УДК 621.762

МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ ТА ОЦІНКИ ГЛИБИНИ ПРОПЛАВЛЕННЯ КОНТАКТ-ДЕТАЛЕЙ КОМУТАЦІЙНИХ АПАРАТІВ

В.В. Василенко, доктор технічних наук

Розглянуто визначення глибини проплавлення контакт-деталей за допомогою рівняння 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, глибина проплавлення, електрична дуга, точкове джерело.

Актуальною науковою проблемою в галузі виробництва комутаційних пристроїв є створення науково-методичного апарата аналізу і синтезу композиційних контактних матеріалів, що пов’язано з розв’язанням розглянутих в цій роботі часткових задач.

Мета досліджень – вдосконалення математичної моделі теплових процесів комутаційних апаратів.

Матеріали та методика досліджень. При проведенні досліджень використовувалися параметри дуги та метод теплового балансу енергії електричної дуги при комутації струму.

Результати досліджень. Визначення потужності, що виділяється в дузі при комутації електричного струму, здійснюється за рівнянням:

$$P = a \cdot gradT_{cm} + L_B G - GT_{cm}, \tag{1}$$

де P – потужність, що виділяється в дузі, Вт; a – коефіцієнт температуропровідності $\frac{м^2}{c}$; T_{cm} – гранична температура нагрівання, °С ; L_B – скрита теплота випаровування, $\frac{Дж}{г}$; $G = 5{,}67 \cdot 10^{-8} \frac{Вт}{м^2 K^4}$ – постійна Стефана-Больцмана.

В основу методу визначення глибини проплавлення контакт-деталей покладено рівняння теплопровідності в сферичних координатах :

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a\left(\frac{\partial^2 T}{\partial^2 r} + \frac{2\partial T}{2\partial r}\right) \tag{2}$$

де T – температура маси контакт-деталі, яка нагрівається, °С ; t – час дії енергії дуги, с ; a – коефіцієнт температуропровідності, $\frac{м^2}{c}$; r – відстань від основи плями дуги, м.

Оскільки розміри основи дуги дуже малі порівняно зі сферичною поверхнею контакт-деталі, то розрахунок проводиться з використанням методів точкового джерела.

Розв’язок рівняння (2) отримують шляхом заміни змінних:

$$U = T \cdot r\,;\ \frac{\partial U}{dt} = \frac{\partial T \cdot r}{\partial t}\,;\ \frac{\partial T}{dt} = \frac{1}{2}\frac{\partial U}{\partial t}\,;$$

$$\frac{\partial T}{dt} = \frac{1}{2}\frac{\partial U}{\partial t} - \frac{T}{2} \tag{3}$$

Тоді рівняння (2) буде мати вигляд :

$$\frac{\partial^2 U}{\partial r^2} = \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial (r\partial T)}{\partial r^2} = \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial r \partial T}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 Tr}{\partial r^2} = 2\frac{\partial T}{\partial r} + r\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} \tag{4}$$

Підставляючи (3), (4), (5) у рівняння (2) величини:

$$\frac{\partial U}{dt} = r\frac{\partial T}{\partial t}\,; \tag{3}$$

$$\frac{\partial T}{dt} = \frac{1}{2}\frac{\partial U}{\partial r} - \frac{T}{2}\,; \tag{4}$$

$$\frac{\partial^2 T}{dr^2} = \frac{1}{2}\frac{\partial^2 U}{\partial r^2} - \frac{2\partial T}{r\partial r}\,, \tag{5}$$

отримаємо :

$$\frac{1}{2}\frac{\partial U}{\partial t} = a\left(\frac{\partial^2 U}{\partial r^2} - \frac{2\partial T}{2\partial r} + \frac{2\partial T}{r\partial r}\right) = \frac{a\partial^2 U}{r\partial r^2}\,, \tag{6}$$

або

$$\frac{\partial U}{dt} = \frac{a\partial^2 U}{\partial r^2}\ . \tag{7}$$

Опорну пляму дуги доцільно уявити у вигляді кулі радіусом *r* , розміщеної всередині контакту. Розміри контакту *R* набагато більші радіуса *r.*

Початкова температура сфери радіусом 0 < r < *R* дорівнює T_0, а в області $r = R$ – дорівнює нулю. Таким чином рівняння (6) розглядається при таких граничних умовах: $U = T_0 r$, коли $t = 0$ та $0 < r < R$; $U = 0$.

Розв’язок рівняння (6) у цьому випадку має такий вигляд :

$$T = \frac{T_0}{2r\sqrt{\pi a t}}\int_0^R r'[l^{-\frac{(r-r')^2}{4at}} + l^{-\frac{(r-r')^2}{4at}}]\partial r' = \frac{T_0}{2r\sqrt{\pi a t}}\int_0^R r'l^{-\frac{(r')^2}{4at}}(l^{-\frac{rr'}{2at}} + l^{-\frac{rr'}{2at}})\partial r'. \tag{8}$$

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

$$l^{-\frac{(r')^2}{4at}} = 1 - \frac{(r')^2}{4at} \pm \frac{(r')^4}{32a^2t^2}\,; \tag{8'}$$

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

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

Після підстановки (8'), (8''), (8''') у (8) отримаємо:

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

$$=\frac{T_0 l^{-\frac{(r')^2}{4at}}}{2r\sqrt{\pi at}}\int_0^R [2r'+\frac{(r')^3}{4at}(-1+\frac{r^2}{2at})+\frac{(r')^5}{16a^2t^2}(1-\frac{r^2}{2at})]\partial r' \qquad (9)$$

Після інтегрування рівняння (9) прийме вигляд:

$$T=\frac{T_0 l^{-\frac{(r')^2}{4at}}}{2r\sqrt{\pi at}}[R^2+\frac{R^4}{8at}(-1+\frac{r^2}{2at})+\frac{R^6}{96a^2t^2}(1-\frac{r^2}{2at})]\,; \qquad (10)$$

$$T=\frac{T_0 l^{-\frac{(r')^2}{4at}}}{2r\sqrt{\pi at}}R^2[1+\frac{R^2}{8at}(-1+\frac{r^2}{2at})]\,. \qquad (11)$$

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

$$mcdT=qIUdt \qquad (12)$$

де m – маса джерела (плями); c – питома теплоємність, Дж/кг·К; I – струм дуги, А; U – падіння напруги в дузі, В; q – електротермічний еквівалент, кал/Дж.

Тоді, інтегруючи по t від 0 до t, отримаємо рівняння часу горіння дуги:

$$T=\frac{3qIUR^2}{2r\sqrt{\pi a\pi R^3}\gamma c}\int_0^t \frac{l^{-\frac{r^2}{4a(t-t_1)}}}{\sqrt{t-t_1}}[1+\frac{R^2}{8at}(-1+\frac{r^2}{2at})]\partial t'$$

$$=\frac{3qIU}{8rR\gamma\pi c\sqrt{\pi a}}\left[\int_0^t \frac{l^{-\frac{r^2}{4a(t-t_1)}}}{\sqrt{t-t_1}}\partial t'-\frac{R^2}{8a}\int_0^t \frac{l^{-\frac{r^2}{4a(t-t_1)}}}{\sqrt{t-t_1}}\partial t'+\frac{R^2r^2}{16a^2}\int_0^t \frac{l^{-\frac{r^2}{4a(t-t_1)}}}{\frac{5}{2}(t-t_1)}\partial t'\right] \qquad (13)$$

Розглянемо інтеграли, що входять у рівняння (13).

1-й інтеграл:

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

Виконавши заміну змінних:

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

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

$$t=t \qquad G=\infty\,,$$

отримаємо розв'язок для 1-го інтегралу:

$$2\int_{\frac{1}{\sqrt{t}}}^{\infty}\frac{l^{-\frac{r^2}{4at}G^2}}{G^2}\partial t=2\sqrt{t}l^{-\frac{r^2}{4at}}-\frac{r^2}{a}\int_{\frac{1}{\sqrt{t}}}^{\infty} l^{-\frac{r^2}{4at}G^2}\partial t=2\sqrt{t}l^{-\frac{r^2}{4at}}-\sqrt{\frac{\pi a}{r^2}}\frac{r^2}{a}\left[1-\varphi\left(\sqrt{\frac{r^2}{4at}}\right)\right]. \qquad (14)$$

Розглянемо 2-й інтеграл:

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

Виконавши зміну змінних:

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

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

отримаємо розв’язок для 2-го інтегралу:

$$2\int_{\frac{1}{\sqrt{t}}}^{\infty} l^{-\frac{r^2}{4at}G^2}\partial t' = 2\sqrt{\frac{\pi a}{r^2}}\left[1-\varphi\left(\sqrt{\frac{r^2}{4at}}\right)\right] \qquad (15)$$

Розглянемо 3-й інтеграл:

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

Виконавши заміну змінних:

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

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

отримаємо розв’язок для 3-го інтегралу :

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

Тоді, після додаткової заміни змінних, одержимо:

$$G^2 = x; G = \frac{1}{\sqrt{t}}; \sqrt{x} = \frac{1}{\sqrt{t}}; x = \frac{1}{t}.$$

Інтегруючи частинами

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

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

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

отримаємо температуру при дії електричної дуги:

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

$$=\frac{4a}{r^2}\frac{1}{\sqrt{1}}l^{-\frac{r^2}{4at}}+\frac{4a}{r^2}\left[\sqrt{\frac{\pi a}{r^2}}\left\{1-\varphi\left(\sqrt{\frac{r^2}{4at}}\right)\right\}\right]. \qquad (16)$$

Таким чином, підставляючи значення інтегралів (14), (15), (16) у (13), отримаємо рівняння температури робочої поверхні :

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

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

$$=\frac{3qIUR^2}{8\pi\sqrt{\pi a R^2\gamma c}}\left\{\left(2\sqrt{t}+\frac{R^2}{4a\sqrt{t}}\right)l^{-\frac{r^2}{4at}}-[1-\varphi]\left(\frac{r^2\sqrt{\pi a}}{4ar}\frac{a^2\sqrt{\pi a}}{4ar}\right)\right\}. \qquad (17)$$

Після скорочення це рівняння прийме вигляд :

$$T=\frac{3qIU}{8\pi\sqrt{\pi a}R^2\gamma c}\left[\frac{1}{r}l^{-\frac{r^2}{4at}}\left(2\sqrt{t}+\frac{R^2}{4at}\right)-\sqrt{\frac{\pi}{a}}\left(1-\varphi\sqrt{\frac{r^2}{4at}}\right)\right]. \qquad (18)$$

Як випливає з рівняння (16), температура контакту не може бути вищою за деяку максимальну величину.

Максимальна температура поверхні електродів нами визначена із рівнянь теплового балансу енергії на електроді за формулою (1) :

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

Чисельний розрахунок за рівнянням (18) показав, що максимальна температура поверхні контакт-деталей становить 2200º К, що відповідає температурі випаровування срібла.

Глибина проплавлення матеріалу контакт-деталей залежить від енергії дуги, фізико-механічних властивостей контактного матеріалу, часу горіння дуги і визначається за виразом [1]:

$$h=0{,}17\sqrt{\frac{U_0I_0\omega\sqrt{t_0}}{bT}}, \qquad (19)$$

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, $\frac{\text{Дж}}{\text{м}^2\,{}^\circ C c^{\frac{1}{2}}}$;

T – розрахункова температура плавлення, $^\circ C$.

Як видно з формули (18) на глибину проплавлення контактного матеріалу впливає 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:

$$t_{onm} = \frac{\pi\lambda\gamma S^2 T^2}{P_{cep}^2}, \quad (20)$$

де S – оцінка контакту, на яку діє енергія електричної дуги, $мм^2$; $P_{сер}$ – середнє значення потужності дуги, $Вт$.

Визначення граничної глибини проплавлення за формулою (18) показала, що її величина становить 0,5 $мм$.

Розглядаючи мікроструктуру поздовжнього розрізу електродів можна помітити, що глибина проплавлення в середньому 0,6 $мм$. Глибина проплавлення при порівнянні з розрахунковими і експериментальними є задовільною.

Висновки

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

$$h = \sqrt{\frac{U_0 I_0 \omega \sqrt{t_0}}{2\psi T_p l_0}}, \quad (21)$$

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

$$\omega = \frac{R_0 t_0}{L}, \quad (22)$$

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, $\frac{\text{Дж}}{\text{м}^2 \, {}^\circ C c^{\frac{1}{2}}}$; U_0 – напруга джерела струму, В; I_0 – сила струму споживача, А; t_0 – час розмикання контакт-деталі, с.

Внаслідок проведеного розрахунку була встановлена можливість визначення залежності терміну служби контактів від кількості електричної енергії в дузі.

Список літератури

1. Буткевич Г. В. Дуговые процессы при коммутации электрических цепей / Буткевич Г. В. – М.: Энергия, 1973. – 172 с.
2. Буткевич Г.В. К вопросу износа контактов электрических аппаратов под действием дуги / Буткевич Г. В. – М.: МЭИ, 1965. – 18 с.
3. Декабрун Н.Е. Контакты аппаратов низкого напряжения /Декабрун Н.Е. – М.: Энергия, 1970. – 327 с.
4. Кобленц М.Г. Исследование электрической износоустойчивости контакторов / Кобленц М.Г.– М.: Электротехника, 1966. – 277 с.
5. Лыков А.В. Теория теплопроводности / Лыков А.В. – М., 1967.– 250 с.
6. Хольм Р. Электртические контакты /Хольм Р. – М.: Изд-во иностранной лит-ры, 1961. – 464 с.

Рассмотрено определение глубины проплавления контакт - деталей при помощи уравнения теплопроводности в сферических координатах. Показано, что поскольку размеры основания дуги очень малы в сравнении с поверхностью контакт – детали, то расчет теплового режима контакт – детали проводится с использованием метода точечного источника. Определено распределение температуры электрической дуги за время ее горения при коммутации тока при работе электроустановки.

Контакт – деталь, глубина проплавления, электрическая дуга, точечный источник.

The article is devoted to the determining method of the contact details penetration depth by using the heat equation in spherical coordinates. Were shown, that as the arc base size is very small in comparison with the surface of contact details, then the thermal regime calculation of the contact details is carried out by using a point source. Were determined the temperature distribution of an electric arc during its combustion at a switching power during operation of the electrical installation.

Contact detail, penetration depth, electric arc, point source.

УДК 007.52

ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ВПРОВАДЖЕННЯ РОБОТОТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ У ТЕПЛИЧНІ ГОСПОДАРСТВА

В.П. Лисенко, кандидат технічних наук
І.М. Болбот, кандидат технічних наук
І.І. Чернов, студент магістратури

Наведено економічне обґрунтування впровадження робототехнічних систем у тепличному господарстві. За результатами дослідження побудовано температурні поля на різних рівнях та встановлено, що в теплиці з'являються зони з підвищеною та пониженою температурою.

Система керування, мікроклімат, тепличне господарство, робототехнічна система, температурне поле.

Сучасні високотехнологічні методи вирощування овочів і квітів у теплицях дозволяють істотно підняти врожайність культур і, відповідно, підвищити економічну ефективність виробництва. Нині спеціалізовані комбінати досягли значних позитивних результатів, завдяки яким теплична галузь є найрентабельніша в сільському господарстві.

Мета досліджень – економічне обґрунтування впровадження робототехнічних систем фітомоніторингу в тепличних комплексах, що сприятиме покращенню розвитку рослин, їх швидшому дозріванню та плодоносінню і, як наслідок, – збільшенню врожайності.