

Міністерство освіти і науки, молоді та спорту України
Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»

ПАВЛЕНКО ТЕТЯНА ПАВЛІВНА



УДК 621.316.5

РОЗВИТОК ТЕОРІЇ ЕЛЕКТРИЧНИХ КОНТАКТІВ
ПІДВИЩЕНОЇ ДУГОСТІЙКОСТІ
ДЛЯ КОМУТАЦІЙНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ АПАРАТІВ

Спеціальність 05.09.01 – електричні машини й апарати

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Харків – 2012

Дисертацією є рукопис

Робота виконана на кафедрі електричних машин Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» Міністерства освіти і науки, молоді та спорту України, м. Харків

Науковий консультант: доктор технічних наук, професор
Мілих Володимир Іванович,
Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»,
завідувач кафедри електричних машин

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Загирняк Михайло Васильович,
Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, ректор,
завідувач кафедри електричних машин та апаратів

доктор технічних наук, професор
Козирський Володимир Вікторович,
Національний університет біоресурсів і природокористування України,
директор Навчально-наукового інституту енергетики та автоматики

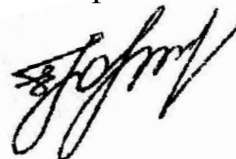
доктор технічних наук, професор
Зиновкін Володимир Васильович,
Запорізький національний технічний університет,
професор кафедри електроприводу та автоматизації промислових установок.

Захист відбудеться 8 листопада 2012 р. о 12 годині 30 хвилин на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.050.08 при Національному технічному університеті «Харківський політехнічний інститут» за адресою: 61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21.

З дисертацією можна ознайомитись в бібліотеці Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»

Автореферат розісланий «10» вересня 2012 р.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради



О.Ю. Юр'єва

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. У системах електропостачання та електроживлення різноманітних установок низьковольтні комутаційні електричні апарати відіграють важливу роль щодо забезпечення управління енергетичними процесами. Проблеми, що виникають в низьковольтних електричних апаратах на номінальні струми 32–1000 А, таких як автоматичні вимикачі, електромагнітні контактори і інші, відносяться до електричних контактів, які визначають роботу цих електротехнічних пристроїв.

При роботі електричних апаратів контакти схильні до різних видів зношування, які викликають ерозію їх робочої поверхні. Основний внесок у розвиток ерозії робочої поверхні вносить електрична дуга, яка утворюється в міжконтактному проміжку при розмиканні електричних контактів. Тривале знаходження електричної дуги на робочій поверхні контактів, а також недостатня ефективність систем дугогасіння можуть призводити до зварювання контактних пар через плавлення складу композиції на робочій поверхні контактів, що у свою чергу створює умови для аварійної ситуації.

У світовій практиці існуючі рішення підвищення дугостійкості електричних контактів не вирішують в достатній мірі проблему зменшення ерозії робочої поверхні. Застосування додаткових пристроїв в системах дугогасіння приводить до збільшення габаритів електричних апаратів. Використання в складах композицій дорогих і токсичних елементів, наприклад, таких як, срібло, паладій, ртуть, окисел кадмію, олово та ін., призводить до підвищення собівартості електричних апаратів і отруєння навколишнього середовища. Зміцнення композиції контактів за рахунок застосування тугоплавких елементів, таких як вольфрам, молібден, нікель і інші призводить до підвищення перехідного опору.

Таким чином, наведені проблеми підкреслюють актуальність теми роботи та пошуку оптимального рішення підвищення дугостійкості електричних контактів, яке визначається комплексними показниками для певного класу електричних апаратів. Перспективним є застосування нових рішень та відповідних методів дослідження електричних контактів, які сприяють їх високій зносостійкості, дугостійкості без використання токсичних елементів, що і складає основний напрям дисертаційної роботи.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертація виконувалась на кафедрі електричних машин НТУ «ХПІ» в рамках:

- науково-дослідної держбюджетної теми МОН України «Розвиток теорії і методів проектування на основі чисельно-польових методів для удосконалення існуючих і створених нових електричних машин» (№ ДР 0111U002269);
- планів робіт наукових семінарів НАН України «Наукові основи електроенергетики» (НТУ «ХПІ»).

Як відповідний виконавець здобувач проводив дослідження, які відображені в дисертації, що проводилися згідно господарчо-договірним темам:

– «Исследование возможности создания контактных материалов высокой эрозионной стойкости для НВА за счет улучшения их эмиссионных свойств» (№ ДР 114-988-1544, Мінелектротехпром СРСР, м. Москва);

– «Исследование возможности создания бессеребрянных псевдожидкометаллических контактов для перспективных разработок автоматических выключателей с уменьшенными массогабаритными показателями» (№ ДР105-987-1545, Мінелектротехпром СРСР, м. Москва);

– «Исследования и испытания контактов повышенной эрозионной стойкости в автоматических выключателях ВА 50-41» (№ ДР 243/3414, з-д «Контактор», м. Ульяновськ, Росія).

Мета та задачі дослідження. Мета роботи – обґрунтування та розвиток основних положень теорії щодо процесів і явищ, які відбуваються на робочій поверхні та в приелектродних областях міжконтактного проміжку, і створення складів композицій контактів підвищеної дугостійкості в комутаційних електричних апаратах.

Для досягнення поставленої мети були поставлені такі задачі:

1. Проаналізувати проблеми і процеси, що виникають при роботі електричних контактів, виходячи з особливостей роботи комутаційних апаратів.

2. Удосконалити загальні методи дослідження електричних контактів.

3. Проведення теоретичних та експериментальних досліджень процесів в приелектродних областях електричних контактів, враховуючи: знос електричних контактів; електронний і енергетичний стан в прикатодній області; взаємодії теплофізичних процесів в зоні контактування електричних контактів; хімічні реакції і фазові перетворення, що визначають динаміку розвитку процесів іонізації, рекомбінації, дифузії в об'ємі плазми дуги.

4. Створити і обґрунтувати моделі теоретичних досліджень процесів, виходячи з:

– взаємозв'язаних фізичних процесів, що відбуваються всередині, на поверхні електричних контактів і в приелектродних областях;

– визначення чинників розвитку ерозії робочої поверхні контактів і механізму переміщення опорної точки дуги під впливом електричного та теплового поля;

– математичній моделі розвитку процесів в прикатодній області, в дуговому розряді і виконати розрахунки основних параметрів методами чисельного моделювання.

5. Створити склади композицій електричних контактів з особливими термостійкими властивостями.

6. Визначити можливість застосування контактних композицій з особливими термоємисійними властивостями в комутаційних електричних апаратах.

Об'єкт дослідження – фізичні процеси, що відбуваються всередині, на робочій поверхні та в приелектродних областях електричних контактів при розвитку дугового розряду.

Предмет дослідження – способи підвищення дугостійкості електричних контактів, які сприяють збільшенню швидкості руху дуги по їх поверхні, внаслідок чого утворюються катодні плями I роду та зменшується ерозія робочих поверхонь цих контактів.

Методи досліджень. Науково-теоретичні дослідження властивостей і взаємодій елементів композиції електричних контактів засновані на статистичних рівняннях Гамільтона і Шредінгера. Визначення дифузії та балансу елементів складу композиції електричних контактів проводилося за допомогою рівнянь Фішера та Фіка. Аналіз термодинамічних процесів проводився на основі рівнянь Тейлора, що визначають потенціал Гібса як функцію стану термодинамічної системи, пов'язаного з стрибкоподібним переміщенням частинок з одного вузла кристалічної решітки в іншій. Аналіз взаємодії теплофізичних параметрів в зоні контакту проводився на енергетичній моделі функцій розподілу Фермі. Для пояснення властивостей електричної дуги та плазмових струменів використовувалися узагальнені рівняння Максвелла, функції розподілу Гібса, рівняння Ліувілля, що зв'язують багато параметрів (швидкість руху дуги та плазмових струменів, густину струму і т. ін.). При визначенні термоємисійної активності компонентів композиції електричних контактів використовувався метод активування по Ленгмюру, який показує і обґрунтовує стрибки контактного потенціалу. Процес нагрівання електричних контактів показано за допомогою рівнянь теплового балансу, рівнянь Відемана–Франца та моделі розподілу каналу імпульсного розряду. Фазові та хімічні перетворення при розвитку дугового розряду на поверхні контактів показано за допомогою рівнянь Больцмана та правила Вант–Гоффа. Теоретичний аналіз моделювання дугового розряду ґрунтувався на математичних моделях тепло-масоперенесення, які показані на основі рівнянь функцій Хевисайда та Бесселя I роду, а також відомих рішень рівнянь Карслоу та Лапласа. Аналіз катодних явищ заснований на методиці рішення рівнянь Маккоуна, Брауна, Крижанівського, Лі. На підставі даних рівнянь розроблена математична модель низьковольтної електричної дуги, яка орієнтована на розрахунок найважливіших технічних параметрів електричних контактів.

Експериментальні дослідження проводилися в лабораторіях Акціонерного товариства «Електричні низьковольтні апарати та системи» (АТ «ЕНАС», м. Харків). При виготовленні контактів контролювалися наступні параметри: питома маса композиції (ГОСТ 19725); твердість (мікротвердість елементів

композиції електричних контактів) по Брінелю, Віккерсу, Роквеллу (ГОСТ 9030) та структура компонентів композиції контактів після виготовлення, до та після випробування (ГОСТ 19725). Емісійна структура зразків електричних контактів визначалася за допомогою термоемісійного мікроскопа EF6. Дослідження фазових складів композицій електричних контактів проводилось з використанням рентгенівських установок Харківського національного університету ім. В.Н. Каразіна. Випробування зразків проводилися в АТ «ЕНАС», а також в НТУ «ХПІ» на кафедрі «Електричні апарати».

Наукова новизна отриманих результатів

1. Вперше в узагальненому обсязі розроблені методи дослідження електричних контактів з урахуванням основних теоретичних положень та досягнення фізико-хімічних властивостей необхідних елементів, які використовуються в складах композицій електричних контактів низьковольтних електричних апаратів на номінальні струми 32–1000 А.

2. Вперше розроблені комплексні фізичні моделі, які стали науковим підґрунтям розвитку теорії основних фізико-хімічних процесів і явищ, що відбуваються при роботі контактних систем. Обґрунтований аналіз виконувався з урахуванням процесів дифузії, активації, термоелектронної емісії, впливу потоків плазми на утворення катодних плям I–III родів, які визначають розвиток ерозії і зварювання робочої поверхні електричних контактів.

3. Вперше виявлені чинники, що забезпечують підвищену дугостійкість за рахунок термоемісійних властивостей складів композицій контактів, які керують процесами дифузії, міграції і фазовими перетвореннями при хімічних реакціях, та обґрунтована теорія механізму переміщення опорних точок дуги по робочій поверхні електричних контактів.

4. Вперше розроблена і реалізована математична модель розвитку дугового розряду, яка пов'язує параметри електричного і теплового полів з фізико-хімічними явищами, що визначають працездатність контактної системи.

5. Вперше на основі проведених теоретичних досліджень і фізико-хімічних властивостей елементів, що входять до складів композицій електричних контактів, отримана технологія їх виготовлення, яка сприяє ресурсозберіганню без застосування токсичних і шкідливих елементів, а також енергозбереженню при виготовленні контактів для комутаційних електричних апаратів.

6. Вперше доведена можливість застосування композиції електричних контактів з особливими термоемісійними властивостями в комутаційних електричних апаратах з дуговою комутацією струму.

Практичне значення отриманих результатів для електроапаратобудування. Розроблені загальні методи дослідження електричних контактів з особливими термоемісійними властивостями, які сприяють підвищенню дуго-

стійкості складів композицій, та пропонуються до використання при удосконаленні та проектуванні в комутаційних електричних апаратах.

Нові технічні рішення (Пат. 6960 України, Бюл. № 1; Пат. 6988 України, Бюл. № 1; Пат. 2007772С 1, РФ, Бюл. № 3; Пат. 2007773С 1, РФ, Бюл. № 1) спрямовані на економію енергоресурсів, пов'язану з технологією виготовлення нових складів контактних композицій з особливими термемісійними властивостями. Композиції електричних контактів не містять токсичних елементів і можуть застосовуватися в контактних парах (рухомий / нерухомий) одного ж і того складу в комутаційних апаратах з дуговою комутацією, таких як автоматичні вимикачі серії ВА та електромагнітні контактори КТ 6023. Ефективність нових технічних рішень і розроблених складів композицій електричних контактів підтверджено актами впровадження на ДП заводу «Електроважмаш», «ХЕМЗ» та ПАТ «Електромашина» (м. Харків).

Матеріали дисертації використовуються в навчальному процесі НТУ «ХП» в дисциплінах спеціальностей «Електричні машини і апарати», «Електропостачання промислових підприємств», «Електричні машини», в дипломному проектуванні спеціалістів кафедри «Електричні апарати», а також в дисциплінах спеціальностей «Електричний транспорт» в Харківській національній академії міського господарства та «Електромеханічні системи автоматизації та електроприводу» в Українській інженерно-педагогічній академії.

Особистий внесок здобувача. До дисертаційної роботи включені теоретичні обґрунтування, положення і результати, виконані здобувачем особисто. Здобувачем розроблені методи дослідження, моделі фізичних процесів і явищ як всередині композиції електричних контактів, так і на їх робочій поверхні, а також визначені чинники, що обґрунтовують розвиток дугового розряду і механізм переміщення електричної дуги по робочій поверхні електричних контактів. Розроблена математична модель розвитку дугового розряду. Під час роботи здобувачем були визначені ефективні варіанти складів композицій електричних контактів для комутаційних електричних апаратів.

Апробація роботи. Основні положення роботи обговорювалися та схвалені на: Міжнародному симпозіумі «Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів (теорія і практика) (SIEMA) (2002, 2005, 2006, 2007; 2008, 2009, 2011, Харків); XVII–XIX Міжнародних науково-практичних конференціях «Інформаційні технології, наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я» (Харків, 2009–2011); XIII Міжнародній науково-практичній конференції «Проблема енергоресурсозбереження в електротехнічних системах. Наука, освіта і практика» (Кременчук, 2011); Міжнародній науково-практичній конференції «Применение инновационных технологий в научных исследованиях» (Курск, Россия, 2011); XVI–XVIII Міжнародних науково-технічних конференціях «Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія і прак-

тика» (Алушта, 2009, 2010; Одеса, 2011); семінарах з комплексної проблеми «Наукові основи електроенергетики» НАН України «Електромагнітні та теплові процеси високо використаних електричних машин» (Харків, 2009–2011), а також на розширених нарадах фахівців промислових підприємств ДП з-д «Електроважмаш», «ХЕМЗ», ПАТ «Електромашина» і навчальних закладів – НТУ «ХП», УПА, ХНАМГ.

Публікації. Результати роботи відображені в 42 публікаціях, з них: 30 – у фахових наукових виданнях України; 4 патенти на винахід (патенти України – 2 шт.; патенти Росії – 2 шт.).

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається з вступу, п'яти розділів, висновків, додатків. Повний обсяг дисертації 332 сторінок, серед них 70 рисунків за текстом, 4 рисунка на 3 окремих сторінках; 17 таблиць за текстом, 3 таблиці на 3 окремих сторінках; список використаних джерел інформації із 178 найменувань на 17 сторінках; 2 додатків на 22 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми, сформульовані мета і основні задачі досліджень, наукова новизна і практичне значення отриманих результатів, особистий внесок здобувача у виконанні дисертаційної роботи та здійснення її апробації.

В першому розділі відзначені основні проблеми, які виникають при роботі електричних контактів, наведені причини зношення і основні методи боротьби з ерозією робочих поверхонь цих електричних контактів при роботі комутаційних електричних апаратів.

Відомі методи боротьби з ерозією робочих поверхонь електричних контактів не є всеосяжними для комутаційних електричних апаратів. Тому перспективним є нове рішення щодо зменшення ерозії робочих поверхонь електричних контактів шляхом активування елементів, які входять до складових композицій, що приводить до збільшення термостійкості робочої поверхні електричних контактів за рахунок зменшення роботи виходу електронів.

В результаті аналізу відомих теоретичних та практичних робіт визначені особливості роботи комутаційних апаратів і основні причини розвитку ерозії робочих поверхонь електричних контактів, а також розглянуті різноманітні рішення та методи, що сприяють підвищенню дугостійкості контактних композицій, при цьому поняття «дугостійкості» визначається складами композицій, технологією їх виготовлення, взаємодією елементів та процесів, що відбуваються при роботі електричних контактів.

У другому розділі визначені основні загальні методи (рис. 1) досліджень як елементів, що входять до складових композицій електричних контактів, так й самих складів композицій електричних контактів, які призначені для комутаційних електричних апаратів.

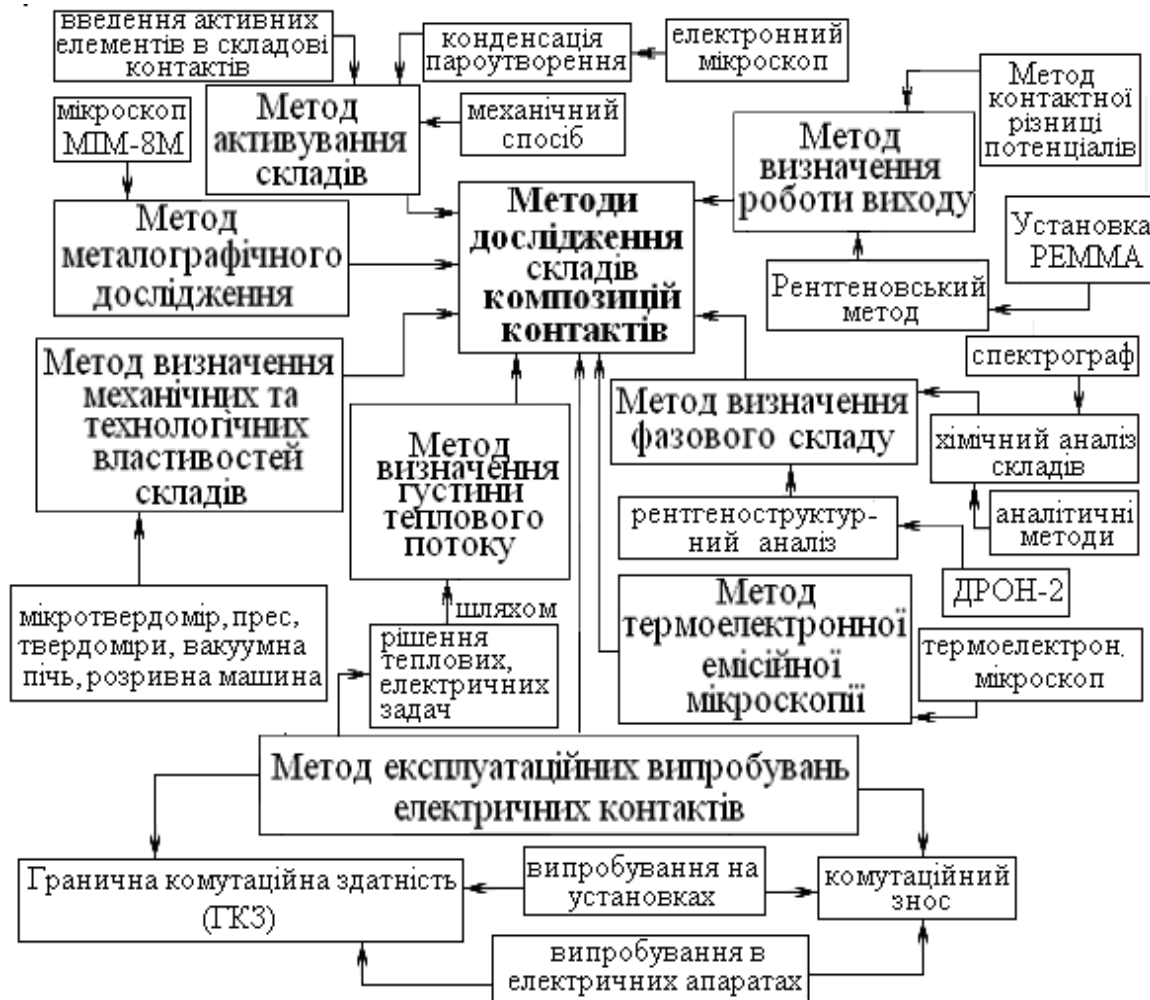


Рисунок 1 – Методи досліджень електричних контактів

На основі системного дослідження стало виявлення елементів з високими термоемісійними властивостями. Визначено, що елемент такий як барій та його з'єднання, викликають активність усього складу композиції та ніколи не використовувалися в електричних контактах. Дослідження проводились на складах композицій срібло-нікель-активна складова (AgNiMe), де визначались їх сумісність та можливі фазові перетворення за рахунок хімічних реакцій.

З використанням термоемісійного мікроскопа визначалися термоемісійна активність складів композицій електричних контактів і властива ним робота виходу електронів при нагріванні зразка. Особливістю даного методу є те, що сам зразок являє собою джерело електронів, які емітують з поверхні ка-

тода і формують її структуру (рис. 2). А це означає, що напрям досліджень вибраний правильно. Робота виходу електронів для активованих складів змінюється від 1,6 до 2,4 эВ, порівняно з неактивованими композиціями того ж складу (AgNi), де робота виходу збільшена та змінюється від 4,0 до 4,5 эВ.

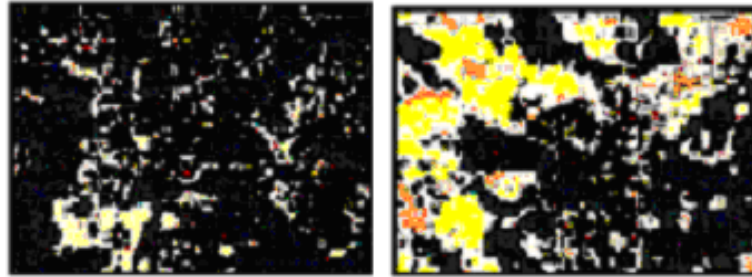


Рисунок 2 – Термоемісійне зображення дослідної поверхні контактної композиції

Визначення фазового складу елементів (рис. 3, де 2θ – кут повороту детектора для визначення інтенсивності дифракційних ліній) проводилось методом рентгеноскопії з використанням установки РЕММА та дифрактометра ДРОН–2, де був отриманий можливий ряд різноманітних фаз: AgNi–(1); Ag–(2); $\text{Ba}(\text{MeOH})_2 \cdot \text{XH}_2\text{O}$ –(3); NiO–(3*); BaO–(4); AgO–(4*); $\text{BaMe}_2 \cdot \text{XH}_2\text{O}$ –(5) Ag_2O_2 ; Ag_2O –(6), тощо. Концентрація елементів складів композицій та їх розподіл у процесі можуть змінюватися.

Дослідження металографії зразків (рис. 4) під час виготовлення, а також до і після випробувань проводилися за допомогою мікроскопів МІМ–8. Визначено, що скупчення активатора спостерігаються на межі та усередині зерна тугоплавкого елемента (нікелю), рис. 4, а. Завдяки цьому відбувається зміцнення композиції контактів, а також рівномірне зношення їх робочих поверхонь в порівнянні з поверхнею контактів промислових зразків без активатора (рис. 4, б; в), що і підтверджує підвищену дугостійкість активованих складів електричних контактів і показує можливість використання їх в комутаційних електричних апаратах.

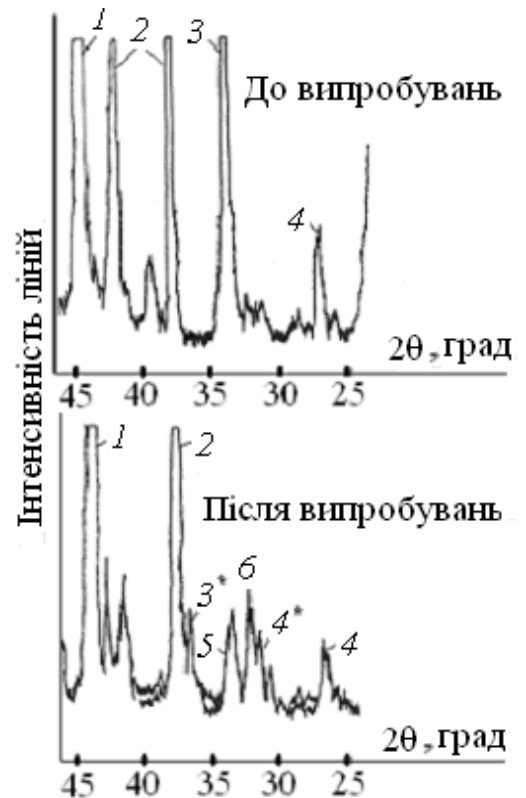
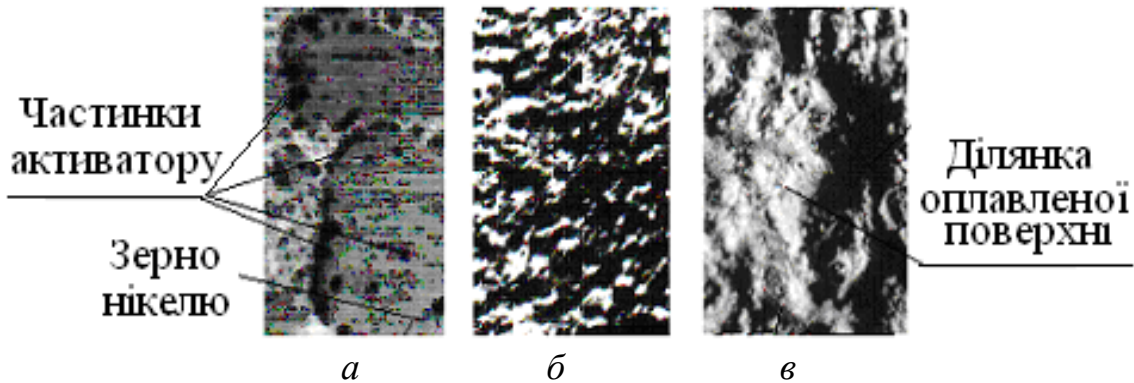


Рисунок 3 – Дифрактограми концентрації елементів композиції



a) металографічне зображення ($500\times$); *б*) робоча поверхня після випробування зразка з активною складовою; *в*) робоча поверхня промислового зразка (КМКА10М) після випробування ($100\times$)

Рисунок 4 – Результати досліджень електричних контактів

Методи досліджень дозволили отримувати та визначати необхідні композиції електричних контактів без токсичних елементів, які задовольняють необхідним вимогам за технологічними параметрами, що передбачаються ГОСТ 19725 «Аппараты электрические коммутационные. Контакты на основе серебра».

Використання таких композицій сприяє економії коштовних елементів, які входять до складів композицій електричних контактів, та енергоресурсів.

В третьому розділі наведені теоретичні та експериментальні результати дослідження процесів в приелектродних областях електричних контактів. При дослідженні визначено, що розвиток процесів впливає на утворення катодних плям I–III роду, які сприяють виникненню ерозії на робочій поверхні електричних контактів (рис. 5).

Катодні плями мають різну роботу виходу електронів внаслідок неоднорідної поверхні електричних контактів. Тому електричне поле постійно змінюється, та може бути гальмівним або прискорювальним залежно від співвідношення між роботою виходу ϕ та рівнем хімічного потенціалу μ на межі взаємодії потоків плазми та катода електричного контакта.

Визначено, що активовані склади композицій електричних контактів мають меншу роботу виходу електронів за рахунок дії гальмівного електричного поля, внаслідок чого значна частина електронів не може подолати потенційний бар'єр і вони повертаються на робочу поверхню, тим самим запобігаючи інтенсивному плавленню та випаровуванню складу композиції електричних контактів. Це і сприяє зменшенню ерозії їх робочих поверхонь порівняно з промисловими складами композицій (див. рис. 4, *б*; *в*).

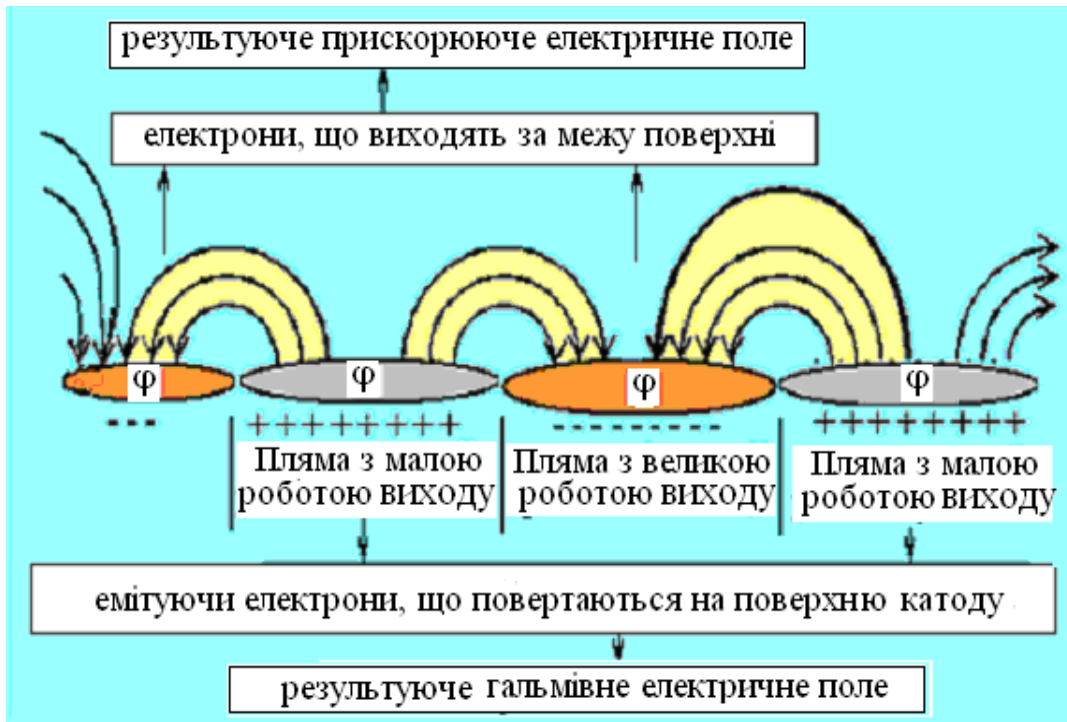


Рисунок 5 – Схема розподілу електричного поля плям на поверхні катода

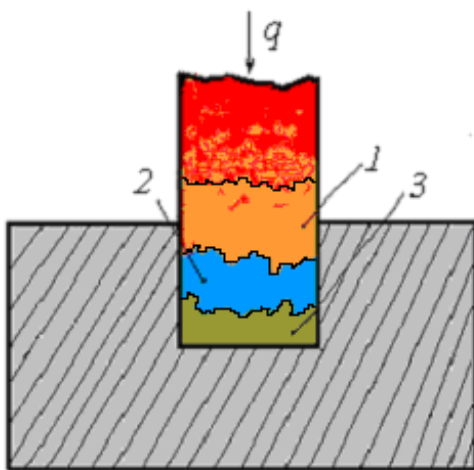
На основі теоретичних досліджень показано розподіл теплового потоку на робочій поверхні контакту та в зоні прив'язки дугового розряду, де відбувається утворення ділянок розвитку ерозії (рис. 6) та з'являються лунки розплавленого складу композиції контактів.

Такий склад вибухоподібне випаровується за рахунок зміни густини флуктуацій та коливань тиску в каналі дугового розряду. У тілі композиції електричних контактів відбувається розподіл температури, як показано на рисунку у вигляді ізотерм.

Згідно закону Фур'є, ефективне значення густини теплового потоку визначається як

$$\bar{q} = -\lambda(T) \frac{dT}{dl}, \quad (1)$$

де $\lambda(T)$ – теплопровідність тіла композиції контакту, яка залежить від розподілу температури; $\frac{dT}{dl}$ – градієнт температури.



- 1 – шар, що випаровується (T_1)
- 2 – рідка фаза плями (T_2)
- 3 – плавлення твердої фази (T_3)

Рисунок 6 – Розподіл температури у циліндричному об'ємі катода електричного контакту

Довжина перегрітого шару (1) поверхні (див. рис. 6)

$$l = \frac{\bar{\lambda}}{q}(T_1 - T_2). \quad (2)$$

Через довжину l перегрітого шару поверхні контакту і його площу ΔS визначається перегрітий об'єм ΔV , який при вибуху перетворюється на пару з масою Δm :

$$\Delta V = \Delta S l = \pi r_0^2 \frac{\bar{\lambda}}{q}(T_1 - T_2), \quad (3)$$

$$\Delta m = \pi r_0^2 \frac{\bar{\lambda}}{q}(T_1 - T_2), \quad (4)$$

де r_0 – радіус перегрітого шару.

При випаровуванні цієї маси складу композиції витрачається тепло

$$\Delta Q = \Delta m \cdot Q_0, \quad (5)$$

де Q_0 – кількість тепла, яка необхідна для нагрівання одиниці маси складу композиції від температури електроду електричного контакту до максимальної температури перегріву з урахуванням теплоти фазових перетворень.

Але це ж тепло, що надійшло до об'єму ΔV , також визначається як

$$\Delta Q = \bar{q} \cdot \Delta S \cdot \Delta t, \quad (6)$$

де $\Delta t = \bar{\lambda} j \frac{T_1 - T_2}{q^2} Q_0$ – час, необхідний для вибухоподібного випаровування

маси складу композиції електричних контактів; j – густина струму.

За величиною тривалості дугового розряду τ визначає кількість вибухів

$$n = \frac{\tau}{\Delta t} = \frac{\bar{q}^2}{\bar{\lambda} \cdot j \cdot Q_0 (T_1 - T_2)}. \quad (7)$$

Маса парової фази за розрядний імпульс визначається з (1) і (4)

$$m = n \cdot \Delta m = \pi r_0^2 \frac{\bar{q}}{Q_0} \tau. \quad (8)$$

Таким чином, знаючи основні фізико-хімічні властивості елементів складів композицій електричних контактів, визначаються основні параметри розподілу теплового потоку, температури в зоні опорної точки дуги, що впливають на розвиток ерозії робочої поверхні катода електричних контактів.

На розвиток ерозії поверхонь електричних контактів впливають також потоки плазми, які виникають після електричного розряду в міжконтактному проміжку з відставанням за часом (1–2 мс) та мають вигляд чітких факелів і по своїй яскравості перевершують деякі частини електричної дуги.

Формування потоків плазми впливає на рельєф робочої поверхні електричного контакту. На первинній стадії виникнення потоків плазми відбуваються вибухові процеси, які впливають на плавлення та випарювання складів композицій електричних контактів. Внаслідок цього відбувається руйнування робочих поверхонь контактів і продукти руйнування виносяться потоками плазми.

Як показали результати експериментальних досліджень, потоки плазми та опорні точки дугового розряду у активованих зразків існують при певних значеннях температур, що і сприяє рівномірному зношуванню робочої поверхні електричних контактів та зменшенню її ерозії порівняно з промисловими зразками (див. рис. 4, б; в).

При теоретичному дослідженні визначені густина струму в каналі імпульсного розряду та в об'ємі потоку плазми (з урахуванням впливу електричного, магнітного та теплового полів), а також параметри процесів емісії частинок, рекомбінації, дифузії в каналі дугового розряду.

У четвертому розділі зроблено обґрунтування фізичних та математичних моделей, на основі яких визначається підвищена дугостійкість активованих складів композицій електричних контактів.

Як показали результати досліджень, процеси, що впливають на роботу електричних контактів, охоплюють спектри різноманітних питань, які корелюються з основними положеннями теорії, що представляється. Всі процеси і явища настільки пов'язані між собою, що неможливо їх розглядати поодиноці, а тим більше давати їм конкретну оцінку.

Загальна фізична модель (рис. 7) показує зв'язок усіх процесів та явищ, які відбуваються при роботі електричних контактів як на їх робочих поверхнях, так і всередині композицій. Розроблена модель відображає основні положення теорій (див. розділи 2, 3 дисертації), за допомогою яких визначаються основні параметри складових композицій електричних контактів.

Розвиток дугового розряду (рис. 8) супроводжується взаємодією з емісійними процесами, які відбуваються на катоді електричних контактів та в прикатодній області, де нагрів катода відбувається за рахунок бомбардування іонів та потоку «зворотних» електронів, а також виникнення потоків плазми та процесу джоулевого тепловиділення за рахунок зовнішнього джерела. Охолодження катода відбувається за рахунок процесу теплопровідності та процесів деіонізації.

На підставі даної моделі визначено розвиток процесів емісії, які пов'язані з виділенням енергії, а також розподілом та виникненням заряджених частинок на робочій поверхні електричних контактів та їх взаємодією під впливом різноманітних чинників (рис. 9), які визначають ерозію робочих поверхонь контактів.

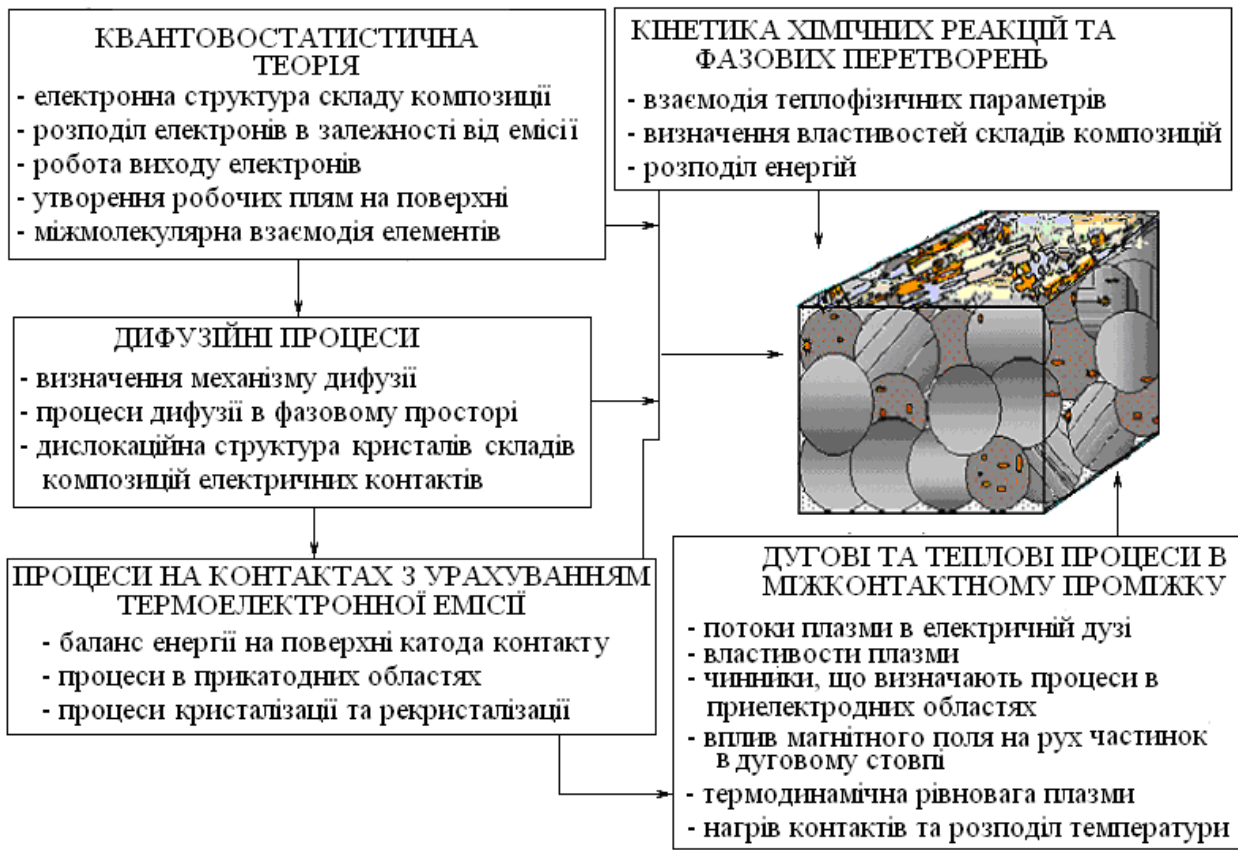


Рисунок 7 – Фізична модель розвитку процесів

На розвиток процесів ерозії поверхні впливають фазові перетворення за рахунок хімічних реакцій, де процеси індукції та затухання відбуваються різноманітними шляхами. У результаті цього відбувається рух опорних точок електричної дуги по робочій поверхні електричних контактів при різних значеннях температур.

Модель механізму переходу опорної точки дуги наведена на рис. 10, де відзначено, що за індукційним періодом іде стаціонарне протікання реакції та відбувається вигоряння складу композиції контактів при високій активності хімічної реакції. Після вигоряння активної складової температура різко спадає, а точка дуги перекидається на іншу поряд розташовану активну складову.

Це підтверджується експериментами, де також визначено, що зниження температури сприяє переходу опорної точки дуги, а після вигорання верхнього шару відбувається внутрішнє «підживлення» активних елементів за рахунок дислокації та дифузії атомів. Тому активний шар на поверхні активованих зразків електричних контактів постійно присутній і за рахунок цього спостерігається рівномірне зношення робочої поверхні електричних контактів у порівнянні з промисловими не активованими зразками.

Впродовж роботи активованих електричних контактів при різних режимах дослідження їх на комутаційну зносостійкість і граничну комутаційну здатність, рельєф робочої поверхні не змінюється.

З аналізу фізичних та математичних моделей стає очевидним, що коло проблем, які виникають при роботі електричних контактів, охоплює дуже великий спектр взаємопов'язаних явищ.

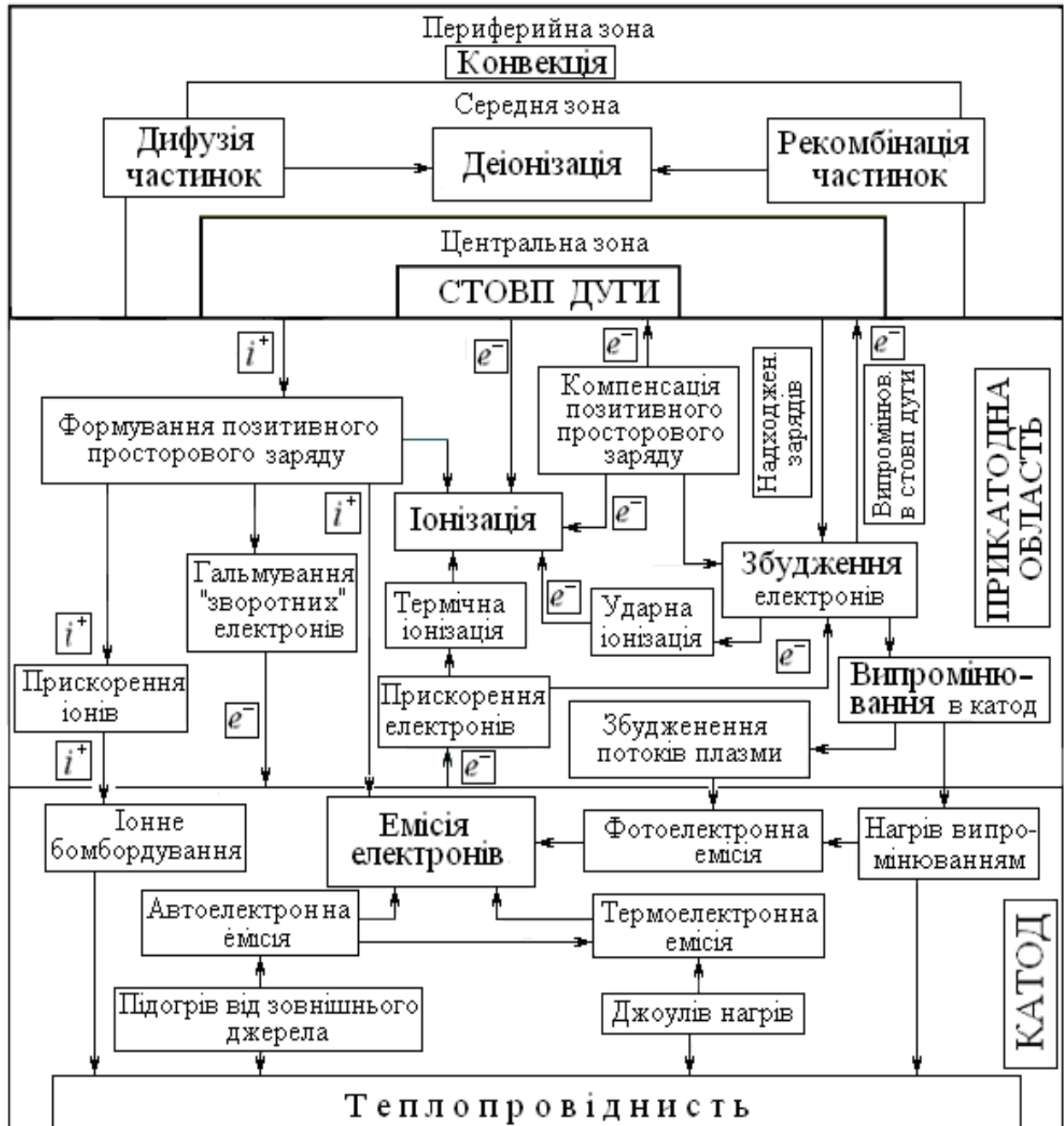


Рисунок 8 – Спрощена модель явищ та процесів в прикатодній області

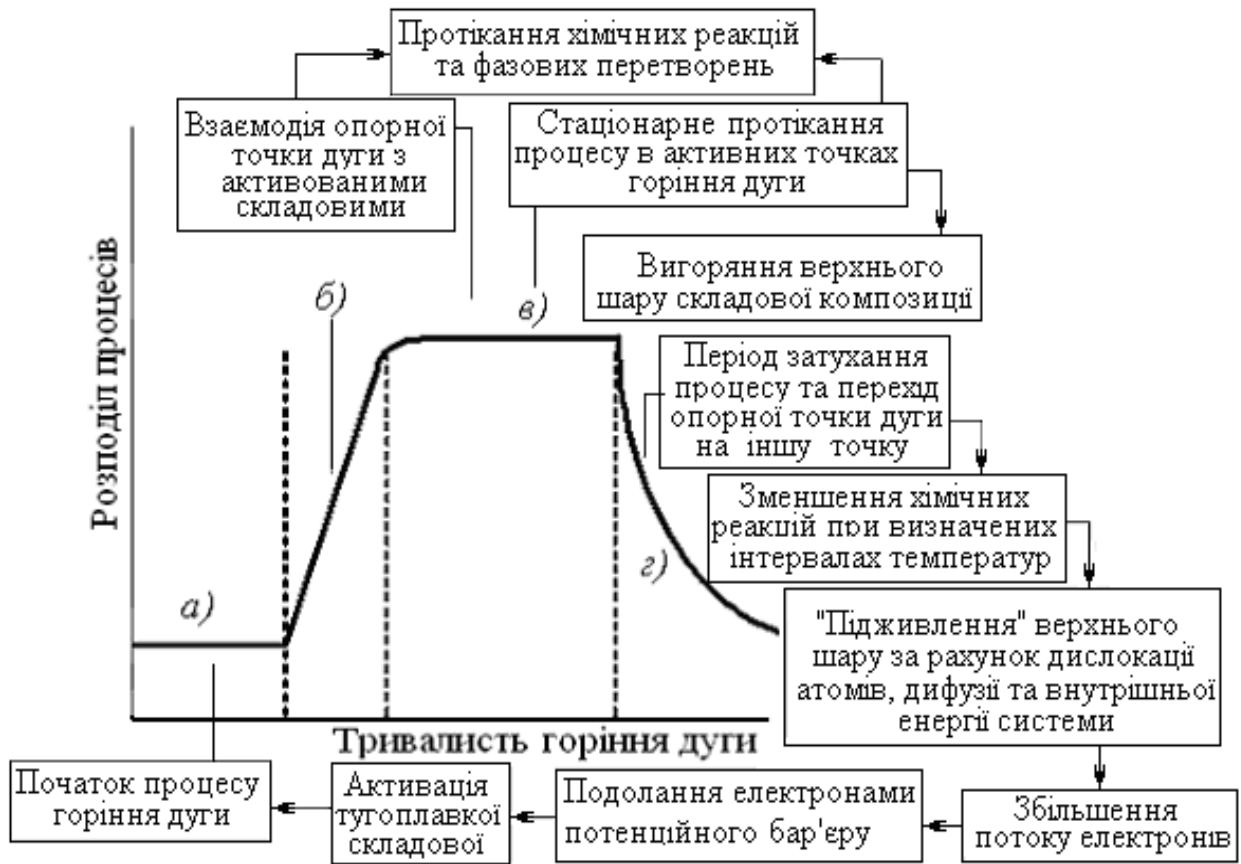


Рисунок 10 – Модель розвитку механізму індукції та затухання електричної дуги

Для отримання результатів моделі проведено ряд розрахунків у такому порядку:

- розрахунок температурного поля катода електричних контактів;
- квантовомеханічний розрахунок струму термоелектронної емісії з робочих поверхонь електричних контактів;
- розрахунок гальмівного та рекомбінаційного випромінювання;
- оцінка перерізу резонансної перезарядки електричної дуги;
- розрахунок параметрів на основі методів чисельного моделювання.

Фізичні явища, що виникають на робочій поверхні контактів, об'єднані в єдину систему рівнянь тепло-масообміну, виходячи з:

- рівняння теплопровідності

$$\rho_i \cdot c_i \frac{\partial T_i}{\partial t} = \text{div}(\lambda_i(T_i) \text{grad} T_i) + \gamma_i(T_i) \left| \nabla \bar{\varphi}_i \right|^2 - p_i(T_i); \quad (9)$$

- рівняння для потенціалу електричного поля

$$\text{div}(\gamma_i(T_i) \text{grad} \varphi_i) = 0, \quad M \in V_i, \quad i = 1, 2, 3; \quad (10)$$

– умови Стефана

$$\lambda_i^+ \cdot \frac{\partial T_i^+}{\partial n} - \lambda_i^- \cdot \frac{\partial T_i^-}{\partial n} = \rho_i \cdot \alpha_i \cdot v_n; \quad T_i^+ = T_i^- = T_{fi}, \quad M \in S_{fi}, \quad i = 2, 3; \quad (11)$$

$$\lambda_i^+ = \lambda_i(T_{fi} + 0), \quad \lambda_i^- = \lambda_i(T_{fi} - 0);$$

– рівняння для теплових і електричних потоків на межі катод–плазма:

$$\lambda_3 \cdot \frac{\partial T_3}{\partial n} - \lambda_1 \cdot \frac{\partial T_1}{\partial n} = q_{13}, \quad \gamma_3 \cdot \frac{\partial \varphi_3}{\partial n} = \gamma_1 \cdot \frac{\partial \varphi_1}{\partial n}; \quad (12)$$

– умов безперервності температурного та електричного полів на межі плазми:

$$T_1 = T_3, \quad \varphi_1 - \varphi_3 = U_k, \quad M \in S_{13}, \quad (13)$$

$$\lambda_1 \cdot \frac{\partial T_1}{\partial n} - \lambda_2 \cdot \frac{\partial T_2}{\partial n} = q_{12}, \quad \gamma_2 \cdot \frac{\partial \varphi_2}{\partial n} = \gamma_1 \cdot \frac{\partial \varphi_1}{\partial n}; \quad (14)$$

– умов безперервності для теплового потоку на межі анод–плазма, де визначається баланс енергії в приелектродних областях:

$$T_1 = T_2, \quad \varphi_2 - \varphi_1 = U_a, \quad M \in S_{12}; \quad (15)$$

$$T_i(M, 0) = T_{0i}(M), \quad M \in V_i, \quad i = 1, 2, 3; \quad (16)$$

$$T_i(\infty, t) = T_0, \quad \varphi_2(\infty) = 0, \quad (17)$$

де ρ_i – питома маса; c_i – питома теплоємність складу композиції; T_i – температура робочої поверхні контактів; t – час протікання дугового розряду; λ_i – питома теплопровідність; γ_i – питома електропровідність; φ_i – потенціал електричного поля; p_i – питомі об’ємні втрати плазми на випромінювання; M – точка поверхні розрахункового шару; $V_i = V_1 \cup V_2 \cup V_3$ – розрахункові області шару, які відповідають (V_1 – плазмі при $0 < z < L$; V_2 – аноду при $z > L$; V_3 – катоду при $z < 0$); z – апліката; L – відстань між електричними контактами; λ_i^+ , λ_i^- – зміна теплопровідності на межі переходу; n – концентрація частинок; α_i – прихована теплота плавлення складу; v_n – швидкість руху фронту плавлення складу; $T_{fi} = T_i^+ = T_i^-$ – температура в точках поверхні контактів на межі переходу; (λ_1, λ_3) , (T_1, T_3) , (γ_1, γ_3) , (φ_1, φ_3) – питома теплопровідність, температура, питома електропровідність, потенціал електричного поля на межі плазма – катод; U_k , U_a – катодний та анодний спад напруги; S_{13} – межа руху фронту частинок складу катоду; λ_2 – питома теплопровідність аноду; T_2 – температура нагріву анода; q_{12} – функція теплового потоку від плазми до аноду; φ_2 – потенціал анода; S_{12} – межа руху фронту частинок в приелектродній області; $T_{0i}(M)$ – значення розподілу температури на поверхні контакту; T_0 – значення температури на нескінченості.

З балансу енергії приелектродних областей отримуються теплові потоки на межі плазма–анод, плазма–катод:

$$q_{12} = \delta_a (U_a + U_e + w_{eA}) + q_Q - q_{V2}; \quad (18)$$

$$q_{13} = \delta_k \cdot f \left(\beta \cdot k_1 \cdot U_k + U_u + \frac{m_3}{e} \chi_3 - w_{ek} \right) + \quad (19)$$

$$+ \delta_k \cdot F \cdot [(1-f) \cdot U_k - f \cdot U_u] - \delta_k (1-f) \cdot w^* + q_Q - q_{V3};$$

$$\delta_a = \gamma_2 \cdot \frac{\partial \varphi_2}{\partial n}, \quad M \in S_{12}; \quad \delta_k = \gamma_3 \cdot \frac{\partial \varphi_3}{\partial n}, \quad M \in S_{13}, \quad (20)$$

де δ_a, δ_k – густина струму на поверхнях анода та катода електричних контактів; U_e – напруга теплового руху електронів у поверхні анода електричних контактів; w_{eA} – напруга, яка відповідає енергії нейтралізації однозарядного іона; q_Q – густина потоку випромінювання енергії зі стовпа дугового розряду; q_{V2} – густина випаровування складу анода; f – іонне коливання струму, яке знаходиться на поверхні електричних контактів; β – коефіцієнт акомодатції іона; k_1 – коефіцієнт втрат енергії іона на шляху до катода контакта; U_u – ефективний потенціал газу поблизу катода контакта; m_3 – маса частинок на поверхні катода; e – заряд електрона; χ_3 – теплота випаровування частинок з поверхні катода; w_{ek} – робота виходу електронів з катода електричного контакту; F – коливання енергії прискорених емісійних електронів у зоні катодного потенціалу; w^* – питомі втрати у катоді електричного контакту на емісію електронів; q_{V3} – густина випаровування складу катода.

Густина випаровування складу контактів в точках поверхні:

$$q_{Vi} = \chi_i \sqrt{\frac{m_i}{2\pi \cdot k_B \cdot T_i}} \cdot p_{Hi}(T_i), \quad i = 2, 3, \dots, \quad (21)$$

де q_{Vi} – густина випаровування частинок складу композиції; χ_i – теплота випаровування частинок складу композиції електричних контактів; m_i – абсолютна маса атома складу композиції; k_B – постійна Больцмана; $p_{Hi}(T_i)$ – тиск насичених парів складу композиції при температурі T_i .

В концептуальному плані математична модель розвитку дугового розряду заснована на комплексному підході. Об'єктивна необхідність такого підходу пояснюється складною взаємозалежністю структури композиції електричних контактів з поверхневими, міжфазними, плазмовими, електричними і тепловими процесами, які залежать від дугового розряду.

Тому, виходячи зі складності процесів, які відбуваються на робочій поверхні електричних контактів, а також їх взаємодії, вводяться положення:

1) електронна емісія в розвиненій катодній плямі має тунельну природу і тому представлена тільки на рівні квантовомеханічних уявлень;

2) найважливішими чинниками формування області позитивного заряду є атомарні процеси збудження, іонізації і резонансної перезарядки, що мають найбільші перерізи взаємодії;

3) основним механізмом надходження нейтральних частинок в область іонізації в квазістаціонарному режимі катодної плями є випаровування складу композиції з робочої поверхні електричних контактів;

4) основна частина прискорених в зоні катодного падіння напруги іонів після нейтралізації імпантується інерційним чином углиб катода електричного контакту;

5) розподіл частинок проводиться без урахування впливу магнітного поля (через складність процесів).

Положення 1, 4, 5 є результатами експериментальних фактів. Перші три пункти є робочою гіпотезою моделі, підтвердженою результатами подальших обчислювальних експериментів.

З урахуванням зроблених зауважень та необхідних передумов, отримана система рівнянь квазістаціонарного катодного шару:

$$\begin{aligned} \nu \frac{\partial f_0}{\partial Z} = -\nu_i f_0 + \int_{-\infty}^{\infty} \sigma_{\Pi} (|\nu - \xi|) \times \\ \times \{f_0(Z, \xi) f_i(Z, \nu) - f_0(Z, \nu) f_i(Z, \xi)\} |\nu - \xi| d\xi; \end{aligned} \quad (22)$$

$$\begin{aligned} \nu \frac{\partial f_i}{\partial Z} - \frac{eE}{m_3} \cdot \frac{\partial f_i}{\partial \nu} = \nu_i f_0 + \int_{-\infty}^{\infty} \sigma_{\Pi} (|\nu - \xi|) \times \\ \times \{f_0(Z, \nu) \cdot f_i(Z, \xi) - f_0(Z, \xi) \cdot f_i(Z, \nu)\} |\nu - \xi| d\xi; \end{aligned} \quad (23)$$

$$\frac{dE^2}{d\varphi} = -\frac{2e(n_i - n_e)}{\varepsilon_0}, \quad E(U_k) = 0, \quad (24)$$

$$\frac{d^2\Psi}{dZ^2} + \frac{2m_e}{\hbar^2} (\varepsilon + e\varphi - \varepsilon_F + U(Z)) \Psi = 0, \quad (25)$$

де ν – швидкість руху частинок; f_0 – функція розподілу нейтральних частинок; Z – енергетичний рівень розподілу частинок; ν_i – частота іонізації частинок; σ_{Π} – переріз резонансної перезарядки; ξ – швидкість утворення зон розплавлення на поверхні катода; f_i – функція розподілу іонів у при катодному шарі; E – напруженість електричного поля; m – маса частинок на поверхні катода; φ – потенціал електричного поля; n_i, n_e – концентрація іонів та електронів; ε_0 – діелектрична стала; Ψ – скалярна функція стаціонарних положень електронів; m_e – маса електронів; \hbar – постійна Планка; ε – енергія

електрона; ε_F – рівень Фермі електронного газу катода; $U(Z)$ – функція потенціального бар'єру.

Частота іонізації частинок за рахунок явища емісії визначається як

$$\nu_i = \sigma_i(e\varphi) |\delta_e| / e, \quad (26)$$

де σ_i – переріз потоку іонізації частинок; δ_e – густина електронного струму:

$$\delta_e = -e \int_0^\infty \int_{-\infty}^\infty \int_{-\infty}^\infty D(\bar{p}) f_F(\bar{p}) p_z \frac{d\bar{p}}{m_e}, \quad (27)$$

$D(\bar{p})$ – проникність потенційного бар'єру для електронів з імпульсом \bar{p} ; $\bar{p} = (p_x, p_y, p_z)$; $f_F(\bar{p})$ – функція Фермі розподілу електронів по імпульсам.

Проникність потенційного бар'єру електронів визначається як

$$D(\bar{p}) = \frac{4 |\Psi_1 \Psi_2' - \Psi_1' \Psi_2|^2}{(\Psi_1 + \Psi_2')^2 + \left(\frac{\Psi_1'}{k} - k \Psi_2 \right)^2}, \quad (28)$$

де $\Psi_1 = \Psi_1(Z_1)$ та $\Psi_2 = \Psi_2(Z_2)$ – фундаментальні рішення рівняння Шредингера (25):

$$\Psi_1(Z_1) = 1, \quad \Psi_2(Z_2) = 0; \quad \Psi_1'(Z_1) = 0; \quad \Psi_2'(Z_2) = 1, \quad (29)$$

Z_1 и Z_2 – енергетичні рівні розподілу частинок, які визначаються умовами:

$$Z_1 < Z_2, \quad \varepsilon + w_{ek}(Z_j) - \varepsilon_F - U(Z_j) = 0, \quad j = 1, 2; \quad (30)$$

k – модуль хвильового вектора.

Концентрація іонів, електронів та швидкість електронів ν_e визначаються як:

$$n_i = \int_{-\infty}^\infty f_i(Z, \nu) d\nu, \quad n_e = -\frac{\delta_e}{\nu_e}, \quad \nu_e = \sqrt{\frac{2w_{ek}}{m_e}}. \quad (31)$$

Для кінетичних рівнянь (22), (23) мають місце умови однозначності:

$$f_0(0, \nu) = g(\nu, T, \chi); \quad f_i(L, \nu) = 0; \quad f_0(Z, \pm\infty) = f_i(Z, \pm\infty) = 0, \quad (32)$$

де $g(\nu, T, \chi)$ – функція розподілу атомів за швидкостями, що випаровуються з поверхні катода; T – температура катода; χ – теплота випаровування частинок з поверхні катода; L – відстань між контактами.

Таким чином, система рівнянь (9)–(32), з урахуванням зазначених умов, у тому числі граничних умов (12)–(17), показує приклад замкнутої математичної моделі дугового розряду.

У цій моделі також показано:

– квантовомеханічний розрахунок струму термоелектронній емісії на основі моделей Мерфі та Гудла, а також рішень рівнянь Шредінгера та Ейрі з урахуванням проникності потенційного бар'єру;

– процес та розрахунок резонансної перезарядки за допомогою рівнянь Шредінгера та метода Гальоркіна, а також теореми Сильвестра, яка визначає фактор формування об'ємного заряду у поверхні катодної плями при її інтенсивному розвитку.

Зважаючи на складність процесів, що протікають, і їх взаємодії між собою, для демонстрації адекватності математичної моделі при визначенні супутніх їм основних параметрів використовувався мідний катод, властивості якого достатньо відомі. Для порівняння результатів досліджень використовувалися параметри експериментальних зразків, при яких були визначені значення питомого зношування електричних контактів і падіння напруги при необхідному значенні комутованого струму, який дорівнює 10 А та при якому відбувається швидкий нагрів центральної частини катодної плями зі збільшенням густини струму. Результати реалізації моделі показані на рис. 11–18.

Температурне поле серед інших характеристик катодної плями має велику енергію. Центральна частина катодної плями при струмі 10 А не встигає швидко розігріватись до температури, яка необхідна для потрібного збільшення густини струму (рис. 11). В міру просування углиб фронту випаровування (рис. 12), внаслідок інерційності температурного поля, підвищуються градієнти температур та інтенсивність кондуктивного тепловідводу, що стимулює ще більше концентрацію струму на катоді. Розвиток процесу обмежується з тієї причини, що збільшення густини струму відбувається за рахунок електронної компоненти.

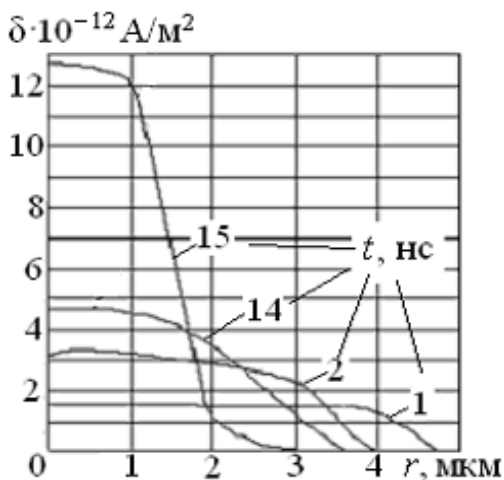


Рисунок 11 – Розподіл густини струму на робочій поверхні катода

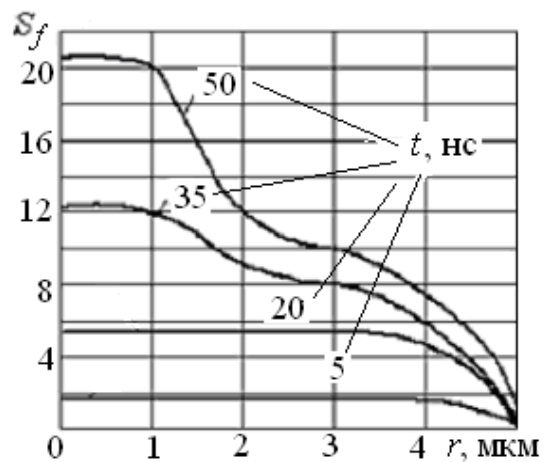


Рисунок 12 – Інтервал руху фронту випаровування вглиб складу катода

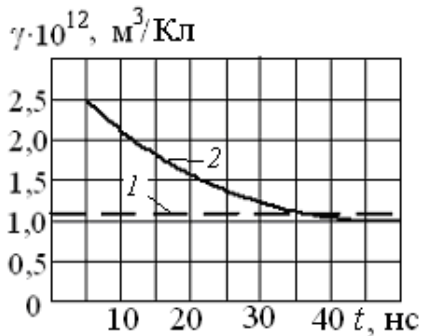


Рисунок 13 – Залежність питомої ерозії поверхні електрода від часу

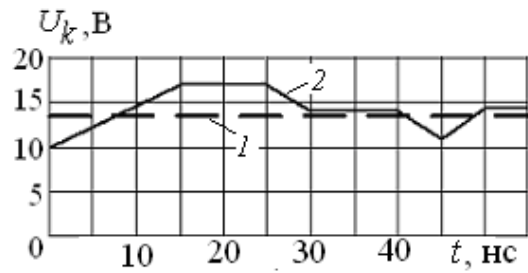


Рисунок 14 – Залежність катодного спаду напруги від часу

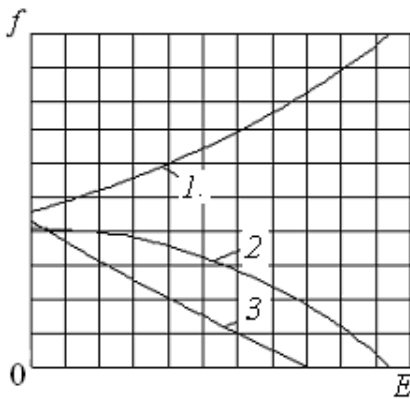


Рисунок 15 – Розподіл потоків частинок у прикатодній області

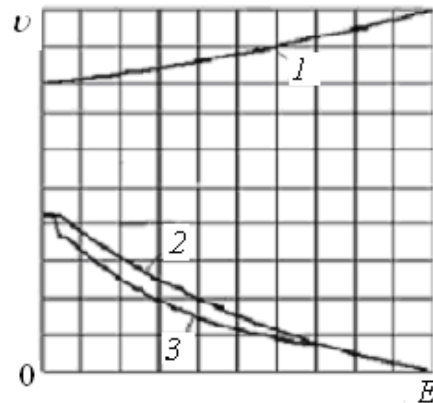


Рисунок 16 – Швидкість частинок у прикатодній області в залежності від поля

Процес комутації при струмі 10 А (рис. 13 і рис. 14, де 1 – середні експериментальні значення; 2 – розрахункові значення для мідних контактів) з виникненням електричної дуги являє собою дискретну, приблизно періодичну послідовність актів іонізації та розпаду емісійних центрів, які визначають питому ерозію робочих поверхонь (рис. 13) та супроводжуються стрибками катодної напруги (рис. 14).

Механізм появи катодних плям пов'язаний з кондуктивним та променевим розігріванням мікровиступів, які контактують з плазмою стовпа дуги.

У результаті відбувається перехід емісії на виступах у термоелектронний режим, який визначає потік f , концентрацію n та швидкість v частинок в прикатодній області в залежності від напруженості електричного поля E (рис. 15–18, де 1 – нейтральні частинки, які переміщуються від катода; 2 – нейтральні частинки, які переміщуються до катода; 3 – потік іонів).

Розвиток емісійного центру при струмах нижче порогових характеризується монотонним зниженням температури та різким зростанням катодного падіння потенціалу (рис. 18).

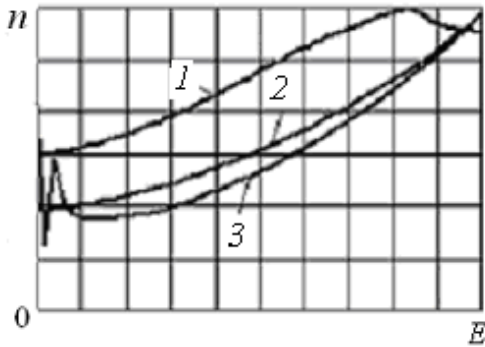


Рисунок 17 – Концентрація частинок в прикатодній області

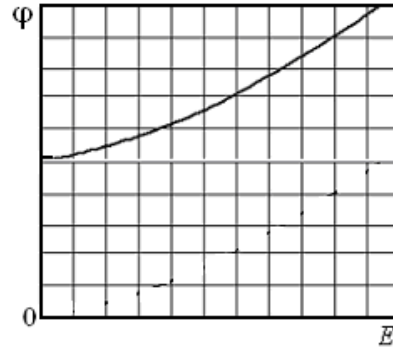


Рисунок 18 – Залежність катодного падіння потенціалу від напруженості електричного поля в прикатодній області

Така модель орієнтована на визначення основних технічних параметрів та на науково-обґрунтований вибір елементів композицій електричних контактів для електричних апаратів з дуговою комутацією струму.

У п'ятому розділі представлені результати практичного застосування контактів підвищеної дугостійкості в комутаційних електричних апаратах. Внаслідок багаточисельних експериментів і теоретичного аналізу отримані склади металокерамічних композицій електричних контактів, які мають необхідні ознаки:

- кожен склад композиції включає до себе три компоненти в різному процентному співвідношенні, які не містять токсичних елементів;
- отримані склади композицій електричних контактів в природі не зустрічаються, а створюються згідно фізико-хімічним властивостям.

Дослідження властивостей і параметрів зразків проводилися паралельно разом з відпрацюванням технології їх виготовлення при застосуванні необхідного обладнання. Для досягнення необхідних властивостей і параметрів (твердості і питомої ваги) складів композицій електричних контактів з активуючою добавкою, передбачених ГОСТ 19725 і технічними умовами, зразки контактів проходили подвійне спікання у вакуумній печі та подвійне калібрування з використанням преса (табл.1).

Для визначення питомої ваги композицій електричних контактів використовувався гідростатичний метод, який полягає у визначенні маси та об'єму тіла. В процесі дослідження твердість зразків контролювалася згідно ГОСТ 9030 за допомогою приладів для вимірювання твердості – твердомери Брінелля (діапазон вимірювань 8–450 *HB*), Віккерса (діапазон вимірювань 8–1000 *HV*), Роквелла (діапазон вимірювань 70 – 85 *HRA*).

Межа міцності зразків електричних контактів визначалася на випробувальній машині (ГОСТ 7855) за методом, що регламентується ГОСТ 18228, при поперечному вигині і температурі $(20_{-10}^{+15})^{\circ}\text{C}$.

Таблиця 1 – Технологічні параметри активованих зразків композицій

Перше спікання зразків							
Номер партії зразків	1	2	3	4	5	6	
Номінальні розміри, мм	20 × 16 × 2,5 (по 10 шт.)						
До калібровки							
Реальні розміри, мм	<i>l</i>	19,51	19,54	19,72	19,6	19,53	19,61
	<i>b</i>	15,61	15,66	15,78	15,6	15,6	15,77
	<i>h</i>	3,09	3,1	3,04	3,09	3,1	3,0
Вага, г	7,694	7,687	7,715	7,565	7,691	7,633	
Об'єм, см ³	0,941	0,949	0,946	0,945	0,944	0,928	
Питома вага, г/см ³	8,2	8,1	8,2	8,0	8,1	8,2	
Після калібровки							
Реальні розміри, мм	<i>l</i>	20,1	20,09	20,09	20,11	20,07	20,09
	<i>b</i>	16,14	16,06	16,1	16,05	16,06	16,07
	<i>h</i>	2,56	2,55	2,55	2,54	2,59	2,54
Об'єм, см ³	0,83	0,823	0,825	0,820	0,835	0,820	
Друге спікання зразків							
До калібровки							
Реальні розміри, мм	<i>l</i>	20,05	20,02	20,05	20,01	20,02	20,06
	<i>b</i>	16,08	16,01	16,03	16,0	16,02	16,02
	<i>h</i>	2,58	2,55	2,54	2,52	2,59	2,55
Вага, г	7,687	7,680	7,709	7,559	7,685	7,629	
Об'єм, см ³	0,832	0,817	0,816	0,807	0,831	0,819	
Питома вага, г/см ³	9,2/9,6	9,4/9,6	9,4/9,6	9,4/9,6	9,2/9,5	9,3/9,6	
Після калібровки							
Реальні розміри, мм	<i>l</i>	20,08	20,09	20,08	20,08	20,08	20,08
	<i>b</i>	16,05	16,05	16,05	16,05	16,05	16,05
	<i>h</i>	2,5	2,48	2,5	2,45	2,5	2,5
Вага, г	7,687	7,679	7,709	7,559	7,686	7,629	
Об'єм, см ³	0,806	0,800	0,806	0,790	0,806	0,806	
Твердість, HV (при навантаженні $P = 10$ кг)	69,7	75,5	70,8	68,1	72,9	68,8	
Питома вага, г/см ³	9,5/9,7	9,6/9,7	9,6/9,7	9,6/9,7	9,5/9,7	9,5/9,7	
ГОСТ 19725, ТУ 16.685.020		Питома щільність, г/см ³			9,6 ± 2		
		Твердість, HV, $P = 10$ кг			65,0–90,0		

В процесі виготовлення зразків електричних контактів з активуючою добавкою визначено, що технологія їх виробництва не викликає ніяких утруднень. Це свідчить про те, що такі контакти технологічно відповідають стан-

дартним на виготовлення срібломістячих композицій електричних контактів промислових зразків.

Аналізуючи результати, які показані в таблиці 1, очевидно, що отримані зразки електричних контактів з активуючою складовою мають необхідні значення твердості та питомої щільності, що відповідає ГОСТ 19725 та технічним умовам. В процесі виготовлення зразків проводилися дослідження металографії після кожної технологічної операції спікання чи калібрування.

Після виготовлення електричні контакти проходили випробування на дугостійкість у режимі $I_{\text{вкл}} = 25 \text{ А}$; $I_{\text{відкл.}} = 2,5 \text{ А}$; $U_{\text{вкл./відкл.}} = 380 \text{ В}$ на спеціальному обладнанні, де з використанням металографічного обладнання були отримані зображення контактів (рис. 19).

Електричні контакти також проходили випробування на установці, де визначалась їх гранична комутаційна здатність (ГКЗ), та в конструкціях електричних апаратів (рис. 20; табл. 2–4)



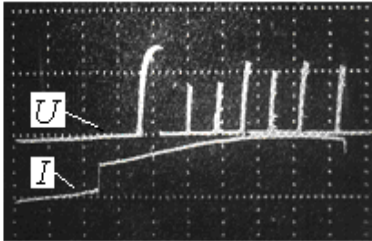
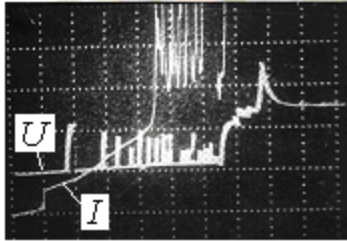
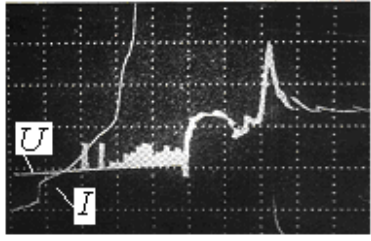
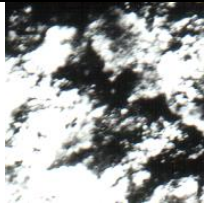
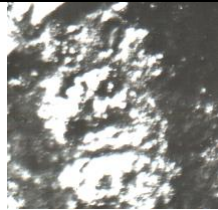
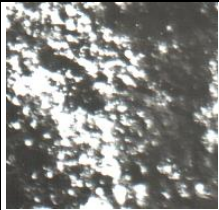
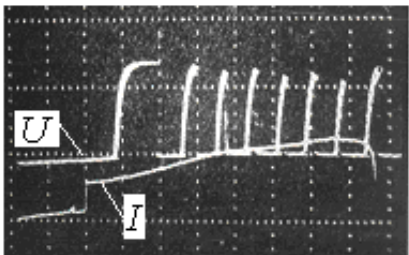
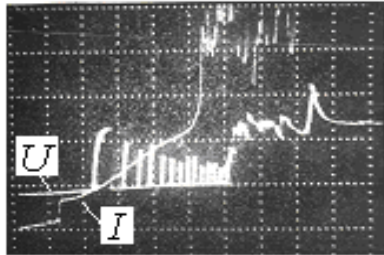
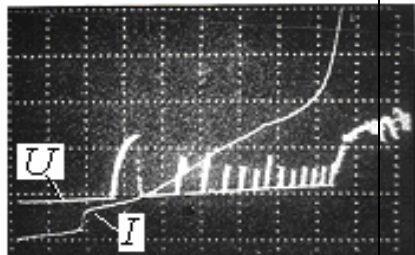

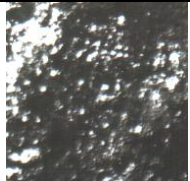
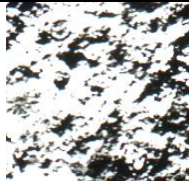
- а) композиції промислових зразків КМКА30м/КМКА10м (ГОСТ 19725);
 б) композиції активованих зразків

Рисунок 19 – Зовнішній вид контактів після випробувань






Рисунок 20 – Приклади результатів випробувань контактних композицій

Таблиця 2 – Результати випробувань електричних контактів на установці, що імітує роботу автоматичних вимикачів: масштаби щодо осцилограм напруги, струму, часу: $M_U = 40$ В/поділ; $M_I = 1,5$ кА/поділ; $M_t = 1$ мс/поділ; τ_d – час горіння дуги, мс; l_k – довжина проміжку між контактами, мм; h_k – висота контактів, мм; γ – питомий знос електричних контактів, г/цикл.

Наявність системи дугогасіння					
без магнітного дуття		з системою магнітного дуття			
Значення максимуму імпульсів струмів I_m , кА					
3,7		7,3		10,5	
Промислова композиція КМКА30 / КМКА10м					
					
$\tau_d = 7$; $l_k = 4,4$	$\tau_d = 3,4$; $l_k = 4,2$	$\tau_d = 2,2$; $l_k = 2,4$			
Висота зразків та середнє питоме зношування					
	$h_k = 3,7$ $\gamma = 0,1055$		$h_k = 3,07$ $\gamma = 0,1732$		$h_k = 2,85$ $\gamma = 0,1511$
Композиція з активованою складовою					
					
$\tau_d = 7,6$ мс; $l_k = 5,1$ мм	$\tau_d = 4,0$ мс; $l_k = 6,4$ мм	$\tau_d = 3,0$ мс; $l_k = 8,2$ мм			
Висота зразків та середнє питоме зношування					
	$h_k = 3,7$ $\gamma = 0,0482$		$h_k = 3,6$ $\gamma = 0,1125$		$h_k = 3,9$ $\gamma = 0,1237$

Як показали результати випробувань, робоча поверхня активованих складів композицій електричних контактів має практично рівномірне зношення порівняно з композицією промислових зразків, де видно, що зносилась не тільки робоча поверхня контакту, а також і контактотримач.

Таблиця 3 – Результати випробувань зразків контактів у контакторі КТ6023Б ($I_{\text{ном}} = 250\text{А}$; $U_{\text{ном}} = 380\text{В}$)

Склад композицій електричних контактів	Активовані складів композицій контактів		Промислові зразки
	AgNi + BaO	AgNi + Ba(OH) ₂	AgNi
Кількість циклів, тис.	39	39	37
Середнє питоме зношення, г/цикл $\times 10^{-5}$	0,20–0,28	0,09–0,23	0,28–0,76
Падіння напруги, мВ	1–3	0,05–1,5	2–8
Робоча поверхня контактів після випробувань на комутаційне зношення			

Таблиця 4 – Результати випробувань складів композицій електричних контактів в автоматичних вимикачах

Тип вимикача	ВА 51–35	ВА 51–37	ВА 51–39	ВА 57–31
Номінальний струм, А	250	400	630	100
Контактні композиції	Комутаційне зношення: кількість циклів/зношення, %			
КМКА30м/ КМКА10м	4000 / 40	2000 / 35	2000 / 40	2000 / 35
Активовані контакти	4000 / 20	2000 / 25	2000 / 30	2000 / 25
ГКЗ (відключення-включення-відключення): струм, кА / зношення, %				
КМКА30м / КМКА10м	15–18 / 100	25 / 100	35 / 100	25–60 / 100
Активовані контакти	15–18 / 80	25 / 80–90	35 / 85	25–75 / 85

Проведені теоретичні та експериментальні дослідження підтверджують можливість використання композицій електричних контактів з активною складовою в комутаційних електричних апаратах (рис. 21).

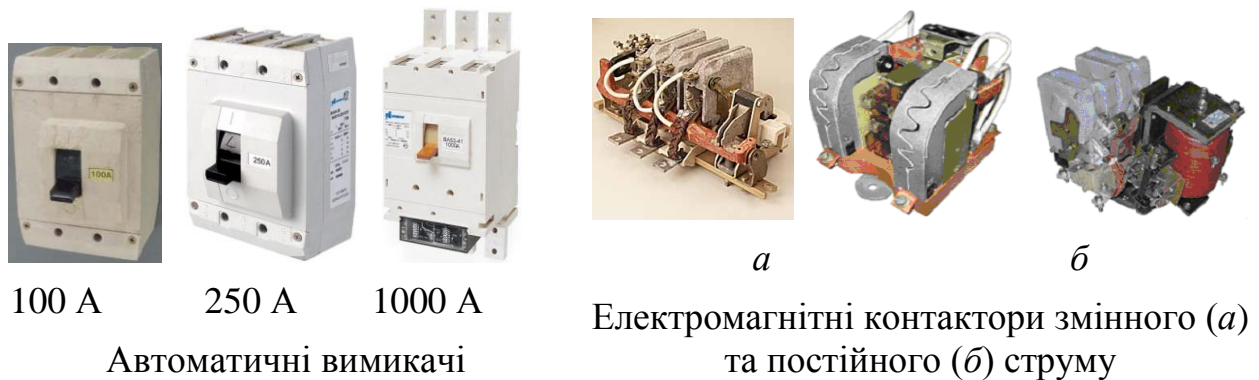


Рисунок 21 – Приклади електричних апаратів, в яких можливо використання контактних композицій з особливими термоемісійними властивостями

Таким чином, в результаті виконаних експериментальних досліджень були створені склади композицій електричних контактів, що задовольняють основним вимогам технічних умов та можуть ефективно використовуватися в електричних апаратах з дуговою комутацією струму.

ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі вирішена науково-технічна проблема, яка має два напрямки:

- зменшення ерозії робочої поверхні електричних контактів за рахунок застосування складів композицій з особливими термоемісійними властивостями, що дозволило підвищити дугостійкість їх робочих поверхонь і зменшити витрати на коштовні елементи, які входять до складів композицій електричних контактів, або підвищити ресурс роботи електричних контактів;

- використання в складах композицій нетоксичних елементів, що дає можливість підвищення конкурентноздатності комутаційних електричних апаратів і поліпшення екології навколишнього середовища.

В результаті виконання роботи сформульовано основні висновки.

1. Проаналізовані проблеми і процеси, що виникають при роботі електричних контактів, виходячи з особливостей роботи електричних апаратів. На основі цього аналізу визначені причини виникнення ерозії робочих поверхонь контактів і можливі шляхи підвищення їх дугостійкості із застосу-

ванням різних рішень використання тугоплавких елементів, удосконалення дугогасних систем, а також за рахунок термоемісійної активності поверхні контактів, з урахуванням розвитку теплових і дугових процесів.

2. Розроблені загальні методи дослідження електричних контактів з урахуванням процесів і явищ, які відбуваються на робочій поверхні електричних контактів і всередині складів композицій. Ці методи дослідження направлені на визначення сумісності властивостей та фізико-хімічних перетворень основних елементів контактних композицій, що активовані за усім об'ємом складу і призначені для комутаційних електричних апаратів.

3. Обґрунтовані теоретичні і експериментальні дослідження процесів в приелектродних областях електричних контактів, виходячи з:

– основних положень теорії розвитку процесів, що визначають зношування електричних контактів; електронного і енергетичного стану прикатодній області. На основі даної теорії, із застосуванням статистичних рівнянь Гамільтона і Шредінгера, визначені енергетичні параметри стану поверхні, мінімальна енергія Фермі і робота виходу електронів, яка необхідна для подолання ними потенційного бар'єру, що впливає на швидкість переміщення основи дуги по робочій поверхні електричних контактів і приводить до зменшення її ерозії;

– теорії взаємодії теплофізичних процесів в зоні контактування електричних контактів, в результаті якої визначені основні теплофізичні параметри (теплопровідність, теплоємність, енергія Фермі, середня швидкість переміщення частинок) та їх взаємозв'язок з урахуванням розподілу частинок по енергетичних рівнях і подолання ними потенційного бар'єру;

– створення алгоритму хімічних реакцій і фазових перетворень, що визначають динаміку розвитку процесів іонізації, рекомбінації, дифузії в об'ємі плазми дуги. В результаті визначені енергетичні і термодинамічні параметри, виходячи з форми розподілу Гауса, потенціалу Гіббса та правила Вант-Гоффа. На основі результатів досліджень, а також взаємозв'язку процесів, що розвиваються, та залежності від параметрів теплового і електричного полів вперше отримано нове рішення, що доводить ідею активування складів композицій електричних контактів за всім об'ємом.

4. Створені і обґрунтовані моделі теоретичних досліджень композицій електричних контактів виходячи з:

– взаємозв'язаних фізичних процесів, що відбуваються всередині, на поверхні електричних контактів і в приелектродних областях. В результаті складено баланс енергії на поверхні катода електричного контакту і визначе-

но розвиток процесів дифузії, емісії частинок, іонізації, рекомбінації в прикатодній області і в дуговому стовпі. За допомогою рівнянь Тейлора показані властивості плазми, що характеризують температурне поле поверхні, розподіл та переміщення частинок різного роду, тиск в дуговому стовпі, а також радіус, довжину дугового каналу і розподіл струму;

– визначення чинників розвитку ерозії робочої поверхні контактів і механізму переміщення опорної точки дуги під впливом електричного і теплового поля. Отримані результати досліджень сприяють розвитку теорії електричних контактів підвищеної дугостійкості при поєднанні фізико-хімічних властивостей елементів контактних композицій, їх сумісності та фазового перетворення при зміні температури;

– математичної моделі розвитку процесів в прикатодній області, в дуговому розряді та виконання розрахунків основних параметрів методами чисельного моделювання. Обчислювальна схема реалізації математичної моделі задовольняє необхідним вимогам коректності. Отримана математична модель служить основою для програмного комплексу, який орієнтован на науково-обґрунтований вибір елементів для складів композицій електричних контактів. Порівняння отриманих експериментальних і розрахункових даних показали, що їх розбіжність знаходиться на рівні близько 20 %.

5. Створені склади композицій електричних контактів з особливими термоемісійними властивостями. В повному обсязі проведені дослідження макро- і мікроструктури отриманих зразків і розроблена технологія виготовлення металокерамічних композицій електричних контактів, які мають основні ознаки:

- а) склади композицій не містять токсичних елементів;
- б) у макромасштабі склади композицій є однорідною фазою, а в мікромасштабі – неоднорідну, з розділенням меж кожної фази;
- в) співвідношення активованих елементів в складах композицій змінює фізико-хімічні та емісійні властивості, що забезпечується відмінністю кристалічної решітки і неоднорідною емісійною структурою робочої поверхні;
- г) отримані склади композицій електричних контактів в природі не зустрічаються, мають грубодисперсну структуру, що спрощує технологію їх виготовлення, і створюються згідно фізико-хімічним властивостям елементів і їх сумісності.

Проведені експлуатаційні випробування зразків в електричних комутаційних апаратах, які показали:

- а) зменшення ерозії контактів в 1,5–2,5 рази в порівнянні з серійними композиціями близького складу;

б) особливий характер зношування зменшує схильність контактів до зварювання і, в більшості випадків, дозволяє відмовитися від застосування високотоксичних і з високим вмістом срібла промислових композицій КМК-А10М;

в) вперше доведена можливість контактування срібромістячих контактних пар (рухомий/нерухомий) одного і того ж складу в контактних системах електричних комутаційних електричних апаратах.

6. Визначена можливість застосування контактних композицій з особливими термодіємними властивостями в комутаційних електричних апаратах, виходячи з сукупності науково-обґрунтованих теоретичних і експериментальних досліджень. В результаті отримані композиції електричних контактів, що пройшли різні види випробувань, можуть застосовуватися в автоматичних вимикачах серії ВА на номінальні струми 10–1000 А і в електромагнітних контакторах серій КТ і КМ, або в інших електричних апаратах з дуговою комутацією струмів, що підтверджене актами впровадження і рекомендаціями подальшого створення подібних композицій для електричних апаратів.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Павленко Т.П. Математическая модель контактной проводимости бес-серебряных контактов / Т.П. Павленко, Ю.П. Павленко, С.А. Некрасов // Вісник Східно-українського державного університету. – Луганськ : СУДУ, 1998. – С. 55–58. *Здобувачем розроблена фізична та математична модель контактної провідності.*

2. Павленко Т.П. Контактные композиции повышенной дуговой стойкости сильноточных электрических аппаратов / Т.П. Павленко // Вісник ХДПУ. – Харків : ХДПУ, – 2000. – № 84. – С. 154–156.

3. Павленко Т.П. Стационарное температурное поле электрических псевдорідиннометалевих контактів / Т.П. Павленко // Вісник НТУ «ХП». – Харків : НТУ «ХП». – 2001. – № 16. – С. 129–131.

4. Павленко Т.П. Оцінка параметрів перехідних процесів у псевдорідиннометалевих контактах / Т.П. Павленко // Вісник НТУ «ХП». – Харків : НТУ «ХП». – 2001. – № 17. – С. 113–115.

5. Павленко Т.П. Динамическая модель развития дугового разряда / Т.П. Павленко // Електротехніка і Електромеханіка. – Харків. – 2005. – № 3. – С. 38–41.

6. Павленко Т.П. Квантовомеханический расчет тока термоэлектронной эмиссии / Т.П. Павленко // Електротехніка і Електромеханіка. – Харків. – 2005. – № 4. – С. 54–56.

7. Павленко Т.П. Оценка сечения резонансной перезарядки поверхности электрода / Т.П. Павленко // Вісник НТУ «ХП». – Харків : НТУ «ХП». – 2005. – № 36. – С. 63–68.

8. Павленко Т.П. Анализ математической модели дугового разряда / Т.П. Павленко // Взрывозащищенное электрооборудование : сб. науч. тр. – Донецк : УКРНИИВЕ. – 2005. – С. 81–83.

9. Павленко Т.П. Термоэмиссионная активность композиционных контактных материалов / Т.П. Павленко // Вісник НТУ «ХП». – Харків : НТУ «ХП». – 2005. – № 48. – С. 115–118.

10. Павленко Т.П. Факторы, определяющие эмиссию частиц с контактной поверхности / Т.П. Павленко // Електротехніка і Електромеханіка. – Харків. – 2006. – № 3. – С. 27–30.

11. Павленко Т.П. Диффузия частиц композиционных новых контактных материалов / Т.П. Павленко // Електротехніка і Електромеханіка. – Харків. – 2006. – № 4. – С. 44–46.

12. Павленко Т.П. Моделирование термоэмиссионных процессов в прикатодных областях численными методами / Т.П. Павленко // Взрывозащищенное электрооборудование : сб. науч. тр. – Донецк : УКРНИИВЕ. – 2006. – С. 113–122.

13. Павленко Т.П. Механизм перемещения заряженных частиц в кристаллической решетке контактной композиции / Т.П. Павленко // Електротехніка і Електромеханіка. – Харків. – 2006. – № 5. – С. 39–41.

14. Павленко Т.П. О миграциях активированных частиц в кристаллических решетках элементов контактной композиции / Т.П. Павленко // Електротехніка і Електромеханіка. – Харків. – 2006. – № 6. – С. 22–24.

15. Павленко Т.П. Энергетические параметры катодного пятна электрической дуги на рабочей поверхности контактов. / Т.П. Павленко, В.С. Лупиков // Вісник НТУ «ХП». – Харків : НТУ «ХП». – 2006. – № 35. – С 101–106. *Здобувачем зроблено аналіз розвитку катодних плям на поверхні електричних контактів.*

16. Павленко Т.П. Характеристики свойств кристаллов компонентов композиций контактов с учетом термодинамических параметров / Т.П. Павленко // Вісник НТУ «ХП». – Харків : НТУ «ХП». – 2006. – № 36. – С. 101–106.

17. Павленко Т.П. Влияние активации на износ электрических контактов для сильноточных электрических аппаратов / Т.П. Павленко // Електротехніка і Електромеханіка. – Харків. – 2007. – № 3. – С. 44–47.

18. Павленко Т.П. Анализ состояния поверхности катода на основе статистической теории твердого тела / Т.П. Павленко // Електротехніка і Електромеханіка. – Харків. – 2007. – № 6. – С. 52–55.

19. Павленко Т.П. Анализ влияния магнитного поля на эмиссию частиц элементов контактной композиции / Т.П. Павленко // Взрывозащищенное электрооборудование: сб. науч. тр. – Донецк : УКРНИИВЕ. – 2007. – С. 133–136.

20. Павленко Т.П. Термоэмиссионная активность контактных материалов сильноточных электрических аппаратов / Т.П. Павленко // Праці Луганського відділення Міжнародної академії інформатизації: науковий журнал. – Луганськ. – 2007. – № 1(14). – С. 43–45.

21. Павленко Т.П. Анализ прикатодных процессов с точки зрения физики твердого тела и явления термоэмиссии / Т.П. Павленко // Вісник НТУ «ХП». – Харків.: НТУ «ХП». – 2008. – № 25. – С. 104–108.

22. Павленко Т.П. Физические процессы на поверхности контактов с учетом потоков плазмы и термоэмиссионной активности материала / Т.П. Павленко // Електротехніка і Електромеханіка. – Харків. – 2009. – № 1. – С. 25–28.

23. Павленко Т.П. Возможность применения новых материалов в электротехнических устройствах / В.И. Милых, Т.П. Павленко // «ЕЛЕКТРОІНФОРМ». – Львів : ЕКОінформ. – 2009. – С. 467–470. *Здобувачем показано можливість використання нових складів композиції в електричних апаратах.*

24. Павленко Т.П. Анализ параметров плазмы, определяющих износ контактов коммутационных электрических аппаратов / В.И. Милых, Т.П. Павленко // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. – Кременчук : КНУ. – 2011. – Вип. 1/2011(13). – С. 68–71. *Здобувачем показано розвиток плазми та розподіл її по робочій поверхні, що впливає на зношування електричних контактів.*

25. Павленко Т.П. Модели катодных процессов с учетом эмиссии частиц с поверхности контакта электрического аппарата / В.И. Милых, Т.П. Павленко // Электрика. – Москва, Россия. – 2011. – № 7. – С. 18–21. *Здобувачем показано моделі за допомогою котрих проводяться оціночні розрахунки катодних процесів на основі рівнянь теплопровідності та явища термемісії частинок.*

26. Павленко Т.П. Электрические контакты повышенной дугостойкости для коммутационных электрических аппаратов / В.И. Милых, Т.П. Павленко // Электрика. – Москва, Россия. – 2011. – № 9. – С. 37–40. *Здобувачем показані оптимальні склади електричних контактів для апаратів з дуговою комутацією струму.*

27. Павленко Т.П. Баланс энергии на поверхности катода контактов электрических аппаратов с учетом явления термоэмиссии / В.И. Милых, Т.П. Павленко // Гірничя електромеханіка та автоматика : наук.-техн. зб. – Дніпропетровськ : НГУ. – 2011. – Вип. 86. – С. 114–118. *Здобувачем показа-*

но розподіл енергії на поверхні катода електричного контакту з урахуванням процесу термоелектронної емісії.

28. Павленко Т.П. Теоретические исследования контактной композиции с точки зрения термодинамических функций / В.И. Милых, Т.П. Павленко // Вісник Кременчуцького державного університету імені Михайла Остроградського. – Кременчук : КДУ. – 2011. – Вип. 3/2011(68). – С. 11–13. *Здобувачем приведені основні властивості електричних контактів, які зменшують ерозію робочої поверхні.*

29. Павленко Т.П. Электрические контакты для автоматических выключателей и электромагнитных контакторов / В.И. Милых, Т.П. Павленко // Электротехнические и компьютерные системы. – К. : Техніка. – 2011. – № 03(79). – С. 325–326. *Здобувач визначив оптимальні склади композицій електричних контактів та пропонує їх використання в автоматичних викидачах та електромагнітних контакторах.*

30. Павленко Т.П. Исследование фазового состава композиций электрических контактов с особыми термоэмиссионными свойствами / В.И. Милых, Т.П. Павленко // Электрика. – Москва, Россия. – 2012. – № 4. – С. 15–18. *Здобувачем проведені дослідження фазового складу та обґрунтовані результати.*

31. Пат. 6960 України, МКІ 5 Н01Н1/02 Дугостійкий електричний контакт / Ю.П. Павленко, Г.Н. Гапоненко, Т.П. Кригіна (Т.П. Павленко), А.М. Мелений, М.В. Павлов, В.О. Веріхов. – № 0318892; Заявл. 09.03.1993. Опубл. 30.03.1995. Бюл. № 1. – 10 с.

32. Пат. 6988 України, С 1 Н01Н11/04, Н01Н1/02, В22F7/04. Спосіб виготовлення контактної вузла електричного апарата / Т.П. Кригіна (Т.П. Павленко), Т.І. Вайнблат, Г.Н. Гапоненко, О.С. Дзюба, Ю.С. Кагановський, Ю.П. Павленко. Заявл. 09.03.93. Опубл. 30.03.1995., Бюл. № 1. – 7 с.

33. Пат. 2007772С 1, РФ, Н01Н1/02. Дугостойкий электрический контакт / Ю.П. Павленко, Г.Н. Гапоненко, Т.П. Крыгина (Т.П. Павленко), А.М. Мелений, М.В. Павлов, В.О. Верихов. – № 5022921/07; Заявл. 20.01.92. Опубл. 15.02.1994., Бюл. № 3. – 10 с.

34. Пат. 2007773С 1, РФ, Н01Н11/04, Н01Н1/02, В22F7/04. Способ изготовления контактного узла / Т.П. Крыгина (Т.П. Павленко), Т.І. Вайнблат, Г.Н. Гапоненко, О.С. Дзюба, Ю.С. Кагановский, Ю.П. Павленко. Заявл. 31.03.92. Опубл. 15.02.1994., Бюл. № 1. – 7 с.

35. Павленко Т.П. Исследование контактных материалов с использованием методов теории случайных функций / Ю.П. Павленко, Т.П. Павленко (Т.П. Крыгина), В.Л. Емельянов – К., 1997. – 9 с. – Деп. в Укр.ІНТЕІ 26.02.97,

№ 204–Уі–97. *Здобувачем розроблена модель визначення перехідного опору контактів при випробуванні їх на комутаційне зношення.*

36. Павленко Т.П. Анализ результатов многоточечных испытаний методами математической статистики / Ю.П. Павленко, Т.П. Павленко (Т.П. Крыгина), В.Л. Емельянов – К., 1997. – 7 с. – Деп. в УкрІНТЕІ 26.02.97, № 205–Уі–97. *Здобувачем розроблена модель порівняння результатів випробувань з Використанням методів математичної статистики.*

37. Павленко Т.П. Метод оценки измерения переходного сопротивления контактов при коммутационных испытаниях / Т.П. Павленко, В.Л. Емельянов – К., 1997. – 7 с. – Деп. в УкрІНТЕІ 26.02.97, № 206–Уі–97. *Здобувачем розроблені модель та алгоритм випадкового процесу контролю перехідного опору електричних контактів.*

38. Павленко Т.П. Фізичні процеси на контактах / Т.П. Павленко // Інформаційні технології наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я – 2009 : тр. XVII Міжнар. наук.-практ. конф., 20–22 травня 2009 р. – Харків : НТУ «ХПІ». – 2009. – С. 521.

39. Павленко Т.П. Анализ параметров плазмы, определяющих износ электрических контактов / Т.П. Павленко // Інформаційні технології наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я – 2010 : тр. XVIII Міжнар. наук.-практ. конф., 12–14 травня 2010 р. – Харків : НТУ «ХПІ». – 2010. – С. 188.

40. Павленко Т.П., Милых В.И. Фазовые превращения и свойства состояния системы контактной композиции / В.И. Милых, Т.П. Павленко // Проблеми енергоресурсозбереження в електротехнічних системах. Наука, освіта і практика – 2011 : тр. XIII Міжнар. наук.-техн. конф., 18–20 травня 2011 р. – Кременчук : КНУ. – 2011. – С. 244–245. *Здобувачем показано розвиток повної та міжфазної енергії, які впливають на зміну складу композиції контактів.*

41. Павленко Т.П. Электрические контакты повышенной дугостойкости для коммутационных электрических аппаратов / В.И. Милых, Т.П. Павленко // Применение инновационных технологий в научных исследованиях – 2011 : Сб. науч. ст. II Междунар. науч.-практ. конф., 28 мая 2011 г. – Курск. : Юго-Западный гос. ун-т. – 2011. – С. 29–32. *Здобувач розробив оптимальні склади композицій електричних контактів для комутаційних електричних апаратів.*

42. Павленко Т.П. Электрические контакты для автоматических выключателей / Т.П. Павленко // Інформаційні технології наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я – 2011 : тр. XIX Міжнар. наук.-практ. конф., 01–03 квітня 2011 р. – Харків : НТУ «ХПІ». – 2011. – С. 117.

АННОТАЦІЇ

Павленко Т.П. Розвиток теорії електричних контактів підвищеної дугостійкості для комутаційних електричних апаратів. – Рукопис.

Дисертація на здобуття вченого ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.09.01 – електричні машини й апарати, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, 2012.

Електричні контакти є необхідним і важливим вузлом комутаційних електричних апаратів. Для дослідження складів композицій електричних контактів розроблені загальні методи, фізичні та математичні моделі, в яких обґрунтовані процеси (теплові, дифузійні, термодинамічні та інші), що відбуваються на поверхні електричних контактів і всередині композиції, та отримані результати розрахунку розвитку дугового розряду методами чисельного моделювання.

Експлуатаційні випробування (ГКЗ, комутаційне зношування) проводилися на обладнанні, що імітують роботу комутаційних електричних апаратів, а також у натурних конструкціях автоматичних вимикачів серії ВА і електромагнітних контакторів серій КМ та КТ. Характер зношування робочої поверхні незмінний, має дрібноточкову структуру, що відображає зменшення її ерозії в 1,5–2,5 рази. Це дає можливість зменшити витрати срібла, або збільшити ресурс роботи контактних систем. Дані результати підтверджені актами впроваджень

Основні результати роботи використовуються в навчальному процесі в університетах, які мають спеціальності стосовно використання електротехнічних пристроїв в енергетичній системі.

Ключові слова: електричний контакт; дугостійкість, композиції; комутаційний апарат; термоємісійний процес; електрична дуга; енергетичні параметри; фазовий склад; хімічні перетворення; динамічна модель.

Pavlenko T. P. Development of the Theory of Enhanced Arc Resistance of Electric Contacts for Commutation Electric Devices

Doctoral thesis of engineering on specialty 05.09.01 – Electric Machines and Devices, National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”, Kharkiv, 2012.

Electric contacts are the necessary and important unit of commutation electric devices. General methods, physical and mathematic models, that contain proved processes (heat, diffusion, thermodynamic, etc.) that take place on the surface

of electric contacts and inside the composition, were developed for research of the structure of electric contacts composition; the results of calculation of arc grade development by the methods of numerical modeling are gained.

Operating tests (maximum interconnect ability, commutation wear) were carried out on the equipment imitating the work of commutation electric devices, and also in the full-size constructions of automatic breakers of VA-series, and in the electromagnetic contactors of the KM and KT-series. The nature of the wore out work surface is unchanged, it has fine-points structure, that reflects the reduction of its erosion to 1,5–2 times. It gives an opportunity to decrease the expenses of silver or to increase the resource of work of contact systems. Given results are confirmed by application acts.

The main results of work are used during the educational process in universities, having specialties relating to usage of electrotechnical devices in energy system.

Key words: electric contact; arc resistance of composition; commutation device; termoemission process; electrical arc; energy parameters; phase structure; chemical transformations; dynamic model.

Павленко Т.П. Развитие теории электрических контактов повышенной дугостойкости для коммутационных электрических аппаратов. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.09.01 – электрические машины и аппараты. Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Харьков, 2012.

Электрические контакты являются необходимым и важным узлом коммутационных электрических аппаратов, которые выполняют функции отключения электрических силовых цепей при токах короткого замыкания и перегрузок или управляют процессами на электрических станциях, подстанциях, транспорте, промышленных предприятий. Исходя из условий режимов работы коммутационных электрических аппаратов, разработаны составы композиций электрических контактов высокой дугостойкости. Повышение дугостойкости достигнуто за счет применения в составах композиций электрических контактов активных соединений на основе бария. Это позволило уменьшить работу выхода электронов основных составляющих композиций и, благодаря этому, снизить эрозию рабочей поверхности контактов в 1,5–2 раза.

Разработаны общие методы исследования составов композиций электрических контактов, которые позволяют определить оптимальные составы для коммутационных электрических аппаратов.

Разработаны физические модели, которые показывают развитие процессов, как на рабочей поверхности электрических контактов, так и внутри состава композиций. Данные модели основаны на теоретических положениях развития явлений и процессов, начиная с квантостатистической теории твердого тела и заканчивая тепловыми и дуговыми процессами. На развитие дугового разряда оказывает влияние распределение электрических зарядов в прикатодных областях, которые характеризуются высокой температурой и возникновением потоков плазмы, что и приводит, в основном, к эрозии рабочей поверхности и образованию катодных пятен I–III родов. Для уменьшения эрозии необходимо стремиться к образованию катодных пятен I рода, которые не способствуют образованию участков расплавления рабочей поверхности электрических контактов.

Для определения физико-химических свойств композиций электрических контактов, согласно общим методам, проведен ряд исследований (рентгеноструктурные, металлографические, химические), которые определяют фазовый состав композиций до испытаний и после испытаний, а также отработана технология для достижения основных параметров (твердость, плотность и т. п.), на соответствие требованиям, предусмотренным техническими условиями. В результате данных исследований определены оптимальные составы композиций электрических контактов для коммутационных электрических аппаратов (автоматических выключателей, электромагнитных контакторов).

Проведенные испытания на установках, имитирующих работу коммутационных аппаратов, показали, что рельеф рабочей поверхности имеет мелкоточечную структуру. Износ по всей поверхности равномерный – без следов участков расплавления и разбрызгивания состава композиций. Это говорит о том, что направления исследований выбраны правильно.

Для подтверждения эффекта работы составов композиций с особыми термоэмиссионными свойствами была создана динамическая модель, которая основана на системе уравнений массо-теплопереноса, объединяющая области катод – локально разогретая плазма – анод. Расчеты подтвердили предположения, показанные ранее, что плотность тока экспериментально соответствует 10^{10} – 10^{12} А/м². Время существования эмиссионного центра находится в пределах 0,01–1 мкс и процесс имеет дискретную последова-

тельность, при которой происходит падение напряжения. Расхождения экспериментов и результатов расчета модели составляет ~ 20 %.

Проведенные испытания в конструкциях коммутационных аппаратов подтвердили направление исследований, достоверность технических решений и математических моделей. Основные результаты работы используются в учебном процессе. По результатам исследований получены акты внедрения и рекомендации по дальнейшему использованию электрических контактов повышенной дугостойкости в коммутационных электрических аппаратах.

Ключевые слова: электрический контакт; повышенная дугостойкость, композиции; коммутационный аппарат; термоэмиссионный процесс; электрическая дуга; энергетические параметры; фазовый состав; динамическая модель.

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'А.В.И.', is located in the lower right quadrant of the page.

Підп до друку 28.08.2012 р. Формат 60 × 90 1/16. Папір офісний.
Riso-друк. Гарнітура Таймс. Ум. друк. арк. 1,9. Наклад 100 прим.
Зам. № 52. Ціна договірна.

Видавець і виготовлювач
ТОВ «Видавництво «Підручник НТУ «ХП»»,
вул. Фрунзе, 21, м. Харків-2, 61002

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 3656 від 24.12.2009 р.