

ВИЗНАЧЕННЯ ВЕЛИЧИНИ ЕРОЗІЇ КОНТАКТІВ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПУСКАЧІВ ТА РЕЛЕ

Коробський В. В., Мрачковський А. М.

Національний університет біоресурсів і природокористування України (Київ)

Запропонована формула для визначення глибини проплавлення контакт-деталей пускачів та реле і наведені результати розрахунків для деяких контактних матеріалів.

Постановка проблеми. Вся електрична енергія W , яка виділяється в комутуючих пристроях при комутації, перетворюється в теплову Q . Частина її (Q_1) витрачається на нагрівання маси металу контакт-деталі нерухомої та рухомої до температури плавлення і частково на плавлення металу на робочій поверхні контакт-деталі; інша частина (Q_2) - на нагрівання маси розплавленого металу до температури кипіння і на випаровування частини металу. З іншої сторони, ця енергія W має дві складові: одну – прямопропорційну часу горіння дуги t_0 і яка обумовлюється активним навантаженням кола - W_R , та другу – постійну - W_L , яка дорівнює енергії магнітного поля, накопиченої в індуктивностях електричного кола і витрачається в комутуючих пристроях при комутації.

Тому розглядаючи теплові і електромагнітні процеси для одного полюсу реле або пускача, можна записати [1]:

$$W = Q = Q_1 + Q_2 = W_R + W_L = P_{сеп} \cdot t_0 + W_L = U_0 I_0 t_0 \cdot \omega_R + U_0 I_0 t_0 \cdot \omega_L = U_0 I_0 t_0 \cdot \omega, \quad (1)$$

де $P_{сеп} = \frac{1}{6} U_0 I_0 \left(1 + 2 \frac{U_1}{U_0} \right)$ - середня потужність в кон-

такт-деталях, яка визначається активною складовою навантаження R_0 , Вт;

U_0 – напруга мережі (джерела живлення), В;

I_0 – струм навантаження, А;

U_1 – спад напруги на опорі контакту кола, В;

ω_R - коефіцієнт, який показує відношення напруг U_1 і U_0 ;

ω_L - коефіцієнт, який залежить від характеру навантаження кола;

ω - коефіцієнт, який залежить від характеру навантаження кола і показує долю енергії магнітного поля W_L , яка витрачається власне в контакт-деталях при їх розмиканні [2].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. За формою більшість контакт-деталей пускачів і реле виготовляються круглого перерізу з плоскою або сферичною робочою поверхнею, причому величина діаметра d значно перевищує висоту l контакт-деталі (рис. 1). Тому при однократній комутації контакт-деталей будемо вважати, що тепловіддача здійснюється з протилежної сторони робочої поверхні (зі сторони прикріплення до контактотримача) в навколишнє середовище, а з бічних поверхонь тепловіддача відсутня і, що тепло до контакт-деталі надходить імпульсами протягом часу t_0 , крізь всю його робочу площу поверхню S . Тепло надходить перпендикулярно до повер-

хні і теплопровідність у всіх напрямках – однакова. Тривалість імпульсів тепла Q_1 дорівнює часу горіння

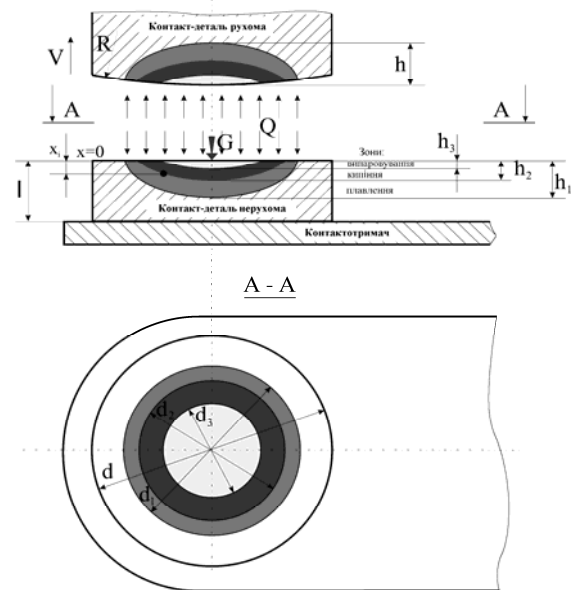


Рисунок 1 - Схематичне зображення глибини проплавлення h контакт-деталей пускача при однократній комутації струму

електричної дуги між електродами t_0 (\approx часу однократного замикання або розмикання контакт-деталей). Кількість тепла Q_1 - це тепло, необхідне для нагрівання контакт-деталі до температури плавлення.

Граничні умови:

- $T(x, 0) = 0$; (перепад температур контакт-деталі і навколишнього середовища в початковий момент дорівнює нулю);

- $T(l, t) = 0$; (температура точок протилежної сторони деталі при $x=l$ також дорівнює температурі середовища і вона стала величиною).

Мета статті. Встановити взаємозв'язок між теплофізичними характеристиками контактного матеріалу та величиною ерозії і глибиною проплавлення контактів пускачів, реле.

Основні матеріали дослідження. Рівняння теплопровідності в цьому випадку таке, що ізотермічні поверхні є концентричними сферами і температура контакт-деталі залежить тільки від координати x і часу t [1], тобто:

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

де T – температура точок об'єму контакт-деталі, яка нагрівається, К;

a – коефіцієнт температуропровідності контакт-ного матеріалу м²/с.

У випадку дії плоского джерела тепла (рис. 1) розв'язком рівняння (2) є вираз:

$$T = \frac{G}{2\sqrt{\pi at}} \cdot e^{-\frac{x^2}{4at}}, \quad (3)$$

де G – сила імпульсного джерела тепла, яке розміщене в площині розмикання контакт-деталей безпосередньо на поверхні при $x=0$ (густина теплового потоку, який надходить до однієї контакт-деталі), м·К;

x – координата точки, температура якої в момент t дорівнює T (рис. 1).

Згідно формули (3) визначається розподіл температур в об'ємі контакт-деталі, який викликаний джерелом тепла силою G , що розташований на площині при $x=0$. Кількість тепла q [Дж/м²], яка виділяється з одиниці площі плоского джерела між двома контакт-деталіями, дорівнює:

$$q = \frac{Q}{2f_0} = \frac{W}{2f_0} = G \cdot \gamma \cdot c, \quad (4)$$

де W – кількість електричної енергії (енергія дуги), Дж;

Q – тепла енергія, яка надходить у контактну пару, кал (Дж);

f_0 – площа контактної поверхні розплавленої лунки (умовна площа контактування), м² (рис. 1).

Протягом комутації густина теплового потоку на поверхні однієї контакт-деталі складає:

$$G = \frac{W}{2\gamma c f_0}. \quad (5)$$

Розв'язавши рівняння теплопровідності (2), визначається розподіл температури T на глибину x від поверхні контакт-деталі за час t . Для визначення величини глибини проплавлення h вводиться поняття "ефективної температури". Ефективна температура T_{ef} – це температура, до якої була б нагріта розплавлена маса металу контакт-деталі при затратах на це теплоти, яка обумовлена (визначається) скритою теплотою плавлення:

$$m_1 \cdot c_1 \cdot T_{ef} = m_1 \cdot g_1, \quad (6)$$

де g_1 – скрита теплота плавлення, Дж/кг;

c_1 – теплоємність розплавленого металу, Дж/кг·К.

З достатньою імовірністю для наших розрахунків вважається, що ця теплоємність c_1 дорівнює теплоємності нерозплавленого (холодного) металу, тобто $c = c_1$. Тоді ефективна температура:

$$T_{ef} = \frac{g_1}{c}. \quad (7)$$

Доведення до температури плавлення $T_{пл}$ і самого

плавлення маси металу контакт-деталі m_1 рівноцінно доведенню до загальної температури плавлення $T_{пл}$ і ефективної температури T_{ef} всієї розплавленої маси m_1 . Тобто розрахункова температура плавлення:

$$T_{1розр} = T_{пл} + T_{ef} = T_{пл} + \frac{g_1}{c}. \quad (8)$$

Межа в тілі контакт-деталі, температура точок якої досягла $T_{1розр}$, обмежує розплавлену частину металу і є, фактично, глибиною лунки розплавлення h_1 . Глибина цієї лунки визначається координатою x (рівняння (3)). Частина металу в лунці буде доведена теплом Q_2 до температури кипіння $T_{кип}$. В цьому випадку розрахункова температура кипіння визначається так:

$$T_{2розр} = T_{кип} + \frac{g_2}{c_1}, \quad (9)$$

де g_2 – прихована теплота випаровування матеріалу контакт-деталі (пароутворення), Дж/кг.

При цьому межі лунки h_2 , в якій метал кипить, будуть визначатися теж координатою x , але меншою ніж h_1 . Для металу, який випаровується, – межа лунки h_3 ($h_3 < h_2 < h_1$).

Загальна розрахункова температура випаровування матеріалу:

$$T_{3розр} = T_{кип} + \frac{g_1}{c} + \frac{g_2}{c_1}. \quad (10)$$

Розв'язок рівняння теплопровідності (3) визначається:

$$e^{-\frac{h_i^2}{4at}} = \frac{T_{iрозр} \cdot 2\sqrt{\pi at_0}}{G}, \quad (11)$$

де h_i – глибина зони плавлення або кипіння або випаровування, координата точок, температура яких досягає $T_{iрозр}$ до кінця часу горіння дуги t_0 .

Використовуючи співвідношення (5) отримаємо:

$$e^{-\frac{h_i^2}{4at}} = \frac{W}{4\sqrt{\pi at_0} \cdot \gamma c f_0 T_{розр}}, \quad (12)$$

де $W = U_0 I_0 t_0 \cdot \omega$ - з формули (1).

Площа контактної поверхні при плавленні f_0 залежить від глибини проплавлення h . Jones F.L. експериментально встановив співвідношення між розмірами розплавленої зони [3]:

$$h_1 = 0,3 \cdot d_1, \quad (13)$$

де d_1 – діаметр розплавленої зони.

Тоді, роблячи деякі допущення:

$$f_0 = \frac{\pi d_1^2}{4} = \frac{\pi}{4} \left(\frac{h_1}{0,3} \right)^2 = 8,727 \cdot h_1^2 = \psi h_1^2, \quad (14)$$

де $\psi = 8,727$ – коефіцієнт пропорційності, який враховує співвідношення між розмірами контакт-деталі.

В цьому випадку визначення величини глибини проплавлення h зводиться до розв'язку трансцендентного рівняння, для розв'язку якого використовуються формули (1) і (14):

$$e^{\frac{h^2}{4at_0}} = \frac{U_0 I_0 t_0 \cdot \omega}{4\sqrt{\pi a t_0} \cdot \gamma c \psi h^2 T_{розр}} \quad (15)$$

Після проведення математичних перетворень виразу (15) величина глибини проплавлення визначається:

$$h^2 \cdot e^{\frac{h^2}{4at}} = \frac{U_0 I_0 \omega \cdot \sqrt{t_0}}{4\psi b T_{розр}} \quad (16)$$

де $b = \sqrt{\pi \lambda \gamma c}$ – коефіцієнт, який визначається тільки теплофізичними характеристиками контактної матеріалу.

Коефіцієнт b для екологічно безпечних контактних матеріалів за нашими розрахунками становить (табл. 1):

$$b = (50...67) \cdot 10^3, \frac{\text{Дж}}{\text{м}^2 \cdot \text{К} \cdot \text{с}^2} \quad (17)$$

Коефіцієнт температуропровідності для реальних контактних матеріалів (мідь, срібло, СrН-90) становить $a = (1,164...1,689) \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$.

В пусках та реле змінного струму напругою до 1000 В час горіння електричної дуги t_0 складає не більше одного напівперіоду синусоїди, про що свідчать зняті нами осцилограми вимикання (рис. 2), а час розмикання контакт-деталей знаходиться в межах $t = 0,02 \text{ с} = 20 \text{ мс}$. Згідно документів [4, 5], повний час вмикання пускачів ПМЛ-1100 дорівнює $t_{1повн} = 17 \pm 7 \text{ мс}$, а ПМЛ-2100 - $t_{2повн} = 22 \pm 5 \text{ мс}$.

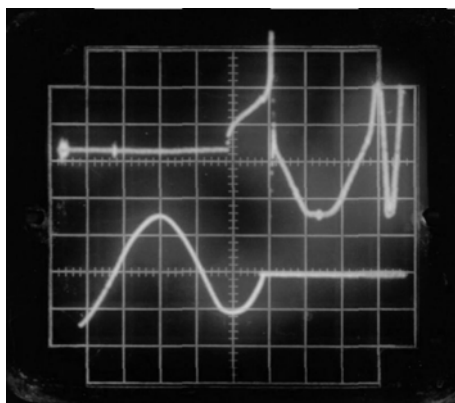


Рисунок 2 - Осцилограма розмикання. Параметри кола: $U=65 \text{ В}$, $I=10 \text{ А}$, $\cos\varphi=0,65$; ($R=4,2 \text{ Ом}$, $L=15,6 \text{ мГн}$)

Величина глибини проплавлення за даними випробуваних зразків контактних матеріалів становить: $h \approx (0,01...0,1) \text{ мм} = (1,0...10) \cdot 10^{-5} \text{ м}$.

Тому, підставляючи наведені числові значення до виразу $e^{\frac{h^2}{4at_0}}$, можна обчислити величину $e^{\frac{h^2}{4at_0}}$, яка при реальних числових співвідношеннях мало відрізняється від одиниці. В подальшому величина глибини проплавлення однієї контакт-деталі визначається за формулою:

$$h = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{U_0 I_0 \omega \sqrt{t_0}}{\psi b T_{розр}}} \quad (18)$$

Основні теплофізичні характеристики і розрахункові температури плавлення та кипіння для серійних і дослідних контактних матеріалів наведені в таблиці.

Математичні розрахунки проводяться з використанням програми "MathCAD 7 Professional".

На рис. 3 та рис. 4 наведено графіки залежності значення глибини проплавлення контакт-деталі залежно від часу горіння дуги для двох контактних матеріалів при різних величинах робочого струму.

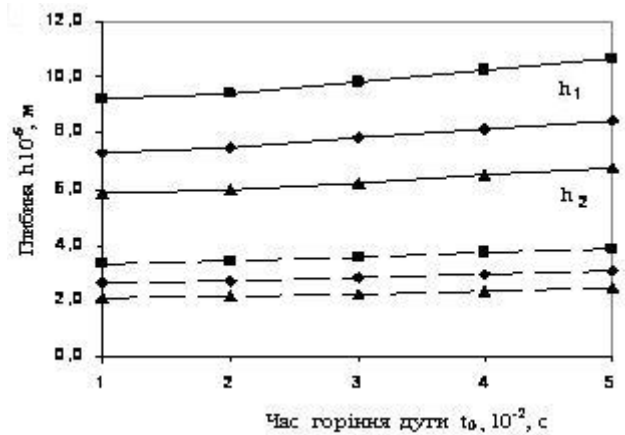


Рисунок 3 - Значення глибини проплавлення контакт-деталі при різних величинах струму. Матеріал CrM-0,2+M1. h_1 - глибина зони плавлення; h_2 - глибина зони кипіння. ■ – 10А; ♦ – 6,3А; ▲ – 4 А.

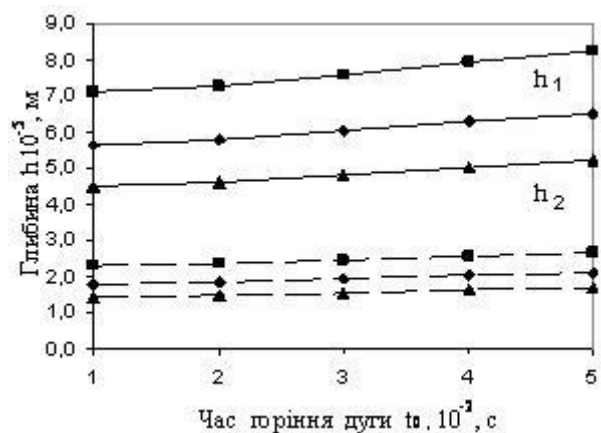


Рисунок 4 - Значення глибини проплавлення контакт-деталі при різних величинах струму Матеріал 78%Cu+15%Mo+3%MoO₃+3%C+1,0%Ni: h_1 - глибина зони плавлення; h_2 - глибина зони кипіння. ■ – 10А; ♦ – 6,3А; ▲ – 4 А.

Таблиця 1 - Основні теплофізичні характеристики контактних матеріалів

Контактний матеріал	Теплофізичні характеристики				
	λ , Вт/м·К	γ , $\times 10^3$ кг/м ³	a_1 , $\times 10^{-4}$ м ² /с	$\frac{c}{c_1}$, Дж/кг·К	$T_{пл}$, °С
1. Ag (100%)	440	10,5	1,783	235/290	960,8
2. СрН-90	384	10,1	1,475	257,5/317,8	1010
3. СрМ-0,2+М1	350	10,49	1,417	235/290,5	961
4. КМК-А10м	311	10,1	1,050	293/362	895
5. Cu (100%)	406	10,5	1,164	390/481,3	1083
6. 83%Cu+10%Mo+3%MoO+3%C+1,0%Ni	369,4	8,74	1,11	380,8/470	1310
7. 80,5%Cu+12,5%Mo+3%MoO ₃ +3%C+1,0%Ni	363	8,77	1,095	377,8/466,3	1336
8. 78%Cu+15%Mo+3%MoO ₃ +3%C+1,0%Ni	356,6	8,8	1,081	374,8/462,6	1387
9. 86,5%Cu+12%Nb+1,0%Zr+0,5%Y ₂ O ₃	359,5	8,86	1,083	374,5/462,2	1263
10. 83,5%Cu+15%Nb+1,0%Zr+0,5%Y ₂ O ₃	348,8	8,84	1,064	370,9/457,7	1306
11. 86,3%Cu+5,0%Cr+3,0%TiB ₂ +3,0%Nb+2,0%Cr+0,7%Zr	376,8	8,56	1,12	393/484,9	1278
12. 83,8%Cu+7,5%Cr+3,0%TiB ₂ +3,0%Nb+2,0%Cr+0,7%Zr	369	8,51	1,098	394,7/487,1	1299
13. 81,3%Cu+10%Cr+3,0%TiB ₂ +3,0%Nb+2,0%Cr+0,7%Zr	361	8,47	1,075	396,5/489,2	1319

При вивченні шліфу повздовжнього перерізу електродів контактного матеріалу 83%Cu+10%Mo+3%MoO₃+3%C+1,0%Ni під мікроскопом МИМ-7 було встановлено, що максимальна глибина проплавлення матеріалу від поверхні електроду становить 0,08 мм при параметрах $I_{ном} = 10A$, $\tau = 40мс$, $t_0 = 31,3мс$. Різниця розрахункових ($h_1 = 7,673 \cdot 10^{-5}м$ при $t_0 = 3$ мс) і експериментальних даних становить 4,1%. Таким чином, враховуючи, що розрахунок теплового режиму електродів зроблено один раз, співпадання результатів розрахунку з експериментальними даними задовільне.

В той же час, потрібно врахувати, що розрахунок здійснений для матеріалу, який має гетерогенну структуру. При переході від електродів гетерогенної структури до гомогенної картина може змінюватися; тому при розрахунках потрібно робити акцент на факторі гетерогенності.

Висновки. З наведеного матеріалу випливає:

1. При деяких припущеннях тепловиділення в процесі комутації електричного струму в пускателях результати розрахунку теплового режиму електродів та глибини проплавлення досить гарно співпадають з експериментальними даними глибини проплавлення (відрізняються на 4...5 %).

2. Глибина проплавлення визначається теплофізичними характеристиками контактного матеріалу, розрахунковою температурою розплавлення, кипіння, випаровування контактного матеріалу.

3. Величина глибини проплавлення прямопропорційна величині комутуваного струму 4; 6,3; 10А.

4. Одержану методику можна рекомендувати для застосування в подальших розрахунках ерозії та терміну служби контактів.

Список використаних джерел

1. Лыков А. В. Теория теплопроводности / А. В. Лыков. – М.: ГИТЛ, 1967. – 303 с.
2. Томан А. С. Электроэнергетические показатели разрывных контактов / А. С. Томан, М. Ф. Сагач, С. П. Кохановский // Электрификация сельскохозяйственного производства. Научные труды УСХА. - К.: Издательство УСХА. - 1975. - Вып. 110. - Т. II. - С. 61-71.
3. Jones F.L. The Physics of Electrical contacts. – Oxford: Clarendon Press, 1957. – 323 p.
4. Каталог 07.14.01-82. Пускатели электромагнитные серии ПМЛ. - М.: Информэлектро, 1982.
5. ГОСТ 2491-82 (СТ СЭВ 5535-86). Пускатели электромагнитные низковольтные. Общие технические условия. – Введ. 01.01.83. – М.: Изд-во стандартов, 1982. – 22 с.
6. Справочник по электротехническим материалам / Под ред. Ю. В. Корицкого, В. В. Пасынкова, Б. М. Тареева. - Т. 3. - 3-е изд., перераб. - Л.: Энергоатомиздат, 1988. - 728 с.
7. Хольм Р. Электрические контакты / Р Хольм. - М.: Издательство иностранной литературы, 1961. - 464 с.
8. Патент на винахід №93778 від 10.03.2011 / Матеріал для електричних контактів комутаційних апаратів.
9. Сотсков Б. С. Основы расчета и проектирования электромеханических элементов автоматических и телемеханических устройств / Б. С. Сотсков. – М-Л.: Изд-во "Энергия", 1965. – 237 с.

Аннотация

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕЛИЧИНЫ ЭРОЗИИ КОНТАКТОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПУСКАТЕЛЕЙ И РЕЛЕ

Коробский В. В., Мрачковский А. Н.

Предложена формула для определения глубины проплавления контакт-деталей пускателей и реле и приведены результаты расчетов для некоторых контактных материалов.

Abstract

DEFINITION OF SIZE OF EROSION OF CONTACTS ELECTROMAGNETIC ACTUATORS AND RELAY.

V. Korobskyy, A. Mrachkovskyy

The formula for determining the depth of penetration of the contact details of starters and relays, and the calculation results for some contact materials.