

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕРОЗІЇ ТА ПЕРЕХІДНОГО ОПОРУ СЕРІЙНИХ КОНТАКТ-ДЕТАЛЕЙ РЕЛЕ

А. М. Мрачковський, кандидат технічних наук

Розглянуто процеси виникнення електричної дуги та тривалості її горіння на контакт-деталях реле серії РПЛ-2204 і закономірності зміни електричної ерозії як функції сили струму та кількості комутацій.

Електромагнітні реле, електрична ерозія, контактний матеріал, напруга, сила струму, енергія, комутаційні апарати.

Електроерозійна стійкість контакт-деталей реле в основному визначається властивостями контактного матеріалу та параметрами електричної дуги: величиною напруги, силою струму, потужністю та енергією. Встановлення залежностей режимів роботи комутаційних апаратів при різних навантаженнях електричного кола є визначальним фактором зносостійкості контакт-деталей.

Мета досліджень - підвищення надійності роботи та зменшення зносостійкості контакт-деталей електромагнітних реле в електроустановках сільського господарства за рахунок властивостей матеріалу контактів та параметрів електричної дуги (напруги, сили струму та тривалості горіння).

Матеріали та методика досліджень. Для встановлення закономірностей зміни електричної ерозії і перехідного опору від параметрів електричної дуги та властивостей контактного матеріалу використовувались відомі і розроблені детерміновані та імовірнісні математичні та фізичні моделі контакт-деталей комутаційних апаратів.

Експериментальні дослідження в лабораторних умовах проводились на спеціальному стенді з використанням кліматичної камери. Аналіз теплових процесів на контакт-деталях здійснювався методом розв'язування нелінійної задачі теплопровідності напівнескінченного тіла з урахуванням витрат енергії.

Дослідження процесів виникнення електричної дуги та тривалості її горіння на контакт-деталях реле серії РПЛ-2204. Електроерозійна стійкість контакт-деталей реле в основному визначається властивостями матеріалу контактів та параметрами електричної дуги: величиною напруги, сили струму та тривалістю її горіння. Оскільки тривалість горіння дуги є визначальним фактором зносостійкості контакт-деталей, то було проведено осцилографування параметрів електричної дуги на контакт-деталей реле типу РПЛ-2204 при розмиканні електричного кола постійного струму.

Осцилограма процесу виникнення електричної дуги та тривалості її горіння при розмиканні електричного кола з величиною струму $I=10\text{A}$, напругою $U=64\text{В}$ і постійною часу $\tau=40\text{мс}$ наведена на рис. 1. До моменту розмикання контактів апарата $t=0$ у колі протікав струм $I=10\text{A}$ і спад напруги на контактах становив $\Delta U_k=45\text{В}$. Починаючи з часу $t=0$, опір дуги R_δ збільшується, напруга на ній U_δ – зростає, а струму I_δ – зменшується прямолінійно.

На осцилограмі напруги можна виділити три характерні етапи процесів розмикання контакт-деталей. На першому етапі контакт-деталі розходяться і в момент розриву робочих поверхонь контакт-деталей між собою, напруга миттєво збільшується від 45мВ до $13,5\text{В}$ і дуга загоряється. Потім протягом $3,5\text{ мс}$ на осцилограмі видно зменшення струму до нуля і дуга згасає. На осцилограмі спостерігається пік напруги, який виникає при погасанні дуги, внаслідок дії індуктивності $L=240\text{ мГн}$.

Процес виникнення дуги при відключенні кола, на основі отриманих осцилограм, можна проаналізувати так.

Перед початком розмикання контакт-деталей між ними створюється один або декілька мостиків із рідкого металу розміром у декілька мікрон. За час менше $1\text{-}2\text{ мкс}$ після початку розмикання вершини мостиків вибухають під дією джоулевого тепла і створюється напруженість електричного поля величиною $10^{-8}\text{-}10^{-9}\text{В/м}$, яка підтримує провідність у газовому розряді.

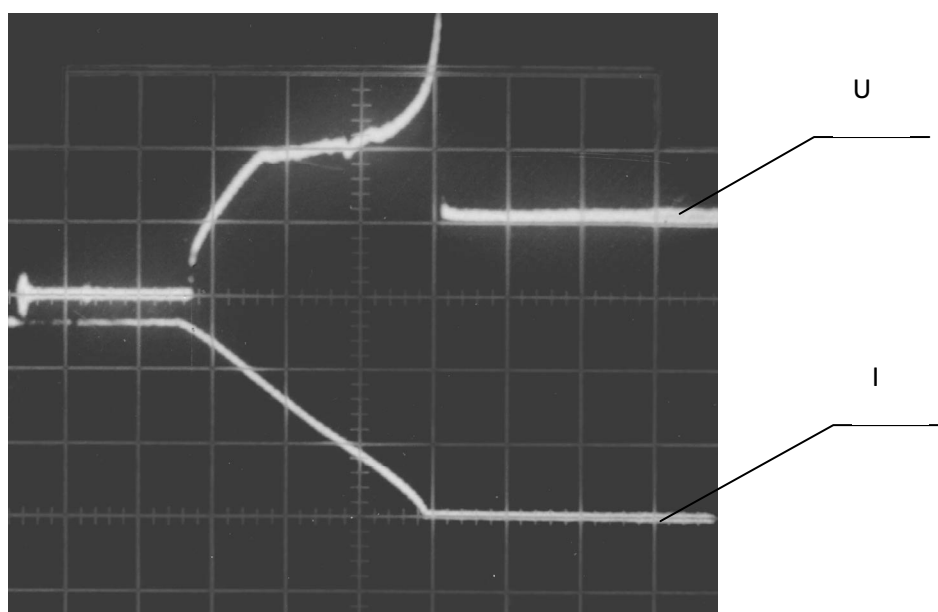


Рис. 1. Осцилограма струму і напруги в дугі між контакт-деталлями реле РПЛ–2204 при розмиканні електричного кола постійного струму з параметрами: $U=65\text{ В}$; $I=10\text{ А}$; $L=240\text{ мГн}$. Час горіння дуги $t=35\text{ мс}$

Напруга на контакт-деталях є безперервно зростаючою функцією часу і визначення величини сили струму в дугі, тривалості її горіння можливе при рішенні рівняння електричного кола з дугою:

$$U = IR + L \frac{dI}{dt} + U_{\partial}, \quad (1)$$

де: U – напруга джерела живлення, В; R – активний опір кола, Ом;
 L – індуктивність, Гн; I – струм електричного кола, А; U_{∂} – напруга дуги, В; t – час горіння дуги, с; dI/dt – швидкість зміни струму в дузі, А/с.

Рішення рівняння (1) дає закономірність зміни струму в дузі. З осцилограми (рис. 1) видно, що напруга в дузі змінюється за такою залежністю:

$$U_{\partial} = U_{\partial 0} + \kappa t, \quad (2)$$

де: $U_{\partial 0}$ – напруга запалювання дуги, В; κ – коефіцієнт, що залежить від матеріалу та відстані між контакт-деталлями, постійної часу τ і величини сили струму I ; t – час горіння дуги, с.

Після підстановки формули (2) у рівняння (1) отримаємо:

$$U = IR + L \frac{dI}{dt} + U_{\partial 0} + \kappa t. \quad (3)$$

Знаходження сили струму із виразу (3) проводиться так.

Приймаємо $I=xy$; $\frac{dI}{dt} = x \frac{dy}{dt} + y \frac{dx}{dt}$. Тоді:

$$\begin{aligned} U &= Rxy + L \left(x \frac{dy}{dt} + y \frac{dx}{dt} \right) + U_{\partial 0} + \kappa t = \\ &= Rxy + Lx \frac{dy}{dt} + Ly \frac{dx}{dt} + U_{\partial 0} + \kappa t. \end{aligned} \quad (4)$$

Приймаємо, що:

$$Rxy + Ly \frac{dx}{dt} = 0; \quad Rx + L \frac{dx}{dt} = 0; \quad x = e^{\frac{Rt}{L}} = e^{\frac{t}{\tau}}. \quad (5)$$

Тоді отримаємо:

$$U = Lx \frac{dy}{dt} + U_{\partial 0} + \kappa t; \quad U = Le^{\frac{t}{\tau}} \frac{dy}{dt} + U_{\partial 0} + \kappa t. \quad (6)$$

Звідси, маємо:

$$y = \int \frac{(U - U_{\partial 0} - \kappa t)e^{-\frac{t}{\tau}} dt}{L} = \frac{U}{R} e^{\frac{t}{\tau}} - \frac{U_{\partial 0}}{R} e^{\frac{t}{\tau}} - \frac{\kappa t}{R} e^{\frac{t}{\tau}} + \frac{\kappa \tau}{R} e^{\frac{t}{\tau}} + C. \quad (7)$$

Тоді:

$$\begin{aligned} I = xy &= e^{\frac{t}{\tau}} \left(\frac{U}{R} e^{\frac{t}{\tau}} - \frac{U_{\partial 0}}{R} e^{\frac{t}{\tau}} - \frac{\kappa t}{R} e^{\frac{t}{\tau}} + \frac{\kappa \tau}{R} e^{\frac{t}{\tau}} + C \right) = \\ &= \frac{U}{R} - \frac{U_{\partial 0}}{R} - \frac{\kappa t}{R} + \frac{\kappa \tau}{R} + Ce^{\frac{t}{\tau}}. \end{aligned} \quad (8)$$

Визначимо постійну інтегрування C , беручи до уваги, що при $t=0$ контакт-деталі замкнуті і струм дорівнює номінальному струму електричного кола: $I=I_0$. Отже:

$$I_0 = \frac{U}{R} - \frac{U_{\partial 0}}{R} - \frac{\kappa t}{R} + \frac{\kappa \tau}{R} + C \Rightarrow C = \frac{U_{\partial 0}}{R} - \frac{\kappa \tau}{R}. \quad (9)$$

У вираз (8) підставляємо формулу (9) та отримуємо:

$$\begin{aligned} I &= \frac{U}{R} - \frac{U_{\partial 0}}{R} - \frac{\kappa t}{R} + \frac{\kappa \tau}{R} + \left(\frac{U_{\partial 0}}{R} - \frac{\kappa \tau}{R} \right) e^{-\frac{t}{\tau}} = \\ &= I_0 \left(1 - \frac{\kappa t}{U} \right) - I_0 \left(\frac{U_{\partial 0} - \kappa \tau}{U} \right) \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right). \end{aligned} \quad (10)$$

Як видно з рівняння (10) зміна сили струму в колі при розмиканні контакт-деталей залежить від величини напруги джерела струму, фізико-механічних властивостей матеріалу контакт-деталей та часу горіння дуги.

Значення часу горіння дуги t_r може бути визначено із рівняння (10) при допущенні, що $I=I_t$ (струм обриву дуги). Для срібла він становить $I_t=0,4A$. Рівняння (10) тоді зводиться до вигляду:

$$I_t = I_0 \left(1 - \frac{\kappa t_r}{U} \right) - I_0 \left(\frac{U_{\partial 0} - \kappa \tau}{U} \right) \cdot \left(1 - e^{-\frac{t_r}{\tau}} \right). \quad (11)$$

Приймаємо $\alpha = \frac{I_0}{I_t}$.

Закономірності електричної ерозії як функції сили струму та кількості комутації. Відомо, що електроерозійна стійкість контакт-деталей реле залежить від величини струму, тривалості горіння дуги, кількості комутацій та фізико-механічних властивостей контактного матеріалу. Основні контактні матеріали, що використовуються в реле, наведено в таблиці.

Результати електроерозійних випробувань контакт-деталей реле РПЛ-2204 із матеріалу СрН-10 наведено на рис. 1. Матеріал СрН-10 включає дві складові фази: срібло – 90 % та нікель – 10 %. Фази нікелю та срібла не змішуються ні в твердому, ні в рідкому стані. Нікель підвищує зносостійкість, визначає міцність і твердість матеріалу, зменшує мостикоутворення при комутації струму, сприяє тривкості до атмосферної корозії. При нагріванні до 500 °С, контактний матеріал СрН-10 перетворюється в потрібну композицію: срібло-оксид нікелю-нікель з більш дрібнодисперсною структурою, ніж у вихідного матеріалу. Такий матеріал забезпечує невелику тривалість горіння електричної дуги, має позитивні функціональні характеристики дуги, але низьку теплостійкість. Це призводить до обгорання, розплавлення та зварювання контакт-деталей при високих електричних навантаженнях.

Електроерозійне руйнування матеріалу визначалося на основі зміни маси контакт-деталей, в залежності, від сили струму та кількості кому-

тацій. При комутації відбувається направлений перенос матеріалу з катода на анод (рис. 2), який пов'язаний з дугою розмикання, що виникає при бомбардуванні катода позитивно зарядженими іонами.

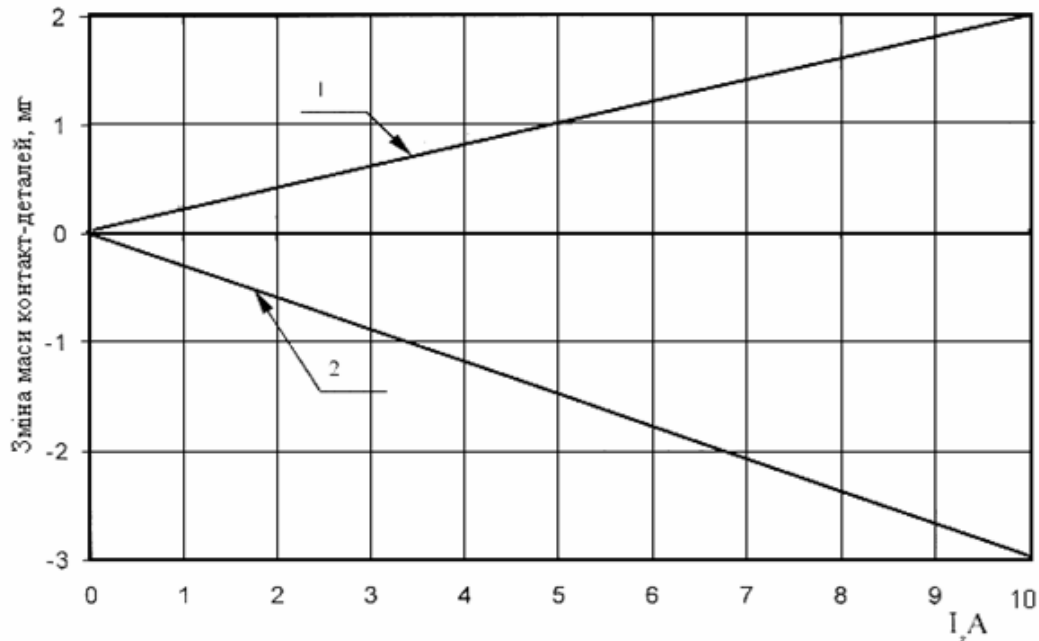
Для гетерогенних матеріалів встановлена закономірність закріплення дугового каналу в районі структурних складових, де полегшуються умови виникнення автоемісійних центрів. При переміщенні дуги по поверхні контакт-деталей відбувається дисипація енергії дуги і зменшується кількість теплової енергії, що поглинається матеріалом контакт-деталей. Знання закономірностей фіксації дугового каналу дозволяє цілеспрямовано конструювати структуру контактних матеріалів для отримання більш високих ерозійних характеристик.

Основні матеріали, що використовуються в контакт-деталях реле

Реле		Марка контактів	Матеріал контактів, мас%
Найменування	Тип		
Електромагнітні	РПЛ-122	СрН-10	срібло - 90 нікель – 10
	ПЭ 36, ПЭ 37, РЭП-20	СрКдІн	срібло – 72,5 кадмій – 26 індій – 1,0 мідь – 0,5
	ПЭ-4, ПЭ-5, ПЭ-9, ПЭ-10	КМК-А10	срібло – 85 кадмій – 15 срібло – 99,2
Електротеплові	РТЛ	СрМ- 0,2+М1 50БПГ	мідь – 0,5 нікель – 0,2 бор – 0,1
Приставки контактні до електромагнітних пускачів	ПКЛ-2204, ПКЛ-0404	СрН-10	срібло - 90 нікель – 10
Реле електрокар	КП-1300	КМК-А00	срібло – 100

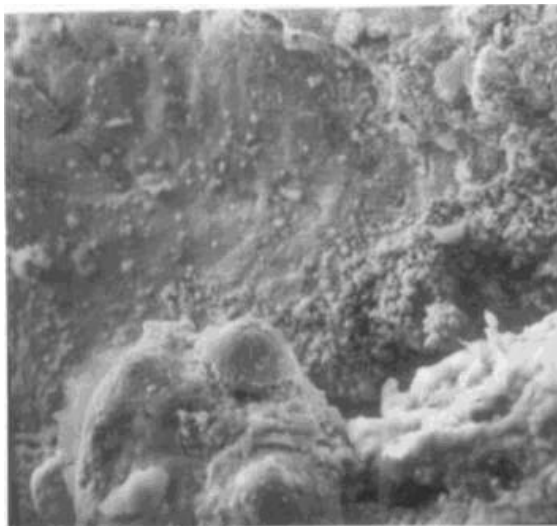
Електронно-мікроскопічні дослідження зміни мікроструктури (рис. 3), що відбуваються на робочих поверхнях контакт-деталей під дією струмового навантаження, дозволили безпосередньо простежити за результатами впливу дуги на окремі структурні складові матеріалу. Серед них необхідно зазначити: місця контактної термічної дії дуги, ділянки термічного, механічного та втомлюючого руйнування, зони оплавлення, розбризкування та затвердіння рідкої фази срібла, ділянки осідання кристалів срібла, ділянки інтенсивної ерозії границь зерен і поверхні матеріалу.

У процесі комутації струму відбувається плавлення та інтенсивне випаровування легкоплавкої складової з робочої поверхні катода, внаслідок чого формується дисперсна, бугриста поверхня, ступінь шорсткості якої залежить від величини зерна нікелевої складової (див. рис. 3, а). У результаті дії дуги плавиться не тільки легкоплавка складові композиції – срібло, але також зерна нікелю. Поверхня анода вкрита частками дрібнодисперсного срібла, перенесеного з катода через газоподібну чи рідку фазу (див. рис. 3, б).



**Рис.2. Залежність електричної ерозії контакт-деталей від величини комутованого струму. Матеріал CrH-10 (90%Ag+10%Ni):
1 – анод, 2 – катод, $n=5 \cdot 10^4$ циклів комутацій**

Мікроструктура контактного матеріалу CrH-10 являє собою рівномірно дрібнодисперсну суміш срібної та нікелевої фаз, частинки яких витягнулися паралельно напрямку прокатування дроту, що забезпечує анізотропність фізичних характеристик (рис. 4, а). Структура поверхневих шарів робочої поверхні змінюється при багаторазовому термічному впливу електричної дуги.



а

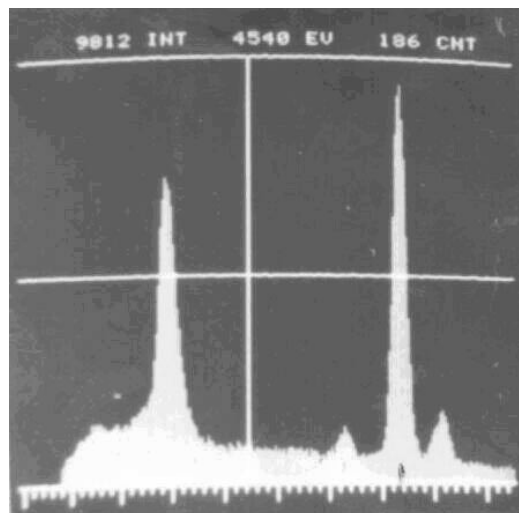


б

**Рис. 3. Робоча поверхня контакт-деталей реле РПЛ-2204. Матеріал CrH-10 (90 %Ag+10 %Ni):
а – катод, б – анод, $I=10A$, $n=5 \cdot 10^4$ циклів комутацій**



а



б

Рис. 4. Мікроструктура (а) та спектральний аналіз (б) контакт-деталей реле РПЛ-2204. Матеріал СрН-10 (90%Ag+10%Ni), $n=5 \cdot 10^4$ циклів комутацій

По мірі наближення до робочої поверхні розмір зерен збільшується і утворюються різні види структури в зоні дії електричної дуги. На робочій поверхні формується мікроструктура з незначним виділенням нікелю (2 % мас.) всередині легкоплавкої складової срібла. Внаслідок чого створюється висока стійкість матеріалу проти обгоряння та з низьким контактним опором. Глибина шару, в якому відбуваються мікроструктурні зміни становить приблизно 0,08-0,1мм. Як уже зазначалося, при комутації струму на робочій поверхні відбувається плавлення та випаровування легкоплавкої складової (срібла), оскільки температура випаровування срібла (2210 °С) значно нижча температури випаровування нікелю (2730 °С). Внаслідок цього і формується дисперсна нерівномірна бугриста поверхня (див. рис. 4), ступінь шорсткості якої залежить від величини струму та кількості циклів комутації. Спектральний аналіз поверхневих шарів напрацювання показав, що кількість нікелю на робочій поверхні значно збільшується (від 10 % до 20–25 %), а це є свідченням першочерговості випаровування срібла з поверхні контакт-деталі в процесі комутації струму (див. рис. 4, б).

Отримані результати дають змогу стверджувати, що контактування на поверхні із вмістом нікелю 20–25 % здійснюється по точках тугоплавкої складової (нікелю), яка і визначає схильність матеріалу до зварювання.

Кореляційний зв'язок електричної ерозії з фізико-механічними властивостями контактного матеріалу. Для визначення зв'язку електродугової ерозії з фізико-механічними властивостями металів були проведені випробування металів, які є складовими композиційних контактних матеріалів, що використовуються як у реле, так і в комутаційних апаратах напругою до 1000В. Такими металами є титан, хром, нікель, мідь, ітрій, цирконій, ніобій, молібден, срібло.

Значення електродугової ерозії визначалося при випробуваннях при величині струму $I=10$ А в різномірних парах зі сріблом та міддю, а в однорідних парах з одноіменними металами.

Результати досліджень. Отже, залежності інтенсивності ерозії анодів при випробуваннях у парі з розглянутими катодами (Ag, Cu) мають однаковий характер. Інтенсивність електроерозії анодів Δm_{ai} у металів з різними фізико-механічними властивостями неоднакова. Саму високу інтенсивність електроерозії має ітрій. Маса анода зі срібла не зменшується, а збільшується, тобто іде направлений перенос металу з катода на анод. У різномірних парах, де катодом є срібло, маса катода зростає, що свідчить про направлений перенос матеріалу з анода на катод.

У різномірній парі, де катодом є мідь, зменшується маса як анода так і катода. Інтенсивність ерозії анода набагато вища катода. Виключенням тут є ітрій, в якого маса анода переноситься на катод.

Аналіз результатів досліджень показав, що серед випробуваних металів є такі, які мають високу ерозійну стійкість на аноді – нікель, мідь, ніобій, молібден, срібло і метали з ерозійною стійкістю на катоді – титан, цирконій, ніобій, молібден, срібло. Простежується теж така тенденція, що є метали, які проявляють високу ерозійну стійкість при будь-якій полярності, тобто є ерозієстійкими як на аноді, так і на катоді. До таких належать срібло, молібден, ніобій.

Висновки

У результаті досліджень електроерозійної стійкості, перехідного опору контакт-деталей, вивчення мікроструктури контактного матеріалу після випробувань, можна зробити такі висновки:

- встановлено, що електроерозійна стійкість контакт-деталей із матеріалу CrH-10 залежить від сили струму, тривалості горіння дуги, кількості комутацій та фізико-механічних властивостей контактного матеріалу;

- електронно-мікроскопічні дослідження мікроструктури виявили ділянки термічного, механічного та втомлюючого руйнування матеріалу. В процесі комутації струму відбувається плавлення та інтенсивне випаровування легкоплавкої складової з робочої поверхні катода, внаслідок чого формується дисперсна бугриста поверхня. Робоча поверхня анода вкрита частками дрібнодисперсного срібла, перенесеного з катода через газоподібну або рідку фазу. Спектральний аналіз поверхневих шарів на працюючому показав, що кількість нікелю на робочій поверхні катода значно збільшується, а це є свідченням першочерговості випаровування срібла з поверхні контакт-деталі в процесі комутації струму;

– результати досліджень з впливу хімічно активних реагентів навколишнього середовища на величину перехідного опору показали, що граничнодопустима концентрація аміаку, сірководню, двоокису сірки, двоокису вуглецю у повітряному середовищі тваринницьких приміщень при вологості 95–100 % підвищує перехідний опір контакт-деталей в 5–7 раз.

Список літератури:

1. Буткевич Г.В. Дуговые процессы при коммутации электрических цепей / Буткевич Г.В. – М.: Энергия, 1973. – 172 с.
2. Гопкинс М.Р. Переходные процессы, мостики, микродугои и перенос металла при коммутации низковольтных цепей электрическими контактами / М.Р. Гопкинс, Р.Х. Джонс // Электротехническая пром-сть. Серия «Аппараты низкого напряжения». – 1974. – Вып. 6(37). – С. 52–56.
3. Изделия коммутационные, установочные и соединители электрические. Методы измерения сопротивления контакта, динамической и статической нестабильности переходного сопротивления контакта: ГОСТ 24606.3-82 (СТ СЭВ 3985-83). – [Введен с 1982-07-01]. – М.: Изд-во стандартов, 1985. – 5 с.
4. Ковалева Е.В. Установка для исследования эрозии и переходного сопротивления материалов в различных средах / Е.В. Ковалева, И.В. Пархоменко // Электротехническая пром-сть. Серия «Аппараты низкого напряжения». – 1974. – Вып. 8 (39). – С. 55-61.
5. Намитокоев К.К. Проблемы эрозионных и электродных процессов в низковольтных сильноточных аппаратах и других устройствах: дис...доктора техн. наук: 05. 09.16. / Намитокоев К.К. – Харьков, 1969. – 560 с.
6. Омельченко В.Т. Исследование мостиковой эрозии электрических контактов. Омельченко В.Т. // Электрические контакты: тр. совещания (29 марта–01 апреля 1965 г.); отв. редактор Б.С. Сотсков. – М.: Энергия, 1967. – С. 82–96.
7. Разумихин М.А. Эрозионная устойчивость маломощных контактов / Разумихин М.А. – М.; Л.: Энергия, 1964. – 83 с.

Рассмотрены процессы возникновения электрической дуги и продолжительности ее горения на контакт-деталях реле серии РПЛ-2204 и закономерности изменения электрической эрозии как функции силы тока и количества коммутаций.

Електромагнітні реле, електрична ерозія, контактний матеріал, напруга, сила струму, енергія, комутаційні апарати.

The processes of the electric arc and the duration of its burning on contact details relays РПЛ-2204 and the patterns of change of electrical erosion as a function of the current and the number of cycles.

Electromagnetic relays, electrical erosion, contact material, voltage, current, energy, power, switching devices.