УДК 621.762

МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ ТА ОЦІНКИ ГЛИБИНИ ПРОПЛАВЛЕННЯ КОНТАКТ-ДЕТАЛЕЙ КОМУТАЦІЙНИХ АПАРАТІВ

І.П. Радько, кандидат технічних наук

Стаття присвячена методу визначення проплавлення контакт-деталей рівнянням теплопровідності в сферичних координатах. Показано, що оскільки розміри основи дуги дуже малі в порівнянні з поверхнею контакт-деталі, то розрахунок теплового режиму контакт-деталі проводиться з використанням методу точкового джерела. Визначено розподіл температури електричної дуги за час її горіння при комутації струму при роботі електроустановки.

Контакт-деталь, електрична дуга, електрична ерозія, електричний струм.

Мета роботи – вдосконалення математичної моделі теплових процесів комутаційних апаратів.

Матеріали та методи досліджень: Параметри дуги та метод теплового балансу енергії електричної дуги при комутації струму.

Результати досліджень: Вперше обраховано величину глибини проплавлення, електричну ерозію, термін служби контактів з дослідженими матеріалами порошкової металургії та потужність електричної дуги.

$$P = a \cdot gradT_{ct} + \lambda G - GT_{ct}^4,$$

P – потужність, що виділяється в дузі;

α – коефіцієнт температуропровідності;

T_{ct} – гранична температура нагріву;

λ – скрита теплота випаровування;

G – постійна закону Стефана-Больцмана.

В основу методу визначення глибини проплавлення контакт-деталей покладено рівняння теплопровідності в сферичних координатах [1, 5].

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha(\frac{\partial^2 T}{\partial^2 r} + \frac{2\partial T}{r\partial r}), \tag{1}$$

де T – температура маси контакт-деталі, яка нагрівається, °C;

t – час дії енергії дуги, с;

α – коефіцієнт температуропровідності, м^2/с;

r – відстань від опорної плями (основи) дуги, м.

Оскільки розміри основної дуги дуже малі в порівнянні з поверхнею контакт-деталі, то розрахунок теплового режиму контакт-деталі проводиться з використанням методів точкового джерела [1].

Розв'язок рівняння (1) знайдемо наступним чином. Введемо заміну змінних:

$$U = T \cdot r \tag{2}$$

$$\frac{\partial U}{\partial t} = \frac{\partial Tr}{\partial t}; \; \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r}\frac{\partial U}{\partial t}; \tag{3}$$

$$\frac{\partial T}{\partial r}=\frac{1}{r}\frac{\partial U}{\partial r}-\frac{T}{r}\,; \tag{4}$$

$$\frac{\partial^2 U}{\partial r^2}=\frac{\partial T}{\partial r}+\frac{\partial(r\partial T)}{\partial r^2}=\frac{\partial T}{\partial r}+\frac{\partial r\partial T}{\partial r^2}+\frac{\partial^2 Tr}{\partial r^2}=2\frac{\partial T}{\partial r}+r\frac{\partial^2 T}{\partial r^2}\,. \tag{5}$$

Підставляючи (3), (4), (5) в рівняння (1) отримаємо :

$$\frac{\partial U}{\partial t}=r\frac{\partial T}{\partial t},(3);\ \frac{\partial T}{\partial r}=\frac{1}{r}\frac{\partial U}{\partial r}-\frac{T}{r},(4);\ \frac{\partial^2 T}{\partial r^2}=\frac{1}{r}\frac{\partial^2 U}{\partial r^2}-\frac{2}{r}\frac{\partial T}{\partial r},(5);$$

$$\frac{1}{r}\frac{\partial U}{\partial t}=\alpha\left(\frac{1}{2}\frac{\partial^2 U}{\partial r^2}-\frac{2\partial T}{r\partial r}+\frac{2\partial T}{r\partial r}\right)=\frac{\alpha}{r}\frac{\partial^2 U}{\partial r^2}\,;$$

$$\frac{\partial U}{\partial t}=\alpha\frac{\partial^2 U}{\partial r^2}\,. \tag{6}$$

Опорну пляму дуги ми розглядаємо у вигляді кулі радіусом R, розміщеної всередині контакту, розміри якого набагато разів більше радіуса R (необмежене середовище). Початкова температура кулі 0 < r< R рівна T_0, а в області $r>R$ температура дорівнює нулю. Таким чином рівняння (6) розглядається при наступних граничних умовах [2, 5, 6]:

$U=T_0 r$ коли $t=0$ при $0<r<R$;

$U=0$ коли $t\neq 0$ при $r<R$;

$U=0$ коли $t=0$ при $r>R$.

Розв’язок рівняння (6) в цьому випадку буде таким

$$T=\frac{T_0}{2r\sqrt{\pi at}}\int_0^R r'[l^{-\frac{(r-r')^2}{4at}}+l^{-\frac{(r-r')^2}{4at}}]\partial r'=\frac{T_0}{2r\sqrt{\pi at}}\int_0^R r'l^{-\frac{(r')^2}{4at}}(l^{-\frac{rr'}{2at}}+l^{-\frac{rr'}{2at}})\partial r'. \tag{7}$$

Використовуючи малість R, розкладемо підінтегральну функцію в ряд за ступенями r і обмежимо першими 3-ма членами розкладу:

$$l^{-\frac{(r')^2}{4at}}=1-\frac{(r')^2}{4at}\pm\frac{(r')^4}{32a^2t^2}\,; \tag{7'}$$

$$l^{-\frac{rr'}{2at}}=1+\frac{rr'}{2at}+\frac{r^2(r')^2}{8a^2t^2}\,; \tag{7''}$$

$$l^{-\frac{rr'}{2at}}=1-\frac{rr'}{2at}+\frac{r^2(r')^2}{8a^2t^2}\,. \tag{7'''}$$

Після підстановки (7'), (7''), (7''') в (7) отримаємо

$$T=\frac{T_0 l^{-\frac{(r')^2}{4at}}}{2r\sqrt{\pi at}}\int_0^R(r'-\frac{(r')^3}{4at}+\frac{(r')^5}{32a^2t^2})(2+\frac{r^2(r')^2}{4a^2t^2})\partial r'=$$

$$\frac{T_0 l^{-\frac{(r')^2}{4at}}}{2r\sqrt{\pi at}}\int_0^R[2r'+\frac{(r')^3}{4at}(-1+\frac{r^2}{2at})+\frac{(r')^5}{16a^2t^2}(1-\frac{r^2}{2at})]\partial r' \tag{8}$$

Після інтегрування (8) прийме вигляд

$$T=\frac{T_0 l^{-\frac{(r')^2}{4at}}}{2r\sqrt{\pi at}}[R^2+\frac{R^4}{8at}(-1+\frac{r^2}{2at})+\frac{R^6}{96a^2t^2}(1-\frac{r^2}{2at})]\,; \tag{9}$$

$$T=\frac{T_0 l^{-\frac{(r')^2}{4at}}}{2r\sqrt{\pi at}}R^2[1+\frac{R^2}{8at}(-1+\frac{r^2}{2at})]\,. \tag{10}$$

Знайдемо розподіл температур T цього джерела для випадку кінцевого часу. Для цього скористаємось відомим співвідношенням

$$mcdT = qIUdt\,, \tag{11}$$

де

m – маса джерела (плями);

c – питома теплоємність;

I – струм дуги, А;

U – падіння напруги в дузі, В;

q – електротермічний еквівалент, кал/дж.

Визначимо звідси Е, значення якого підставимо і інтегруючи по t від 0 до t отримаємо:

$$T = \frac{3qIUR^2}{2r\sqrt{\pi a}\pi R^3 \gamma c}\int_0^t \frac{l^{-\frac{r^2}{4a(t-t_1)}}}{\sqrt{t-t_1}}[1+\frac{R^2}{8at}(-1+\frac{r^2}{2at})]\partial t$$

$$= \frac{3qIU}{8rR\gamma\pi c\sqrt{\pi a}}\left[\int_0^t \frac{l^{-\frac{r^2}{4a(t-t_1)}}}{\sqrt{t-t_1}}\partial t' - \frac{R^2}{8a}\int_0^t \frac{l^{-\frac{r^2}{4a(t-t_1)}}}{\sqrt{t-t_1}}\partial t' + \frac{R^2 r^2}{16a^2}\int_0^t \frac{l^{-\frac{r^2}{4a(t-t_1)}}}{\frac{5}{2}(t-t_1)}\partial t'\right]. \tag{12}$$

Залишилось знайти три інтеграли.

1-й інтеграл

$$\int_0^t \frac{l^{-\frac{(r')^2}{4a(t-t_1)}}}{\frac{1}{2}(t-t')}\partial t'.$$

Скориставшись зміною змінних:

$$\frac{1}{\frac{1}{2}(t-t_1)} = \sigma \quad \partial\sigma = \frac{\partial t'}{2(t-t_1)^{\frac{3}{2}}};$$

$$t = 0 \qquad \sigma = t^{-\frac{1}{2}};$$

$$t = t \qquad \sigma = \infty.$$

Будемо мати

$$2\int_{\frac{1}{\sqrt{t}}}^{\infty} \frac{l^{-\frac{r^2}{4at}\sigma^2}}{\sigma^2}\partial t = 2\sqrt{t}\,l^{-\frac{r^2}{4at}} - \frac{r^2}{a}\int_{\frac{1}{\sqrt{t}}}^{\infty} l^{-\frac{r^2}{4at}\sigma^2}\partial t = 2\sqrt{t}\,l^{-\frac{r^2}{4at}} - \sqrt{\frac{\pi a}{r^2}}\frac{r^2}{a}\left[1-\varphi\left(\sqrt{\frac{r^2}{4at}}\right)\right]. \tag{13}$$

2-й інтеграл:

$$\int_0^t \frac{l^{-\frac{(r')^2}{4a(t-t_1)}}}{\frac{3}{2}(t-t')}\partial t'.$$

Введемо змінну змінних:

$$\frac{1}{\frac{1}{2}(t-t')} = \sigma; \qquad \partial\sigma = \frac{\partial t'}{2(t-t_1)^{\frac{3}{2}}};$$

$$t = 0 \qquad \sigma = t^{-\frac{1}{2}};$$
$$t = t \qquad \sigma = \infty,$$

$$2\int_{\frac{1}{\sqrt{t}}}^{\infty} l^{-\frac{r^2}{4at}\sigma^2} \partial t' = 2\sqrt{\frac{\pi a}{r^2}}\left[1 - \varphi\left(\sqrt{\frac{r^2}{4at}}\right)\right] \tag{14}$$

3-й інтеграл:

$$\int_0^t \frac{l^{-\frac{(r')^2}{4a(t-t_1)}}}{\frac{3}{2}(t-t')} \partial t'.$$

$$\frac{1}{\frac{1}{2}(t-t')} = \sigma; \qquad \partial\sigma = \frac{\partial t'}{2(t-t_1)^{\frac{3}{2}}}:$$

$$t = 0 \qquad \sigma = t^{-\frac{1}{2}};$$
$$t = t \qquad \sigma = \infty,$$

$$2\int_0^t \sigma^2 l^{-\frac{r^2}{4at}\sigma^2} \partial\sigma = 2\frac{1}{2}\int_{\frac{1}{t}}^{\infty} \sigma l^{-\frac{r^2}{4at}\sigma^2} \partial\sigma^2 =$$

заміна змінних $\sigma^2 = x; \sigma = \frac{1}{\sqrt{t}}; \sqrt{x} = \frac{1}{\sqrt{t}}; x = \frac{1}{t}$

$$2\int_{\frac{1}{t}}^{\infty} \sqrt{x} l^{-\frac{r^2}{4at}x} \partial x =$$

Інтегруючи частинами

$$\sqrt{x} = U; \frac{1}{2\sqrt{x}}\partial x = \partial U;$$

$$l^{-\frac{r^2}{4a}x\partial x} = \partial V;$$

$$-\frac{4a}{r^2} l^{-\frac{r^2}{4a}x} = V;$$

$$= \sqrt{x}\left(-\frac{4a}{r^2} l^{-\frac{r^2}{4a}x}\right) l^{-\frac{r^2}{4a}x} \int_{\frac{1}{t}}^{\infty} - \int_{\frac{1}{t}}^{\infty} -\frac{4a}{r^2} l^{-\frac{r^2}{4a}x} \frac{1}{2\sqrt{x}} \partial x$$

$$\frac{4a}{r^2}\frac{1}{\sqrt{1}} l^{-\frac{r^2}{4at}} + \frac{4a}{r^2}\left[\sqrt{\frac{\pi a}{r^2}}\left\{1 - \varphi\left(\sqrt{\frac{r^2}{4at}}\right)\right\}\right]. \tag{15}$$

Підставляючи значення інтегралів (13), (14), (15) в (12), будемо мати

$$T = \frac{3qIU}{8\pi\sqrt{\pi a}R\gamma c}\left(2\sqrt{t} l^{-\frac{r^2}{4at}} + \frac{r^2}{a}\sqrt{\frac{\pi a}{r^2}}[1-\varphi] - \frac{2R^2}{4a}\sqrt{\frac{\pi a}{r^2}}[1-\varphi]\right)$$

$$+ \frac{4aR^2r^2}{16a^2r^2}\frac{1}{\sqrt{t}} l^{-\frac{r^2}{4at}} + \frac{4a}{r^2}\sqrt{\frac{\pi a}{r^2}}\frac{R^2r^2}{16a^2}[1-\varphi];$$

$$= \frac{3qIUR^2}{8\pi\sqrt{\pi a R^2}\gamma c}\left\{\left(2\sqrt{t} + \frac{R^2}{4a\sqrt{t}}\right) l^{-\frac{r^2}{4at}} - [1-\varphi]\left(\frac{r^2\sqrt{\pi a}}{4ar}\frac{a^2\sqrt{\pi a}}{4ar}\right)\right\}.$$

$$T = \frac{3qIU}{8\pi\sqrt{\pi a}R^2\gamma c}\left[\frac{1}{r}l^{-\frac{r^2}{4at}}\left(2\sqrt{t}+\frac{R^2}{4at}\right)-\sqrt{\frac{\pi}{a}}\left(1-\varphi\sqrt{\frac{r^2}{4at}}\right)\right]. \quad (16)$$

При цьому видно, що температура контакту не може бути вище деякої максимальної.

Максимальна температура поверхні електродів нами визначена із рівнянь теплового балансу енергії на електроді за формулою [5, 6]:

$$P = a \cdot gradT_{ct} + \lambda G + GT_{ct}^4, \quad (17)$$

де P – потужність, що виділяється в дузі;

T_{ct} – гранична температура нагріву;

λ – скрита теплота випаровування;

G – постійна закону Стефана-Больцмана.

Приведена оцінка показала, що максимальна температура поверхні контакт-деталей складає 2400° К, що близько до температури випаровування срібла.

Глибина проплавлення матеріалу контакт-деталей залежить від енергії дуги, фізико-механічних властивостей контактного матеріалу, часу горіння дуги і визначається виразом [4].

$$r = 0{,}17\sqrt{\frac{U_0 I_0 \omega\sqrt{t_0}}{bT}}, \quad (18)$$

де U_0 – напруга джерела живлення, В;

I_0 – струм навантаження, А;

t_0 – час розмикання контакт-деталі, с;

$b = \sqrt{\pi\lambda\gamma c}$ – коефіцієнт, який визначається теплофізичними властивостями контактного матеріалу, Дж/(м^{2}Кс$^{1/2}$);

Т – розрахункова температура плавлення, К.

Як видно з формули (18), на глибину проплавлення контактного матеріалу впливає і час горіння дуги t_0 при комутації струму. Тому, можна визначити оптимальний час розмикання контакт-деталей $t_{опт}$, при якому глибина проплавлення та ерозії будуть мінімальні:

$$t_{опт} = \frac{\pi\lambda\gamma S^2 T^2}{P_{сер}^2},$$

де S – оцінка контакту, на яку діє енергія електричної дуги, $мм$;

$P_{сер}$ – середнє значення потужності дуги, $Вт$.

Оцінка граничної глибини проплавлення по формулі (18) показала, що її величина складає 0,5 $мм$.

Розглядаючи мікроструктуру поздовжнього розрізу електродів можна замітити, що глибина проплавлення складає в середньому 0,6 $мм$.

Таким чином, співпадання даних розрахунку з експериментальними даними є задовільним, враховуючи оціночний розрахунок.

Висновки

Глибина проплавлення матеріалу контактів залежить від енергії дуги, електроерозійних властивостей матеріалу контактів, часу горіння електричної дуги і визначається за формулою:

$$h = \sqrt{\frac{U_0 I_0 \omega \sqrt{t_0}}{2\psi T_p l_0}},$$

ω – коефіцієнт, характеризує тип навантаження і залежить від співвідношення активного опору споживача R_0 та його індуктивності L і залежить від часу розмикання контактів t_0:

$$\omega = \frac{R_0 t_0}{L},$$

ψ – коефіцієнт, який враховує співвідношення між розмірами контактів;

T_p – розрахункова температура плавлення контактного матеріалу, К;

$b = \sqrt{\pi\lambda\gamma c}$ – коефіцієнт, який визначається фізико-механічними характеристиками матеріалу контактів, Дж/(м^{2}Кс$^{1/2}$);

U_0 – напруга джерела струму, В;

I_0 – сила струму споживача, А;

t_0 – час розмикання контакт-деталі, с.

Внаслідок проведеного розрахунку була встановлена залежність строку служби контактів від кількості електрики перенесеної в дузі.

Список використаних джерел

1. Буткевич Г. В. Дуговые процессы при коммутации электрических цепей. – М. Энергия, 1973. – 172с.
2. Буткевич Г. В. К вопросу износа контактов электрических аппаратов под. действием дуги. – М.: МЭИ, 1965.
3. Декабрун Н. Е. Контакты аппаратов низького напряжения. М. Энергия, 1970. – 327с.
4. Кобленц М. Г. исследование электрической износоустойчивости контакторов. Электротехника. 1966. – 277с.
5. Лыков А. В. Теория теплопроводности – М., 1967. – 250с.
6. Хольм Р. Электрические контакты – М.: издательство иностранной литературы, 1961. – 464с.

Статья посвящена методу определения проплавления контакт-деталей уравнением теплопроводности в сферических координатах. Показано, что поскольку размеры основания дуги очень малы по сравнению с поверхностью контакт-детали, то расчет теплового режима контакт-детали производится с использованием метода точечного источника. Определено распределение температуры электрической дуги за время ее горения при коммутации тока при работе электроустановки.

Контакт-деталь, электрическая дуга, электрическая эрозия, электрический ток.

The article is devoted to the method of determining the penetration of the contact details of the heat equation in spherical coordinates. It is shown that as the size of the base of the arc is very small compared with the surface of the contact details of the calculation of the thermal regime of contact details is carried out using the point source. Determined the temperature distribution of an electric arc during its burning at switching current at electrical work.

Call detail, electric arc, electric erosion electricity.