.К.* Электроэрозионные явления / *К.К. Намитоков*. – М.: Энергия, 1978. – 456 с. 3. *Карслоу Г.С.* Теория теплопроводности / *Г.С. Карслоу*. – М.: Наука, 1947. – 288 с. 4. *Лыков А.В.* Теория теплопроводности. М.: Высшая школа, 1967. – 599 с. 5. *Вейник А.И.* Приближенный расчет процессов теплопроводности. М., 1959. – 184 с.

Надійшла до редколегії 15.06.2013

УДК 621.762

Нагрев и проплавление электрических контактов при коммутации / Ю. М. Федюшко, А. Н. Мрачковский, И. П. Радько, В. А. Кохановский // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. – Х.: НТУ «ХПІ», 2013. – № 59 (1032). – С. 137–146. – Бібліогр.: 5 назв.

Були проведені дослідження залежності енергії що виділяється та визначеної цим глибини плавлення контактів в залежності від величини струму, індуктивності навантаження, а також теплофізичних властивостей матеріалу контакту.

Ключові слова: комутація, електричні контакти.

The investigations of relivered energy and it's dependense on current magnitude and phisical properties of contact material were held.

Keywords: electrical contact.