

УДК 621316.669.22

**ТЕОРЕТИЧНІ ПИТАННЯ НАДІЙНОСТІ
ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИХ КОМУТУЮЧИХ ПРИСТРОЇВ
ПОЛІГРАФІЧНИХ МАШИН**

© В. О. Кохановський, НТУУ «КПІ», Київ, Україна

Работа посвящена определению количественных характеристик параметров электрической дуги контактной пары, на основании которых можно рассчитать глубину проплавления контактного материала и величину электрической эрозии. Полученные результаты служат основой для разработки композиционных материалов на основе серебра с целью повышения эффективности контактной пары и экономии драгоценного металла.

The work is devoted determination of quantitative descriptions of parameters of voltaic arc of contact pair on the basis of which it is possible to expect the depth of melting of contact material and size of electrical erosions. The gotten results served as basis for development of composition materials on the basis of silver with the purpose of increase the efficiency of contact pair and economy of precious metal.

Постановка задачі

На даний час єдиним джерелом живлення поліграфічних машин та різноманітних автоматизованих комплексів служить електрична енергія. Тому питання надійності різного роду електротехнічних комутаційних апаратів та пристроїв є важливим та актуальним.

Основою будь-якого комутаційного пристрою є контактна пара, розмикання якої спричинює виникнення електричної дуги. Тому, однією з найбільш важливих експлуатаційних властивостей контактів є їхня стійкість проти електродугової ерозії. У даній роботі досліджуються теоретичні питання кількісної оцінки параметрів електричної дуги та їхній вплив на електричну ерозію контактів.

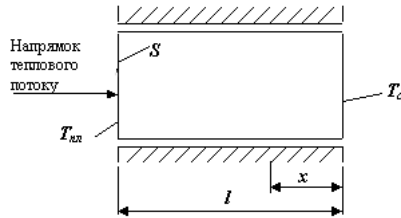
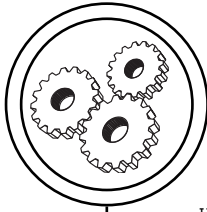
Теоретичні дослідження

Енергія, яка виділяється в контактах при комутації струму переходить в тепло, що має дві складові: Q_1 — тепло, що витрачається на нагрівання частини матеріалу до температури плавлення; Q_2 — тепло, що витрачається на часткове плавлення матеріалу, з доведенням частини розплавленої маси до температури кипіння.

$$W = Q_1 + Q_2 \quad (1)$$

Тепло, що поступає на робочу поверхню контакту S , необхідно розглядати як потік тепла в стержні довжиною l з торцевої його сторони (рис.).

Приймаємо, що тепловіддача відбувається з протилежного торця стержня, з бокових поверхонь тепловіддачі не має.



Розрахункова схема нагріву матеріалу контакту: S — поверхня, через яку поступає тепло; $T_{пл}$ — температура плавлення матеріалу; T_c — температура навколишнього середовища

Тривалість дії тепла дорівнює тривалості розмикання контактів t_0 .

Для визначення кількості тепла, що йде на нагрів маси контактів Q_1 і доведення поверхні до температури плавлення $T_{пл}$ за проміжок часу t_0 приймаємо наступне рівняння теплопровідності:

$$\frac{\partial T(x,t)}{\partial t} = a \frac{\partial^2 T(x,t)}{\partial x^2} \quad (t > 0; 0 < x < \infty). \quad (2)$$

де $a = \frac{\lambda}{c\gamma}$ — коефіцієнт температуропровідності, m^2/c ; c — питома теплоємність матеріалу контактів (ізохорна) $Вт/кг\ K$; λ — коефіцієнт теплопровідності, $Вт/м^2K$; γ — густина матеріалу, $кг/м^3$; x — координата визначення температури контакту вздовж осі x ; t — час, при якому визначається температура T .

Розв'язання цього рівняння дає можливість визначити температуру T в кожній точці контакту вздовж осі x у будь-який момент часу t .

Умови межі $T(x, 0) = 0$; $T(\infty, t) = 0$, тобто перепад температур маси контакту в середовищі в початковий момент дорівнює нулю.

Температура точок протилежного боку при $(x = 0)$ також дорівнює температурі середовища.

Рівняння тепловіддачі з протилежного боку контакту:

$$\frac{\partial T(x,t)}{\partial t} + HT(0,t) = 0. \quad (3)$$

де $H = \frac{\alpha}{\lambda}$ — відносний коефіцієнт теплообміну; α — коефіцієнт теплообміну, $Вт/м^2K$; λ — коефіцієнт теплопровідності, $Вт/м^2K$.

Температура T (перевищення над температурою зовнішнього середовища) у будь-якому розрізі контакту x на його висоті в кожний момент часу t після надходження імпульсу в масу контакту визначається за формулою [2]:

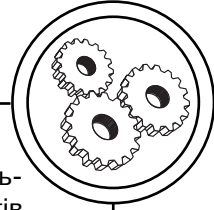
$$T(x,t) = \frac{B}{2\sqrt{\pi at}} \left[e^{-\frac{(x-t)^2}{4at}} + e^{-\frac{(x+t)^2}{4at}} - \frac{BN}{\sqrt{\pi at}} \int_0^\infty e^{-\left[H\xi + \frac{(x+t)\xi^2}{4at} \right]} d\xi \right]. \quad (4)$$

де $a = \frac{\lambda}{c\gamma}$ — коефіцієнт температуропровідності, m^2/c ; c — питома теплоємність матеріалу контактів (ізохорна); λ — коефіцієнт теплопровідності, $Вт/м^2K$;

$H = \frac{\alpha}{\lambda}$ — відносний коефіцієнт теплообміну; α — коефіцієнт теплообміну, $Вт/м^2K$; t — час надходження тепла в контакт, c ; ξ — коефіцієнт теплосасвоєння.

Припустимо, що температура протилежного боку контакту в процесі нагрівання залишається незмінною, тоді у виразі (2) останній член дорівнює нулю.

У формулі (4) величина $B = \frac{Q}{c\gamma s}$, де Q — кількість тепла, яке на-



дійшло у контакт через його поверхню S , Дж; γ — густина речовини контакту, кг/м³; s — площа контакту, м².

Рівняння (4) справедливе і для точок, які знаходяться безпосередньо на поверхні контакту S .

Вважаємо, що температура на поверхні досягає температури плавлення металу (при $x = l$, $T = T_1$) за відрізок часу $t = t_0$, тобто $T(l_0, t_0) = T_1$:

$$T_{nl} = \frac{Q}{2cys\sqrt{\pi\alpha t_0}} \left[1 + e^{\frac{l^2}{\alpha t_0}} \right] \quad (5)$$

Якщо відома температура плавлення металу контакту, до якої нагріваються точки його поверхні, то можна визначити кількість тепла, що надійшло у контакт за період t_0 і витрачене на його контакту:

$$Q = \frac{2cys\sqrt{\pi\alpha \cdot t_0}}{1 + e^{\frac{l^2}{\alpha t_0}}} \cdot ST_{nl} \quad (6)$$

Кількість тепла, яке йде на нагрівання контакту, пропорційна температурі плавлення металу T_1 і залежить від періоду нагрівання t_0 . Через те, що $a = \frac{\lambda}{c\gamma}$, то

$$Q = \frac{2\sqrt{\pi\lambda c\gamma t_0}}{1 + e^{\frac{l^2}{\alpha t_0}}} \cdot ST_{nl} \quad (7)$$

Крім температури плавлення T_{nl} поверхні контактів S , кількість тепла, яка йде на нагрівання контактів, пропорційна квадратному кореню з коефіцієнтів теплопровідності λ , теплоємності c та густині матеріалу γ .

Якщо всі ці величини для даної контактної пари постійні,

кількість тепла, яка витрачається на нагрівання маси контактів у залежності від проміжку часу розмикання і замикання, буде:

$$Q_1 = D \frac{\sqrt{t_0}}{1 + e^{\frac{l^2}{\alpha t_0}}} T_1 \quad (8)$$

де

$$D = (2\sqrt{\pi c \lambda \gamma}) \cdot S = 3.55\sqrt{c \lambda \gamma} \cdot S; \quad (9)$$

$$k = \frac{l^2}{\lambda} \cdot c\gamma, \quad (10)$$

причому k залежить від розмірів контактів.

Значення функції може визначитися тільки за різних розмірів контактів $\left(0 \leq e^{\frac{k}{t_0}} \leq 1 \right)$. Тому

знаменник у формулі (8) не може бути більше 2 і менше 1, тобто:

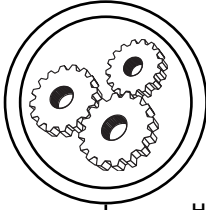
$$1 \leq \left(1 + e^{\frac{k}{t_0}} \right) \leq 2 \quad (11)$$

Чим більша постійна D , тим більше тепла витрачається на нагрівання маси контакту і доведення його поверхні до температури плавлення. Чим більша величина k , тим знаменник у формулі менший і тим більше тепла йде на нагрівання маси контакту. Вплив k і розмірів контакту на витрати тепла при нагріванні значно менші, і можна вважати, що

$$Q_1 = \frac{D}{\beta} T_1 \sqrt{t_0}, \quad (12)$$

де $\beta \approx e^{\frac{l^2}{\alpha t_0}}$, $1 \leq \beta \leq 2$.

Практично, якщо t_0 — величина мала, то $\beta \approx 1,0$.



Тепло, яке витрачається на нагрівання контактів, можна вважати пропорційним кореню квадратному із часу горіння дуги.

Збільшення коефіцієнта теплопровідності λ , коефіцієнта теплоємності C і питомої густини γ матеріалу контакту збільшує постійну D і тим самим збільшується складова Q_1 , яка іде на нагрівання і плавлення контакту.

Друга складова Q_2 витрачається на доведення розплавленого металу до температури кипіння і його випаровування й дорівнює:

$$Q_2 = m_1 g_1 + m_2 (T_k - T_1) C + m_3 g_2, \quad (13)$$

де $m_1 g_1$ — теплота, яка витрачається на плавлення маси металу із захованою питомою теплою плавлення; $m_2 (T_k - T_1) C$ — теплота, що витрачається на доведення маси металу до температури кипіння T_1 ; $m_3 g_2$ — теплота, яка витрачається на випаровування маси металу з питомою теплою пароутворення.

Складова m_3 є частиною m_2 , а остання, в свою чергу, є частиною m_1 .

Маса металу, яка підлягає тільки випаровуванню, буде $(m_2 - m_3)$, частина розплавленого металу доведеного до кипіння становить m_2 .

Маса, доведена до кипіння, але яка не випарувалася, буде $(m_2 - m_3)$.

Маса металу, яка залишилася тільки розплавленою, складає $(m_1 - m_3)$.

Енергія, яка виділяється у контактах при їх розмиканні, має дві складові: одну, прямо пропорційну часу горіння дуги, —

W_R , і другу — постійну — W_L , яка дорівнює енергії магнітного поля, накопиченій в індукційних полях:

$$W_R = P_{cp} t_0; \quad W_L = \frac{1}{2} L I^2 = E;$$

$$W = P_{cp} t_0 + E; \quad (14)$$

Тепло, яке витрачається на розплавлення і випаровування металу контакту, становить:

$$Q_2 = W - Q_1 = P_{cp} t_0 + E - \frac{D \sqrt{t_0 T_1}}{\beta}, \quad (15)$$

$$\text{де } 1 < \beta < 2; \quad D = (2\sqrt{\pi \lambda \gamma c}) S. \quad (16)$$

Як видно із залежності (15), теплота, яка зумовлює величину ерозії контактів при визначеному часі горіння дуги, має мінімум, тобто при t_{opt} ерозія контактів і їх плавлення будуть мінімальними.

Значення t_{opt} може бути знайдено з рівнянь:

$$\frac{\partial Q_2}{\partial t_0} = 0; \quad P_{cp} - \frac{D T_1}{\beta} \cdot \frac{1}{2\sqrt{t_0}} = 0. \quad (17)$$

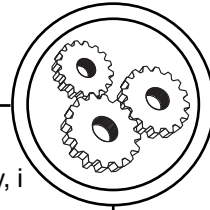
Звідси матимемо:

$$t_{opt} = \left(\frac{D T_1}{2\beta P_{cp}} \right)^2; \quad t_{opt} = \frac{\pi \lambda \gamma c}{\beta^2 P_{cp}^2} T_1^2 S \quad (18)$$

Чим більші температура T_1 і коефіцієнти теплопровідності λ та теплоємності c , тим триваліший час горіння дуги, за якого ерозія поверхні контактів найменша. При $t_0 > t_{opt}$ і $t_0 < t_{opt}$ кількість тепла, яке витрачається на плавлення контактів, більша. Отже,

$$Q_{1min} = E - \frac{D^2 T_1^2}{4\beta^2 P_{cp}} = E - P_{cp} t_{opt}, \quad (19)$$

де енергія магнітного поля в індукційному колі визначається формулою



$$E = \frac{LI_0^2}{2}, \quad (20)$$

а середня потужність у контактах при активному навантаженні кола визначається рівністю

$$P_{cp} = \frac{1}{6}U_0I_0 \left(1 + \frac{2U_1}{U_0} \right) \quad (21)$$

Висновки та перспективи дослідження

За кількістю тепла, яке витрачається на плавлення і випаро-

вування контактного матеріалу, і часом горіння електричної дуги можна визначити глибину проплавлення контактів та величину електричної ерозії. Отримані результати можуть служити основою для експериментального дослідження властивостей композиційних матеріалів на основі срібла з метою підвищення ефективності контактної пари та економії дорогоцінного металу.

1. Белкин Г. С. Перспективы развития коммутационной аппаратуры высокого напряжения // Электротехника. — 1997. — С. 5—7. 2. Жаворонков М. А., Нестеров Г. Г., Тайвер Е. И. Оценка коэффициента выброса при расчете эрозии сильноточных контактов // Изв. Вузов. Электромеханика. — 1981. — № 10. — С. 1161—1164. 3. Егоров Е. Г. Испытания и исследования низковольтных коммутационных электрических аппаратов: Учеб. для вузов. — Чебоксары: Изд-во Чуваш, ун-та, 2000. — 448 с. 4. Ивоботенко Б. А., Ильинский Н. Ф., Копылов И. П. Планирование эксперимента в электромеханике. — М.: Энергия, 1975. — 184 с. 5. Надежность и эффективность в технике. Справочник. Т. 7. Качество и надежность в производстве. — М.: Машиностроение, 1989. — 280 с. 6. Патент України на корисну модель № 21466 від 15.03.2007 р. 7. Розанов Ю. К., Акимов Е. Г. Основные тенденции развития силовых коммутационных аппаратов и управления и защиты низкого напряжения // Электротехника. — 1997. — № 1. — С. 1—5. 8. Ройзен С. С., Артыков Э. С. Электрооборудование полиграфических машин: [Учеб. для студентов вузов, обучающихся по направлению «Полиграфия», спец. «Автоматика и упр. в тех. системах» и «Полигр. машины и автоматизиров. комплексы»] / Под общ. ред. С. С. Ройзена. — М.: Мир книги, 1994. — 368 с. 9. Статистический анализ надежности контактов магнитных пускателей в условиях малой выборки / А. Г. Годжелло, Е. Г. Егоров, Н. А. Рашепкина, С. П. Иванова // Электротехника. — 2002. — № 1. — С. 37—40. 10. Таев И. С., Егоров Е. Г. Расчетно-экспериментальное определение коммутационной износостойкости электрических аппаратов // Электротехника. — 1995. — № 9. — С. 55—56. 11. ТУ 16-523.609-81. Контакты электрические марки КМК СpKgn. 12. ТУ 16-538.400.83. Контакты электрические коммутационные марок КМК-А10мдт, КМК-А10мд. 13. Штоляков В. М., Федосеев А. Ф., Зирнзак Л. Ф. и др. Офсетные печатные машины: Учебное пособие. — М.: Изд-во МГУП, 1999. — 207 с. 14. Электрические и электронные аппараты: Учеб. для вузов / Под ред. Ю. К. Розанова. — М.: Энергоатомиздат, 2001. — 420 с.

Рецензент — О. В. Литвин, к.т.н., доцент, НТУУ «КПІ»

Надійшла до редакції 06.03.08