

УДК 621.762

АНАЛІЗ, ХАРАКТЕРИСТИКА ТА РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕКТРОДІВ В ПРОЦЕСІ РОЗМИКАННЯ КОНТАКТІВ

А. М. Мрачковський, кандидат технічних наук, доцент

E-mail: talk.about.alps@gmail.com

М. Ю. Чембай, студент магістратури

E-mail: chembay16@gmail.com

Національний університет біоресурсів і природокористування України

Анотація. Проаналізовано процеси розмикання електродів та розраховано параметри площі контактування залежно від геометрії контактів. Характер зміни фактичної контактної площі дотику електродів при їх розмиканні суттєво залежить від ряду параметрів, що не завжди піддаються точному визначенню (геометрія, стан і властивості поверхні електродів, фактична швидкість розходження окремих точок, розподіл тиску між зонами контактування та інші). Розраховано радіус контактної поверхні електродів із урахуванням контактного натиску, температури нагрівання і плавлення електродів. Зображена залежність зміни розмірів контактної площі при розмиканні контактів.

Ключові слова: *деформація, провідність, розряд, площа контактування, об'єм металу, електроди, контактний натиск, питомий опір*

Актуальність. Сучасні вітчизняні комутаційні апарати мають низькі показники надійності і термін служби при використанні їх в специфічних умовах експлуатації. Так, термін служби цих пристроїв складає 0,5-3 роки і є значно нижчим, ніж їхній технічний ресурс.

При виготовленні електричних апаратів приблизно 65 % вартості матеріалів складають контакти на основі срібла. Такі контактні матеріали відзначаються не лише високою вартістю, а й низькою корозійною стійкістю при експлуатації в агресивних середовищах.

Оскільки в нашій державі срібло не видобувається, то за умов значного подорожчання благородних металів виникає гостра потреба в створенні екологічно безпечних і ерозійно стійких композиційних контактних матеріалів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Експериментальна частина лабораторних досліджень комутаційних апаратів проводилася в категоріях застосування АС-3 і АС-4 на спеціалізованих стендах. Аналіз теплових процесів у комутуючих пристроях проводився методом розв'язування нелінійної задачі теплопровідності напівнескінченного тіла з урахуванням витрат енергії. Обробка результатів досліджень здійснювалася за допомогою методів математичної статистики з використанням комп'ютерної техніки.

Мета дослідження – аналіз та характеристика факторів у процесі розмикання контактів та розрахунок параметрів електродів.

Матеріали та методи дослідження. Матеріал контакт-деталей комутаційних апаратів з гетерогенною мікроструктурою має підвищену електроерозійну стійкість. З метою визначення температурного режиму контакт-деталей реле при комутації струму було розв'язане рівняння теплопровідності в сферичних координатах. Глибина проплавлення матеріалу контакт-деталей залежить від енергії дуги, фізико-механічних властивостей контактного матеріалу, часу горіння дуги і визначається після математичних перетворень.

Оцінка максимальної температури поверхні контакт-деталей отримана за рівнянням теплового балансу енергії на електродах. Теоретичні дані зі встановлення величини електричної ерозії контакт-деталей з урахуванням електрофізичних і механічних властивостей контактних матеріалів дають можливість визначити термін служби контакт-деталей, який співпадає з експериментальними даними, отриманими при випробуванні апаратів на комутаційну стійкість.

Результати досліджень та їх обговорення. Під час проведення розрахунків, пов'язаних з процесами розмикання електродів, приймаємо, що контактні площі мають правильну і найпростішу геометричну форму, а

деформації – пружні та пластичні. Рух електродів відносно один одного зазвичай вважається поступальним у напрямі, перпендикулярному площині контактної поверхні. Матеріал електродів вважається твердим або пластичним, а поверхня чистою.

Але навіть за таких умов, коли можливий миттєвий розрив контакту, електричний опір між ними не буде змінюватись так само миттєво, оскільки при цьому відбувається зміна механізму протікання струму – замість металевої виникає тунельна провідність, а в подальшому, якщо є відповідні умови, між електродами виникає розряд.

Миттєвий розрив контактів ще не означає відповідного розриву провідності між електродами. Цей перехідний процес залежить від швидкості розмикання електродів і параметрів кола. Відповідно відбувається і збільшення опору між електродами, що призводить до порушення, встановленого в замкненому стані, теплового режиму, до перегріву всієї контактної поверхні та її ділянок, на яких відбувається дійсний контакт між електродами. У результаті нагрівання контактних зон і всієї поверхні змінюються пружні властивості матеріалу.

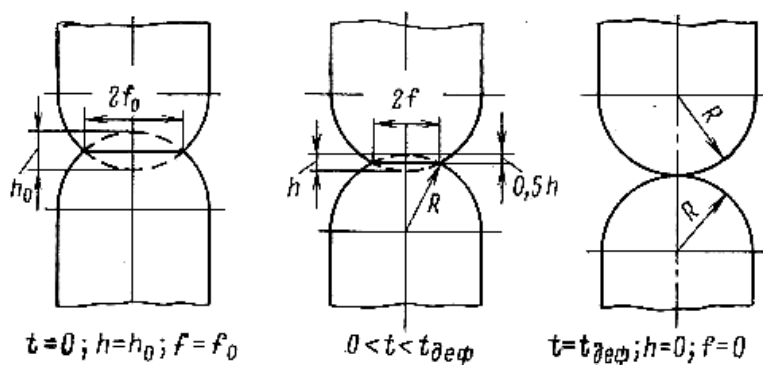


Рис.1. Схема процесу розмикання контактів в початковій стадії

У найпростішому випадку, коли поверхні електродів мають ідеальну сферичну форму і розмикання відбувається без струму, радіус f контактної площі визначаємо за формулою:

$$f = \sqrt[3]{\frac{3PR}{4E}}; \quad (1)$$

$$f = \sqrt[3]{\frac{4PR}{3E}}; \quad (2)$$

$$h = \sqrt[3]{\frac{9P^2}{16E^2R}}; \quad (3)$$

де P – контактний натиск; R – радіус поверхні електродів; E – модуль пружності електродів.

З рис. 1 видно, що зближення електродів h залежить від радіуса кривизни контактної поверхні R та радіуса контактної площі $f(t)$ і визначається за формулою:

$$h = 2(R - \sqrt{R^2 - f^2}). \quad (4)$$

За умови, що $f \ll R$, можна записати:

$$f = \sqrt{Rh}; \quad (5)$$

$$f_0 = \sqrt{Rh_0}. \quad (6)$$

Відносна зміна розмірів контактної площі спочатку відбувається повільно, а в кінці процесу зняття деформації стає більш різкою. Внаслідок збільшення опору через зменшення контактної площі під дією струму в цих зонах температура буде підвищуватися, причому особливо різке підвищення температури аж до температури плавлення, теплового вибуху та випаровування буде спостерігатись в кінці процесу розмикання (рис. 2).

Такі співвідношення справедливі тільки тоді, коли можна не враховувати теплову дію струму. Якщо нею не можливо знехтувати, то мають місце такі крайні випадки:

- коли електроди не змінюють свого положення відносно один одного (тобто залишаються нерухомими за час процесу нагріву під дією струму);

- коли електроди один відносно одного можуть переміщуватись перпендикулярно площі контакту під дією внутрішніх сил, які виникають за рахунок теплового розширення.

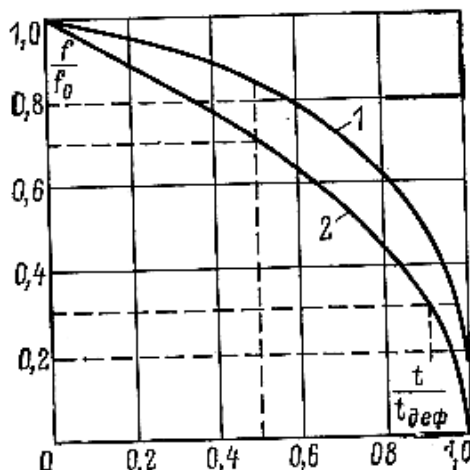


Рис. 2. Зміна розмірів контактної площі при розмиканні контактів

У цих випадках характер зміни фактичної площі дотику залежатиме від об'єму зони нагрівання на електроді і температури нагрівання. При критичній температурі, коли відбувається плавлення контакту, умови контактування приймають якісно новий характер.

Якщо електроди нерухомі, то нагрівання деякого його об'єму ще до плавлення викличе теплове розширення, в результаті чого між електродами виникне додаткова сила. Площа контакту буде визначатись сумарною дією зовнішньої сили тиску і додатковою внутрішньою силою розмикання електродів.

Тоді радіус ефективної контактної площі визначатиметься відношенням:

$$f = \sqrt{\frac{lP}{\pi(\sigma l - E\alpha l_0 T)}}, \quad (7)$$

де σ – опір матеріалу; E – модуль пружності матеріалу; α – температурний коефіцієнт лінійного розширення; T – середня температура нагріву, l_0 ; l – висота частини деформації електрода.

У випадку, коли електроди під дією додаткових внутрішніх сил можуть вільно переміщуватися, контактна площа при нагріванні може змінюватися за рахунок зміни характеристик матеріалу, і приріст радіуса контактної площі буде практично незначним.

Якщо ж нагрівання супроводжується плавленням деякого об'єму, то розплавлений матеріал видавлюватиметься і ним буде заповнюватись зазор, який прилягає до контактної зони поверхні (рис. 3). Якщо електроди були попередньо стиснені дією зовнішньої сили P , то розплавлений матеріал видавлюватиметься не тільки за рахунок зміни об'єму матеріалу при плавленні, але й за рахунок деформації електродів.

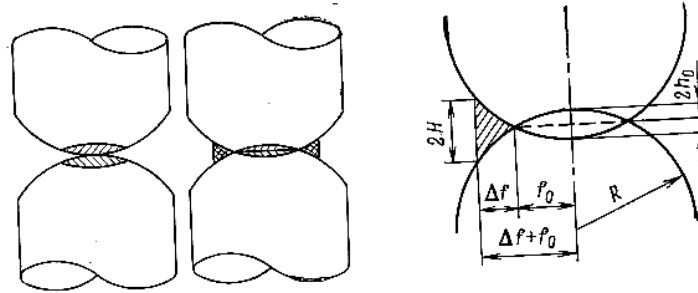


Рис. 3. Схема витіснення розплавленого металу

Зміна радіуса контактної площі, викликана матеріалом, витісненим в зазор між поверхнями електродів і безпосередньо прилеглими до контактної площі за рахунок тільки об'ємного розширення, визначатиметься згідно рис. 4 вирішенням такої системи рівнянь:

$$\begin{cases} \Delta V_0 = 2\pi H(f_0 + \Delta f)^2 - \frac{1}{3}\pi H[3(f_0 + \Delta f)^2 + 3f_0^2 + H^2] \\ R^2 = (f_0 + \Delta f)^2 + [R - (H + h_0)]^2 \end{cases} \quad (8)$$

Із урахуванням, що $\frac{(f_0 + \Delta f)}{R} \ll 1$, розрахунок системи відносно Δf можна записати у вигляді:

$$\Delta f = \frac{\Delta V_0}{8\pi R f_0}; \quad (9)$$

або

$$\Delta f = \sqrt{RV_0(\gamma_T - \gamma_{ж})/2\pi f^2 \gamma_{ж}}, \quad (10)$$

де $\gamma_T, \gamma_{ж}$ – щільність матеріалу відповідно в твердому і рідкому станах.

Якщо ж враховувати, що в процесі плавлення відбувається зняття деформації і за рахунок цього відбувається додаткове видавлення рідкого

металу, то вважаючи, що розплавлений об'єм V_0 більше об'єму деформованого сегмента на сферичній поверхні електроду, отримуємо рівняння для визначення зближення електродів у вигляді:

$$h = \sqrt{\frac{\frac{1}{2}V_0}{2\pi R} + f_0^4/4R^2} . \quad (11)$$

Особливості формування контактної площі за участі, з одного боку, процесу плавлення і, з іншого – зближення поверхонь електродів за рахунок зняття деформації можуть призвести до деяких несподіваних наслідків: якщо можливе розширення контактної площі за рахунок витіснення рідкого металу із зони початкового контакту між електродами, то це викличе природне зменшення густини струму і, як наслідок, потужності, що виділяється в контактній зоні.

Витіснений рідкий метал розтікається по твердій поверхні електроду, має температуру, тим меншу, чим далі вона знаходиться від зони початкового контакту, і буде тверднути, починаючи з периферії. Потім, оскільки потужність, що виділяється на одиницю контактної площі, зменшиться, то почнеться затвердіння і решти частини електроду.

Об'єм витіснення рідкого металу буде визначатися за формулою:

$$V_0' = \frac{V_0}{2} - \pi f^4/4R . \quad (12)$$

При цьому збільшення радіуса контактної площі буде дорівнювати:

$$\Delta f = f_0' - f_0 + \Delta f' + \Delta f'' \quad (13),$$

де $\Delta f'$ - збільшення за рахунок витіснення металу при знятті пружної деформації; $\Delta f''$ - збільшення радіуса за рахунок теплового розширення металу і фазового переходу.

Значення $\Delta f'$, $\Delta f''$ визначаються відповідно за формулами:

$$\Delta f' = \sqrt{\frac{R}{2\pi f_0^2 \left(\frac{V_0}{2} - \frac{\pi f^4}{4R} \right)}} , \quad (14)$$

де $\Delta f''$ розраховується за формулою:

$$\Delta f = \sqrt{\frac{RV_0}{2\pi f_0^2} \frac{V_T - V_P}{V_P}}. \quad (15)$$

Замінивши f_0 на f_0' , отримаємо:

$$\Delta f'' = \sqrt{\frac{RV_0}{2\pi f'^2} \frac{V_T - V_P}{V_P}}. \quad (16)$$

Висновки і перспективи. 1. При розмиканні електродів можуть створюватися умови для швидкого нагрівання контактних площ, оскільки їх характер залежить від багатьох факторів і математичне вираження таких процесів може мати деякі похибки.

2. Характер зміни фактичної площі дотику залежить від об'єму зони нагрівання на електроді і температури нагрівання.

3. Площа електродів у місці контактування визначається сумарною дією зовнішньої сили тиску і додатковою внутрішньою силою розмикання електродів.

4. Оцінка величин, що визначають протікання процесів, завжди потребує деяких допущень і визначає можливість їх практичного застосування.

Список використаних джерел

1. Хольм Р. Электрические контакты / Р. Хольм. – М.: Издательство иностранной литературы, 1961. – 464 с.

2. Бейлис И. И. Исследование эрозии металлокерамических контактов на основе серебра и никеля при коммутации малых токов. Электрические контакты / И. И. Бейлис, Г. Н. Братерская, В. Н. Раховский, О. К. Теодорович. – М.: Энергия, 1987. – 305 с.

3. Белкин Г. С. Исследование электрической эрозии металлокерамических аппаратов / Г. С. Белкин, М. Е. Данилов // Электричество. – 1972. - № 2. – С. 12 - 18.

4. Намитоков К.К. Электроэрозионные явления / Намитоков К. К. – М.: Энергия, 1978. – 456 с.

5. Намитоков К.К. Расчет электрического сопротивления многоточечного контакта / К. К. Намитоков, В. Б. Красовицкий // Научно-технический реферативный сборник «Электрофизические и электрохимические методы обработки». – 1973. – Вып. 8. – С. 4-7.

6. Омельченко В. Т. Тепловая теория мостиковой эрозии контактов. Автореф. дис. на стиск. учен. степени д-ра техн. наук. Харьков: ХПИ, 1966. - 24 с.

7. Radko I.P. Contacts with increased environmental safety in low-voltage switching devices / I.P.Radko, S.P.Kokhanivskiy, T.V.Shcherbak // Published works of Lublin University. Motoryzacia i energetyka rolnictwa. – 2011. – Vol 13 D.

References

1. Khol'm, R. (1961). Elektricheskie kontakty [Electrical contacts].. Moskow: Izdatel'stvo inostrannoy literatury, 464.

2. Beylis, I.I., Braterskaya, G.N., Rakhovskiy, V.N., Teodorovich, O.K. (1987). Issledovanie erozii metallokeramicheskikh kontaktov na osnove serebra i nikelya pri kommutatsii malykh tokov. Elektricheskie kontakty [Study of the erosion of metal-ceramic contacts based on silver and nickel for commutation of low currents. Electrical contacts]. Moskow: Energija, 305.

3. Belkin, G.S., Danilov, M.E. (1972). Issledovanie elektricheskoy erozii metallokeramicheskikh apparatov [Study of electrical erosion of metal-ceramic devices]. Elektrichestvo, 2, 12 - 18.

4. Namitokov, K.K. (1978). Elektroerozionnye yavleniya [Electroerosion phenomena]. Moskow.: Energiya, 456.

5. Namitokov, K.K., Krasovitskiy, V.B. (1973). Raschet elektricheskogo soprotivleniya mnogotochechnogo kontakta [Calculation of the electrical resistance of a multipoint contact]. Nauchno-tekhnicheskii referativnyy sbornik «Elektrofizicheskie i elektrokhimicheskie metody obrabotki», 8, 4-7.

6. Omel'chenko, V.T. (1966). Teplovaya teoriya mostikovoy erozii kontaktov [Thermal theory of bridge erosion of contacts]. Avtoref.dis. na stisk. uchen. Stepeni d-ra tekhn. Nauk.. Khar'kov: KhPI, 24.

7. Radko, I.P., Kokhanivskiy, S.P , Shcherbak , T.V. (2011). Contacts with increased environmental safety in low-voltage switching devices. Published works of Lublin University "Motoryzacia i energetyka rolnictwa", 13 D.

АНАЛИЗ, ХАРАКТЕРИСТИКА И РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОДОВ В ПРОЦЕССЕ РАЗМЫКАНИЯ КОНТАКТОВ

А.М. Мрачковский, М. Ю. Чембай

Аннотация. Проанализированы процессы замыкания электродов и рассчитаны параметры площади контакта в зависимости от геометрии контактов. Характер изменения фактической контактной площади соприкосновения электродов при их замыкании существенно зависит от ряда параметров, не всегда поддаются точному определению (геометрия, состояние и свойства поверхности электродов, фактическая скорость различия отдельных точек, распределение давления между зонами контакта и другие). Рассчитан радиус контактной поверхности электродов с учетом контактного нажатия, температуры нагрева и плавления электродов. Изображена

зависимость изменения размеров контактной площади при размыкании контактов.

Ключевые слова: деформация, проводимость, разряд, площадь контактирования, объем металла, электроды, контактный нажим, удельное сопротивление

**ANALYSIS, CHARACTERIZATION AND CALCULATION OF THE
PARAMETERS OF ELECTRODES IN THE PROCESS OF OPENING
THE CONTACTS**

A. Mrachkovskiy, M. Chembay

Abstract. *The processes of unlocking the electrodes are analyzed and parameters of the contact area are calculated, depending on the geometry of the contacts. The nature of the change in the actual contact area of the contact of the electrodes during their disconnection essentially depends on a number of parameters that are not always precise (geometry, state and properties of the surface of the electrodes, the actual speed of the difference between the individual points, the distribution of pressure between the contact zones, and others). The radius of the contact surface of the electrodes is calculated, taking into account the contact pressure, the heating temperature and the melting of the electrodes. Represents the dependence of the change in the size of the contact area when opening the contacts.*

Key words: *deformation, conductivity, discharge, area of contact, the volume of metal electrodes, the contact pressure, the resistivity*