

## ОЦІНКА ВПЛИВУ РЯДУ ФАКТОРІВ НА ЕРОЗІЮ В ПОЧАТКОВІЙ ФАЗІ ДУГИ ВІДКЛЮЧЕННЯ

**А. М. Мрачковський, кандидат технічних наук**

*Розглянуто ступінь впливу сукупності факторів (струм, час загорання дуги, зазор, полярність електродів) на електроерозійну стійкість і перехідний опір комутаційних апаратів у процесі їх експлуатації.*

*Досліджено вплив міжконтактного проміжку, сили струму відключення і матеріалу електродів на величину електричної ерозії контактів.*

**Електрична ерозія, міжконтактний проміжок, електроди, розривні контакти, енергія, катод, анод, комутуючий струм, перегрів.**

**Мета досліджень** – вивчення впливу факторів електричної дуги відключення на ерозійну стійкість контактів і виявлення особливостей масопереносу матеріалу контактів.

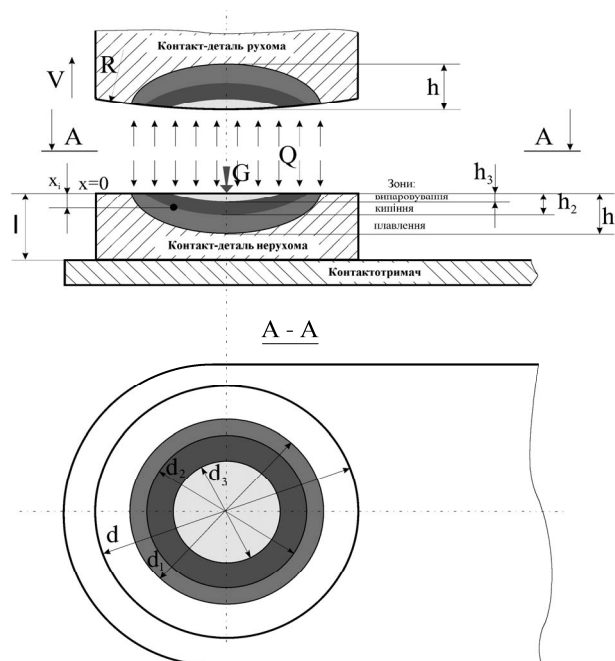
**Матеріали та методика досліджень.** Умови експлуатації і сукупність факторів електричної дуги відключення (зазору, матеріалу і стану поверхні електродів) значно впливають на термін служби комутаційних апаратів, який становить у середньому 1–3 роки. Причиною невеликого терміну служби контакт-деталей реле є електрична ерозія з направленим масопереносом з катода на анод при комутації кіл постійного струму. На електричну ерозію впливають такі фактори, як величина струму, характер навантаження, час горіння дуги, середовище, в якому відбувається дуговий розряд, форма контакт-деталей та їх матеріал, швидкість розмикання і технологія виготовлення контакт-деталей. Вплив численних факторів на ерозію можна виразити так:

$$\Delta V_z = f(I^\alpha; t^\beta; \delta^\gamma; H^\chi \dots),$$

де  $I$  – струм, А;  $t$  – час загорання дуги, с;  $\delta$  – зазор, мм;  $H$  – напруженість поля магнітного дуття, А/м;  $\alpha, \beta, \gamma, \chi$  – коефіцієнти.

**Результати досліджень.** Для оцінки ступеня впливу того чи іншого фактора на ерозію необхідно мати результати дослідів, в яких цей параметр виступає в ролі незалежної змінної, в той час як вплив інших має бути приведений до мінімального або лишатися постійним.

Незалежними змінними в наших дослідях виступають тривалість існування дуги і комутований струм. Проте отримана картина змін  $\Delta V_z = f(t)$  (рис.1) утруднює проведення оцінки ступеня їх участі, оскільки залежно від ділянки розгляду ступінь впливу різний, тому проводимо оцінку впливу факторів відповідно до тієї або іншої ділянки залежності  $\Delta V_z = f(t)$ .



**Рис. 1. Схематичне зображення глибини проплавлення  $h$  контакт-деталей при комутації струму**

**Вплив проміжку.** При невеликих відстанях між контактами практично вся енергія, яка виділяється в процесі дугового розряду, відводиться в електроди. Це викликає розігрів металу до високих температур в опорних точках взаємодії каналу розряду з електродами, що призводить до випаровування, яке забезпечує доступ відповідної кількості нейтральних атомів у розрядний проміжок. Однак у підтриманні розряду бере участь лише незначна частина від загальної кількості «нейтралів», що надійшли. Решта дифундує в навколишнє середовище та осідає на електродах. При встановленні квазістаціонарних умов необхідна кількість «нейтралів» для підтримки довжини каналу розряду при постійності навколишніх умов буде незмінна. Зі збільшенням довжини каналу розряду необхідна кількість «нейтралів» повинна зростати непропорційно. Це пояснюється такими факторами.

По-перше, зі зростанням розміру проміжку у випадку дуги постійного струму пропорційно зростає енергія, що виділяється в міжконтактному проміжку. Енергія зі все більш зростаючим ступенем почне відводитися в навколишнє середовище і все в меншій мірі – в контакти.

По-друге, відведення енергії буде супроводжуватися зростаючою дифузією «нейтралів» у навколишнє середовище та одночасно оберненим процесом проникнення «холодних» часток навколишнього середовища в канал розряду.

По-третє, ступінь дії на канал розряду зовнішніх факторів (повітряного чи магнітного дуття) зростає.

По-четверте, зі зростанням зазору і збільшенням розміру проміжку зростає ймовірність розкиду і відхилення факельних струменів, що виходять із опорних точок на електродах, від напрямку каналу розряду.

Крім того, після встановлення квазістаціонарного стану будь-яке додаткове підведення енергії повинно призводити до непропорційного (вибухоподібного) зростання швидкості випаровування, що вказує про непропорційність впливу проміжку на ерозію.

Зростання втрат матеріалу електродів зі збільшенням проміжку може продовжуватись до певної межі. Це визначається енергетичними співвідношеннями, оскільки зі збільшенням проміжку зростає частина енергії, яка відводиться в навколишнє середовище, з іншого боку, відбувається зростання ступеня навколишнього середовища у підтримці розряду, що призводить до зростання енергії, яка виділяється в проміжку, і максимум настає в момент  $\Delta V_z = f(t)$ .

Таким чином, при зміні абсолютної довжини дуги, розміщеної всередині міжконтактного проміжку, витрати матеріалу електродів будуть зростати доти, поки дуга не розвиватиметься до значних розмірів і не покине електроди. У випадку нерухомих опорних точок дуги знос буде посилюватися такими гідро- і газодинамічними процесами, що призводять до значних викидів рідкої фази і залежать від потужності дуги відключення.

**Вплив струму відключення.** З аналізу результатів численних експериментів випливає, що ступінь впливу струму відключення має найбільший діапазон від 1,2 до 3,0.

У зв'язку зі складною закономірністю зміни ерозії в початковій фазі результати оцінки впливу струму здійснені на межі переходу відповідних ділянок. Результати аналітичної оцінки зведені до табл.1, з якої видно ще більший діапазон зміни показників ступеня від 0,36 до 3,12.

### 1.Значення показника ступеня $\alpha$ залежно від моменту існування початкової фази дуги

| Групи ділянок |             |             |             |
|---------------|-------------|-------------|-------------|
| I-II          | II-III      | III-IV      | IV-V        |
| 1,31 – 1,8    | 0,36 – 2,02 | 0,36 – 2,42 | 1,28 – 3,12 |
| 1,38 – 1,86   | 1,45 – 2,59 | 1,54 – 2,62 | 1,6 – 2,66  |

Залежно від умов комутації обрив дуги відключення трапляється в той момент часу, який призводить до відповідних обмежень розвитку початкової фази дуги відключення. Залежно від умов комутації гасіння дуги буде проходити при різній величині проміжку (табл. 2).

### 2. Значення показника ступеня $\alpha$ залежно від тривалості існування дуги

| Час $t$ , мс |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|--------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1,0          | 2,0   | 3,0   | 4,0   | 4,5   | 5,5   | 8,5   | 9,5   | 10    | 13,0  | 17,0  |
| 1,35–        | 1,385 | 2,05– | 2,48– | 1,97– | 0,31– | 1,385 | 2,12– | 2,34– | 1,795 | 1,23– |
| 1,85         | –3,34 | 1,80  | 1,58  | 2,14  | 4,00  | –3,4  | 3,09  | 3,09  | –3,09 | 3,09  |

Отримані оцінки вказують на непостійність ступеня впливу струму комутації на ерозію. Це пояснюється зміною механізму руйнування матеріалу електродів у паровій, рідкій і крапельно-твердій фазах, тому засто-

совувати питомі величини  $[cm^3/(kA \cdot s)]$  для розрахунку ерозії потрібно досить обережно.

**Вплив полярності електродів на знос.** У замкнутих контактах із однорідного матеріалу за рахунок тунельного ефекту відбувається перегрівання анода. Це призводить до великих розмірів зон проплавлення на аноді при розімкненні контактів, більшою участю матеріалу анода в утворенні рідкометалевого моста. Як наслідок цього виникає направлений мостовий перенос з анода на катод, що викликає зміну геометрії контактуючих поверхонь з утворенням «піків» на катоді та «кратерів» на аноді.

Експериментально були визначені співвідношення між теплофізичними постійними матеріалів контактних пар, при дотриманні яких буде спостерігатись саморегульований перенос при розімкненні контактів з малими струмами навантаження. Тобто при комутації ланцюгів із іскровою чи короткочасною дуговою формами розрядів шляхом підбору матеріалів при зіставленні контактних пар вдається знизити і зрівняти знос контактуючих елементів.

У випадку сильнострумових розрядів після руйнування моста під дією прикладеної напруги між контактами розвивається дуговий розряд. Участь матеріалу зруйнованого моста у підтримці наступного розряду дуже незначна, основна «маса» нейтральних часток надходить у канал розряду з електродів із опорних точок дуги. Оскільки в процесі розвитку дугового розряду змінюється його структура (частка електронної та іонної провідності) і розміри зон ураження на електродах, повинно змінюватись відношення потужності, яка виділяється на аноді, до потужності, що виділяється на катоді.

Відмінності в природі частинок, їх енергетичному балансі і механізмі передачі енергії призводять до відмінності процесів, які відбуваються на поверхні катода та анода.

Закономірності ерозії анода залежать від процесів, які відбуваються в прианодній області дуги, і в першу чергу від характеру взаємодії електронів з атомами анода, які знаходяться в пароподібному стані. Електрони, що надходять із позитивного стовпа дуги і прискорені в області анодного падіння, виробляють іонізацію випаруваних з анода атомів. Вивільнювані при іонізації електрони доповнюють основний струм, і їх кількість буде тим більша, чим нижче енергія іонізації атомів анода. Збільшення анодного падіння потенціалу відбувається як за рахунок зменшення потенціалу позитивного стовпа дуги, так і за рахунок більш інтенсивного зменшення позитивного і збільшення негативного об'ємних зарядів. Це супроводжується дифузними процесами, електричним полем дуги, а також анодними і катодними факельними потоками рідин, що випаровуються з електродів. Перераховані явища дозволяють зробити висновок, що електрична ерозія, а отже й енергія, яка підводиться до анода, залежать від потенціалу іонізації атомів анода.

Проте в іскрових розрядах ерозія анода зіставна з ерозією катода чи більше її. Це спостерігається в електричних розрядах, які тривають досить короткі проміжки часу, або при надзвичайно невеликих відстанях між

електродами. Через малу рухливість іонів при короткотривалій дії розряду лише невелика частина їх досягає катода і віддає йому свою енергію. Зменшення кількості іонів, що бомбардують катод, призводить до зниження його ерозії.

Таким чином, ерозія катода та анода в дуговому розряді залежить від елементарних процесів, які відбуваються в приелектродній зоні дуги і на поверхні електродів, тобто від енергії іонізації атомів і їх кількості, а також від енергії збудження метастабільних станів атомів. Оскільки теплові процеси інерційні, на співвідношення між ерозією анодного і катодного електродів суттєво буде впливати тривалість розряду. Крім того, збільшення тривалості існування розряду на одному місці призводить до зниження щільності струму в опорних точках дуги, розширенню каналу стовпа дуги і до збільшення іонної частки провідності каналу стовпа дуги. Збільшення ж числа іонів, які бомбардують катод, викликає його інтенсивне руйнування.

Крім зовнішніх факторів, на розміри і характер ерозії сильно впливає матеріал електродів. Переважна ерозія анода з переносом на катод характеризує так звану дугу «анодного» типу, і відповідно переважна ерозія катода з переносом на анод – дугу «катодного» типу. Із досліджених нами матеріалів лише на молібдені спостерігається дуга «катодного» типу, в решті випадків – дуга «анодного» типу. Цю обставину слід приймати до уваги як при зіставленні різноманітних контактних пар, так і при поясненні результатів ерозії анодного і катодного електродів.

Розглянуті процеси на електродах різних полярностей призводять до висування різноманітних вимог до теплофізичних властивостей матеріалів для забезпечення мінімуму ерозії, при чому ці вимоги залежать від режиму існування опорних точок дуги в процесі комутації.

### **Висновки**

1. При зміні довжини дуги, розміщеної всередині міжконтактного проміжку, витрати матеріалу електродів будуть зростати доти, поки дуга не розвиватиметься до значних розмірів і не покине електроди.
2. Встановлено нелінійну залежність зміни електричної ерозії контактів від сили струму, числа комутацій та фізико-механічних властивостей контактного матеріалу.
3. Швидкість електричної ерозії непостійна, спочатку випробувань – максимальна, а при певних струмах (5–7 А) – мінімальна, що вказує на формування у поверхневому шарі матеріалу оптимальної мікроструктури з точки зору опору електричної ерозії.
4. Ерозія катода та анода в дуговому розряді залежить від енергії іонізації атомів і їх кількості, а також від енергії збудження метастабільних станів атомів.

### Список літератури

1. Белкин Г.С. Влияние теплофизических свойств материала контактов на величину электрической эрозии / Г.С.Белкин. // Электричество. – 1970. – №2. – С.2.
2. Белкин Г.С. Исследование особенностей электрической эрозии металлокерамических материалов / Г.С.Белкин, М.Е.Данилов. // Электричество. – 1972. – №8. – С.45–48.
3. Жаворонков М.А. О влиянии скорости размыкания на дуговую эрозию контактов / М.А. Жаворонков. – К.: Изд-во АН УССР, 1972. – 258 с.
4. Кузнецов Р.С. Износ контактов разнородных материалов / Р.С. Кузнецов. – М.: Изд-во иностр. лит-ры, 1986. – 544 с.
5. Омельченко В.Т. Мостиковая эрозия электрических контактов / В.Т. Омельченко. // Вестник ХПИ – 1967. – №19 (67). – С. 8–9.

*Рассмотрена степень влияния совокупности факторов(ток, время возгорания дуги, зазор, полярность электродов) на электроэрозионную стойкость и переходное сопротивление коммутационных аппаратов в процессе их эксплуатации.*

*Исследовано влияние межконтактного промежутка, силы тока отключения и материала электродов на величину электрической эрозии контактов.*

***Электрическая эрозия, межконтактный промежуток, электроды, разрывные контакты, энергия, катод, анод, коммутирующий ток, перегрев.***

*The degree of influence of totality of factors (current, time of ignition of arc, gap, polarity of electrodes) is considered on electro-erosive firmness and transitional resistance of interconnect vehicles in the process of their exploitation.*

*Influence of inter pin interval, strength of current of disconnecting and material of electrodes are investigational on the size of electric erosion of contacts.*

***Electric erosion, between a pin interval, electrodes, bursting contacts, energy, cathode, anode, current, overheated.***

УДК 621.311.21

## ЭКОНОМИКА СТРОИТЕЛЬСТВА МАЛЫХ ГИДРОЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

***Н.А. Палишкин, кандидат технических наук  
И.А. Мищенко, кандидат экономических наук***

*Выполнен сравнительный анализ экономических показателей малых гидроэлектростанций разных типов. Показано, что использование типовых проектов и серийного гидроэнергетического оборудования позволяет на треть сократить затраты на строительство малых гидроэлектростанций.*