

**ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРЕХІДНОГО ОПОРУ ТА ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕРОЗІЇ  
СЕРІЙНИХ КОНТАКТ-ДЕТАЛЕЙ РЕЛЕ ПКЛ - 2204**

***А. О. Березюк, кандидат технічних наук, доцент***

*E-mail: [bereziuk@nubip.edu.ua](mailto:bereziuk@nubip.edu.ua)*

***В. В. Васюк, кандидат технічних наук, доцент***

*E-mail: [vasyuk@nubip.edu.ua](mailto:vasyuk@nubip.edu.ua)*

***Національний університет біоресурсів і природокористування України***

***О. В. Вишинський, завідувач електромеханічного відділення***

***Кам'янець-Подільський фаховий коледж індустрії, бізнесу та  
інформаційних технологій***

*E-mail: [vishinskiy1982@gmail.com](mailto:vishinskiy1982@gmail.com)*

**Анотація.** Розглянуто процеси виникнення електричної дуги та її тривалість на контакт-деталях реле серії ПКЛ-2204. Також вивчені закономірності зміни електричної ерозії, яка є функцією сили струму та кількості комутацій.

Проведено детальний аналіз процесу розмикання контакт-деталей на основі осцилограми напруги. Дослідження показали, що цей процес можна розглядати у трьох основних етапах. Перший етап відзначається розходженням контакт-деталей, і в сам момент розриву робочих поверхонь відбувається різкий стрибок напруги з 45 мВ до 13,5 В, супроводжуваний формуванням електричної дуги. Другий етап, тривалістю близько 3,5 мс, характеризується послабленням струму до нуля, і дуга повністю гасне на осцилограмі. Третій етап відзначається виникненням піка напруги на осцилограмі, який виникає при загасанні дуги й обумовлений індуктивністю  $L=240$  мГн. Цей аналіз допомагає краще розуміти процес розмикання контактів та може мати практичне застосування у сфері електротехніки та електроніки.

Аналіз результатів наших досліджень вказує на наявність металів, які володіють високою стійкістю до ерозії незалежно від їх ролі як анода чи катода. Серед цих металів можна відзначити нікель, мідь, ніобій, молибден, срібло та інші, які проявляють стійкість до ерозії навіть при зміні полярності, тобто вони є ерозійностійкими як на аноді, так і на катоді. Зокрема, серед таких металів варто відзначити срібло, молибден та ніобій, які демонструють надзвичайну стійкість до ерозії в різних умовах. Ці результати можуть мати важливе значення для розробки стійких до ерозії матеріалів для електронних пристроїв та інших застосувань.

На основі проведених досліджень виявлено, що електроерозійна стійкість контакт-деталей, виготовлених із матеріалу СрН-10, залежить від кількох

*факторів, включаючи силу струму, тривалість горіння дуги, кількість комутацій та фізико-механічні властивості контактного матеріалу.*

*Дослідження мікроструктури матеріалу під час процесу комутації струму виявили термічне, механічне та втомлююче руйнування. Під час цього процесу легкоплавка складова матеріалу катода плавиться й інтенсивно випаровується, що призводить до формування дисперсної та бугристої поверхні. Робоча поверхня анода вкрита дрібнодисперсними частками срібла, які переносяться з катода через газоподібну або рідку фазу. Аналіз спектрів поверхневих шарів свідчить про значне випадання нікелю на робочій поверхні катода, що підтверджує пріоритет випаровування срібла з поверхні контакт-деталі під час комутації струму.*

*Дослідження ефекту хімічно активних реагентів на перехідний опір показало, що у вологому повітрі з високим вмістом аміаку, сірководню, двоокису сірки та двоокису вуглецю перехідний опір контакт-деталей зростає в 5-7 разів.*

**Ключові слова:** *комутаційні апарати, електрична ерозія, контактний матеріал, робоча поверхня контакт-деталей*

**Актуальність.** Реле є важливими електричними пристроями, які використовуються для комутації електричних кіл та проведення струму у різних промислових, комерційних та побутових системах. Вони виконують функцію перемикачів електричних контактів, що дозволяє забезпечити коректну роботу систем та забезпечити необхідні електричні з'єднання.

Під час експлуатації реле виникає ряд проблем, які негативно впливають на їхню роботу та, як наслідок, надійність. Основними з них є значний перехідний опір та електрична ерозія контакт-деталей [1, 2].

Перехідний опір є результатом неідеальності контактів у реле та залежить від фізичних властивостей матеріалів, таких як провідність та поверхневі характеристики контактів. Цей опір виникає під час процесу замикачів або розмикання контактів та може впливати на якість комутації та ефективність роботи реле. Він може призводити до втрати енергії, нестабільного контакту та нагрівання контактів. Перехідний опір є важливим фактором в роботі реле, оскільки він визначає точність та надійність комутації. Високий перехідний опір може призвести до проміжку між контактами, що ускладнює перехід струму, а також призводити до надмірного нагрівання контактів, що може призвести до їхнього зносу та втрати функціональності реле. Для забезпечення надійної роботи реле важливо вивчати та

контролювати параметри перехідного опору та вдосконалювати матеріали та конструкції контактів для мінімізації цього опору.

Електрична ерозія, в свою чергу, виникає через поступовий знос контакт-деталей, спричинений проходженням електричного струму через них. Це може призводити до погіршення якості контакту, збільшення перехідного опору та зниження надійності роботи реле. 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 [3].

Цей процес є критичним у визначенні тривалості служби реле та їхньої надійності, оскільки знос контактів може призвести до втрати ефективної площини контакту та збільшення опору, що, в свою чергу, може викликати несправності та перебої у роботі систем, де вони використовуються. Тому вивчення та аналіз електроерозійного зносу, а також розробка спеціальних матеріалів та технологій, спрямованих на зменшення цього явища, є важливими завданнями в електротехнічній науці та промисловості.

Об'єктом дослідження в цій роботі є контакт-деталі реле ПКЛ-2204 з урахуванням його широкого застосування, поширеності проблем, доступності даних та практичної важливості у різних галузях промисловості та транспорту.

Актуальність проведення цього дослідження обумовлена кількома причинами. По-перше, воно спрямоване на покращення надійності контактних систем, що є критично важливим для багатьох електричних систем і може позитивно позначитися на безпеці та функціональності цих систем. По-друге, дослідження спрямоване на підвищення технічних характеристик реле, що може призвести до поліпшення їхньої продуктивності та ефективності. По-третє, враховуючи економічну вигоду від оптимізації роботи реле та подальший розвиток технологій у цій області, дослідження має внести позитивний вклад у розвиток електротехнічної індустрії та

забезпечити економічну вигоду для підприємств, які використовують реле ПКЛ-2204.

Отже, це дослідження має важливе наукове та практичне значення і може призвести до покращення якості та надійності реле в різних сферах застосування, що робить його актуальним та важливим для подальшого розвитку електротехніки.

Таким чином, дослідження перехідного опору та електричної ерозії серійних контакт-деталей реле ПКЛ-2204 має велику актуальність і важливість для покращення надійності і функціональних характеристик цих реле, а також для вдосконалення електричних систем загалом.

Аналіз фізичних процесів, що відбуваються в контакт-деталях, дозволить розробити методи покращення їх робочих характеристик, забезпечити стабільну роботу реле та підвищити їх надійність. Тому дослідження перехідного опору та електричної ерозії серійних контакт-деталей реле є важливою проблемою. Розуміння фізичних процесів, що відбуваються в контакт-деталях, дозволить розробити методи покращення їх робочих характеристик, забезпечити стабільну роботу реле та підвищити їх надійність.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Результати наукових досліджень, присвячені дослідженню перехідного опору та електричної ерозії серійних контакт-деталей реле, розглядалися в таких публікаціях. У дослідженні [4] наведено результати, що стосуються зносостійкості та ерозії серійних контакт-деталей електромагнітних пускачів, виготовлених зі срібла. У цьому дослідженні встановлено закономірності, які стосуються ерозійного руйнування розривних мостикових контактів. У публікації [5] досліджено залежність перехідного опору електричних контактів від дотичної сили стискання без проковзування. У результаті дослідження встановлені степеневі залежності, які характеризують зміну довжини площадки контакту та перехідного опору залежно від способу навантаження. У публікації [6] досліджується можливість створення математичної моделі процесу механічної ерозії слабкострумівих електричних контактних пар. Для цього використовується моделювання з використанням програмної системи MATLAB та методу ідентифікації, який передбачає отримання математичної моделі реального

об'єкта на основі експериментальних даних у вигляді алгебраїчних рівнянь. У роботі [7] висвітлено створення безпечного екологічного композиційного контактного матеріалу з підвищеною стійкістю до електроерозії для комутаційних апаратів. Використання таких нових контактних матеріалів на основі срібла покращує ресурс експлуатації, надійність і екологічність апаратів. Шляхом дослідження впливу домішок на контактні властивості матеріалу визначено типи домішок, що покращують його характеристики, відповідно до наукових принципів структуроутворення композиційних матеріалів. У роботі [8] розглядаються методи відновлення та підсилення деталей електрообладнання, використовуючи композиційні матеріали, і розробляються спеціалізовані стенди для вивчення електричної ерозії й перехідного опору контакт-деталей електричних апаратів напругою до 1000 В. У дослідженні [9] аналізуються характеристики електромагнітного контактора під час формування дугового розряду.

Представлені дослідження свідчать про активний інтерес наукової спільноти до проблем перехідного опору та електричної ерозії серійних контакт-деталей реле. Вони висвітлюють необхідність подальших досліджень з метою вдосконалення матеріалів, конструкцій та технологій, спрямованих на покращення якості та надійності роботи реле ПКЛ-2204.

**Мета дослідження** - підвищення надійності роботи та зменшення зносостійкості контакт-деталей електромагнітних реле, які використовуються в електроустановках. яка досягається шляхом вивчення та оптимізації властивостей матеріалу, з якого виготовлені контакти, а також параметрів електричної дуги, таких як напруга, сила струму та тривалість горіння. Ця мета має важливе практичне значення, оскільки надійність роботи реле в електроустановках визначає їхню загальну ефективність і безпеку. Зниження зносостійкості контактів може позитивно позначитися на тривалості їхньої служби та вартості експлуатації електроустановок. Водночас оптимізація параметрів електричної дуги може сприяти зменшенню енерговитрат і підвищенню стійкості контактів.

**Матеріали і методи дослідження.** Для встановлення закономірностей зміни електричної ерозії та перехідного опору від параметрів електричної дуги та

властивостей контактної матеріалу використовувалися відомі й розроблені детерміновані та імовірнісні математичні та фізичні моделі контакт-деталей комутаційних апаратів [10, 11]. Експериментальні дослідження в лабораторних умовах проводилися на спеціальному стенді з використанням кліматичної камери. Аналіз теплових процесів на контакт-деталях проводився методом розв'язування нелінійної задачі теплопровідності напівнескінченного тіла з урахуванням витрат енергії. Ці методи дозволили отримати важливі дані та встановити зв'язок між параметрами дуги та властивостями матеріалу контактів, що важливо для розуміння та контролю процесів перехідного опору та електричної ерозії. Використання детермінованих імовірнісних моделей сприяє покращенню прогнозування й оптимізації роботи комутаційних апаратів.

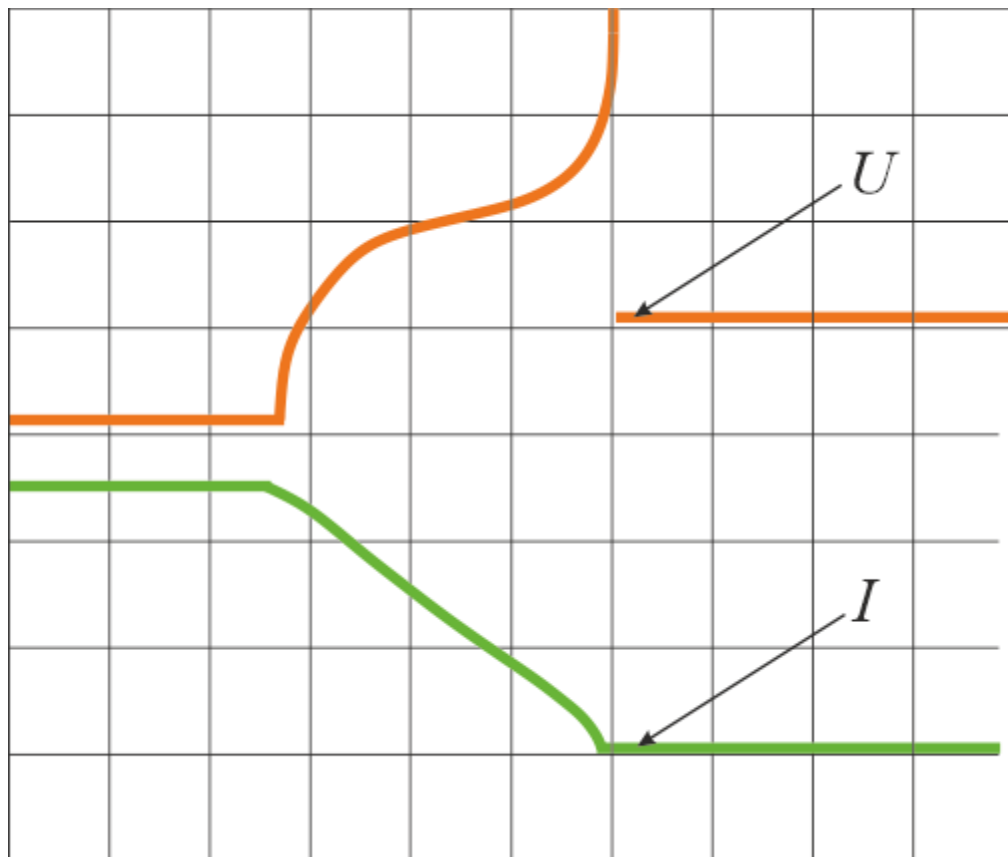
**Результати досліджень та їх обговорення.** Електроерозійна стійкість контакт-деталей реле визначається, головним чином, властивостями матеріалу контактів та параметрами електричної дуги, такими як величина напруги, сила струму та тривалість її горіння. Оскільки тривалість горіння дуги є ключовим фактором, що впливає на зносостійкість контакт-деталей, було проведено осцилографування параметрів електричної дуги на контакт-деталях реле типу РПЛ-2204 під час розмикання електричного кола постійного струму.

Це дослідження важливе для розуміння процесів, які відбуваються під час роботи реле та впливають на стійкість їх контактів до електроерозії. Дані, отримані під час осцилографування, можуть служити основою для подальших аналізів та вдосконалення технологій виготовлення контактів з метою підвищення їхньої тривалості служби та зменшення зносостійкості.

Це дослідження сприяє покращенню якості та надійності електричних реле та може мати значущий вплив на безпеку та ефективність електроустановок.

Графічне зображення процесу формування електричної дуги та тривалості її горіння під час розмикання електричного кола при визначених значеннях струму  $I = 10$  А, напруги  $U = 64$  В та постійної часу  $\tau = 40$  мс представлено на рис. 1. До моменту розмикання контактів апарату  $t = 0$  у колі якого протікав струм  $I = 10$  А, а спад напруги на контактах складав  $\Delta U_{\kappa} = 45$  В. Починаючи з часу  $t = 0$ , опір дуги

$R_{\delta}$  почав зростати, напруга  $U_{\delta}$  на ній збільшувалася, а струм  $I_{\delta}$  прямолінійно зменшувався.



**Рис. 1. Осцилограма струму і напруги в дузі між контакт-деталлями реле ПКЛ-2204 при розмиканні електричного кола постійного струму при параметрах:**

$U = 65 \text{ В}; I = 10 \text{ А}; L = 240 \text{ мГн}$ . Час горіння дуги  $t = 35 \text{ мс}$ .

При аналізі осцилограми напруги виявляється, що процес розмикання контакт-деталей можна розглядати у трьох характерних етапах. Перший етап характеризується розходженням контакт-деталей, і в сам момент розриву робочих поверхонь контакт-деталей виникає різкий скачок напруги з 45 мВ до 13,5 В, супроводжуваний утворенням електричної дуги. На другому етапі, що триває приблизно 3,5 мс, на осцилограмі помітно зниження струму до нуля, і дуга зникає. Третій етап відзначається виникненням піка напруги на осцилограмі, що виникає при загасанні дуги й спричинене індуктивністю  $L = 240 \text{ мГн}$ .

Аналіз процесу утворення дуги під час відключення електричного кола, заснований на отриманих осцилограмах, може бути проведений так. Перед початком

розмикання контакт-деталей утворюють один або декілька мікронних мостиків з рідкого металу. Протягом менше, ніж 1-2 мікросекунд після початку розмикання, вершини цих мостиків вибухають внаслідок джоулевого нагрівання, що призводить до створення високого електричного поля з напруженістю від  $10^{-8}$  до  $10^{-9}$  В/м. Це поле підтримує провідність в газовому розряді.

Напруга на контакт-деталях є неперервно зростаючою функцією часу, і визначення величини струму у дузі та тривалості її горіння можливе за допомогою розв'язання рівняння електричного кола з урахуванням присутності дуги:

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

Цей аналіз дозволяє краще розуміти та описувати механізми, які лежать в основі утворення дуги під час відключення електричних контактів.

Зміна сили струму в колі при процесі розмикання контакт-деталей підпорядкована кільком факторам, включаючи величину напруги джерела струму, фізико-механічні властивості матеріалу контакт-деталей та тривалість горіння дуги.

Значення часу горіння дуги  $t_r$  може бути розраховане за допущення, що струм обриву дуги  $I = I_r$ . Для срібла цей час складає  $I_r = 0,4$  А.

$$I_r = I_0 \left( 1 - \frac{\kappa t_c}{U} \right) - I_0 \left( \frac{U_{\delta 0} - \kappa \tau}{U} \right) \cdot \left( 1 - e^{-\frac{t_c}{\tau}} \right). \quad (2)$$

Відомо, що електроерозійна стійкість контакт-деталей реле залежить від кількох факторів, таких як величина струму, тривалість горіння дуги, кількість комутацій, а також фізико-механічні властивості контактного матеріалу [12].

Отримані результати електроерозійних випробувань контакт-деталей реле ПКЛ-2204, виготовлених з матеріалу СрН-10, подані на рис. 1. Матеріал СрН-10 містить дві складові фази: срібло складає 90 %, а нікель – 10 %. Фази нікелю та срібла не взаємодіють між собою ні в твердому, ні в рідкому стані. Нікель впливає на підвищення стійкості до зношування, визначає міцність і твердість матеріалу, а також зменшує утворення мостиків під час комутації струму. Він також сприяє стійкості до атмосферної корозії [7]. При нагріванні до температури 500 °С контактний матеріал СрН-10 переходить у потрібну композицію, яка включає в себе



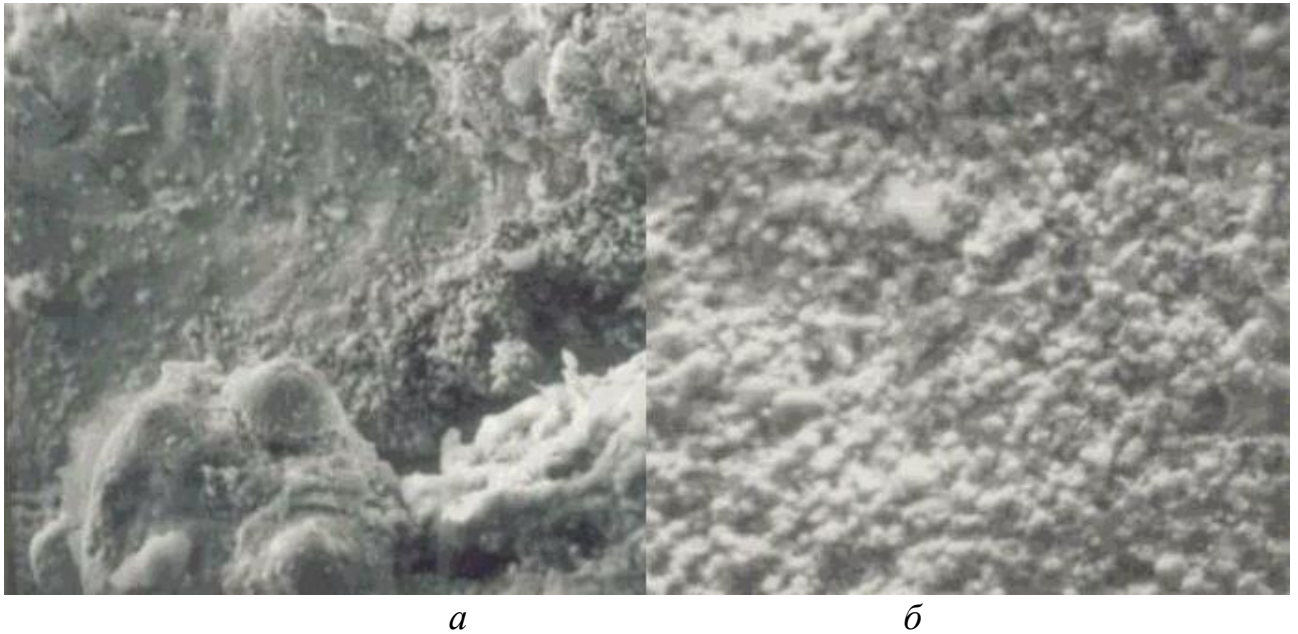
срібло, оксид нікелю та нікель. Структура цього матеріалу стає більш дрібнодисперсною, ніж у вихідного матеріалу. Такий матеріал має кілька переваг, зокрема, він забезпечує короткий час горіння електричної дуги та має позитивні характеристики дуги. Однак він володіє низькою теплостійкістю, що може призводити до обгоряння, розплавлення та зварювання контакт-деталей при високих електричних навантаженнях.

Електронно-мікроскопічні дослідження зміни мікроструктури (рис. 2), які відбуваються на робочих поверхнях контакт-деталей під впливом струмового навантаження, дозволили нам докладно вивчити вплив дуги на окремі структурні складові матеріалу. Серед цих складових важливо виділити такі:

1. Місця контактної термічної дії дуги.
2. Ділянки термічного, механічного та втомлюючого руйнування.
3. Зони оплавлення, розбризкування та затвердіння рідкої фази срібла.
4. Ділянки осідання кристалів срібла.
5. Ділянки інтенсивної ерозії границь зерен і поверхні матеріалу.

Ці дослідження дозволили зрозуміти, як дуга впливає на структуру матеріалу контакт-деталей та визначити процеси, що відбуваються під час експлуатації.

Під час комутації струму спостерігається плавлення й інтенсивне випаровування складових матеріалу з робочої поверхні катода, що є легкоплавкими. Цей процес призводить до формування дисперсної та бугристої поверхні, а ступінь шорсткості цієї поверхні залежить від розміру зерен нікелевої складової матеріалу (рис. 2, а). Важливо зауважити, що під впливом дуги плавиться не лише легкоплавка складова композиції, а саме срібло, але також і зерна нікелю. Як результат, поверхня анода покривається частками дрібнодисперсного срібла, яке переміщується з катода через газову або рідку фазу (рис. 2, б).



**Рис. 2. Робоча поверхня контакт-деталей реле ПКЛ-2204. Матеріал СrН-10 (90%Ag+10%Ni):**

*a* – катод, *б* – анод,  $I=10\text{A}$ ,  $n=5\cdot 10^4$  циклів комутацій

За отриманими результатами можна стверджувати, що контактування на поверхні з вмістом нікелю 20-25 % здійснюється переважно через точки тугоплавкої складової (нікелю). Ця складова визначає схильність матеріалу до зварювання. Для вивчення залежності електродугової ерозії від фізико-механічних властивостей металів були проведені випробування металів, які є складовими композиційних контактних матеріалів. Ці матеріали використовуються як у реле, так і в комутаційних апаратах для роботи під напругою до 1000 В. Серед таких металів можна відзначити титан, хром, нікель, мідь, ітрій, цирконій, ніобій, молібден і срібло.

Значення електродугової ерозії було визначено шляхом проведення випробувань за величини струму  $I = 10\text{ A}$ . У таких випробуваннях використовувалися пари металів, де один із них був сріблом або міддю, та пари металів, де використовувалися однакові метали.

Аналіз залежностей інтенсивності ерозії анодів під час випробувань у парі з розглянутими катодами (Ag, Cu) показує схожий характер цих процесів. Проте інтенсивність електроерозії анодів  $\Delta m_{ai}$  металів з різними фізико-механічними властивостями виявляє різний характер. Зокрема, ітрій демонструє найвищу

інтенсивність електроерозії серед досліджених матеріалів. Цікаво відзначити, що маса анода зі срібла не зменшується, а навпаки, збільшується, що свідчить про напрямок перенесення матеріалу з катода на анод. У випадку різнорідних пар, де срібло виступає у ролі катода, маса катода також зростає, що підтверджує напрямок переносу матеріалу з анода на катод.

У випадку різнорідної пари, де катодом виступає мідь, спостерігається зменшення маси як анода, так і катода. Проте інтенсивність ерозії анода виявляється значно вищою, ніж у катода. Важливим аспектом є виняток у вигляді ітрію, де маса анода переноситься на катод.

Аналіз отриманих результатів досліджень свідчить, що серед випробуваних металів існують такі, які відзначаються високою стійкістю до ерозії як на аноді, так і на катоді. До цієї категорії входять нікель, мідь, ніобій, молібден, срібло і метали, які проявляють стійкість до ерозії незалежно від полярності, тобто ерозійностійкими є як на аноді, так і на катоді. Серед таких металів можна виділити срібло, молібден і ніобій.

**Висновки і перспективи.** На основі проведених досліджень встановлено, що електроерозійна стійкість контакт-деталей, виготовлених із матеріалу CrH-10, залежить від кількох факторів, включаючи силу струму, тривалість горіння дуги, кількість комутацій та фізико-механічні властивості контактного матеріалу.

За результатами електронно-мікроскопічних досліджень було виявлено, що мікроструктура матеріалу піддається дії термічного, механічного та втомлюючого руйнування під час процесу комутації струму. Під час цього процесу легкоплавка складова матеріалу катода плавиться й інтенсивно випаровується, що призводить до формування дисперсної та бугристої поверхні. Робоча поверхня анода вкрита дрібнодисперсними частками срібла, які переносяться з катода через газоподібну або рідку фазу. Аналіз спектрів поверхневих шарів свідчить про значне випадання нікелю на робочій поверхні катода, що підтверджує пріоритет випаровування срібла з поверхні контакт-деталі під час комутації струму.

Результати наших досліджень щодо впливу хімічно активних реагентів навколишнього середовища на величину перехідного опору показали, що

граничнодопустима концентрація аміаку, сірководню, двоокису сірки та двоокису вуглецю в повітрі в тваринницьких приміщеннях, де вологість становить 95-100 %, призводить до збільшення перехідного опору контакт-деталей в 5-7 разів.

### **Список використаних джерел**

1. Braunovic M., Myshkin N. K., Konchits V. V. Electrical contacts: fundamentals, applications and technology. New York: CRC Press, 2007. 646 p.
2. Клименко Б. В. Електричні апарати. Електромеханічна апаратура комутації, керування та захисту. Загальний курс : навчальний посібник. Харків: Видавництво «Точка», 2012. 340 с.
3. Коробський В. В., Акулінін Я. Д. Дослідження робочих поверхонь контактів електромагнітних пускачів та реле з використанням електронного мікроскопу. Енергетика і автоматика. 2022. № 6. С. 45-58.
4. Коробський В. В. Експериментальні дослідження ерозійного зносу серійних контакт-деталей пускачів як функція кількості комутацій. Наук. вісн. НУБІП України. Серія "Техніка та енергетика в АПК". 2013. Вип. №184, ч. 1. С. 181-187.
5. Волкова О. Г. Метод зменшення перехідного опору розривних контактів комутаційних пристроїв. Вісник Криворізького національного університету. 2015. № 39. С. 78-81.
6. Ситник О. О., Ключка К. М., Кисельов В. Б., Кисельова Г.О. Моделювання місткової ерозії слабкострумівих електричних контактів засобами MatLab. Математичне та кмп'ютерне моделювання. Серія: Технічні науки. Кам'янець-Подільський, 2020. № 21. С. 40-52,
7. Кохановський В. О. Підвищення електроерозійної стійкості контактів низьковольтних комутаційних апаратів. Енергетика, 2015. № 1. С. 81-86.
8. Заблудський М. М., Наливайко В. А., Радько І. П., Окушко О. В., Радько І.В. Технології відновлення і зміцнення деталей електрообладнання з використанням композиційних матеріалів. К.: «Видавничий центр НУБІП України», 2022. 268 с.
9. Yoshida K., Shimotsuma S., Sawa K., Suzuki K., Takaya K. Various characteristics of electromagnetic contactor when arc discharge are generated only make arc. 2016 IEEE 62nd Holm Conference on Electrical Contacts (Holm), Clearwater Beach, FL, USA, 2016. P. 215-221.
10. Мрачковський А. М., Соловей О. В. Особливості дугових розрядів та ерозійних явищ. Енергетика і автоматика, 2021. № 2. С. 135-145.
11. Коханівський, С. П., Радько, І. П., Наливайко, В. А. Вплив енергії дуги на електричну ерозію. Науковий вісник ХНТУСГ ім. П. Василенка. 2012. Вип. 130. С. 82-83.
12. Мрачковський, А. М. Дослідження закономірностей електричної ерозії дослідних зразків контакт-деталей на основі срібла і міді. Енергетика і автоматика. 2016. № 1. С. 82-89.

### **References**

1. Braunovic, M., Myshkin, N. K., Konchits, V. V. (2007). Electrical Contacts:

Fundamentals, Applications and Technology. CRC Press, 646.

2. Klimenko, B. V. (2012) Elektrichni aparati. Elektromehanichna aparatura komutatsiyi, keruvannya ta zahistu [Electric devices. Electromechanical switching, control and protection equipment]. Kharkiv, "Tochka" Publishing House, 340.

3. Korobskiy, V. V., Akullin, Ya. D. (2022). Doslidzhennya robochih poverhon kontaktiv elektromagnitnih puskachiv ta rele z vikoristannyam elektronnoho mikroskopu [Study of working surfaces of contacts of electromagnetic starters and relays using an electron microscope]. Energetika i avtomatika, 6, 45-58.

4. Korobskiy, V. V. (2013). Eksperimentalni doslidzhennya eroziynogo znosu seriynih kontakt-detaley puskachiv yak funktsiya kilkosti komutatsiy [Experimental studies of erosive wear of serial contact details of starters as a function of the number of switchings]. scientific bulletin NUBIP of Ukraine, 184, 181-187.

5. Volkova, O. G. (2015). Metod zmeshchennya perehidnogo oporu rozrivnih kontaktiv komutatsiynih pristroyiv [The method of reducing the transient resistance of breaking contacts of switching devices]. Bulletin of Kryvyi Rih national university, 39, 78-81.

6. Sitnik, O. O., Klyuchka, K. M., Kiselov, V. B., Kiselova, G. O. (2020). Modelyuvannya mistkovoyi eroziyi slabkostrumovih elektrichnih kontaktiv zasobami MatLab. [Modeling of bridge erosion of low-current electrical contacts using MatLab tools]. Mathematical and computer modeling, Kamianets-Podilskyi, 21, 40-52.

7. Kohanovskiy, V. O. (2015). Pidvischennya elektroeroziynoyi stiykosti kontaktiv nizkovoltnih komutatsiynih aparativ. [Increasing the electroerosion resistance of contacts of low-voltage switchgear]. Energetika i avtomatika, 1, 81-86.

8. Zablodskiy, M. M., Nalivayko, V. A., Radko, I. P., Okushko, O. V., Radko, I.V. (2022). Tehnologiyi vidnovlennya i zmitsnennya detaley elektroobladnanniyaz vikoristannyam kompozitsiynih materialiv. [Technologies for restoring and strengthening parts of electrical equipment using composite materials]. "Publishing Center of NUBIP of Ukraine", 268.

9. Yoshida, K., Shimotsuma, S., Sawa, K., Suzuki, K., Takaya, K. (2016). Various characteristics of electromagnetic contactor when arc discharge are generated only make arc. 2016 IEEE 62nd Holm Conference on Electrical Contacts (Holm), Clearwater Beach, FL, USA, 215-221.

10. Mrachkovskiy, A. M., Solovey, O. V. (2021). Osoblivosti dugovih rozryadiv ta eroziynih yavisch. [Features of arc discharges and erosion phenomena]. Energetika i avtomatika, 2, 135-145.

11. Kohanivskiy, S. P., Radko, I. P., Nalivayko, V. A. (2012). Vpliv energiyi dugi na elektrichnu eroziyu. [Effect of arc energy on electrical erosion]. naukoviy visnik HNTUSG im. P. Vasilenka, 130, 82-83.

12. Mrachkovskiy, A. M. (2016). Doslidzhennya zakonomirnostey elektrichnoyi eroziyi doslidnih zrazkiv kontakt-detaley na osnovi sribla i midi. [Study of patterns of electric erosion of test samples of contact parts based on silver and copper]. Energetika i avtomatika, 1, 82-89.

## INVESTIGATION OF TRANSIENT RESISTANCE AND ELECTRICAL EROSION OF SERIAL CONTACT PARTS RELAY PKL - 2204

*A. Berezyuk, V. Vasyuk, O. Vishinskiy*

**Abstract.** *In this study, the processes of the occurrence of an electric arc and its duration on the contact details of the PKL-2204 series relay are considered in detail. The patterns of changes in electrical erosion, which is a function of current strength and the number of switchings, were also studied.*

*A detailed analysis of the process of opening the contact details was carried out based on the voltage oscillogram. Studies have shown that this process can be considered in three main stages. The first stage is marked by the separation of the contact parts, and at the very moment of the break of the working surfaces, there is a sharp jump in voltage from 45 mV to 13.5 V, accompanied by the formation of an electric arc. The second stage, lasting about 3.5 ms, is characterized by the weakening of the current to zero, and the arc is completely extinguished on the oscillogram. The third stage is marked by the appearance of a voltage peak on the oscillogram, which occurs when the arc is extinguished and is caused by the inductance  $L=240$  mH. This analysis helps to better understand the process of contact opening and may have practical applications in the field of electrical engineering and electronics.*

*Analysis of the results of our research indicates the presence of metals that have high resistance to erosion, regardless of their role as an anode or cathode. Among these metals, we can note nickel, copper, niobium, molybdenum, silver, and others, which show resistance to erosion even when the polarity changes, that is, they are erosion-resistant both at the anode and at the cathode. In particular, among such metals it is worth noting silver, molybdenum and niobium, which demonstrate extraordinary resistance to erosion in various conditions. These results may have important implications for the development of erosion-resistant materials for electronic devices and other applications.*

*On the basis of the conducted research, it was found that the electroerosion resistance of contact parts made of CpH-10 material depends on several factors, including the current strength, the duration of arc burning, the number of commutations, and the physical and mechanical properties of the contact material.*

*Research into the microstructure of the material during the current switching process revealed thermal, mechanical, and fatigue failure. During this process, the low-melting component of the cathode material melts and intensively evaporates, which leads to the formation of a dispersed and bumpy surface. The working surface of the anode is covered with finely dispersed silver particles, which are transferred from the cathode through the gaseous or liquid phase. The analysis of the spectra of the surface layers indicates a significant occurrence of nickel on the working surface of the cathode, which confirms the priority of evaporation of silver from the surface of the contact part during current switching.*

*The study of the effect of chemically active reagents on transient resistance showed that in humid air with a high content of ammonia, hydrogen sulfide, sulfur dioxide, and carbon dioxide, the transient resistance of contact parts increases by 5-7 times.*

**Key words:** *switching devices, electric erosion, contact material, working surface of contact parts*