

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ
ННІ ЕНЕРГЕТИКИ, АВТОМАТИКИ І ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ**

ПОГОДЖЕНО
**Директор ННІ енергетики,
автоматики і енергозбереження**

проф., д.т.н. _____ **КАПЛУН В.В.**
(підпис)

« _____ » _____ 2026 р.

ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ
**Завідувач кафедри
електротехніки, електромеханіки та
електротехнологій**

доц., к.т.н. _____ **ОКУШКО О.В.**
(підпис)

« _____ » _____ 2026 р.

МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

**на тему: «ДОСЛІДЖЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНОЇ НАДІЙНОСТІ
КОНТАКТНИХ ВУЗЛІВ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ МУСКАЧІВ 1 ВЕЛИЧИНИ»**

Спеціальність 141 – електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Освітня програма Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Орієнтація освітньої програми освітньо-наукова

Гарант освітньої програми

К.Т.Н., доцент
(науковий ступінь та вчене звання)

(підпис)

Троханяк В.І.
(ПІБ)

Керівник магістерської кваліфікаційної роботи

К.Т.Н., доцент
(науковий ступінь та вчене звання)

(підпис)

Коробський В.В.
(ПІБ)

Виконав

(підпис)

Костенко А.О.
(ПІБ)

КИЇВ – 2026

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ ЕНЕРГЕТИКИ, АВТОМАТИКИ І ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ**

ЗАТВЕРДЖУЮ

**Завідувач кафедри електротехніки,
електромеханіки та електротехнологій**

К.Т.Н., доц.

Окушко О.В.

(підпис)

« »

2026 р.

ЗАВДАННЯ

**ДО ВИКОНАННЯ МАГІСТЕРСЬКОЇ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ
ЗДОБУВАЧУ**

Костенку Андрію Олеговичу

Спеціальність 141 – електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Освітня програма Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Орієнтація освітньої програми освітньо-наукова

Тема магістерської кваліфікаційної роботи: «Дослідження експлуатаційної
надійності контактних вузлів електромагнітних пускачів 1 величини»

затверджена наказом від 18.11.2024 № 2058”С”

Термін подання завершеної роботи на кафедру 16. 06 . 2026

Вихідні дані до магістерської кваліфікаційної роботи: «Правила устаткування
електроустановок»; «Правила технічної експлуатації електроустановок
споживачів»; «Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів».

Перелік питань, що підлягають дослідженню:

1. Аналіз експлуатаційних умов електромагнітних пускачів на виробництвах.
2. Модернізація схеми керування установкою для дослідження контактних матеріалів на електроерозійну стійкість.
3. Метод дослідження характеристик електричної дуги при комутації кола серійним і дослідними контактами пускачів.
4. Економічна ефективність розробленого комплексу.

Перелік графічного матеріалу: презентація виконана в програмному
забезпеченні MS Power Point

Дата видачі завдання «19» листопада .2024 р.

**Керівник магістерської
кваліфікаційної роботи**

Завдання прийняв до виконання

(підпис)

(підпис)

Коробський В.В.

(ПІБ)

Костенко А.О.

(ПІБ)

РЕФЕРАТ

Магістерська робота: 94 с., 17 рис., 9 табл., 24 джерела.

Мета дослідження. Аналіз процесів функціонування та оцінка технічного стану контактних вузлів електромагнітних пускачів, проведення досліджень процесів виникнення електричної дуги, зміни перехідного опору та зношування контактів у процесі експлуатації для розробки обґрунтованих заходів підвищення надійності та довговічності електромагнітних пускачів за рахунок застосування сучасних екологічно-безпечних контактних матеріалів і вдосконалення конструктивних та експлуатаційних характеристик.

Об'єкт дослідження. Процеси експлуатації та контактні вузли електромагнітних пускачів першої величини.

Предмет дослідження. Фізико-хімічні процеси, що виникають в контактних вузлах електромагнітних пускачів, процеси виникнення електричної дуги, зміни перехідного опору та зношування контактних поверхонь у процесі експлуатації.

Дослідження проводились за сучасними методиками. Обробка результатів виконувалась на ПК в середовищі математичного програмного забезпечення "Mathcad 15.1".

Положення що виносяться на захист:

- аналіз експлуатаційних умов електромагнітних пускачів на виробництвах;
- модернізація схеми керування лабораторною установкою для дослідження контактних матеріалів на електроерозійну стійкість;
- метод дослідження характеристик електричної дуги при комутації кола серійним і дослідними контактами пускачів;
- економічна ефективність розробленого комплексу.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
РОЗДІЛ 1_АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ ПРО СТАН ЕКСПЛУАТАЦІЇ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПУСКАЧІВ	9
1.1. Аналіз методів дослідження надійності і показників експлуатаційної надійності електромагнітних пускачів.....	9
1.2. Стан експлуатації електромагнітних пускачів в сільськогосподарському виробництві	12
1.3. Експлуатаційні фактори впливу на електромагнітний пускач та їх рангова кореляція	17
1.4. Вплив факторів зовнішнього середовища на параметри надійності електромагнітних пускачів.....	20
РОЗДІЛ 2_ЗАВДАННЯ, ПРОГРАМА, МЕТОДИКИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ	27
2.1. Завдання та програма досліджень	27
2.2. Методики досліджень	Ошибка! Закладка не определена.
2.2.1. Дослідження фізико-механічних властивостей контактних матеріалів і морфології робочих поверхонь контактів	29
2.2.2. Лабораторні кліматичні випробування контактних матеріалів і пускачів.	37
2.2.3. Експериментальні установки для дослідження контактних матеріалів і електромагнітних пускачів.....	42
РОЗДІЛ 3_ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ І ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕРОЗІЇ І ПЕРЕХІДНОГО ОПОРУ КОНТАКТІВ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПУСКАЧІВ СЕРІЇ ПМЛ.....	53
3.1. Експериментальні дослідження ерозійного зносу серійних контакт- деталей СрН-90, СрМ-0,2+М1, КМК-А10м як функція кількості комутацій.....	53

3.2. Металографічний та рентгеноспектральний аналіз структури робочої поверхні серійних контактів.	58
3.3. Закономірності зміни перехідного опору і корозійної тривкості зразків контактних матеріалів під впливом хімічно-активних компонентів атмосфери тваринницьких приміщень.	60
РОЗДІЛ 4 РОЗРОБКА ДОСЛІДНИХ КОНТАКТНИХ МАТЕРІАЛІВ НА ОСНОВІ МІДІ ТА ЇХ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ПЕРЕВІРКА	65
4.1. Розробка і створення контактних матеріалів на основі міді	65
4.2. Експериментальні випробування контактів	67
4.2.1. Випробування пускачів з дослідними контактними матеріалами на комутаційну зносостійкість.	69
4.2.2. Випробування пускачів з дослідними контактними матеріалами на номінальну комутаційну здатність.	70
4.2.3. Дослідження контактного опору пускачів з серійними і дослідними контактами.	71
4.2.4. Експлуатаційні виробничі випробування пускачів з дослідними контактами.	72
4.3. Технічне обслуговування та технологія виробництва контактів пускачів з використанням дослідних контактних матеріалів на основі міді.....	Ошибка! Закладка не определена.
РОЗДІЛ 5 ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ЗАСТОСУВАННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПУСКАЧІВ З ДОСЛІДНИМИ КОНТАКТАМИ НА ОСНОВІ МІДІ	76
5.1. Розрахунок проекту вартості пускача з дослідними зразками контакт-деталей	77
5.2. Розрахунок втрат електричної енергії в комутуючих пристроях пускачів.	79
ВИСНОВКИ	81
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	83

ВСТУП

Сучасний розвиток електротехнічних систем супроводжується широким застосуванням комутаційної апаратури, зокрема електромагнітних пускачів, які є невід'ємною частиною керування електроприводами в промисловості, енергетиці та аграрному секторі. Надійність роботи таких пристроїв значною мірою визначає безперервність технологічних процесів, безпеку обладнання та економічну ефективність експлуатації електроустановок. Особливо це стосується пускачів першої величини, які працюють у колах із відносно малими та середніми струмами, але зазнають інтенсивного впливу комутаційних і зовнішніх факторів.

Ключовим елементом електромагнітних пускачів є контактні вузли, оскільки саме вони безпосередньо виконують процес замикання та розмикання електричного кола. У процесі експлуатації контакти піддаються комплексному впливу електричної дуги, механічних навантажень, термічних процесів та агресивного навколишнього середовища. Це призводить до електроерозійного зношування, корозійного руйнування, зростання перехідного опору та можливих відмов апарата. Тому дослідження експлуатаційної надійності контактних вузлів є важливим науково-технічним завданням.

Використання сучасних композиційних контактних матеріалів на основі міді та її сплавів дозволяє підвищити стійкість до електроерозії та корозії, однак ефективність їх роботи значною мірою залежить від умов експлуатації, режимів комутації та конструктивних особливостей пускача. У зв'язку з цим виникає необхідність комплексного аналізу процесів зношування контактів та оцінювання їх поведінки в реальних виробничих умовах.

Дослідження надійності контактних вузлів електромагнітних пускачів є актуальним завданням, що має як наукове, так і практичне значення. Отримані результати дозволяють обґрунтувати вибір контактних матеріалів, удосконалити конструкцію контактних систем та підвищити загальну надійність електромагнітної комутаційної апаратури.

Актуальність дослідження. Зростання вимог до надійності електрообладнання, особливо в умовах агресивного середовища та інтенсивних режимів комутації, зумовлює необхідність підвищення довговічності контактних вузлів пускачів. Відмова контактної системи призводить до простоїв обладнання, економічних втрат і зниження безпеки експлуатації, що робить проблему оцінювання та підвищення надійності особливо актуальною.

Мета дослідження. Аналіз процесів функціонування та оцінка технічного стану контактних вузлів електромагнітних пускачів, проведення досліджень процесів виникнення електричної дуги, зміни перехідного опору та зношування контактів у процесі експлуатації для розробки обґрунтованих заходів підвищення надійності та довговічності електромагнітних пускачів за рахунок застосування сучасних екологічно-безпечних контактних матеріалів і вдосконалення конструктивних та експлуатаційних характеристик.

Об'єкт дослідження. Процеси експлуатації та контактні вузли електромагнітних пускачів першої величини.

Предмет дослідження. Фізико-хімічні процеси, що виникають в контактних вузлах електромагнітних пускачів, процеси виникнення електричної дуги, зміни перехідного опору та зношування контактних поверхонь у процесі експлуатації.

Практичне значення дослідження. Отримані результати можуть бути використані для підвищення надійності електромагнітних пускачів шляхом обґрунтованого вибору контактних матеріалів, удосконалення конструкції контактних систем та оптимізації режимів експлуатації, що сприятиме зменшенню відмов і підвищенню ефективності роботи електрообладнання.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ ПРО СТАН ЕКСПЛУАТАЦІЇ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПУСКАЧІВ

1.1. Аналіз методів дослідження надійності і показників експлуатаційної надійності електромагнітних пускачів

Інтенсивний розвиток сучасної техніки та пріоритетних галузей промисловості зумовив необхідність проведення широкомасштабних теоретичних досліджень і став основою формування сучасної теорії та практики надійності. Аналіз фундаментальних наукових праць у галузі надійності дозволяє виділити дві основні тенденції дослідження надійності систем і апаратів. Перша тенденція базується на вивченні статистичних та імовірнісних закономірностей виникнення несправностей і відмов у процесі експлуатації або під час проведення спеціальних випробувань. У межах такого підходу стан апарата розглядається як справний або несправний, а відмова трактується як випадкова подія. Крім того, здійснюється аналіз законів розподілу напрацювання до відмови та інших статистичних характеристик. Друга тенденція ґрунтується на детерміністичному підході до фізичної теорії надійності апаратів і спрямована на встановлення закономірностей перебігу фізико-хімічних процесів у них. При цьому досліджується взаємозв'язок механічних і фізичних параметрів, умов навантаження та експлуатації з показниками надійності на основі аналізу механізмів виникнення відмов.

Для кількісного оцінювання стану систем і апаратів використовують математичний апарат теорії ймовірностей, математичної статистики та теорії випадкових процесів.

Питання фізичної природи зношування, процесів старіння електричних комутаційних апаратів, а також впливу окремих факторів на їх працездатність неодноразово розглядалися на спеціальних нарадах і наукових конференціях.

Водночас статистичні та ймовірнісні оцінки їх надійності висвітлені ще недостатньо.

Згідно з вимогами нормативних документів, оцінку надійності комутаційних апаратів здійснюють із застосуванням таких загальнотеоретичних методів:

- розрахункового (з використанням в основному довідкових даних);
- розрахунково-експериментального;
- експериментального.

Використовуючи положення зазначених методів, при визначенні показників надійності виділяють кілька етапів загальної методики оцінки надійності комутаційних апаратів.

Окрім цих основних методів, на практиці широко застосовуються більш спрощені інженерні методи розрахунку надійності, які базуються на довідкових даних та результатах експлуатаційних спостережень: метод апріорно-емпіричних функцій (застосовується при об'ємі вибірки $n \leq 20$);

- спрощений метод розрахунку ПН;
- метод розрахунку за середньо груповими значеннями інтенсивності відмов;
- метод розрахунку з використанням даних експлуатації;
- коефіцієнтний метод (ґрунтується на використанні відносних коефіцієнтів надійності).

Загалом показники надійності (ПН) обираються для конкретного виду апарату залежно від поставлених завдань. Унаслідок цього в нормативних документах спостерігається значна різноманітність ПН для різних апаратів та відсутність єдиного уніфікованого підходу до їх вибору.

Вплив оточуючого середовища може призводити до суттєвого зростання перехідного контактного опору. Тому основоположники теорії електричних контактів Р. Хольм, В. Мерл, І.С. Таєв, Б.С. Сотсков та інші вчені вважають перехідний контактний опір $R_{\text{пер}}$, основною характеристикою, яка визначає надійність електричних контактів. До нього висуваються такі вимоги::

$$R_{\text{пер}} < R_{\text{пер ту}}; \quad (1.1)$$

$$\frac{dR_{\text{пер}}}{dt} \rightarrow 0; \quad \frac{dR_n}{dt} \rightarrow 0, \quad (1.2)$$

де $R_{\text{пер ту}}$ - гранично допустиме значення опору, яке визначене технічними умовами;

t, n - час і число комутаційних циклів, відповідно.

Це справедливо для електричних контактів як елемента комутаційного апарату. Однак перехідний опір не є єдиною достатньою характеристикою для надійного прогнозування працездатності всього електромагнітного пускача в цілому.

Найбільша частка відмов низьковольтної апаратури (НВА) припадає саме на комутуючі пристрої (контактну систему) — 60 %, на механізм керування (електромагнітні котушки) — 27 % та на механічну систему — 13 %.

Аналізуючи різні фактори впливу на комутаційні апарати, Костенецька Л.І. та Мінакова Р.В. зазначають, що: 36% всіх відмов виникає за рахунок недоліків при конструюванні;

– 36% - виникає за рахунок експлуатації;

– 28% - виникає за рахунок ненадійності застосованих в апараті елементів.

Всі електромагнітні пускачі (ЕМП) повинні виготовлятися відповідно до вимог чинних нормативних документів. Для найбільш поширених серій пускачів ПМЕ, ПМА та ПМЛ, які експлуатуються в аграрному секторі України, встановлено нормовані показники надійності (ПН).

Важливим параметром, що характеризує працездатність контактів протягом тривалого періоду експлуатації, є допустима температура. На основі цього розроблено відповідні вітчизняні та закордонні стандарти щодо допустимих перевищень температури контактів пускачів.

Для слаботочних контактів одним із ключових параметрів є спад напруги на контактах. При цьому допустимий спад напруги $\Delta U_{\text{к.доп.}}$ повинен бути меншим за напругу розм'якшення матеріалу $\Delta U_{\text{розм.}}$: $\Delta U_{\text{к.доп.}} = (0,5-0,8) \cdot \Delta U_{\text{розм.}}$.

Згідно з рекомендаціями довідкової літератури, на практиці в умовах експлуатації перехідний опір контактів визначають шляхом пропускання через замкнуті контакти апарату постійного струму напругою 2–5 В з одночасним вимірюванням спаду напруги на них. Для пускачів зі струмом навантаження $I_{\text{ном}} < 50 \text{ А}$, величина спаду напруги ΔU не повинна перевищувати 70 мВ, а для пускачів з $I_{\text{ном}} \geq 50 \text{ А}$ - $\Delta U < 110 \text{ мВ}$.

За останні 10–15 років в агропромисловому комплексі значно ширше почали застосовувати пускачі типу ПМЛ, а також модернізовані ПМЕ. Однак аналіз експлуатаційних даних свідчить, що впровадження цих серій не дозволило суттєво знизити аварійність, підвищити ймовірність безвідмовної роботи та збільшити термін служби. Час безвідмовної роботи пускачів, які експлуатуються в тваринницьких виробничих приміщеннях, у середньому становить 0,5–3,0 роки, а в приміщеннях, суміжних з основними, — 3–5 років (табл. 1.1)

Таблиця 1.1

Показники надійності електромагнітних пускачів, які експлуатуються в електроустановках на фермі ВРХ

Найменування робочих машин, технологічних процесів	Середньо квадратичні наробітки до капітального ремонту, роки	Середньо квадратичні відхилення, роки	Коефіцієнти варіації	кофіцієнти Пірсона	Нормовані моменти четвертого порядку
Транспортер гноєзбиральний (ТСН-3,0 Б)	3,24	1,689	0,52	1,332	4,915
Вакуумні насоси	4,187	1,085	0,26	0,174	1,836
Молочні насоси	4,083	2,574	0,63	0,088	0,936
Кормоцех для ВРХ	4,545	1,786	0,39	0,006	2,201
Подрібнення зерна	6,064	1,855	0,32	0,315	3,478

1.2. Стан експлуатації електромагнітних пускачів в сільськогосподарському виробництві

У 80–90-х роках минулого століття для потреб сільського господарства СРСР випускалося понад 100 типів комплектних пристроїв керування, а

номенклатура електромагнітних пускатрів налічувала більше 100 основних серій і типовиконань. Загальний обсяг поставок сягав близько 15 млн одиниць апаратів, а річний обсяг виробництва пускатрів становив 17–19 млн штук. При цьому щорічний приріст виробництва наприкінці періоду складав не менше 5 %, з яких 8,9 млн штук припадало на пускатрі з номінальним струмом $I_{\text{ном}}=10\text{A}$).

На початку 90-х років у сільському господарстві України експлуатувалося близько 3,5 млн електродвигунів, і приблизно такою ж була чисельність парку електромагнітних пускатрів. За результатами обстежень господарств Київської, Чернігівської та Хмельницької областей, найбільш поширеними в аграрному секторі були пускатрі таких типів::

- вітчизняного виробництва ПМЕ - 46%; ПМЛ - 25%; ПАЕ - 11,3%; П6 - 4,2%;
- закордонного виробництва MDSt - 3%; SLA - 0,5%; інші - 10%.

Під час проєктування пускатрів до них висуваються такі експлуатаційні та спеціальні вимоги:

- а) врахування впливу умов навколишнього середовища;
- б) тривалий строк служби, висока надійність і безвідмовність роботи;
- в) простота та зручність у спостереженні, огляді та заміні деталей, а також ремонтпридатність;
- г) мінімальні експлуатаційні витрати, зокрема низьке енергоспоживання пускатря;
- д) забезпечення належних умов праці обслуговуючого персоналу (ергономічність та естетичність);
- е) безпека під час виготовлення, монтажу та експлуатації.

Виконання за комутаційною зносостійкістю для АС-3 залежить від інтенсивності циклів:

- понад 400 циклів/добу — виконання А;
- 120–400 циклів/добу — виконання Б;
- менше 120 циклів/добу — виконання В.

Для перервно-тривалого режиму роботи характерний вибір тривалості робочого періоду зі стандартного ряду значень 10, 30, 60 і 90 хв. У випадку

повторно-короткочасного режиму відносна тривалість вмикання (ТВ) приймається з ряду 15, 25, 40 та 60%. При цьому допустима частота циклів вмикання-вимикання може становити від 600 до 2400 за годину.

Умови експлуатації електромагнітних пускачів у сільському господарстві суттєво відрізняються від промислових. На виробництві більшість таких апаратів працює в стандартних умовах навколишнього середовища, при стабільній і симетричній трифазній напрузі, у режимах, передбачених державними стандартами та технічними умовами. Їх обслуговування здійснюється висококваліфікованим персоналом, із регулярним проведенням планово-попереджувальних ремонтів і технічного обслуговування згідно з установленними вимогами.

У сільськогосподарському виробництві електромагнітні пускачі переважно працюють у важких умовах експлуатації. Для них характерні ненормальні режими роботи, зокрема повторно-короткочасний режим із тривалими паузами між вмиканнями. Крім того, живильна напруга в мережі часто є нестабільною: добові коливання амплітуди можуть досягати 20%, при цьому спостерігається змінна асиметрія фаз, що пояснюється змішаним підключенням споживачів. Узагальнюючи результати спостережень і враховуючи висновки інших дослідників щодо експлуатації електрообладнання в аграрній сфері, можна виділити основні причини відмов і знижених показників надійності пускачів:

- негативний вплив навколишнього середовища на комутаційні апарати;
- специфічний характер роботи з рідкими вмиканнями та значними інтервалами простою;
- неправильне налаштування захисних пристроїв та експлуатація в аварійних режимах;
- низька якість електроживлення;
- порушення правил експлуатації;
- виробничі, монтажні та ремонтні дефекти.

Для отримання достовірних оцінок показників надійності пускачів із заданою точністю визначається обсяг генеральної сукупності, тобто формується

вибірка, за якою проводяться експлуатаційні спостереження. Приймається план спостережень NUT, а також припускається, що наробіток до відмов і середній строк служби пускачів підпорядковуються нормальному закону розподілу. При заданих параметрах довірчої ймовірності $g = 0,95$ та відносної похибки $\varepsilon = 0,05$, необхідний обсяг вибірки становить $N = 1000$ одиниць.

Експлуатаційні спостереження за цією вибіркою (1000 пускачів) проводилися протягом трьох років у господарствах Київської, Чернігівської та Хмельницької областей. За весь період було зафіксовано 324 випадки відмов. Характер несправностей та причини відмов окремих елементів електромагнітних пускачів наведено в табл. 1.2.

Таблиця 1.2

Структура відмов електромагнітних пускачів

Види відмов (несправностей)	Відмови	
	кількість	%
1. Електротеплові:		
- електрична ерозія контактів;	79	24,38
- зварювання контактів;	8	2,47
- пошкодження котушок;	63	19,45
- пошкодження корпусу;	13	4,01
- пошкодження електротеплових реле.	59	18,21
Сума по електротепловим відмовам	222	68,52
2. Фізико-хімічні:		
- зниження опору ізоляції та пробій;	37	11,42
- утворення непровідних плівок на контакт-деталях;	5	1,55
- послаблення і відмова контактних пружин.	12	3,70
Сума по фізико-хімічним відмовам	54	16,67
3. Механічні:		
- пошкодження рухомої частини комутуючого пристрою;	12	3,70
- порушення з'єднання між контакт-деталлю і контакто-тримачем;		
- пошкодження блок-контактів;	7	2,16
- пошкодження короткозамкнутого витка електромагнітної котушки;	6	1,85
- забруднення робочих поверхонь електромагніту;	8	2,47
- пошкодження оболонки пускача.	6	1,85
	9	2,78
Сума по механічним відмовам	48	14,81
Всього по пусках	324	100

З урахуванням того, що у відмовлених апаратах залишається понад половину срібловмісного контактного матеріалу, а фактичний ресурс за механічною та електричною зносостійкістю використовується не більше ніж на

1/10 від номінального, можна зробити висновок про значні втрати дорогоцінного КМ і відповідних фінансових ресурсів. Ситуація ускладнюється тим, що в більшості господарств і підприємств відсутня організована система збору та регенерації такого матеріалу.

Через особливості роботи тваринницьких приміщень та специфіку експлуатаційних умов у тваринницьких і птахівничих господарствах щорічно фіксуються відмови: приблизно до 17% припадає на електромагнітні пускачі, а до 15% — на автоматичні вимикачі.

Структура відмов пускачів в агропромисловому комплексі розподіляється таким чином:

- тваринництво — близько 70%;
- рослинництво — приблизно 20%;
- ремонтно-механічні майстерні — близько 10%.

Надійна робота електромагнітних пускачів загальнопромислового виконання забезпечується за умови, що температура навколишнього середовища знаходиться в діапазоні від -40 до $+60$ °C, а відносна вологість повітря становить близько 75%. Використання таких пускачів в агресивних середовищах нормативними документами не передбачене.

Оптимальні мікрокліматичні умови для утримання тварин регламентуються галузевими нормами технологічного проєктування в сільському господарстві. Відповідно до цих вимог, температура у тваринницьких приміщеннях має підтримуватися в межах від $+3$ до $+20$ °C, відносна вологість повітря — 70–80%, вміст вуглекислого газу — 0,05–0,20%, а гранична концентрація аміаку — до 20 мг/м³.

Для зниження негативного впливу вологості та агресивної атмосфери тваринницьких приміщень на практиці застосовують низку заходів, спрямованих на підвищення надійності пускачів:

- а) встановлення пускачів загальнопромислового виконання в окремих, захищених приміщеннях;

б) використання спеціально виготовлених пускачів, розрахованих на роботу у несприятливих умовах;

в) застосування інгібіторів корозії для захисту металевих елементів від агресивного середовища;

г) використання протекторного захисту контактів та спеціальних мастильних матеріалів, що зменшують вплив довкілля на контактні з'єднання.

У сільськогосподарській практиці рекомендується встановлювати комутаційні апарати в окремих приміщеннях, ізольованих від основних виробничих зон, де утримується худоба та розміщене технологічне обладнання. Теоретично можливим є також застосування апаратів у тропічному виконанні безпосередньо в основних приміщеннях, однак через їх високу вартість і дефіцитність для більшості господарств та фермерів це часто недоступно.

За останні роки, особливо в зарубіжній практиці, значного поширення набули спеціальні мастильні матеріали для електричних контактів. Вони знижують агресивний вплив навколишнього середовища, зменшують перехідний опір і ймовірність виникнення електричної дуги під час розмикання, а також послаблюють її негативний вплив на зношування контактів.

Такі мастила можуть бути як рідкими, так і в'язкими за механічними властивостями та за поведінкою подібні до традиційних мастильних матеріалів. Водночас вони мають значно вищі електроізоляційні характеристики: при температурі 20°C їх об'ємний опір становить близько 400 МОм/см³, тоді як у звичайних мастил — приблизно 10⁶ МОм/см³. Важливою перевагою є зниження цього опору зі зростанням температури: при 120°C він не перевищує 50 МОм/см³.

1.3. Експлуатаційні фактори впливу на електромагнітний пускач та їх рангова кореляція

Під час експлуатації електромагнітні пускачі піддаються одночасному впливу великої кількості факторів, що визначаються як режимами їх роботи, так і умовами навколишнього середовища. У зв'язку з цим доцільно виділяти лише

5–6 найсуттєвіших чинників, які найбільшою мірою характеризують стан пускача, оскільки загальна кількість впливів може сягати кількох десятків. При цьому лабораторне дослідження пускачів і нових контактних матеріалів є складним багатфакторним завданням, що потребує проведення значної кількості експериментів.

Для пускачів 1 та 2 величин (з $I_{ном} \leq 25$ А), які працюють в агресивних умовах тваринницьких приміщень, визначальними є характеристики комутаційного вузла. Насамперед це зносостійкість (електрична T_k та механічна T_m), корозійна стійкість (надійність контактного з'єднання), що оцінюється стабільністю перехідного опору в часі, а також стійкість до зварювання контактів. Саме відмова комутаційних пристроїв є причиною понад 60% усіх відмов пускачів.

Оскільки на показники надійності пускачів впливає значна кількість факторів, виникає необхідність оцінити їхню вагомість та ступінь впливу як на сам пускач, так і на його комутаційний вузол. Для цього застосовується метод ранжування факторів, який базується на експертній оцінці спеціалістів і дозволяє відсіяти незначущі та виділити ключові впливи.

На основі аналізу літературних джерел та експлуатаційних даних було сформовано перелік із 12 основних факторів, що найбільше впливають на надійність електромагнітних пускачів. Визначення середніх та граничних значень цих факторів здійснюється методами математичної статистики. Найімовірніші значення наведено в табл. 1.3.

До основних дієвих факторів віднесено групи електричного, механічного та кліматичного впливу. Електричні фактори включають напругу, силу струму, тип струму, характер навантаження та режим роботи. Механічні чинники охоплюють контактний натиск, швидкість замикання і розмикання контактів, а також матеріал контактних елементів. Окремо виділяються фактори, пов'язані з кліматичними умовами експлуатації.

Ранжування факторів за кожним визначальним параметром здійснюється з урахуванням даних літературних джерел та результатів експертного опитування.

Для цього використовуються анкетні форми, які заповнюються спеціалістами у сфері експлуатації електрообладнання та дослідження електричних контактів (кількість експертів $m = 10$).

Таблиця 1.3

Фактори рангової кореляції електромагнітних пускачів

Символ фактору	Назва фактору	Розмірність, інтервал варіювання, інші умови
U	Напруга	0-380 В
I	Величина сили струму	0-25 А
$\cos \varphi$	Характер навантаження	0,35-1,0
S	Режим роботи (комутації)	Тривалий Перервно-тривалий Повторно-короткотривалий
V_I	Рід струму	Змінний, постійний
$P_{\text{кон}}$	Контактний натиск	50-250 Н
$M_{\text{кон}}$	Матеріал контактів	На основі Ag і Cu
$K_{\text{кон}}$	Конструкція робочих поверхонь контакт-деталей	Площина, напівсфера
$V_{\text{кон}}$	Швидкість замикання і розмикання контактів	0,25-1,35 м/с
G_1	Стан оточуючого середовища (температура, атмосферний тиск, вологість)	$t = 5-35\text{ }^{\circ}\text{C}$; $W = 45-100\%$; $p = 0,5-1,5\text{ атм.}$
G_2	Стан оточуючого середовища (хімічно-активні домішки)	$\varphi = 0-38\text{ мг/м}^3\text{ (NH}_3\text{)}$; $\varphi = 0-35\text{ мг/м}^3\text{ (H}_2\text{S)}$; $\varphi = 0-0,4\text{ \% (CO}_2\text{)}$
M	Механічні впливи	Удар, вібрація, прискорення

Ступінь узгодженості думок експертів оцінюється за допомогою коефіцієнта конкордації w , значення якого знаходиться в межах $0 \leq w \leq 1$. При $w = 0$ відсутня будь-яка узгодженість оцінок, тоді як $w = 1$ відповідає повній злагоженості експертних суджень. Статистична значущість коефіцієнта w перевіряється за критерієм χ^2 . Гіпотеза про наявність узгодженості не відхиляється при рівні значущості $\alpha = 0,05$, якщо розрахункове значення χ^2_p перевищує табличне значення ($\chi^2_t = 4,58$ при $\alpha = 0,05$ і числі ступенів свободи $f = n - 1 = 11$).

Результати опрацювання анкетних даних та обчислення коефіцієнтів конкордації наведено в таблиці 1.4. Оскільки для всіх розглянутих випадків

ранжування виконується умова $\chi^2_p > \chi^2_{\alpha}$ (при $\alpha = 0,05$ і $f = 11$), це підтверджує статистичну значущість коефіцієнтів конкордації.

На основі отриманих результатів побудовано ступінчасту діаграму рангів, де по осі абсцис відкладено фактори, а по осі ординат — суми їхніх рангів $\sum_{j=1}^m a_{ij}$.

Відомо, що чим більша сума рангів певного фактора, тим меншим є його вплив. Діаграма формується у порядку спадання значущості факторів, а результати ранжування подано у графічному вигляді на рис. 1.1.

За результатами аналізу всі фактори, що впливають на окремі параметри та на працездатність комутуючого вузла пускача в цілому, умовно поділено на три групи: головні, суттєві та несуттєві (табл. 1.4).

Застосування методу апіорної рангової кореляції дозволило встановити, що під час розробки методики дослідження пускачів найбільш вагомими чинниками, які визначають надійність комутаційного пристрою, є величина струму, матеріал контактів та наявність агресивного середовища.

1.4. Вплив факторів зовнішнього середовища на параметри надійності електромагнітних пускачів

Загальні відомості. Робота електромагнітного пускача невіддільна від впливу навколишнього середовища та процесів, що в ньому протікають. Особливо важливим є дослідження повільно змінних деградаційних явищ, таких як корозія, старіння матеріалів і втома. Вплив середовища на процес комутації струму контактами може проявлятися у зміні перехідного опору, інтенсивності електроерозії та характеру дугових процесів. Загалом на поверхні контактів формуються різноманітні плівки, які збільшують контактний опір.

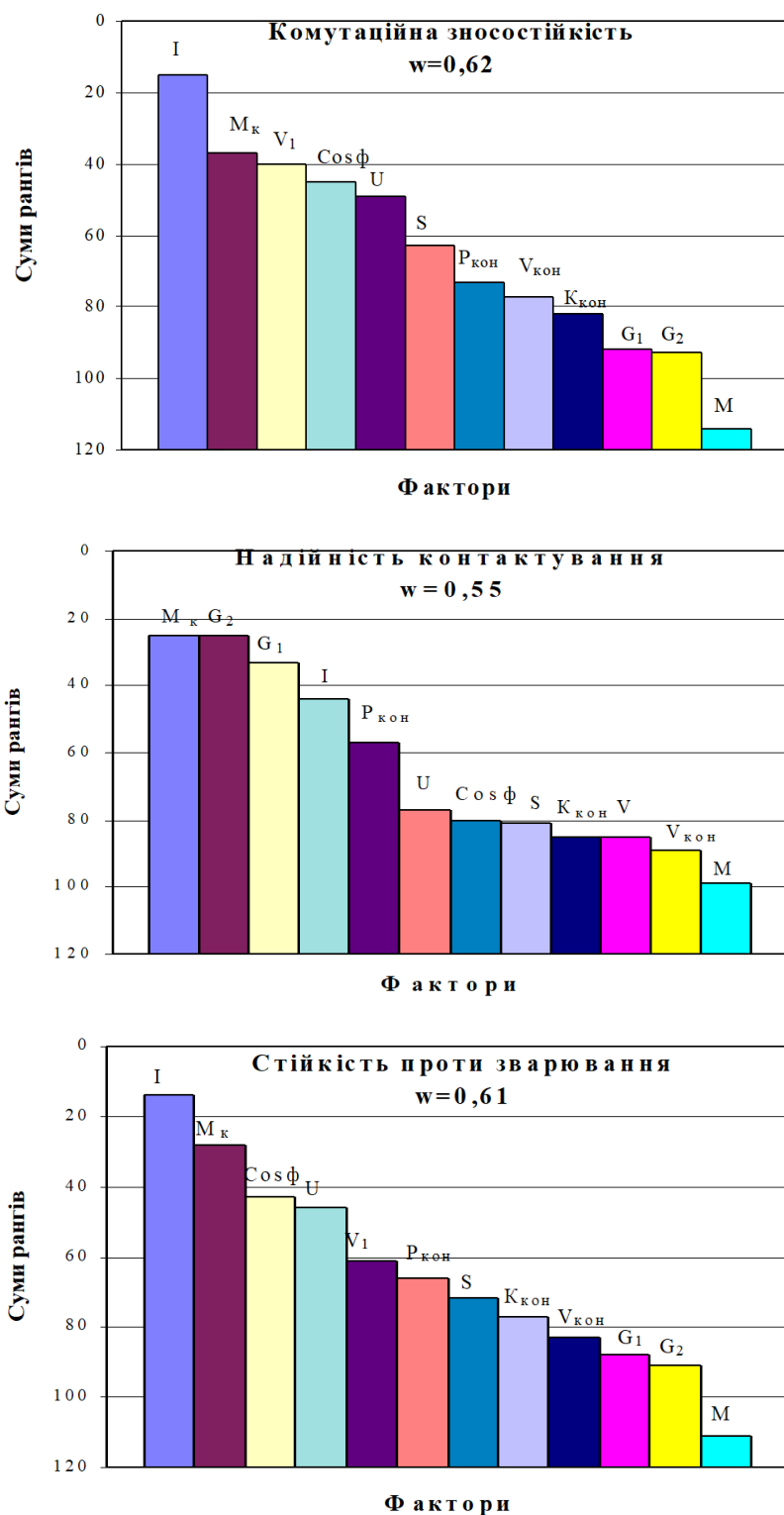


Рис. 1.1. Ступінчасті діаграми рангової кореляції факторів впливу на показники надійності електромагнітного пускача

Вплив середовища на перехідний опір контактів електромагнітних пускачів проявляється через його залежність від хімічного складу атмосфери, температури, вологості та тривалості експлуатації в таких умовах.

Таблиця 1.4

Класифікація факторів впливу на параметри надійності пускача

Параметр	Головні фактори	Суттєві фактори	Несуттєві фактори
Комутаційна зносостійкість	I, M _{кон}	V ₁ , cosφ, U, S, P _{кон} ,	V _{кон} , K _{кон} , G ₁ , G ₂ , M
Надійність контактування	M _{кон} , G ₂ , G ₁ , I	P _{кон} , U, cosφ, S, V ₁	K _{кон} , V _{кон} , M
Стійкість проти зварювання	I, M _к	cosφ, U, V ₁ , P _{кон} , S	K _{кон} , V _{кон} , G ₁ , G ₂ , M
Комплекс трьох параметрів	I, M _{кон} , G ₂ , G ₁ ,	cosφ, P _{кон} , U, V ₁ , S	K _{кон} , V _{кон} , M

Загальний контактний опір R_k в атмосферних умовах:

$$R_k = R_{ст} + R_{пл}, \quad (1.3)$$

де $R_{ст} = R'_{ст} + R''_{ст}$ - опір стягування (перехідний опір), обумовлений макро- $R'_{ст}$ і мікрогеометрією $R''_{ст}$ контактних поверхонь, Ом;

$R_{пл}$ - опір поверхневих плівок контакту, Ом.

З урахуванням прийнятих авторами допущень під час виведення формули, зокрема припущення, що поверхня контакту між двома елементами має вигляд взаємодії сфери з площиною, формула (1.3) можна записати у такому вигляді:

$$R_k = \frac{\rho}{2a} + \frac{\sigma_{пл}}{S_k}, \quad (1.4)$$

де ρ - питомий опір контактного матеріалу, Ом·м;

a - радіус поверхні дотику, м;

$\sigma_{пл}$ - питомий поверхневий (тунельний) опір плівки, Ом·м²;

S_k - ефективна контактна поверхня, м².

Питомий тунельний опір плівки $\sigma_{пл}$ можна визначити як відношення спаду напруги на плівці $\Delta U_{пл}$ до густини тунельного струму:

$$\sigma_{пл} = \frac{\Delta U_{пл}}{e \cdot N}, \quad (1.5)$$

де e - заряд електрону, К;

N - число електронів, які проходять під дією тунельного ефекту за одиницю часу через одиницю поверхні плівки, електронів/м²·с.

Було встановлено, що перехідний опір срібних контактів після 20 днів перебування в середовищі з домішкою 0,0002% H₂S збільшився в 20-30 разів (умови випробування: $t=20\div 25^{\circ}\text{C}$; $\varphi=40\%$; $I=0,5\text{mA}$; $P=1,96\cdot 10^{-6}\text{W}$). При зміні умов випробування (концентрація H₂S збільшилась до 0,02%; $t=45^{\circ}\text{C}$), перехідний опір збільшився в 40-50 разів. Причому $R_{\text{пер}}$ після перших 3-5 днів перебування в умовах випробування збільшується досить сильно, а за останні 10-15 днів зростання йде повільніше.

Відомо, що сульфідні плівки збільшують $R_{\text{пер}}$ при індуктивному навантаженні. Вітенберг М.І. вважає, що спад напруги на срібних контактах, вкритих сульфідною плівкою, практично постійний і мало залежить від величини струму. При збільшенні струму $R_{\text{пер}}$ зменшується обернено пропорційно струму, що пояснюється зміною структури плівки Ag₂S при нагріванні струмом і збільшенням електричної провідності плівки. Опір, при наявності Ag₂S, залежить в основному від тривалості проходження струму.

Науковцями досліджено вплив H₂S і парів дибутилфталату на перехідний опір сплавів: потрійного - Ag/Pd20/Mg0,3 і четверного - Ag/Pd20/Mg0,25/Al0,25.

Умови досліджень на корозійну тривкість такі:

а) в середовищі сірководню:

- концентрація H₂S, мг/(%).....1 (0,07)
- відносна вологість φ , %.....90
- температура t , $^{\circ}\text{C}$20
- час витримки, години.....24;48

б) в парах дибутилфталату:

- концентрація г/л.....0,5
- температура t , $^{\circ}\text{C}$100
- час витримки, години.....24; 48

Тривале перебування зразків сплавів у середовищі H_2S призводить до формування на їх поверхні плівки Ag_2PdS , що супроводжується різким зростанням перехідного опору $R_{\text{пер}}$ порівняно з вихідним станом, особливо при малих контактних натисках 0,02–0,05 Н. При збільшенні часу впливу з 24 до 48 годин значення $R_{\text{пер}}$ зростає у 3–4 рази. За умови натиску 0,05 Н воно досягає приблизно 200 мОм для потрійного та 70 мОм для четверного сплаву. При цьому досліджувані матеріали зберігають працездатність контактної групи, маючи $R_{\text{пер}}$ у межах 20–45 мОм при 0,05 Н.

Ті ж автори наводять результати досліджень впливу тривалості нагрівання на $R_{\text{пер}}$ сплаву $\text{Ag/Pd}_{20}/\text{Mg}_{0,3}$ у повітрі при температурах 200 °С і 300 °С. Незначне підвищення опору спостерігається вже в перші 3–4 години при кімнатній температурі, що пояснюється адсорбцією кисню на поверхні. Найбільш суттєві зміни відбуваються при 300 °С, де $R_{\text{пер}}$ збільшується у 3–4 рази, однак не перевищує 30 мОм при натиску 0,05 Н, що забезпечує надійну роботу контактів.

Fechant L. та Muniesa I. наводять аналітичну залежність для визначення перехідного опору $R_{\text{пер}}$ (мОм) холодних контактів без поверхневих плівок і без впливу електричної дуги:

$$R_{\text{пер}} = \frac{A}{\sqrt{P_{\text{к}}}}, \quad (1.6)$$

де $P_{\text{к}}$ - сила контактного натиску в інтервалі 10^{-2} - 10^3 Н;

A - коефіцієнт, характерний для різних КМ, (для Ag - 0,26, а для AgCdO - 0,6).

Хольм Р. встановив закон зміни перехідного опору від робочої температури контактів:

$$R_{\text{пер}} = R_0 \cdot \left(1 + \frac{2}{3} \alpha \theta \right), \quad (1.7)$$

де R_0 - опір при $\theta=20^\circ\text{C}$, мОм;

θ - температура контакту, °С;

α - температурний коефіцієнт опору металу контакту.

Він же вважає, що $R_{\text{пер}}$ змінюється в основному так, як і питомий опір.

У дослідженнях Tamai Terutaka показано, що при зниженні температури контактний опір спочатку зменшується, а потім зростає. При цьому для різних контактних матеріалів існує температура, за якої $R_{пер}$ є мінімальним: для мідних контактів вона становить близько 100 °С, для срібних — близько 140 °С. При циклічних змінах температури спостерігається явище гістерезису перехідного опору.

Вплив середовища на ерозійні процеси контактів є суттєвим і визначається його хімічним складом. Зокрема, кисень може як сприяти руйнуванню матеріалу через окиснення, так і частково захищати поверхню за рахунок утворення плівок, які змінюють умови проходження струму, роботу виходу електронів, катодний спад напруги та інші параметри. Так, Хак К.А. показав, що робота виходу електронів залежить від стану поверхні, її шорсткості та кристалографічної орієнтації:

- для срібла.....3,94 В;
- для срібла з сульфідною плівкою.....4,33 В.

Інші дослідники зазначають, що для кожного металу існує оптимальна концентрація кисню в суміші з азотом, за якої знос катода є мінімальним. Для срібного катода мінімальний знос спостерігається при вмісті кисню близько 10–12%, для мідного — 3–4%. Подальше збільшення концентрації кисню призводить до зростання зношування. При дослідженні мідних електродів, що працюють у постійному струмі до 50 А, встановлено, що склад газового середовища (суміш азоту та кисню) істотно впливає на процеси в дузі, особливо при зміні швидкості її обертання.

Ерозія срібних контактів у CO_2 залежно від струму є подібною до ерозії в повітрі: при малих струмах (до 15 А) переважає перенесення матеріалу з катода, а при подальшому зростанні струму процес переходить у переважно анодне руйнування. У повітрі та CO_2 залежність ерозії від струму до 15 А є майже лінійною, після чого спостерігається значне розсіювання значень.

Німецький дослідник Amft C.D. встановив, що при струмі 25 А інтенсивність обгорання контактів у повітрі зростає в ряду: Ag, Cu, W. Це

відбувається всупереч очікуваному зменшенню зносу з підвищенням тугоплавкості матеріалу, що пояснюється інтенсивним утворенням оксидних плівок на поверхні Cu і W. Загалом ступінь обгорання зменшується в ряду середовищ: O₂, повітря, N₂, He, SF₆.

Підвищення температури контактів зменшує їх зносостійкість, оскільки змінює умови деіонізації дуги через тепловідвід. При дослідженні контактора (I = 20 А, режим АС-3, контакти Ag) у діапазоні температур від –20 °С до +60 °С отримано результати, що узгоджуються з даними Кобленца М.Г., де при зміні температури від +50 °С до +160 °С знос змінюється лише на 6,5%, тобто вплив температури є незначним.

РОЗДІЛ 2

ЗАВДАННЯ, ПРОГРАМА, МЕТОДИКИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1. Завдання та програма досліджень

У процесі експлуатації електромагнітних пускачів у комутуючих пристроях та інших елементах конструкції відбуваються незворотні зміни фізико-хімічних, фізико-механічних і діелектричних властивостей електроізоляційних матеріалів, а також процеси втомного руйнування контактних і зношування конструкційних матеріалів.

Основними факторами, що визначають надійність комутуючих пристроїв електромагнітних пускачів у сільськогосподарських електроустановках, є величина комутованого струму, матеріал контактів та наявність агресивних домішок у навколишньому середовищі.

Виходячи з наведеного вище, метою даної роботи є розробка науково обґрунтованих заходів підвищення ефективності та експлуатаційної надійності електромагнітних пускачів сільськогосподарських електроустановок за рахунок використання нових композиційних контактних матеріалів з гетерогенною структурою на основі міді.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- проаналізувати специфічні умови експлуатації пускачів в електроустановках тваринництва, фактори навколишнього середовища, причини відмов (передусім комутуючих пристроїв) та основні показники їх надійності;
- виконати аналіз існуючих контактних матеріалів, що застосовуються в електромагнітних пусках, визначити можливі шляхи економії срібла, а також провести лабораторні кліматичні випробування альтернативних мідних контактних матеріалів за розробленою методикою на корозійну тривкість;
- розробити математичну модель прогнозування перехідного опору $R_{пер}$ та електроерозійного зношування контактів залежно від параметрів навколишнього середовища та кількості комутаційних циклів;

– визначити значення глибини проплавлення, величини електричної ерозії та ресурсу контактів на основі вдосконаленої математичної моделі теплових процесів у комутуючих пристроях електромагнітних пускачів. Для вирішення поставлених завдань передбачається проведення комплексного дослідження, основні етапи якого наведено в табл. 2.1.

Таблиця 2.1

**Основні етапи комплексного дослідження електромагнітних пускачів
з новими композиційними контактними матеріалами**

Етапи дослідження	Вид дослідження	Мета дослідження	Основні визначальні параметри
1	2	3	4
1	Дослідження фактичних умов експлуатації і режимів роботи пускачів.	Для вивчення умов роботи комутуючого пристрою пускача щодо формування вимог для КМ.	1.Струмові навантаження і характер навантаження електроустановок в тваринництві. 2.Режими роботи пускачів. 3.Нормовані і фактичні параметри оточуючого середовища.
2	Фізико-механічні лабораторні дослідження нових КМ.	Вивчення впливу фізико-механічних властивостей на показники експлуатаційної надійності.	1.Густина. 2.Твердість. 3.Характеристики міцності. 4.Питомий електричний опір. 5.Теплофізичні властивості.
3	Випробування створених КМ на електроерозійну стійкість.	Визначення закономірностей масопереносу і ерозії розривних контактів від виду домішок, величини напруги, струму, кількості комутаційних циклів.	1.Електроерозійний знос зразків КМ. 2.Контактний опір зразків КМ.
4	Лабораторні кліматичні випробування розроблених КМ.	Виявлення найбільш корозійнотривких матеріалів.	1.Корозійні втрати. 2.Перехідний опір.
5	Вивчення структури, морфології робочих поверхонь контактів.	Вивчення впливу домішок, виду формування структури, вивчення поверхні розривних контактів під впливом параметрів дуги комутації.	1.Мікроструктура. 2.Рельєф. 3.Спектральний аналіз робочих поверхонь.

Продовження табл. 2.1

1	2	3	4
6	Лабораторні дослідження електромагнітних пускачів ПМЛ в категорії застосування АС-3.	Вивчення впливу факторів оточуючого середовища на ПН пускача в модельних умовах зовнішнього середовища.	1.Перехідний опір контактів пускача. 2.Зносостійкість КМ в пусках. 3.Перевищення температури контактів і температура електромагнітних котушок. 4.Дослідження на вмикальну і вимикальну здатність пускача.
7	Експлуатаційні випробування пускачів з розробленими КМ.	Визначення експлуатаційних ПН пускачів у виробничих умовах.	1.Провал контактів. 2.Хід контактів. 3.Контактний натиск. 4.Перехідний опір. 5.Контроль і перевірка електричного опору ізоляції.

2.2. Методики досліджень

2.2.1. Дослідження фізико-механічних властивостей контактних матеріалів і морфології робочих поверхонь контактів. Густина КМ (контактного матеріалу) визначають методом гідростатичного зважування зразків у дистильованій воді. Як кінцевий результат приймають середнє значення не менше ніж п'яти вимірювань за умови, що відносна похибка не перевищує 3%. Розрахунок густини γ КМ здійснюється за відповідною формулою:

$$\gamma = \frac{m_1}{m_1 - m_2} \cdot \gamma_B, \quad (2.1)$$

де m_1 - маса контакту, зваженого в повітрі, г;

m_2 - уявна маса контакту, зваженого у воді, г;

γ_B - густина води, г/см³, (10³ кг/м³).

Зважування контактів здійснюється на механічних вагах ВЛА-200М, які забезпечують точність вимірювання не менше 10⁻⁴ г. Повторність зважувань

становила не менше трьох разів, а за кінцевий результат приймали середнє арифметичне значення.

Твердість (мікротвердість) фазових складових композиційних спечених матеріалів, яка характеризується як уявна твердість, визначається методом Віккерса за допомогою приладу ПМТ-3. Випробування проводили на трьох зразках кожного контактного матеріалу (КМ). На кожному зразку виконувалося не менше п'яти вимірювань.

Міцність розроблених композиційних КМ визначається шляхом випробування зразків на розтягування на розривній машині РМУ-0,05-1,0 відповідно до вимог ГОСТ 7855-84.

Визначення шорсткості поверхні контакт-деталей здійснюється за допомогою профілографа-профілометра моделі 201 (похибка вертикального збільшення — 5%). При цьому визначається параметр Ra (середнє арифметичне відхилення мікронерівностей від середньої лінії профілю), а також виконується запис профілю мікронерівностей поверхні у збільшеному масштабі на електротермічному папері.

Теплофізичні випробування контактних матеріалів виконують згідно з чинними методиками, причому визначення перевищення температури комутуючого пристрою та інших вузлів пускачів відносно температури навколишнього середовища здійснюють безпосередньо на діючих апаратах. Дослідження проводять за умови пропускання номінального змінного струму через всі струмоведучі полюси в режимі тривалої роботи.

Визначення середньої об'ємної температури контактної деталі виконують із використанням платинородій-платинової термопари типу ТПП 13 (87%Pt + 13%Rh) з діаметром електродів $(1,0 \pm 0,1)$ мм. Вимірювання термо-ЕРС здійснюють за допомогою мультиметра та вольтметра постійного струму В2-36. Усі вимірювання проводять за температури навколишнього середовища $+(20 \pm 5)^\circ\text{C}$, що дозволяє не вводити поправки на вплив зовнішньої температури при визначенні перевищення температури. Основна похибка вимірювань не перевищує $\pm 1\%$ при довірчій імовірності $P = 0,95$.

Перевищення температури електромагнітних котушок пускачів визначають резистивним методом, який ґрунтується на зміні електричного опору обмотки. Значення температурного перевищення котушки $\Delta\theta$ (°C) відносно температури навколишнього середовища обчислюється за формулою:

$$\Delta\theta = \frac{R_2^k - R_1^k}{R_1^k} \cdot (k + R_1^k) + \theta_1 - \theta_2, \quad (2.2)$$

де R_2^k - електричний опір котушки при температурі θ_2 , Ом;

R_1^k - електричний опір котушки при температурі θ_1 , Ом;

k - коефіцієнт, який чисельно дорівнює оберненому значенню температурного коефіцієнта омичного опору матеріалу провoda котушки (для міді $k=235$);

θ_2 - температура оточуючого середовища при вимірюванні електричного опору в нагрітому стані котушки, °C;

θ_1 - температура оточуючого середовища при вимірюванні електричного опору в холодному стані котушки, °C.

Питомий електричний опір зразків КМ ρ визначається за формулою:

$$\rho = \frac{RS}{L}, \text{ Ом}\cdot\text{м} \quad (2.3)$$

де: R - загальний опір зразка, Ом;

S - поперечний переріз зразка, мм²;

L - довжина зразка, м.

Вимірювання електричного опору зразків здійснюють методом вольтметра-амперметра на постійному струмі із застосуванням вольтметра постійного струму типу В2-36. Сумарна похибка вимірювань при цьому не перевищує 0,5%. Додатково для контролю малих значень опору використовується мікроомметр Ф-415.

Для визначення питомого електричного опору КМ виготовляють зразки стандартної геометрії з розмірами: довжина $L = 100$ мм, товщина 5 мм та висота 3 мм. Зразки отримують за тією ж технологією, що й основну експериментальну

партію матеріалу. Вимірювання геометричних параметрів виконують штангенциркулем із похибкою не більше 0,05 мм. Остаточне значення питомого електричного опору визначають як середнє арифметичне не менше ніж за п'ять паралельних вимірювань.

Провал і хід контактів пускачів контролюють за допомогою стійки СШ (ГОСТ 10197-70) за стандартною методикою із застосуванням електричного індикатора відповідно до ТУ48-І-391(392)-81, ТУ16-91.ИГЕВ.644131.001ТУ та ТУ16-685.020-85. Переміщення траверси фіксують індикатором лінійних переміщень ИЧ (ГОСТ 577-68) з точністю до 0,01 мм.

Контактний натиск контактів-зразків і контакт-деталей пускача визначають у замкненому стані за допомогою динамометра EXCEL з ціною поділки 0,245 Н.

Оцінку надійності контактування виконують за характером зміни перехідного опору. Перехідний опір експериментальних контактних пар визначають методом вольтметра-амперметра із використанням універсального вольтметра В7-35 та амперметра із дзеркальною шкалою Э514 класу точності 0,5 (ГОСТ 8711-78). Вимірювання перехідного опору проводять до та після кожної серії комутаційних циклів при протіканні номінального струму. Для кожної контактної пари виконують по 10 вимірювань спаду напруги після кожної комутації з витримкою у замкненому стані 10 с. Для пускача спад напруги визначають на кожному полюсі головного кола.

Опір контакту ΔR (мОм) розраховується за формулою:

$$\Delta R = \frac{\Delta U}{I}, \quad (2.4)$$

де ΔU - спад напруги на контактному переході, що виміряний вольтметром В7-35, мВ;

I - струм, що виміряний амперметром Э514, А.

Визначення перехідного опору виконують при температурі навколишнього середовища $+(20 \pm 5)^\circ\text{C}$, що дає змогу не враховувати температурні поправки при перерахунках. Похибка вимірювання спаду напруги

при цьому не перевищує 3%. Допустиме відхилення при визначенні перехідного опору контактів становить $\pm 10\%$ із довірчою імовірністю $P = 0,95$.

Оцінка похибки перехідного опору δ виконується за Формулою:

$$\delta = 1,1 \cdot \sqrt{\delta_V^2 + \delta_A^2}, \quad (2.5)$$

де δ_V - похибка вольтметра, %;

δ_A - похибка амперметра, %.

Випробовування зразків КМ та контактів пускачів на електричне зношування (ерозію) виконують за частоти 2400–600 циклів увімкнення-вимкнення за годину, що відповідає вимогам технічної документації на серійні та розроблені контактні матеріали і пускачі. Для лабораторних експериментів найбільш доцільним вважається ваговий (масовий) метод визначення зносу.

Зразки-контакти, а також рухомі та нерухомі контакт-деталі зважують до і після кожної серії комутаційних циклів на аналітичних вагах ВЛА-200М із точністю 10^{-4} г. Кожне зважування повторюють не менше трьох разів.

Зміна маси контакту Δm (як рухомого, так і нерухомого) після завершення кожної серії комутаційних циклів визначається як

$$\Delta m = m_1 - m_2, \quad (2.6)$$

де m_1 - маса контакту перед початком комутаційних випробувань, г;

m_2 - маса контакту після серії комутаційних випробувань, г.

Абсолютний знос контактів визначається як сума зміни маси рухомого і нерухомого контактів:

$$\Delta m_{\text{абс}} = \Delta m_{\text{рк}} + \Delta m_{\text{нк}}, \quad (2.7)$$

де $\Delta m_{\text{рк}}$ - зміна маси рухомого контакту, г;

$\Delta m_{\text{нк}}$ - зміна маси нерухомого контакту, г.

Як критерій зносу приймається зміна маси матеріалу контактів за один комутаційний цикл k (г/цикл) (коефіцієнт інтенсивності зношування):

$$k = \frac{\Delta m_{\text{абс}}}{n} = \frac{\sum \Delta m_i \cdot n_i}{\sum n_i^2}, \quad (2.8)$$

де n - кількість комутаційних циклів в серії, цикл.

Стійкість КМ проти зварювання визначають на спеціальній установці відповідно до стандартної методики. Сутність методу полягає у відтворенні в комутуючому пристрої найбільш характерного режиму зварювання контактів — проходження короткочасного імпульсу зварювального струму в умовах іонізації дуги під час замикання та розмикання контактів.

Під час експериментів варіюють такі вхідні параметри: величину струму та тривалість імпульсу зварювального струму, контактний натиск, а також швидкість переміщення контактів. Як вихідні характеристики приймають мінімальне значення струму зварювання $I_{зв}$ при імовірності зварювання $P = 0,95$ та зусилля відриву контактів.

Установка для досліджень включає комбіноване джерело зварювального струму, комутуючий пристрій і розривну машину РМУ-2, яка дозволяє визначати зусилля розриву в діапазоні від 1 до 1000 Н із похибкою до 3%.

Перевірка електроізоляційних властивостей пускачів під час експлуатаційних випробувань здійснюється шляхом вимірювання опору ізоляції омметром постійного струму Ф4108-1 при випробувальній напрузі 500 В із похибкою $\pm 10\%$. Вимірювання проводять на початку досліджень і в процесі експлуатаційних навантажень.

Випробування на вмикальну та вимикальну здатність пускачів із новими КМ виконують на лабораторній установці (підрозділ 2.2.3) у режимі граничних комутацій. Тестування на електроерозійну зносостійкість проводять при номінальному струмі в категорії застосування АС-3 (режим нормальних комутацій).

Металографічний аналіз мікроструктури та фазового складу зразків КМ виконують на металографічному мікроскопі МИМ-8. Для травлення шліфів сплавів застосовують 10%-ний розчин персульфату амонію. Шліфи виготовляють на поперечних і поздовжніх перерізах зразків контакт-деталей у такій послідовності: шліфування абразивним папером із різною зернистістю, подальше полірування на фетрі, змоченому водною суспензією оксиду хрому.

Дослідження морфології контактних поверхонь виконують із застосуванням електронної мікроскопії: растрового електронного мікроскопа «Cambridge Stereoscan» S4-10 з приставкою для рентгеноспектрального аналізу Link System-290 та рентгенівського мікроаналізатора “Camebax SX-50”.

Під час випробувань на комутаційну здатність фіксують основні параметри процесу комутації (тривалість горіння дуги та середнє значення струму в дузі) із використанням осцилографування струму та напруги. Струм визначають за спадом напруги на шунті 75ШСМ3-25-05. Осцилограми струму та напруги отримують за допомогою універсального запам'ятовуючого електронного осцилографа. Похибка вимірювань не перевищує 5%. Схема підключення осцилографа до випробувального електричного кола наведена на рис. 2.1

Обробку експериментальних результатів, отриманих методом прямих вимірювань (густини, мікротвердості, характеристик міцності, перевищення температури та інших параметрів), виконують із використанням наведених форму.

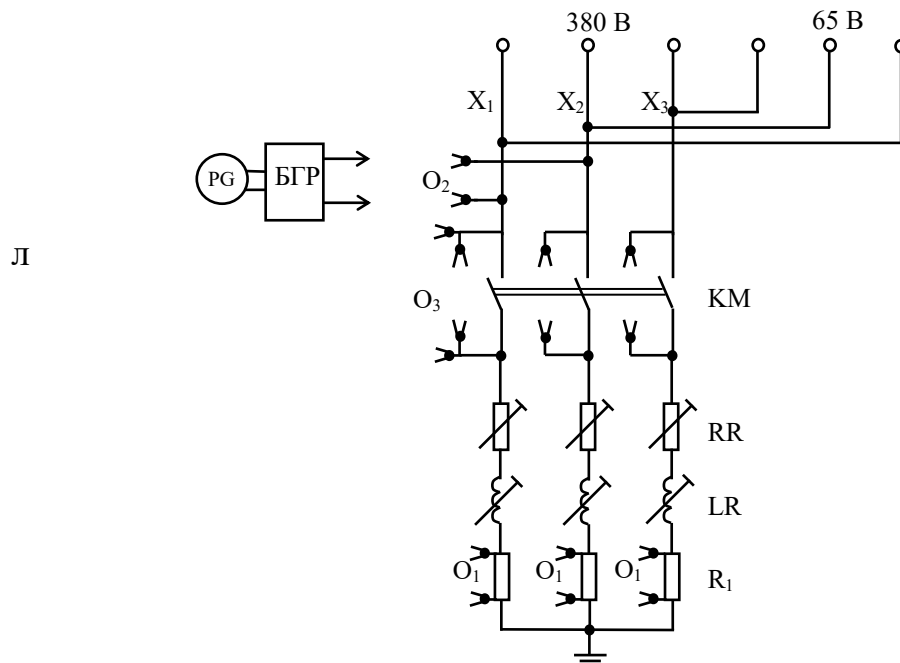


Рис.2.1. Схема приєднання електронного осцилографа до випробувального електричного кола:

O₁ – канал осцилографа для запису струму; O₂, O₃ – канали осцилографа для запису напруги; PG – осцилограф; R₁ – шунт; RR – регульовальні резистори; LR – регульовальні котушки індуктивності; БГР – блок гальванічної розв’язки.

Середнє квадратичне відхилення $\sigma(\bar{A})$ результатів вимірів оцінюється за формулою:

$$S(\bar{A}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{A})^2}{n(n-1)}}, \quad (2.9)$$

де x_i - i -тий результат спостереження;

$\bar{A}$ - результат вимірювання (середнє арифметичне виправлених результатів спостереження);

n - число результатів спостереження;

$S(\bar{A})$ - оцінка середнього квадратичного відхилення.

Довірчі межі ε (без врахування знаку) випадкової похибки результатів вимірювання знаходяться за формулою:

$$\varepsilon = t_c \cdot S(\bar{A}), \quad (2.10)$$

де t_c - коефіцієнт Стюдента, який, в залежності від довірчої імовірності P та числа результатів спостереження n , знаходять по таблиці.

Межі невиключеної систематичної похибки δ_b результатів вимірювання:

$$\delta_b = k \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n \delta_{bi}^2}, \quad (2.11)$$

де δ_{bi} - межа i -тої невиключеної систематичної похибки;

k - коефіцієнт, який визначається прийнятою довірчою імовірністю; при $P=0,95$, $k=1,1$.

Межі похибки результатів вимірювання Δ :

$$\Delta = \varepsilon, \quad \text{якщо} \quad \frac{\delta}{S(\bar{A})} < 8 \quad (\text{невиключеними систематичними похибками}$$

нехтуємо);

$$\Delta = \delta, \quad \text{якщо} \quad \frac{\delta}{S(\bar{A})} > 8, \quad (\text{випадковими похибками в порівнянні з}$$

систематичними нехтуємо).

2.2.2. Лабораторні кліматичні випробування контактних матеріалів і пускачів. *Загальні положення.* Як правило, електромагнітні пускачі встановлюються у комплектні пристрої розподілу електроенергії та системи керування споживачами. Умови їх експлуатації з урахуванням впливу кліматичних факторів регламентуються нормативними документами.

Електрообладнання, призначене для роботи в тваринницьких приміщеннях, повинно виготовлятися зі ступенем захисту оболонки IP23, IP44 або IP55 та відповідати кліматичному виконанню У3 або У5. У випадках експлуатації в агресивних середовищах передбачається виконання в хімічно стійкому варіанті Х3 (класифікаційна група спеціального середовища — 5). Через порушення правил монтажу, помилки персоналу або нестабільні режими роботи (що трапляється досить часто) може порушуватися герметичність оболонок, у результаті чого пускачі піддаються безпосередньому впливу середовища з агресивними компонентами. Це, у свою чергу, інтенсифікує корозійні процеси в комутуючому пристрої.

Випробувальна камера. Відповідно до вимог обирається тип випробувань на дію корозійно-активної атмосфери та встановлюються методи їх проведення. Для відтворення заданих температурно-вологісних умов використовується кліматична камера SKR-200/25. Вона забезпечує регулювання температури в діапазоні від -25°C до $+60^{\circ}\text{C}$ із автоматичним підтриманням заданого рівня з точністю до 1%. У процесі кліматичних випробувань температура підтримується на рівні $+25\pm 3^{\circ}\text{C}$. Відносна вологість регулюється в межах 20–95% з точністю 3% при температурі $+(25-55)^{\circ}\text{C}$, при цьому робочі значення вологості встановлюються в межах 83–95%.

Для створення в лабораторних умовах спеціального корозійного середовища розробляється та виготовляється герметична приставка (ексикатор) до камери SKR-200/25, наведена на рис. 2.2. Приставка прямокутної форми виконується з органічного скла товщиною 5 мм і має розміри $800\times 600\times 500$ мм (об'єм $0,24\text{ м}^3$). Вона встановлюється в робочій зоні камери та забезпечує візуальний контроль за зразками під час випробувань. Освітленість всередині камери становить 50–300 лк.

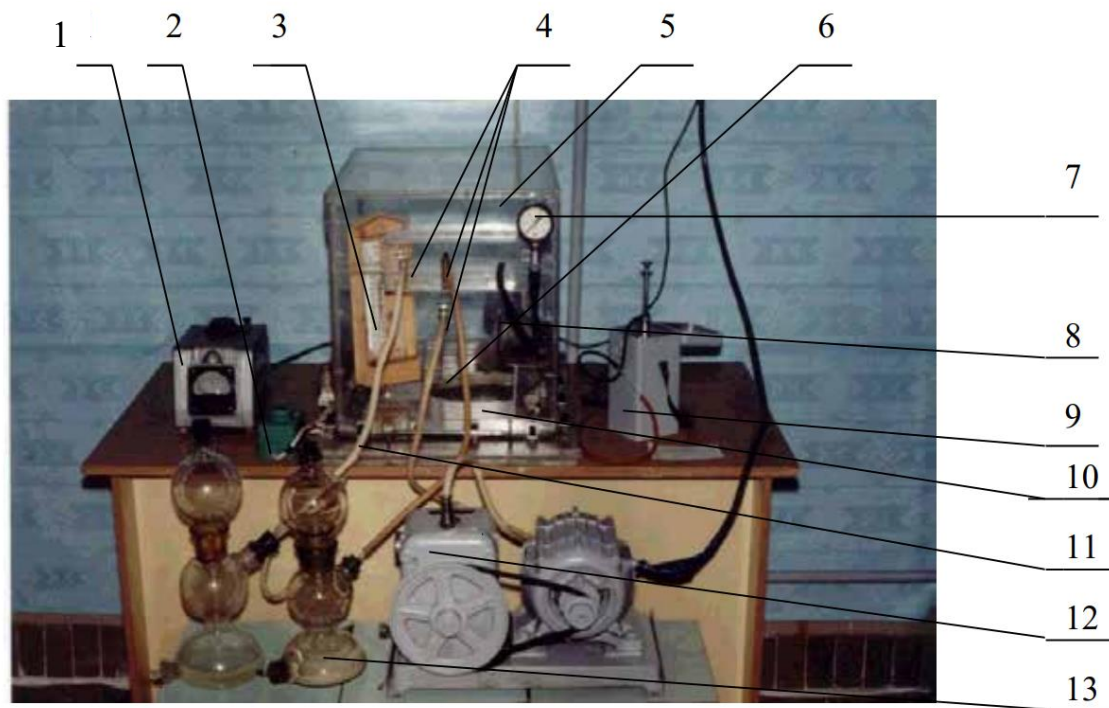


Рис 2.2. Загальний вигляд спеціальної герметичної приставки до камери SKR-200/25 (для проведення лабораторних кліматичних випробувань):

- | | |
|----------------------------|--------------------------|
| 1 – автотрансформатор; | 8 – електровентильатор; |
| 2 – вимикач ПНВС; | 9 – газоаналізатор УГ-2; |
| 3 – гігрометр ВІП-2; | 10 – водонагрівач; |
| 4 – скляний вентиль; | 11 – гумові трубки; |
| 5 – приставка (ексикатор); | 12 – вакуум-нагнітач; |
| 6 – спеціальна касета; | 13 – апарат Кіпа. |
| 7 – манометр; | |

Горизонтальна основа герметично з'єднується з вертикальними стінками через гумову прокладку, яка додатково обробляється вакуумним мастилом. Зразки КМ розміщуються у фарфорових підставках спеціальної касети 6, а пускачі закріплюються на монтажному блоці із струмопідводом без порушення герметичності. Робоче положення пускачів — вертикальне, що забезпечує вільну циркуляцію агресивного середовища між елементами.

Вологість у внутрішньому об'ємі ексикатора підтримується в діапазоні 40–100% за рахунок наявності водяної ванни з електронагрівачем 10 та

електровентилятора 8, розташованого безпосередньо над поверхнею води. Електропідігрівач, підключений до електромережі через автотрансформатор 1, використовується для регулювання температури води у ванні, що дозволяє керувати інтенсивністю випаровування і, відповідно, встановлювати необхідний рівень вологості. Контроль вологості в ексикаторі здійснюється за допомогою гігрометра ВІП-2 (позиція 3). Електровентилятор забезпечує рівномірне перемішування корозійного середовища зі швидкістю до 10 мм/с, що сприяє формуванню однорідних умов по всьому об'єму камери.

На передній стінці приставки передбачено декілька вентилів 4, які служать для подачі корозійних газів, підключення вакуум-нагнітача 12, газоаналізатора 9, а також для вирівнювання тиску та випуску середовища. Для формування агресивних компонентів (NH_3 , H_2S , CO_2 та їх сумішей) використовуються два апарати Кіпа 13, з'єднані з вентилями за допомогою гумових трубок 11. Потрібна концентрація газових домішок досягається шляхом регульованого нагнітання або відкачування повітряного середовища вакуум-нагнітачем до рівня 40–55 кПа. При цьому контролюються покази манометра 7 для забезпечення нормальних умов тиску (84,0–106,7 кПа).

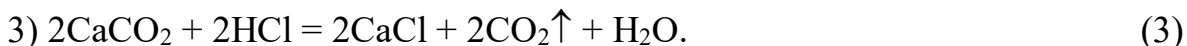
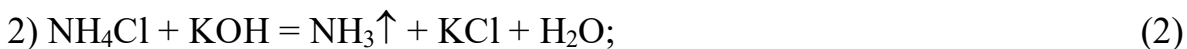
Запропонована конструкція випробувальної камери та схема її компонування дозволяють формувати спеціально задане корозійно-активне середовище відповідно до програми досліджень, а також оперативно коригувати його параметри у разі відхилення від встановлених значень.

Спеціальне корозивне середовище. Для скорочення часу отримання необхідних експериментальних даних інтенсифікація впливу агресивного середовища забезпечується шляхом керованої зміни його параметрів, зокрема:

- підвищення відносної вологості повітря до рівня 83–98%;
- збільшення концентрації корозійно-активних газових компонентів у робочому об'ємі.

Однорідна газоповітряна суміш заданого складу формується шляхом змішування відповідних газів із повітрям із попередньо встановленою вологістю. Отримання необхідних газових складових здійснюється реакційним способом із

використанням апаратів Кіпа. При взаємодії вихідних реагентів відбуваються хімічні процеси, які описуються відповідними рівняннями реакцій:



Номінальне верхнє значення концентрації агресивних газових компонентів при впливі на контактні матеріали встановлюється відповідно до гранично допустимих значень кліматичних факторів зовнішнього середовища в умовах експлуатації та приймається для таких компонентів:

- аміаку NH_320 мг/м³;
- сірководню H_2S10 мг/м³;
- вуглекислого газу CO_230000 мг/м³;
- суміші $\text{NH}_3 + \text{H}_2\text{S}$(20+10) мг/м³.

Під час випробувань пускачів масова концентрація аміаку доводиться до 30 мг/м³, а сірководню — до 25 мг/м³. Таким чином, робоче корозійно-активне середовище формують як газоповітряну суміш $\text{NH}_3 + \text{H}_2\text{S}$.

Контроль концентрації агресивних компонентів здійснюється за допомогою універсального газоаналізатора УГ-2 з точністю вимірювання до $\pm 10\%$ (при цьому допускається підтримання концентрації середовища в камері з похибкою до $\pm 25\%$). Визначення вмісту газів виконується фотоколориметричним методом.

Перед початком випробувань шляхом серії вимірювань встановлюють стабілізовані значення концентрації газів, температури та вологості. У процесі експерименту, внаслідок взаємодії компонентів середовища та їх природного розкладання, спостерігається поступове зниження концентрації газів. У зв'язку з цим контроль параметрів середовища проводять періодично — двічі на добу, з подальшим коригуванням при відхиленні від заданих значень. Особливу увагу приділяють саме концентрації агресивних газів, оскільки за результатами аналізу умов експлуатації електромагнітних пускачів у тваринницьких приміщеннях встановлено наявність двох піків підвищення концентрації таких газів протягом доби.

Загальна тривалість випробувань вибирається з урахуванням можливості оцінки динаміки корозійних процесів та поведінки контактних матеріалів у часі. Для цього передбачено періодичне вилучення зразків КМ для контролю параметрів корозійної тривкості. Після вилучення з камери зразки витримують у нормальних умовах протягом 1 години, після чого виконують відповідні вимірювання.

Контрольні заміри проводять до початку випробувань, а також після 4, 10 та 21 доби перебування зразків у корозійному середовищі. Подібні підходи до витримки контактів із Au, Ag, Pt, Cu під час кліматичних випробувань також застосовуються в низці європейських країн, зокрема в Німеччині, Швеції та Нідерландах.

Вимоги до зразків матеріалів, виміри і обробка результатів. Показники корозійної тривкості оцінюються як у кількісному, так і в напівкількісному вигляді (зокрема, контактний опір може визначатися за п'ятибальною шкалою). Загальна корозійна тривкість зразків контактних матеріалів встановлюється залежно від характеру корозійного ураження та експлуатаційних вимог за такими основними критеріями:

- корозійні втрати, віднесені до одиниці площі (інтегральна характеристика корозійного процесу);
- електричний контактний опір.

У випадку рівномірної (суцільної) корозії, яка фіксується під час проведення випробувань, втрати маси на одиницю площі поверхні Δm_s обчислюються за формулою:

$$\Delta m_s = \frac{m_{0\text{ кор}} - m_{1\text{ кор}}}{S}, \text{ кг/м}^2 \quad (2.12)$$

де $m_{0\text{ кор}}$ - маса зразка до випробувань, кг;

$m_{1\text{ кор}}$ - маса зразка після випробувань без усунення продуктів корозії, кг;

S - площа поверхні зразка, м^2 .

Електричний контактний опір визначається методом малих Е.Р.С. відповідно до формули (2.4), що дає змогу мінімізувати руйнування оксидних

плівок на поверхні контактів під час вимірювань. Зразки фіксуються у спеціальному вимірювальному пристрої та випробовуються при контактному натиску 100 г (0,98 Н), постійному струмі 2 А та напрузі 36 В. Величина контактного опору встановлюється за спадом напруги, який реєструється для 10 повторних вимірювань на трьох парах контактів із витримкою 10 с між замірами.

Зразки КМ для визначення контактного опору виконуються у вигляді циліндричних стержнів діаметром 2,5–4,5 мм і довжиною 15–20 мм. Верхній рухомий контакт (анод) має напівсферичну робочу поверхню, нижній нерухомий (катод) — плоску. Для дослідження втрат маси використовуються пластинчасті зразки розмірами $50 \pm 10 \times 25 \pm 5 \times 1,5$ мм, причому для кожного варіанта матеріалу виготовляється по три зразки.

Подальша математична обробка експериментальних результатів для оцінки корозійної тривкості виконується за формулами (2.9)–(2.11). Корозійні втрати від часу зображуються графічно $\Delta m = f(t_m)$, використовуючи чотири значення показника часу (0, 4, 10, 21 дні витримки).

2.2.3. Експериментальні установки для дослідження контактних матеріалів і електромагнітних пускачів. *Установка для дослідження контактних матеріалів.* Лабораторні методи дослідження надійності конструкцій і систем є базовими при оцінюванні надійності низьковольтної апаратури (НВА). Саме стендові випробування дають змогу отримати порівняльні характеристики серійних та експериментальних зразків, що є необхідним під час удосконалення конструкцій, заміни матеріалів та оптимізації технічних рішень. Однією з основних вимог до експериментальних установок є зменшення трудових витрат та споживання електроенергії під час проведення випробувань.

Для отримання статистично обґрунтованих оцінок показників надійності з заданою точністю та довірчою імовірністю застосовується план випробувань типу NUT, який передбачає одночасне випробування вибірки з N об'єктів (зразків контактів). У процесі випробувань відмови не відновлюються і не компенсуються заміною зразків, а експеримент припиняється після досягнення напрацювання T комутаційних циклів. Обсяг вибірки N визначається на основі

припущення про нормальний закон розподілу імовірності безвідмовної роботи розривних контактів. Вихідні дані для розрахунку включають:

- нижню довірчу границю імовірності безвідмовної роботи $P(T)=0,85$;
- довірчу імовірність $g=0,95$;
- допустиму кількість відмов $d=0$.

За наведеними параметрами встановлено необхідний обсяг вибірки $N=14$ зразків.

Лабораторна установка (загальний вигляд якої наведено на рис. 2.3) функціонально складається з трьох основних блоків:

- 1) джерело живлення та навантаження, що забезпечують режим роботи комутуючих пристроїв відповідно до категорій застосування DC-2, DC-22, AC-3 (з постійною часу τ в межах 2–100 мс та коефіцієнтом потужності $\cos\varphi=0,15–1,0$);
- 2) випробувальне силове коло (агрегат);
- 3) блок реєстрації параметрів комутаційних процесів і керування режимами досліджень.

Електрична принципова схема лабораторної установки для дослідження контактних матеріалів (КМ) на електроерозійну стійкість наведена на рис. 2.4. Живлення установки здійснюється від трифазної мережі змінного струму напругою 380 В та частотою 50 Гц. Регулювання напруги в межах 0–380 В забезпечується за допомогою трифазного поворотного автотрансформатора TV1.

Дослідження проводяться як при постійній, так і при змінній напрузі, що реалізується шляхом вмикання відповідних пускачів КМ1 або КМ2. Робочий діапазон регулювання струму становить 0–25 А.

Постійна напруга отримується за допомогою випрямляча VD1–VD6, виконаного за схемою Ларіонова на діодах типу Д242. Випробувальне силове коло включає такі основні елементи: вимірювальні прилади для контролю електричних параметрів:

- амперметр PA1, який підключається до схеми через тумблер SA1 у моменти вимірювання та контролює загальний струм установки;
- вольтметр PV2;

- цифровий вольтметр PV1 (B7-35), який у ручному режимі по чергово підключається через кроковий (ковзний) перемикач ХА для вимірювання спаду напруги на випробувальних контактах К1...К14;
- амперметр РА2 для вимірювання струму через кожен окремий контакт К;
- осцилограф РГ, який підключається до кола через шунт RS (75ШСМЗ-25-05) для реєстрації імпульсних процесів;

Випробувальні контакти К1...К14, закріплені у спеціально розробленому релейному вузлі на основі реле-регулятора РР362 із котушкою вмикання 12 В постійного струму. Живлення котушки забезпечується через трансформатор TV2 (220/24 В), випрямляч VD7–VD10 та узгоджувальний резистор R1.

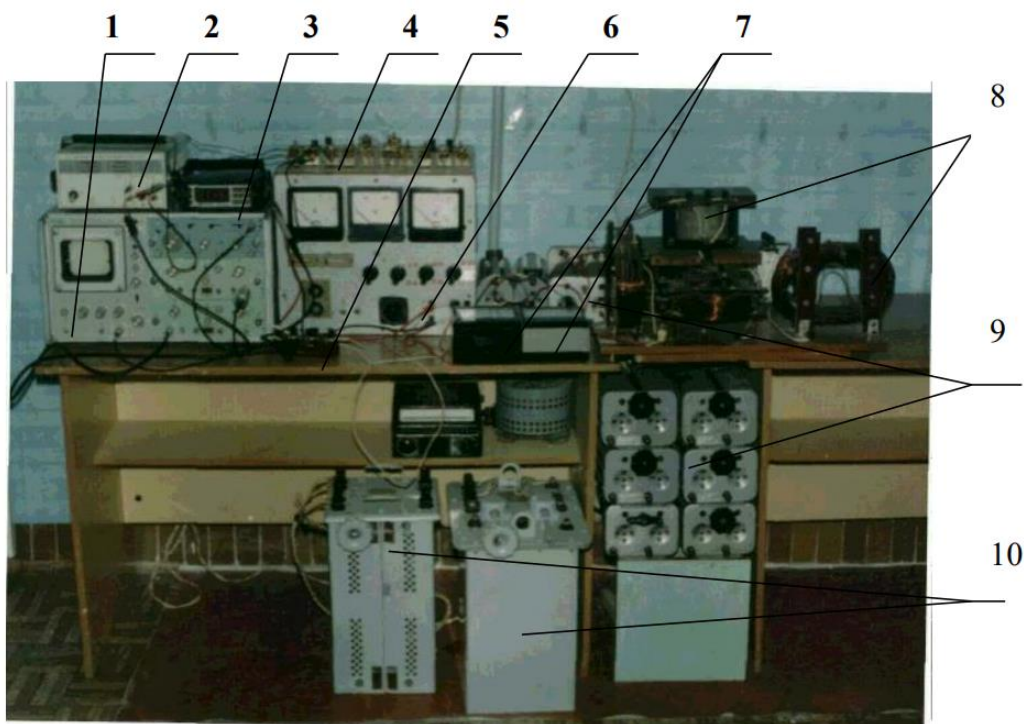


Рис. 2.3. Лабораторна установка для дослідження контактних матеріалів на електроерозійну стійкість:

- | | |
|---|-------------------------------|
| 1 – осцилограф РГ (С8-14); | 7 – прилади для вимірювання: |
| 2 – блок живлення; | амперметр РА1, вольтметр PV2; |
| 3 – вольтметр цифровий PV1 (B7-36); | 8 – реостати RR; |
| 4 – контакти випробувальні К1-К14; | 9 – реактори повітряні LR; |
| 5 – шунт RS (75ШСМЗ-25-05); | 10 – трансформатори. |
| 6 – блок реєстрації параметрів комутації і вибору режимів досліджень; | |

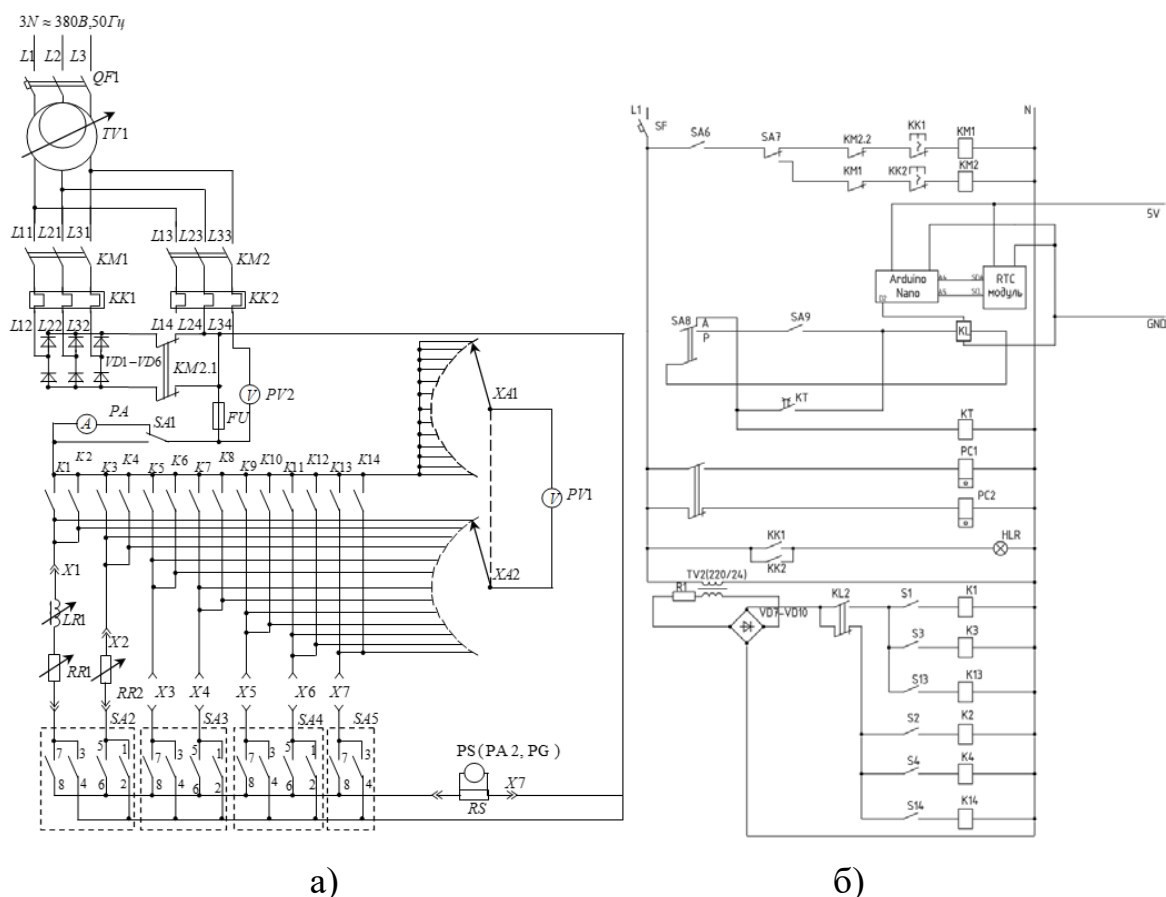


Рис. 2.4. Електрична принципова схема лабораторної установки для дослідження контактних матеріалів на електроерозійну стійкість:

а) – схема силового кола, б) – схема керування.

Зразки контактного матеріалу (КМ) виконуються у вигляді циліндрів або заклепок. Рухомий контакт має напівсферичну форму робочої поверхні, тоді як нерухомий виконано у вигляді плоскості контактної площадки. Діаметр циліндричних зразків становить 2–5 мм при довжині 10–15 мм, а заклепкові елементи мають діаметр 4–6 мм із розміром ніжки 2×5 мм. Конструкція спеціального реле дає можливість регулювати міжконтактний зазор у межах 0,5–2,0 мм, а контактний натиск встановлюється в діапазоні 2,0–2,5 Н. Після випробувань оцінка електроерозійного зношування виконується шляхом демонтажу рухомих і нерухомих контактів із подальшим їх зважуванням.

Навантажувальний вузол установки сформовано на основі послідовного з'єднання регульованих реостатів RR1 та повітряного реактора LR1 або альтернативно одного змінного реостата RR2. Підключення елементів

навантаження здійснюється через гвинтові затискачі X1–X7. Пакетні перемикачі SA2–SA5 забезпечують контроль струму навантаження в режимі вимірювань, а також дозволяють виконувати осцилографування для кожного контакту К. Захист схеми від аварійних режимів реалізовано за допомогою апаратів КК1, КК2 та плавких запобіжників FU.

Блок керування передбачає два основні режими роботи — дослідний та вимірювальний (з ручним і автоматичним керуванням). Живлення системи керування здійснюється від мережі змінного струму 220 В через тумблер SA6. Перемикач SA7 використовується для вибору типу напруги в схемі. Алгоритм керування реалізовано на мікроконтролері Arduino Nano, який формує керуючі сигнали для RTC-модуля реального часу. Останній задає моменти увімкнення силового кола, тривалість протікання струму, час вимкнення та паузи між комутаціями. Стабільне живлення мікропроцесорної частини забезпечується лабораторним блоком живлення PeakTech 6225A.

При встановленій витримці 10 с в автоматичному режимі здійснюється реєстрація спаду напруги на контактах К. У ручному режимі ці операції виконуються за допомогою перемикачів SA8 та SA9. До складу системи також входять два проміжні реле KL1 і KL2, два лічильники імпульсів PC1 і PC2 (типу СИ-206), сигнальна лампа аварійного стану HLR, а також вимикачі S1–S14, що керують електромагнітними котушками контактів K1...K14.

На початку експерименту фіксуються маса контактів та значення спаду напруги на них. Далі установка переводиться в режим тривалих випробувань, після чого кожні 10 тис. комутаційних циклів виконується повторний цикл вимірювань. Остаточні параметри визначаються після досягнення напрацювання 50 або 100 тис. циклів. Програмне забезпечення реалізовано мовою C++ у середовищі Arduino IDE (Рис 2.5). Програмний алгоритм керування установкою побудований на принципі циклічного опитування часових інтервалів, що реалізовано у головній функції loop(). На першому етапі мікроконтролер подає на цифровий вихід D2 (визначений у коді як pin2) сигнал високого логічного рівня (HIGH), що через транзисторний ключ активує котушку реле JQC-3FF-S-

Z, яка, у свою чергу, замикає силові контакти KL. Це ініціює фазу дослідження, під час якої через зразки контактних матеріалів протікає стабільний електричний струм. Програма переходить у стан очікування за допомогою функції `delay(10000)`, яка блокує виконання подальших команд на 10 секунд, забезпечуючи точну витримку часу активного навантаження.

```

1  const int pin2 = 2; // Пін керування реле
2
3  void setup() {
4      pinMode(pin2, OUTPUT);
5      digitalWrite(pin2, LOW); // Початковий стан - вимкнено
6  }
7
8  void loop() {
9      // 1. Вмикаємо струм на 10 секунд
10     digitalWrite(pin2, HIGH);
11     delay(10000);
12
13     // 2. Вимикаємо струм на 10 секунд (час для замірів)
14     digitalWrite(pin2, LOW);
15     delay(10000);
16 }

```

Рис. 2.5. Програмний алгоритм керування установкою

Установка для експериментального дослідження електромагнітних пускачів. Загальні положення. У разі заміни серійних срібловмісних контактів пускачів на експериментальні контактні матеріали на основі міді виконуються як комутаційні, так і кліматичні випробування апаратів.

Комутаційні випробування проводяться за нормальних кліматичних умов ($t = 25 \pm 10$ °C, $\phi = 45\text{--}80$ %, $p = 84\text{--}100$ кПа) і поділяються на такі види:

- випробування на вмикальну та вимикальну здатність (номінальну комутаційну здатність); для пускачів здійснюється перевірка в режимі рідкісних (виняткових) комутацій. Конструкція стенду дозволяє одночасно випробовувати два пускачі як із серійними, так і з дослідними контактами. Режим випробувань задається відповідно до табл. 2.2;

- випробування на комутаційну зносостійкість; проводяться в режимі регулярних (нормальних) комутацій. Схема експериментальної установки забезпечує одночасне дослідження декількох пускачів.

Кліматичні випробування пускачів виконуються в умовах нормальних комутацій при дії корозійно-активного середовища з агресивними

компонентами. Частота комутацій встановлюється відповідно до прийнятих вимог. Кількість пускачів у вибірці прийнято $N = 8$ випадково відібраних зразків.

Загальний вигляд експериментальної установки наведено на рис. 2.5. Дослідження проводяться для комутуючих пристроїв пускачів типу ПМЛ-1100 0x4 та ПМЛ-2100 0x4 у виконанні за класами зносостійкості А, Б, В із застосуванням як серійних, так і дослідних контактних деталей.

Серійні контакти виконані на основі срібла і включають, зокрема, КМК-А10м (ИГЕВ 644231.001ТО), СрН-90ПГ-4051М (СГ-4019М), а також біметалеві композиції типу СрМ-0,2+М1 (Ag/Cu) з різними конструктивними виконаннями.

Із широкого переліку експериментальних контактних матеріалів, що пройшли попередні кліматичні випробування та перевірку на електроерозійну стійкість і якість контактування (рис. 2.2 і 2.3), для подальшого дослідження відібрано композиції на основі міді.

1. $\text{Cu} + (10-15\%) \text{Mo} + (2-3\%) \text{MoO}_3 + (1-3\%) \text{C} + (0,8-1,0\%) \text{Ni}$.
2. $\text{Cu} + (12-15\%) \text{Nb} + (0,8-1,0\%) \text{Zr} + (0,3-0,5\%) \text{Y}_2\text{O}_3$.
3. $\text{Cu} + (5,0-10\%) \text{Cr} + (1,0-2,0\%) \text{TiB}_2 + (2,0-3,0\%) \text{Nb} + (1,0-2,0\%) \text{C} + (0,5-0,7\%) \text{Zr}$.

При проєктуванні схеми враховано вимоги чинної нормативної документації. Електрична принципова схема установки для експериментального дослідження пускачів у категорії застосування АС-3 наведена на рис. 2.6 (із зазначенням елементів схеми для режиму нормальних комутацій).

Розроблена схема забезпечує виконання випробувань пускачів у різних режимах роботи, що характеризуються відповідними параметрами навантажувального кола (контур):

1) режим нормальних комутацій:

– для ПМЛ-1100 ($I_{\text{ном}}=10\text{А}$, $U_{\text{ном}}=380\text{В}$):

увімкнення: $I_{\text{вмик}}=6 \cdot I_{\text{ном}}$; $U_{\text{вмик}}=U_{\text{ном}}$; $\cos\varphi=0,65$;

вимикання: $I_{\text{вим}}=I_{\text{ном}}$; $U_{\text{вим}}=0,17 \cdot U_{\text{ном}}$; $\cos\varphi=0,65$;

– для ПМЛ-2100 ($I_{\text{ном}}=25\text{А}$, $U_{\text{ном}}=380\text{В}$):

увімкнення: $I_{\text{вмик}}=6 \cdot I_{\text{ном}}$; $U_{\text{вмик}}=U_{\text{ном}}$; $\cos\varphi=0,35$;

вимикання : $I_{\text{вим}}=I_{\text{ном}}$; $U_{\text{вим}}=0,17 \cdot U_{\text{ном}}$; $\cos\varphi=0,35$;

2) режим виняткових комутацій:

– для ПМЛ-1100 ($I_{\text{ном}}=10\text{A}$, $U_{\text{ном}}=380\text{В}$):

увімкнення: $I_{\text{вмик}}=10 \cdot I_{\text{ном}}$; $U_{\text{вмик}}=1,1 \cdot U_{\text{ном}}$; $\cos\varphi=0,65$;

вимикання: $I_{\text{вим}}=8 \cdot I_{\text{ном}}$; $U_{\text{вим}}=1,1 \cdot U_{\text{ном}}$; $\cos\varphi=0,65$;

– для ПМЛ-2100 ($I_{\text{ном}}=25\text{A}$, $U_{\text{ном}}=380\text{В}$):

увімкнення: $I_{\text{вмик}}=10 \cdot I_{\text{ном}}$; $U_{\text{вмик}}=1,1 \cdot U_{\text{ном}}$; $\cos\varphi=0,35$;

вимикання: $I_{\text{вим}}=8 \cdot I_{\text{ном}}$; $U_{\text{вим}}=1,1 \cdot U_{\text{ном}}$; $\cos\varphi=0,35$.

Умови дослідження. Робоче положення пускачів у просторі, що встановлені на спеціальному монтажному блоці, є вертикальним, що найбільш наближено відповідає реальним умовам монтажу апаратів відкритого виконання під час експлуатації. Струмopідвід пускачів ПМЛ 1-ї та 2-ї величини виконується мідними провідниками з поперечним перерізом $2,5 \text{ мм}^2$. Підключення джерела живлення та навантажувального контуру до апаратів здійснюється згідно з інструкцією з експлуатації та з урахуванням вимог нормативної документації.

Опис електричної схеми та методика дослідження. До складу випробувального (силового) кола установки входять: джерело живлення, досліджувані пускачі, активне та реактивне навантаження, з'єднувальні провідники, а також необхідна вимірювальна апаратура для реєстрації електричних параметрів у процесі комутаційних випробувань.

Вся установка вводиться в роботу через автоматичний вимикач QF. Як джерело живлення використовується автономний трансформатор, який забезпечує стабілізовану напругу вмикання установки (380 і 418 В, 50 Гц), що подається на досліджувані пускачі шляхом вмикання пускача КМ1. Для формування напруги вимикання $0,17 \cdot U_{\text{ном}} = 64,6 \text{ В}$ застосовується знижувальний трансформатор TV1 380/65 В та пускач КМ2. Усі 8 дослідних пускачів підключаються паралельно до навантажувального кола. Для забезпечення необхідних значень струму та коефіцієнта потужності випробувального контуру послідовно з пускачами вмикаються регульовані резистори RR (тип РСПС) і котушки індуктивності без феромагнітних осердь LR. Для мінімізації впливу взаємних електромагнітних полів індуктивні котушки

розташовуються в просторі у трьох взаємно перпендикулярних площинах. Розрахунок необхідних значень активного та індуктивного опорів навантажувального кола виконується за відповідними формулами з урахуванням заданих числових параметрів випробувального режиму.

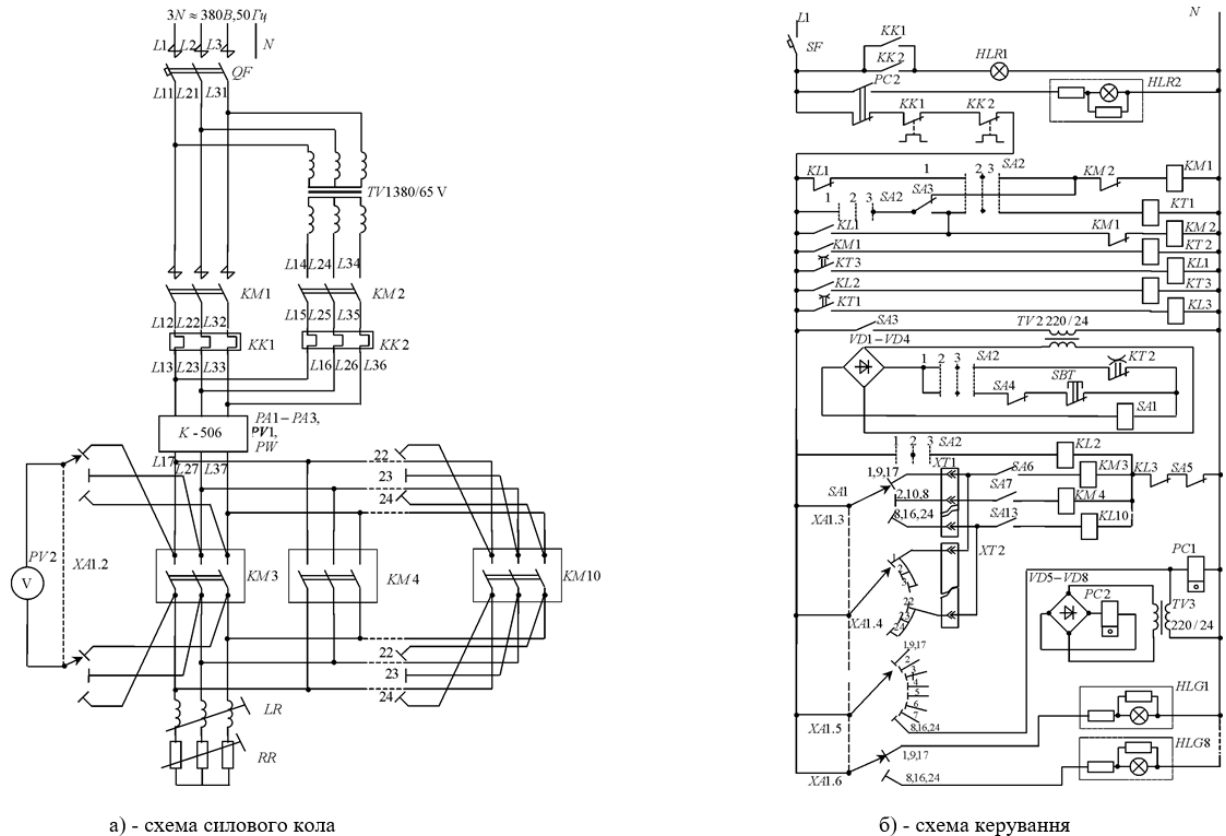


Рис. 2.6. Електрична принципова схема установки для експериментального дослідження електромагнітних пускатрів

Повний опір кола Z (для режиму увімкнення):

$$Z = \frac{U_{yB}}{\sqrt{3} \cdot I_{yB}}, \text{ Ом.} \quad (2.13)$$

Активний опір R_a резисторів RR :

$$R_a = Z \cdot \cos \phi_{yB}, \text{ Ом.} \quad (2.14)$$

Індуктивність L реакторів LR :

$$L = Z \cdot \frac{\sqrt{1 - \cos^2 \phi_{yB}}}{\omega}, \text{ Гн} \quad (2.15)$$

де $\omega = 2\pi f$ - кругова частота напруги, $f = 50 \text{ Гц}$.

Коефіцієнт потужності $\cos\phi$ визначається за сталими кола:

$$\phi = \arctg \frac{\omega L}{R}, \quad \text{або} \quad \cos\phi = \frac{R}{Z}. \quad (2.16)$$

Необхідна вимірювальна апаратура для контролю параметрів навантажувального кола включає комплект приладів К-506, а також цифровий вольтметр PV2 (В7-35), який використовується для визначення спаду напруги на кожному полюсі досліджуваних пускачів.

Основним елементом схеми керування є кроковий перемикач SA1 (тип ПТИ-М), що має 6 рядів ковзних контактів по 24 позиції кожен. Контакти перемикача забезпечують почергове підключення досліджуваних пускачів, а також у режимі вимірювань — послідовне приєднання входів цифрового вольтметра В7-35 до відповідних контактних груп.

Перші два ряди ковзних контактів ХА1.1–ХА1.2 електрично з'єднані з силовими провідниками, що підключені до контактотримачів пускачів і виведені на вольтметр. Третій ряд ХА1.3 через розбірне з'єднання ХТ1 підключає кола керування котушками пускачів. Тумблери SA6–SA13 використовуються для індивідуального вмикання котушок і, при ручному режимі вимірювань, для контролю спаду напруги.

Четвертий ряд контактів ХА1.4 задіюється у вимірювальному режимі, коли з'єднання ХТ1 замінюється на ХТ2, що забезпечує роботу в автоматичному режимі. П'ятий ряд ХА1.5 призначений для підрахунку кількості комутацій кожного пускача шляхом подачі імпульсів на лічильник РС1.

Лічильник РС2 забезпечує автоматичне відключення установки після досягнення заданої кількості циклів (50, 100, 150, 200, 250 або 300 тис.), про що сигналізує червона лампа HLR2. Лампа HLR1 використовується для індикації аварійного вимкнення установки. Контроль черговості комутації пускачів і моментів вимірювання спаду напруги здійснюється за допомогою зелених сигнальних ламп HLG1–HLG8, які живляться через шостий ряд контактів ХА1.6.

Живлення кола керування здійснюється від мережі змінного струму 220 В через автоматичний вимикач SF. Пакетний перемикач SA2 забезпечує вибір

режиму роботи схеми: ручного (положення 3) або автоматичного (положення 2), а також режиму вимірювань.

Далі, через замикаючий контакт проміжного реле KL1 і перемикач SA2, подається живлення на котушку електромагнітного пускача KM1, внаслідок чого на дослідні пускачі подається напруга увімкнення. Із заданою витримкою часу, яку забезпечує реле KT2, живлення надходить на котушку крокового перемикача SA1, що забезпечує підключення чергового дослідного пускача KM3 і подачу на нього напруги комутації.

Одночасно напруга подається на котушку проміжного реле KL2, яке своїм замикаючим контактом вмикає реле часу KT3. Після витримки часу реле KT3 активує проміжне реле KL1. Спрацювання KL1 забезпечує подачу в силове коло напруги вимикання через пускач KM2, а також живлення реле часу KT1.

Після витримки заданого інтервалу часу реле KT1 через проміжне реле KL3 забезпечує вимикання дослідного пускача KM3 від мережі, що відповідає режиму комутації струму вимикання. Після цього KL1 знеструмлюється, система знову переходить у стан подачі напруги увімкнення, і цикл повторюється для наступного пускача (KM4).

Тривалість витримок реле часу KT1, KT2 і KT3 встановлюється експериментально відповідно до заданого режиму роботи та частоти комутацій пускачів. Кнопка SBT та перемикачі SA3–SA13 використовуються при роботі в ручному режимі для проведення вимірювань.

В автоматичному режимі вимірювання спаду напруги на полюсах пускачів забезпечується шляхом збільшення витримки часу розмикання реле KT2 до 10 с, що дозволяє виконувати реєстрацію параметрів без участі оператора.

Отримані в ході досліджень залежності дають змогу здійснювати прогнозування роботи комутуючих вузлів електромагнітних пускачів під час їх експлуатації у специфічних кліматичних умовах.

РОЗДІЛ 3

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ І ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕРОЗІЇ І ПЕРЕХІДНОГО ОПОРУ КОНТАКТІВ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПУСКАЧІВ СЕРІЇ ПМЛ

Пускачі, що виготовляються вітчизняною промисловістю, за основними технічними характеристиками переважно відповідають сучасному світовому рівню. Проте, враховуючи тенденції та інтенсивність розвитку галузі електромагнітних пускачів за кордоном, можливе певне відставання окремих параметрів від аналогічних виробів провідних іноземних компаній. Найбільш близькими аналогами пускачів на струми 6–25 А є апарати фірми La Telemecanique Electrique.

Вітчизняні пускачі серії ПМЛ виготовляються за ліцензією зазначеної компанії та за більшістю характеристик практично не поступаються французьким аналогам. Водночас вони мають деякі недоліки, пов'язані зі зручністю та безпечністю технічного обслуговування й експлуатації, зокрема через відсутність ступеня захисту IP20. Разом із тим їх масогабаритні показники у 1,5–2 рази кращі порівняно із застарілими пускачами серій ПМЕ та ПАЕ.

З огляду на це, для проведення випробувань доцільно використовувати пускачі ПМЛ першої та другої величини.

3.1. Експериментальні дослідження ерозійного зносу серійних контакт-деталей СрН-90, СрМ-0,2+М1, КМК-А10м як функція кількості комутацій.

Дослідження серійних контакт-деталей пускачів ПМЛ-1100 0x4 (виконання А, Б і В) та ПМЛ-2100 0x4 В проводяться відповідно до методики, наведеної у підрозділі 2.2.3, із використанням лабораторної установки, поданої на рис. 2.5. Основною метою досліджень є встановлення математичної залежності зміни маси контакт-деталей від наробітку, а також визначення закономірностей зміни перехідного опору мостикового контакту.

Випробування виконуються для двох пускачів кожної величини у відкритому виконанні без теплового реле. Для всіх дослідних зразків приймається однакова кількість комутаційних циклів увімкнення-вимкнення, що становить 300 тис. циклів. Вимірювання необхідних параметрів здійснюються через кожні 50 тис. комутаційних циклів.

Струмові навантаження для пускачів першої та другої величини обираються з урахуванням того, що їх номінальні робочі струми становлять 4; 6,3 та 10 А. Дослідження проводяться в умовах впливу спеціального корозивного середовища, яке являє собою суміш газів NH_3 та H_2S . Верхнє номінальне значення концентрації аміаку становить 30 мг/м³, а сірководню — 25 мг/м³. Зважування контакт-деталей здійснюється разом із контактотримачами.

Обробка експериментальних результатів з метою визначення математичного закону зміни маси контакт-деталей залежно від наробітку виконується відповідно до методики, наведеної у роботі, та згідно з Формулами (2.9)–(2.11).

Електроерозійний знос визначається на основі зміни маси контакт-деталей:

$$m_2 = m_1 - k \cdot n, \quad (3.1)$$

де m_1 - маса контакту перед початком комутаційних випробувань, г;

m_2 - маса контакту після серії комутаційних випробувань, г.

k - коефіцієнт інтенсивності зношування, г/цикл;

n - кількість комутаційних циклів, цикл.

На рис. 3.1–3.3 наведені фотографії серійних мостикових контактів пускачів ПМЛ. Надійність електричного контакту значною мірою визначається його складом, структурою та властивостями поверхневих шарів, що формуються внаслідок ерозійних процесів і переносу контактного матеріалу в електричній дузі. Під час комутації змінного струму полярність проходження струму через контакти безперервно змінюється. Експериментально встановлено від'ємний коефіцієнт інтенсивності електроерозійного зношування, тобто зменшення маси, як для

нерухомих контакт-деталей (1, 2, 3, 4, 5, 6), так і для рухомих контактів (мостики 1–2, 3–4, 5–6).

Разом із тим рухомі контакт-деталі характеризуються більш інтенсивним зношуванням, яке перевищує зношування нерухомих контактів на 10–27 %. Таке явище є характерним для контактів змінного струму та, ймовірно, пояснюється тим, що під час випробувань температура рухомих мостиків була на 25–30 °С вищою за температуру нерухомих контактів.

Маса рухомих контактів мостикового типу зменшується дещо інтенсивніше порівняно з нерухомими контактами, оскільки процеси дугової ерозії супроводжуються більш активним випаровуванням і розбризкуванням матеріалу контакт-деталі, що має вищу температуру.

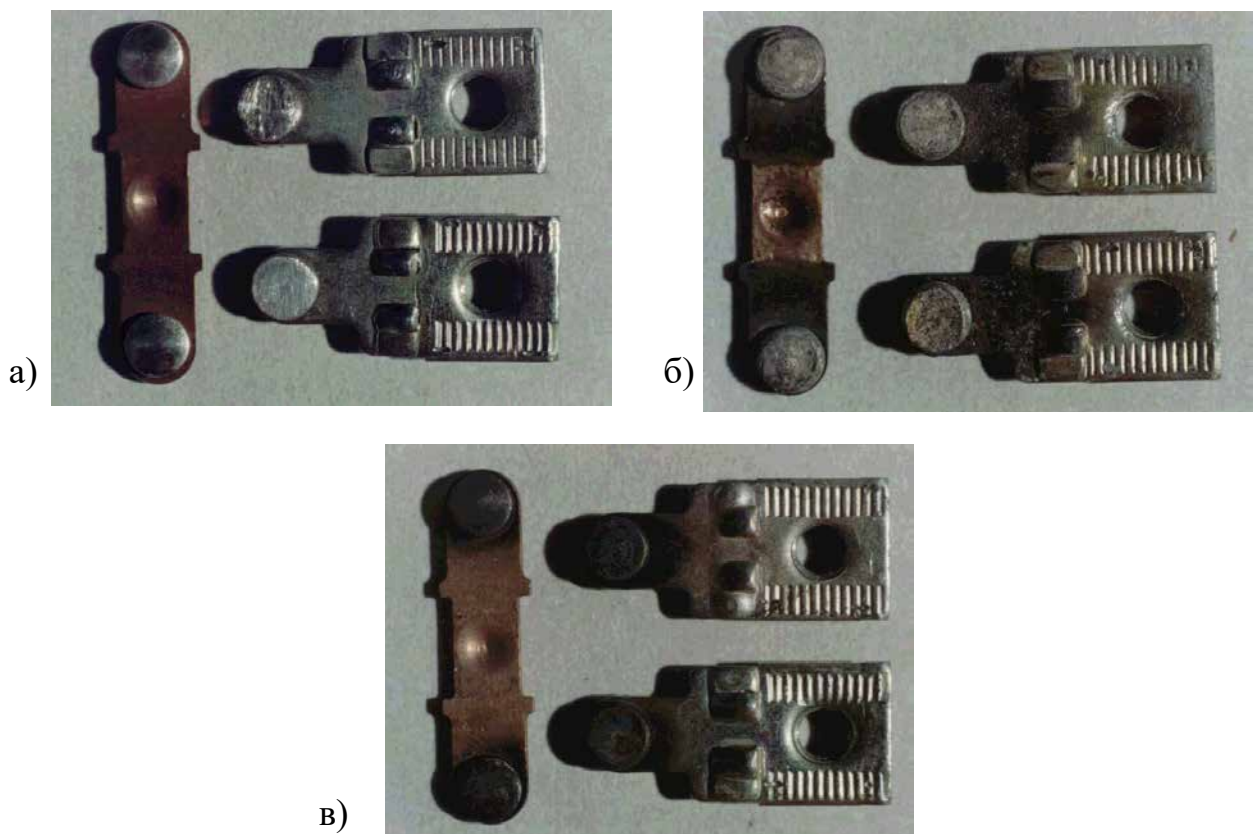
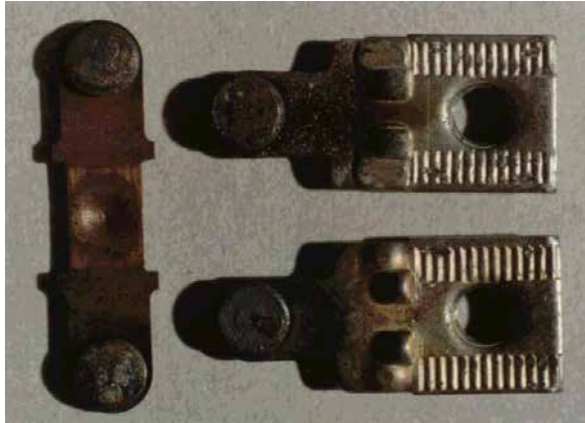


Рис.3.1. Зовнішній вигляд контактів пускача ПМЛ-1100 0_x4 А після наробітку:

а) – 0 тис. комутаційних циклів; б) – 150 тис. циклів; в) – 300 тис. циклів.

Категорія АС-3 (U=380 В; I=10А). Матеріал CrH-90. Збільшення $\times 4$.



а)

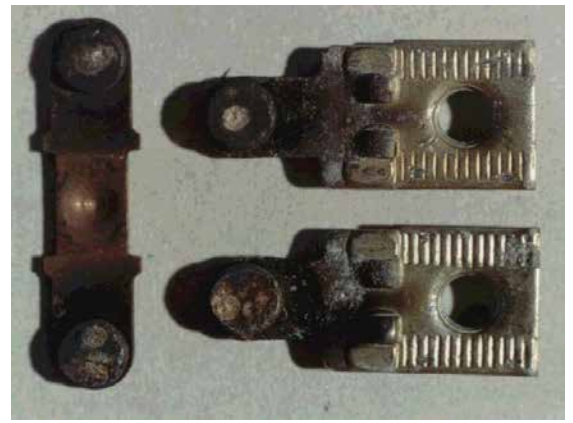


Рис.3.2. Зовнішній вигляд контактів пуск

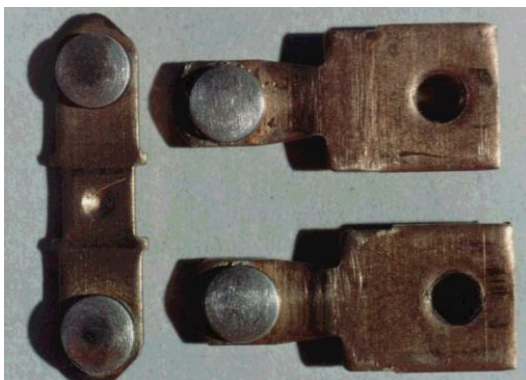
а) – 150 тис. комутаційних циклів; б) – 300 тис. циклів.

Категорія АС-3 ($U=380$ В; $I=10$ А). Матеріал CrM-0,2+M1 . Збільшення $\times 4$.

З наведених рисунків видно, що зі збільшенням комутованого струму інтенсивність ерозійного зношування зростає та досягає максимального значення при струмі 10 А. Це пояснюється тим, що зі збільшенням струму в контактних процесах суттєво зростає роль факторів плазмової дуги, внаслідок чого підвищується дуговий електроерозійний знос через збільшення енергії електричної дуги.

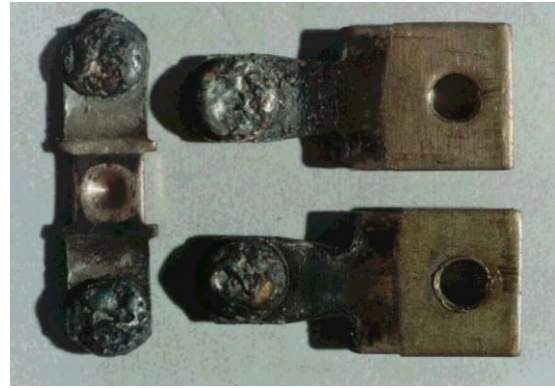
Найвищою ерозійною стійкістю характеризуються контакти типу КМК-А10м, які використовуються у пусках ПМЛ 2100.В. Стійкість контактів із матеріалу КМК-А10м перевищує стійкість контактів із матеріалу CrH-90 на 13–30 %, а біметалевих контактів із матеріалу CrM-0,2+M1 — на 35–45 %.

Висока електроерозійна стійкість контактів із матеріалу КМК-А10м у проведених дослідженнях обумовлена особливостями структури матеріалу та властивостями оксиду кадмію CdO , розглянутими в підрозділі 1.4.1.





в)



г)

Рис.3.3. Зовнішній вигляд контактів пускача ПМЛ-2100 0х4 В після наробітку:

а) - 0 тис. комутаційних циклів; б) - 150 тис. циклів; в) – 300 тис. циклів; г) – 500 тис. циклів. Категорія АС-3 ($U=380V$; $I=25A$). Матеріал КМК - А10м. Збільшення $\times 4$.

Дещо нижчою електроерозійною стійкістю характеризується контактний матеріал $CrNi-90$, який застосовується в електромагнітних пусках типу ПМЛ-1100 0х4 А. Матеріал $CrNi-90$ є двофазним псевдосплавом, у складі якого міститься 90 % срібла та 10 % нікелю. Фази срібла й нікелю не змішуються ні в твердому, ні в рідкому стані. Нікель у складі цього матеріалу підвищує його зносостійкість, твердість і механічну міцність, перешкоджає зварюванню контактів та зменшує ймовірність мостикоутворення, а також підвищує стійкість до атмосферної корозії.

Найменшою ерозійною стійкістю характеризуються контакти з матеріалу $CrM-0,2+M1$. Їх електроерозійний знос у 1,4–1,6 рази перевищує знос контактів із матеріалу КМК-А10м. У біметалевих контакт-деталях заклепкового типу нижній шар виготовляється з міді марки М1 і практично не піддається ерозійному руйнуванню. Робочий плакуючий шар складається з матеріалу такого складу: 99,8 % Ag, 0,1 % Ni та 0,1 % Cu. Мінімальна товщина робочого шару визначається технологічними можливостями зварювального вузла холодновисадкових автоматів і становить приблизно 0,3 мм.

3.2. Металографічний та рентгеноспектральний аналіз структури робочої поверхні серійних контактів.

Поглиблене дослідження фізичних процесів, що відбуваються на робочій поверхні контактів у процесі експлуатації, створює передумови для подальшого зменшення електричної ерозії, яка є однією з основних причин руйнування електричних контактів.

Глибина шару, в якому відбуваються мікроструктурні зміни, становить приблизно 0,08–0,12 мм. При цьому процес окиснення нікелю відбувається як безпосередньо на поверхні контакту, так і на глибині до 0,1 мм.

На робочій поверхні контактів з'являються неглибокі пори та раковини, які утворюються в місцях розташування срібла і скупчень зерен тугоплавкої нікелевої складової. Під час роботи електричного контакту відбуваються плавлення та інтенсивне випаровування легкоплавкої складової — срібла — з поверхні рухомої контакт-деталі, оскільки температура випаровування срібла (2210 °C) є значно нижчою за температуру випаровування нікелю (2730 °C).

Унаслідок цього на робочій поверхні формується дисперсна бугриста структура (рис. 3.3 і 3.4.б), ступінь шорсткості якої залежить від величини комутованого струму та кількості комутаційних циклів. На ерозійній поверхні виникають крупні виступи, а в структурних заглибленнях спостерігаються світлі включення, які, за результатами рентгеноспектрального аналізу, являють собою чисте срібло. Детальне дослідження робочих поверхонь контакт-деталей дало змогу встановити, що під дією електричної дуги плавленню піддається не лише легкоплавка складова композиції — срібло, але й зерна нікелю (рис. 3.6.а). Це підтверджується наявністю характерних виступів затвердіння по краях нікелевих зерен (рис. 3.6.б). Застиглі зерна нікелю мають конусоподібну форму, що є характерною ознакою мостикового переносу матеріалу (рис. 3.6.в).



Рис 3.4. Робоча поверхня нерухомої (а) і рухомої (б) контакт-деталі пускача ПМЛ-1100 0_х4 А після наробітку 150 тис. комутаційних циклів.

Категорія АС-3 (U=380 В; I=10А). Матеріал СrН-90.

Отримані результати дозволяють зробити висновок, що в завершальний момент комутації контактна взаємодія відбувається переважно через точки тугоплавкої складової матеріалу, яка значною мірою визначає схильність матеріалу СrН-90 до зварювання контактів.

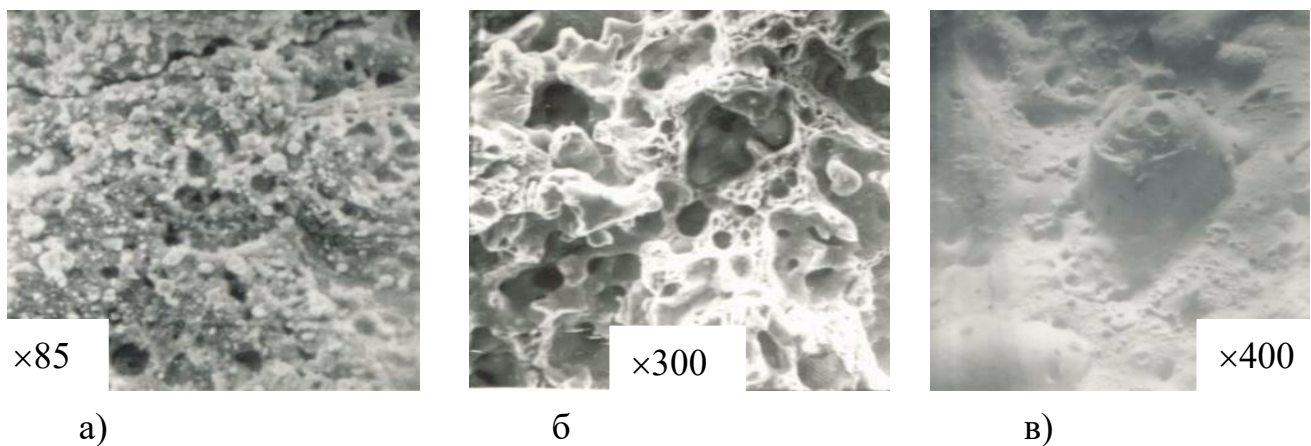


Рис. 3.5. Робоча поверхня контакт-деталей з матеріалу СrН-90 після наробітку 150 тис. комутацій циклів.

При комутації струму величиною 4,0; 6,3; 10,0 А контактами з матеріалу СrМ-0,2+М1 спостерігається інтенсивне обгоряння та оплавлення робочих поверхонь контакт-деталей (рис. 3.2). Металографічний аналіз показав, що мікроструктура поверхневих шарів нерухомої та рухомої контакт-деталей (рис.

3.6) суттєво відрізняється за своєю будовою і змінюється в процесі експлуатації.

Поверхня нерухомої контакт-деталі вкривається дрібними зернами парів металу, що перенесені з рухомого контакту і кристалізуються під час гасіння електричної дуги (рис. 3.8.а). Крім того, на ділянках осадження спостерігаються укрупнені зерна срібла, які утворюються внаслідок рекристалізації під дією підвищеної температури.

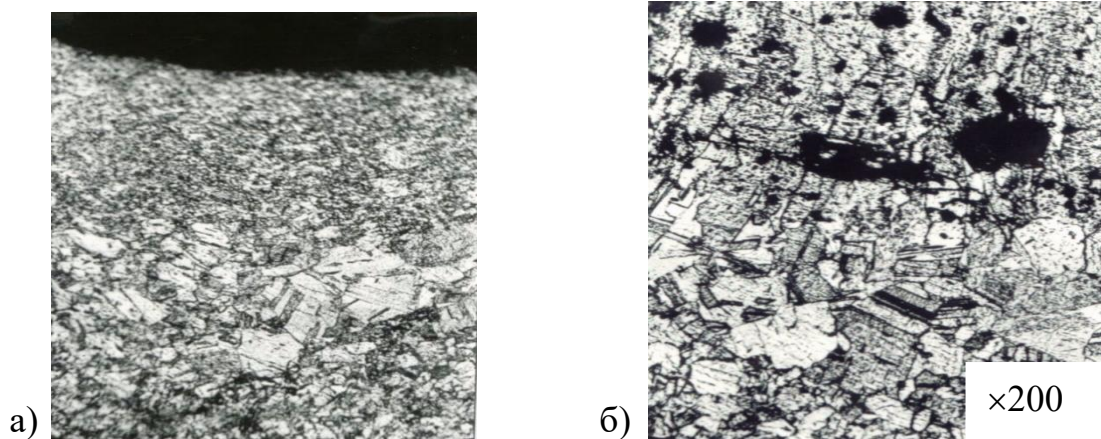


Рис. 3.6. Мікроструктура нерухомої (а) і рухомої (б) контакт-деталі пускача ПМЛ-1100 0,4 В після наробітку 150 тис. циклів комутації. Категорія АС-3 ($U=380$ В; $I=10$ А). Матеріал СрМ-0,2+М1.

3.3. Закономірності зміни перехідного опору і корозійної тривкості зразків контактних матеріалів під впливом хімічно-активних компонентів атмосфери тваринницьких приміщень.

Вивчалася корозійна тривкість зразків міді та її сплавів. Для сплавів домішки умовно поділено на три групи: метали з необмеженою розчинністю в міді (Ni); метали з обмеженою розчинністю (Nb, Ti, Cr, Zr); метали, що практично не взаємодіють з міддю (Mo). Вміст домішок становив 1, 5 і 10 мас. %.

Ріст плівкових утворень контролювався за зміною перехідного контактного опору. Перехідний контактний опір та корозійну тривкість матеріалів оцінювали відповідно до п'ятибальної шкали корозійної тривкості (табл. 3.1).

Як показали експериментальні дослідження, корозійне газове середовище суттєво впливає на властивості електроконтактних матеріалів. Унаслідок

протікання різноманітних хімічних реакцій, а також утворення твердих плівок різної природи і товщини, спостерігаються значні зміни перехідного контактного опору зразків. Встановлено, що найбільш агресивний вплив корозійне середовище чинить на контакти, які працюють у суміші сірководню з аміаком, особливо за наявності вологи.

Таблиця 3.1

Вплив корозивного середовища на перехідний контактний опір та корозійну тривкість контактних матеріалів на основі міді

Сплави	NH ₃		CO ₂		H ₂ S		H ₂ S+NH ₃	
	кон-такт-ний опір	коро-зійна трив-кість	кон-такт-ний опір	коро-зійна трив-кість	кон-такт-ний опір	коро-зійна трив-кість	кон-такт-ний опір	коро-зійна трив-кість
1. Cu 99,99%	5	4	5	5	5	3	5	2
2. Cu+1% Zr	5	2	5	5	4	2	4	2
3. Cu+5% Zr	5	1	5	3	3	1	3	1
4. Cu+10% Zr	4	1	5	1	3	1	2	1
5. Cu+1% Nb	5	4	5	5	3	3	3	2
6. Cu+5% Nb	5	1	5	5	4	2	3	2
7. Cu+10% Nb	5	1	5	3	3	1	3	2
8. Cu+1% Mo	5	4	5	5	3	4	2	2
9. Cu+5% Mo	5	4	5	5	2	3	2	2
10. Cu+10% Mo	5	2	5	5	2	1	2	2
11. Cu+1% Ni	5	4	5	5	4	3	4	2
12. Cu+5% Ni	5	4	5	4	5	3	3	2
13. Cu+10% Ni	5	4	5	5	5	2	3	2
14. Cu+1% Cr	5	4	5	4	5	3	3	2
15. Cu+5% Cr	5	4	5	4	4	3	1	2
16. Cu+10% Cr	5	4	5	3	3	3	1	2
17. Cu+1% Ti	5	4	5	4	4	3	3	2
18. Cu+5% Ti	5	4	5	4	4	2	3	2
19. Cu+10% Ti	4	4	5	4	4	2	2	2
20. Cu+10%Nb+1%C	5	3	5	4	4	2	4	2
21. Cu+10%Mo+1%C	5	3	5	4	5	2	4	1
22. Cu+10%Cr+1%C	5	4	4	4	4	3	4	2
23. 83%Cu+12%Mo+1,7%C+2,4%MoO ₃ +0,9%Ni	5	4	5	5	5	4	5	3
24. 83,5%Cu+15%Nb+1,0%Zr+0,5%Y ₂ O ₃	5	4	5	5	5	3	4	3
25. 81,3%Cu+10%Cr+3%Nb+3%TiB ₂ +2%C+0,7%Zr	5	5	5	5	5	4	5	3

Примітки:

- Перехідний контактний опір: 5 – $R_k \leq 50$ мОм; 4 – $R_k \leq 100$ мОм; 3 – $R_k \leq 200$ мОм; 2 – $R_k \leq 300$ мОм; 1 – $R_k > 300$ мОм.
- Корозійні втрати: 5 – $\Delta m/s \leq 1$ г/м²; 4 – $\Delta m/s \leq 3$ г/м²; 3 – $\Delta m/s \leq 5$ г/м²; 2 – $\Delta m/s \leq 10$ г/м²; 1 – $\Delta m/s > 10$ г/м².

Найбільшу корозійну тривкість мають контакти, випробувані в середовищі $\text{NH}_3 + \text{CO}_2$ (табл. 3.1). У цьому випадку поверхня контактів покривається нальотом чорного кольору, який ідентифікується як оксид міді CuO . Досить наочно це представлено на рис. 3.7, де наведено фотографії зразків контактних матеріалів після витримки в різних корозійних середовищах.

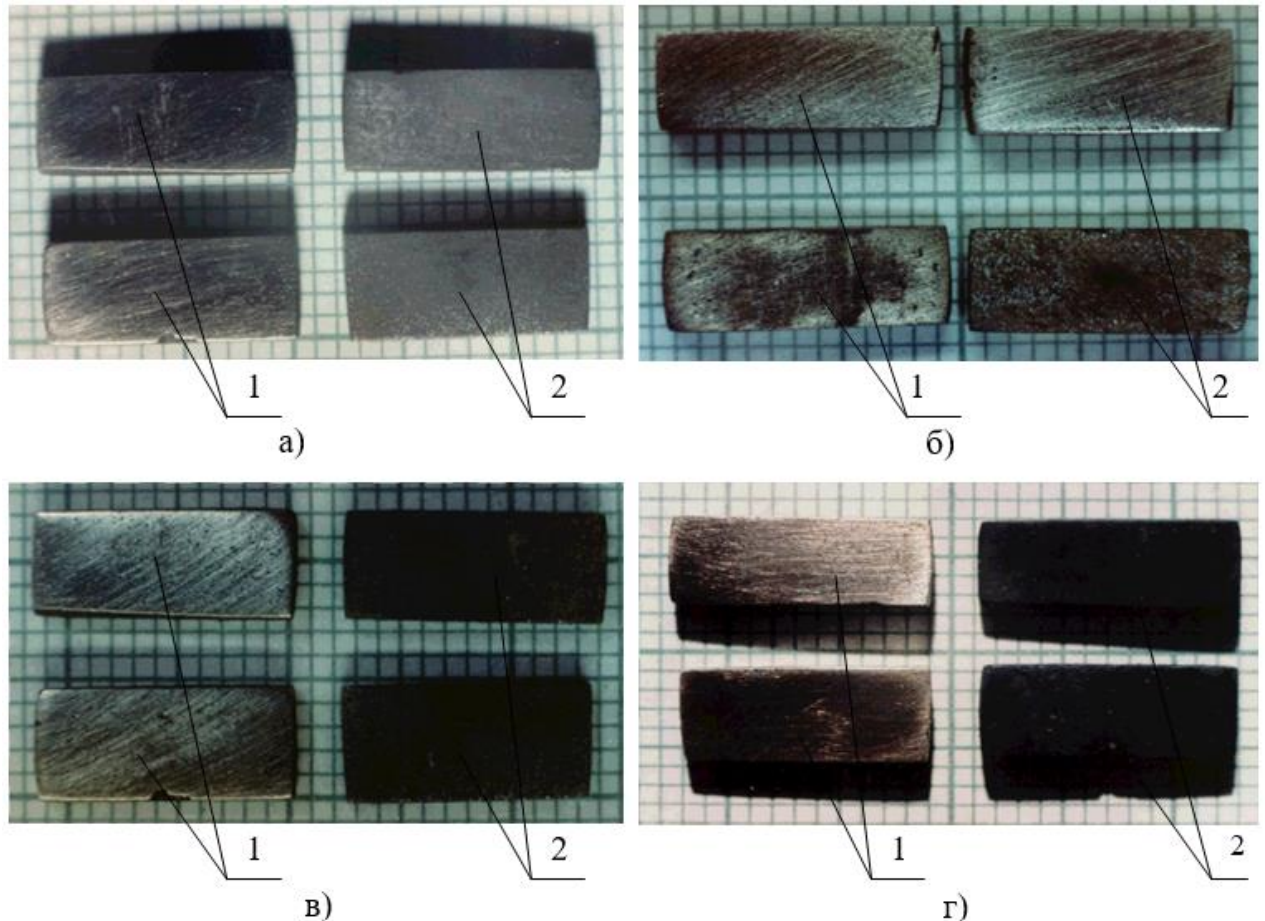


Рис. 3.7. Зразки контактного матеріалу до (1) і після 21 дня витримки (2) в корозивному середовищі, яке містить: а) – CO_2 ; б) – NH_3 ; в) – H_2S ; г) – $\text{H}_2\text{S} + \text{NH}_3$; (верхні – $81,3\%\text{Cu} + 10\%\text{Cr} + 2\%\text{TiB}_2 + 3\%\text{Nb} + 2\%\text{C} + 0,7\%\text{Zr}$, нижні – Cu)

В середовищі аміаку при доступі повітря на поверхні міді та її сплавів виникає комплексний гідроксид $[\text{Cu}(\text{NH}_3)_4](\text{OH})_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$, який добре розчиняється у воді. Унаслідок цього перехідний контактний опір змінюється незначно ($R_k \leq 50$ мОм). Петрографічний аналіз продуктів взаємодії на поверхні зразків виявив скупчення дрібних анізотропних зерен гідроксиду блакитно-зеленуватого кольору з показником заломлення $n = 1,70$. Ці зерна оточені більш світлими анізотропними шарами сполук із показником заломлення $1,5\text{--}1,6$.

Напевно, поряд із основним продуктом взаємодії $[\text{Cu}(\text{NH}_3)_4](\text{OH})_2$ при низьких концентраціях аміаку утворюються також комплексні гідроксиди з різним координаційним числом. У досліджуваних умовах встановлюється рівновага між катіонами різних координаційних станів.

Як у середовищі аміаку, так і в інших досліджуваних корозійних середовищах, оксиди металів-домішок ZrO_2 , Nb_2O_5 , MoO_3 , NiO , Cr_2O_3 і TiO_2 , що утворюються в невеликих кількостях (< 5 мас. %) на зразках у вологому повітрі, петрографічно не виявляються.

Задовільні антикорозійні властивості проявляють майже всі досліджені матеріали і в середовищі діоксиду вуглецю (CO_2). Слід відзначити, що кількість продуктів хімічної реакції тут є меншою, ніж у середовищі аміаку. Як відомо, у сухому повітрі мідь практично не змінюється, оскільки на її поверхні утворюється дуже тонка плівка оксидів Cu_2O і CuO темнішого кольору, яка забезпечує ефективний захист від подальшого окиснення. Проте в наших дослідах за наявності діоксиду вуглецю та вологи поверхня міді і мідьвмісних матеріалів покривається зеленуватим нальотом гідроксокарбонату міді $(\text{CuOH})_2\text{CO}_3$.

Останній ідентифікується за допомогою мікроскопічних досліджень за значеннями відповідних кристалооптичних констант. У випадку чистої міді в поверхневому шарі зразків петрографічно виявляються рівномірно розподілені частинки міді, а зазначена сіль присутня в дуже незначних кількостях. У сплавах міді, особливо з Zr (10 мас. %), її вміст є значно більшим. При цьому навколо дрібних зерен міді спостерігаються скупчення коричнево-зеленуватих ізотропних зерен $(\text{CuOH})_2\text{CO}_3$ такого ж розміру (1–2 мкм) з показником заломлення $n = 1,8$. Оскільки основні солі міді добре розчиняються у воді, щільні захисні шари на зразках контактних матеріалів не утворюються, і перехідний контактний опір у середовищі CO_2 , як правило, становить $R_k \leq 50$ мОм.

Корозійна тривкість електроконтактних матеріалів на основі міді значно погіршується в середовищі сірководню. При цьому встановлений механізм взаємодії в усіх досліджених випадках не відповідає класичному процесу сульфідотворення. Сульфіди міді (CuS) та інші сульфідні сполуки металів за відносної вологості 95–98

% кристалооптично не визначаються. Так, продукти взаємодії з H_2S , що формуються на поверхні зразка Cu 99,99 %, складаються з невеликої кількості оксиду міді Cu_2O червонуватого кольору (внутрішній шар) та червонувато-коричневих зерен оксисульфату міді $\text{Cu}_2(\text{SO}_4)\text{O}$ з високим двопроменезаломленням (другий шар). У зовнішніх шарах продуктів взаємодії петрографічно фіксується гідроксосульфат міді $\text{Cu}_3(\text{OH})_4\text{SO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ у вигляді блідо-зелених скупчень анізотропних зерен із показником заломлення $n = 1,65$, а також сульфат міді $\text{CuSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, який утворює безбарвні анізотропні зерна з нижчим показником заломлення. При переході від міді та мідно-нікелевих сплавів, які являють собою тверді розчини нікелю в міді, до сплавів міді, що є механічними сумішами компонентів, вміст оксисолей у продуктах взаємодії зростає від 20 до понад 30 мас. %, тоді як частка гідроксосолей відповідно зменшується з 50 до 35–40 мас. %.

Всі наведені реакції можуть проходити при кімнатній температурі. При цьому контактний опір зразків у середовищі H_2S зростає до 100 мОм.

У випадку суміші $\text{H}_2\text{S} + \text{NH}_3$ контактний опір збільшується до 300 мОм і більше. У цих умовах корозійна тривкість контактів є найнижчою порівняно з іншими спеціальними корозійними середовищами, а приріст маси зразка після випробувань становить приблизно $\sim 10 \text{ г/м}^2$.

Корозійна взаємодія електроконтактних матеріалів із сумішшю агресивних компонентів $\text{H}_2\text{S} + \text{NH}_3$ є більш інтенсивною, ніж у попередньо розглянутих середовищах. На поверхні зразків може спостерігатися ріст великих кристалів у вигляді пластин, особливо виражений у міді з домішками перехідних металів. Механізм впливу середовища $\text{H}_2\text{S} + \text{NH}_3$ загалом подібний до механізму в середовищі H_2S . При цьому перехід сульфату міді в сульфат тетраамінміді відбувається шляхом безпосереднього насичення аміаком при кімнатній температурі.

Дослідження продемонстрували високу корозійну тривкість електроконтактних матеріалів на основі міді в середовищах NH_3 і CO_2 та значно нижчу — у середовищах H_2S і $\text{H}_2\text{S} + \text{NH}_3$. Плівки, що утворюються на зразках контактних матеріалів №20–24 (табл. 3.2), мають переважно однорідний за складом характер, а їх товщина зростає зі збільшенням тривалості дії корозійного середовища.

РОЗДІЛ 4

РОЗРОБКА ДОСЛІДНИХ КОНТАКТНИХ МАТЕРІАЛІВ НА ОСНОВІ МІДІ ТА ЇХ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ПЕРЕВІРКА

4.1. Розробка і створення контактних матеріалів на основі міді

Використовуючи результати патентного пошуку, враховуючи положення, наведені в підрозділі 3.4, а також службові функції електромагнітних пускачів (ЕМП) в електроустановках тваринництва із струмами 10–25 А, як прототип для створення дослідних контактних матеріалів доцільно прийняти відомі спечені контактні матеріали на основі міді КМК-Б00 (99,95% Cu), КМК-Б10 (97% Cu + 3% C) і КМК-Б11 (95% Cu + 5% C). Основним недоліком цих матеріалів є низька електроерозійна стійкість та нестабільність контактного опору під час експлуатації. Також як прототипи доцільно розглядати матеріали типу $(48\text{--}72\%)Cu + (0,5\text{--}5\%)Ag + Mo(W)$ та $Cu + (0,05\text{--}1,25\%)Cr + (0,05\text{--}1,0\%)Zr + (0,05\text{--}1,5\%)Nb$. Однак, окрім вже зазначених недоліків, для них характерні додаткові проблеми — висока вартість через вміст благородних металів та підвищений контактний опір.

Графіт має низку суттєвих недоліків: низьку механічну міцність і схильність до розшаровування, що зумовлено особливостями його кристалічної будови. При нагріванні електричною дугою графіт, який має високу температуру сублімації (3700 °C), нагрівається до значних температур і формує інтенсивний потік електронної термоємисії, що призводить до збільшення тривалості горіння дуги. У результаті мідна складова інтенсивно плавиться, випаровується та розбризкується, що суттєво підвищує електричну ерозію контактів.

Для підвищення електроерозійної стійкості та забезпечення стабільного контактного опору до наведених матеріалів були введені додаткові домішки, що дозволило створити і запатентувати нові композиційні матеріали.

1. $Cu + (10\text{--}15\%)Mo + (2\text{--}3\%)MoO_3 + (1\text{--}3\%)C + (0,8\text{--}1,0\%)Ni$.

Обґрунтуємо введення складових компонентів для даного КМ. Введення молібдену, який не взаємодіє з міддю ні в твердому, ні в рідкому стані, суттєво підвищує твердість, міцність та дугостійкість матеріалу. Для стабілізації контактного опору введено легуючі домішки триоксиду молібдену MoO_3 та графіту С.

Одночасне введення Мо, MoO_3 , Ні та С забезпечує формування необхідного комплексу службових властивостей, що є критично важливими для матеріалів електромагнітних пускачів (ЕМП). Механізм формування композиції Cu-Mo визначається процесами, що відбуваються на межах розділу фаз, зокрема змочуванням та адгезією. Відсутність хімічної взаємодії між компонентами системи Cu-Mo та неповне розтікання міді по поверхні молібдену ускладнюють отримання безпористих матеріалів.

При горінні електричної дуги графіт нагрівається до температури 3700°C і вище, сублимує та переходить у відновлювальні гази CO і CO_2 , які виносять кисень із дугового каналу та прилеглого простору. Це зменшує інтенсивність окиснення робочої поверхні контактів і скорочує тривалість горіння дуги. У результаті стабілізується контактний опір і зменшується ерозія за рахунок утворення карбідів молібдену MoC_3 . Крім того, графіт знижує ймовірність і силу зварювання контактів.

Введення триоксиду молібдену MoO_3 сприяє збільшенню швидкості переміщення дуги по поверхні та її «видуванню» з контактної зони. Це пояснюється сублимацією MoO_3 при температурі близько 650°C , при якій він різко збільшується в об'ємі в газоподібному стані. У такій формі молекули MoO_3 при температурах $900\text{--}1000^\circ\text{C}$ здатні до полімеризації з утворенням складніших сполук, що додатково поглинає частину енергії дуги. Потенціал іонізації MoO_3 є вищим, ніж у атомів Cu і Mo , що сприяє деіонізації дугового розряду та скороченню часу його горіння. У сукупності це зменшує окиснення робочої поверхні контактів і забезпечує стабільність контактного опору.

Експериментальна перевірка розробленого матеріалу показала такі результати: початковий контактний опір становить $R_k = 4,0\text{--}4,1$ мОм, коефіцієнт

електричної ерозії $k = -(8,1-10,1) \cdot 10^{-8}$ г/цикл, питомий електричний опір $\rho = 0,04-0,043$ мкОм·м.

4.2. Експериментальні випробування контактів

Оскільки надійність пускачів із розробленими контактами передбачає стабільне збереження в часі параметрів, що характеризують здатність ЕМП виконувати свої функції у всіх передбачених режимах, особливо в жорстких умовах експлуатації (середовище технологічних тваринницьких приміщень), контроль показників надійності здійснюється на всіх етапах випробувань: як під час перевірки працездатності пускача, так і при випробуваннях на дію зовнішніх факторів (контрольні випробування). Для зменшення тривалості та витрат на проведення випробувань використовується одноступінчатий контроль, за якого випробовується одна вибірка, а рішення щодо відповідності вимогам надійності приймається за її результатами. При визначенні обсягу вибірки виходять із допустимої похибки оцінювання дослідних показників надійності, яка залежить від розкиду параметрів самих пускачів. Величину цього розкиду можна оцінити на основі результатів попередніх випробувань серійних зразків (підрозділ 3.1). За даними досліджень інтенсивності електроерозійного зносу встановлено, що найбільш слабкою ланкою є рухомий мостик із матеріалу CrM-0,2+M1 : $k = -14,90 \cdot 10^{-6}$ г/цикл. На основі математичної обробки отримані у відносних одиницях (в.о.) значення ерозійного зносу мостика. Для представлення даних у в.о. їх необхідно зіставити з теоретично розрахованими масами, а підсумкові результати цих обчислень подано в табл. 4.1.

Вираховується дисперсія:

$$S^2 = \frac{1}{n-1} \cdot \sum (\Delta X_i)^2 = \frac{1}{5} \cdot 0,1254 = 0,0251 \quad (4.1)$$

$$S=0,158.$$

При плануванні випробування на надійність обумовлюється показник достовірності результатів або довірчу імовірність в межах $g=0,90 \div 0,95$ і

величину відносної похибки в межах $\varepsilon=0,05\div0,20$. З урахуванням мінімальної кількості об'єктів у вибірці та, вважаючи ЕМП виробами серійного та масового виробництва, приймається: $g=0,95$, $\varepsilon=0,10$.

Цим значенням буде відповідати відношення:

$$\frac{\varepsilon}{\sigma} = \frac{\varepsilon}{S} = \frac{0,1}{0,158} \cong 0,633.$$

Таблиця 4.1

Результати обчислення дисперсії електроерозійного зносу

№ досліду (по кількості комутаційних циклів, тис.)	1	2	3	4		6	Сума
Відносний знос мос-тика $X_i=\Delta m_{\text{доc}}/\Delta T$, в.о.	1,10	2,15	2,84	3,92	4,83	6,17	-
Теоретичний знос мостика X_T , в.о.	1	2	3	4	5	6	-
Різниця $\Delta X_i=X_i-X_T$	+0,1	+0,15	-0,16	+0,08	-0,17	+0,17	-
$(\Delta X_i)^2$	0,010	0,0225	0,0256	0,0064	0,0289	0,0289	0,1254

За заданої довірчої імовірності $g = 0,95$ та відношення $\varepsilon/\sigma \approx 0,633$ із використанням табличних даних отримуємо, що необхідний обсяг вибірки становить $N = 7$ об'єктів. Далі, розглядаючи пускач як систему з позицій теорії надійності, головне коло можна подати у вигляді послідовного з'єднання трьох елементів, де відмова будь-якого з них спричиняє вихід з ладу всього комутаційного апарата. Це відповідає умовам роботи трифазного навантаження. Виходячи з припущення про нормальний закон розподілу ймовірності безвідмовної роботи та прийнятого значення $P(T)=0,90$ для розривних контактів із новими матеріалами, виконуємо оцінку кількості елементів головного кола (полюсів):

- довірна імовірність $g = 0,95$;
- допустима кількість відмов $d = 0$.

За відповідними табличними значеннями визначено необхідний обсяг вибірки $N = 22$ елементи, що еквівалентно 8 пускачам. Таким чином, для

випробувань приймається одна вибірка, що складається з 8 апаратів, які сумарно містять 24 полюси головного кола.

У зв'язку із заміною серійного контактного матеріалу на дослідний проводиться комплекс типових випробувань. З метою оцінювання технічних характеристик пускачів із новими контактами та визначення рівня їх працездатності було сформовано таку програму досліджень:

- випробування на комутаційну зносостійкість у категорії застосування АС-3;
- перевірка номінальної комутаційної здатності контактів головного кола в категорії АС-3;
- дослідження змін контактної опору для серійних і дослідних зразків;
- виробнича експлуатаційна перевірка ЕМП з новими контактними матеріалами.

4.2.1. Випробування пускачів з дослідними контактними матеріалами на комутаційну зносостійкість. Комутаційні випробування композиційних КМ на зносостійкість виконували в умовах, що моделюють мікроклімат тваринницьких приміщень, при нормальному режимі комутацій. Запропонована електрична схема (Рис. 2.6) дозволяє одночасно тестувати до 8 пускачів. Режими випробувань наведено в табл. 2.2.

Обробку отриманих експериментальних даних здійснювали відповідно до методики, описаної в розділі 3. За результатами досліджень були побудовані графіки електроерозійного зношення контакт-деталей, виготовлених з різних КМ, для пускачів ПМЛ (рис. 4.1 і 4.2). У випробуваннях використовували такі композиційні матеріали

- 1) $83,5\%Cu + 15\%Nb + 1,0\%Zr + 0,5\%Y_2O_3$.
- 2) $78\%Cu + 15\%Mo + 3\%MoO_3 + 3\%C + 1,0\%Ni$.
- 3) $81,3\%Cu + 10\%Cr + 3\%TiB_2 + 3\%Nb + 2\%C + 0,7\%Zr$.

На рис. 4.1 представлено фотографії дослідних контакт-деталей. Видно, що на дослідних зразках обгоряння виражене сильніше, а на робочій поверхні значно чіткіше проявляються сліди ерозійного руйнування матеріалу.

4.2.2. Випробування пускачів з дослідними контактними матеріалами на номінальну комутаційну здатність. Випробування пускачів, оснащених новими композиційними КМ, виконували на спеціальній експериментальній установці в режимі виняткових комутацій. Для пускача ПМЛ-1100 ($I_{\text{ном}} = 10 \text{ А}$, $U_{\text{ном}} = 380 \text{ В}$) параметри навантажувального кола були підібрані таким чином, щоб забезпечити такі умови:

- вмикання: $I_{\text{вмик}} = 10 \cdot I_{\text{ном}} = 100 \text{ А}$; $U_{\text{вмик}} = 1,1 \cdot U_{\text{ном}} = 418 \text{ В}$; $\cos\varphi = 0,65$;
- вимкнення: $I_{\text{вим}} = 8 \cdot I_{\text{ном}} = 80 \text{ А}$; $U_{\text{вим}} = 1,1 \cdot U_{\text{ном}} = 418 \text{ В}$; $\cos\varphi = 0,65$.

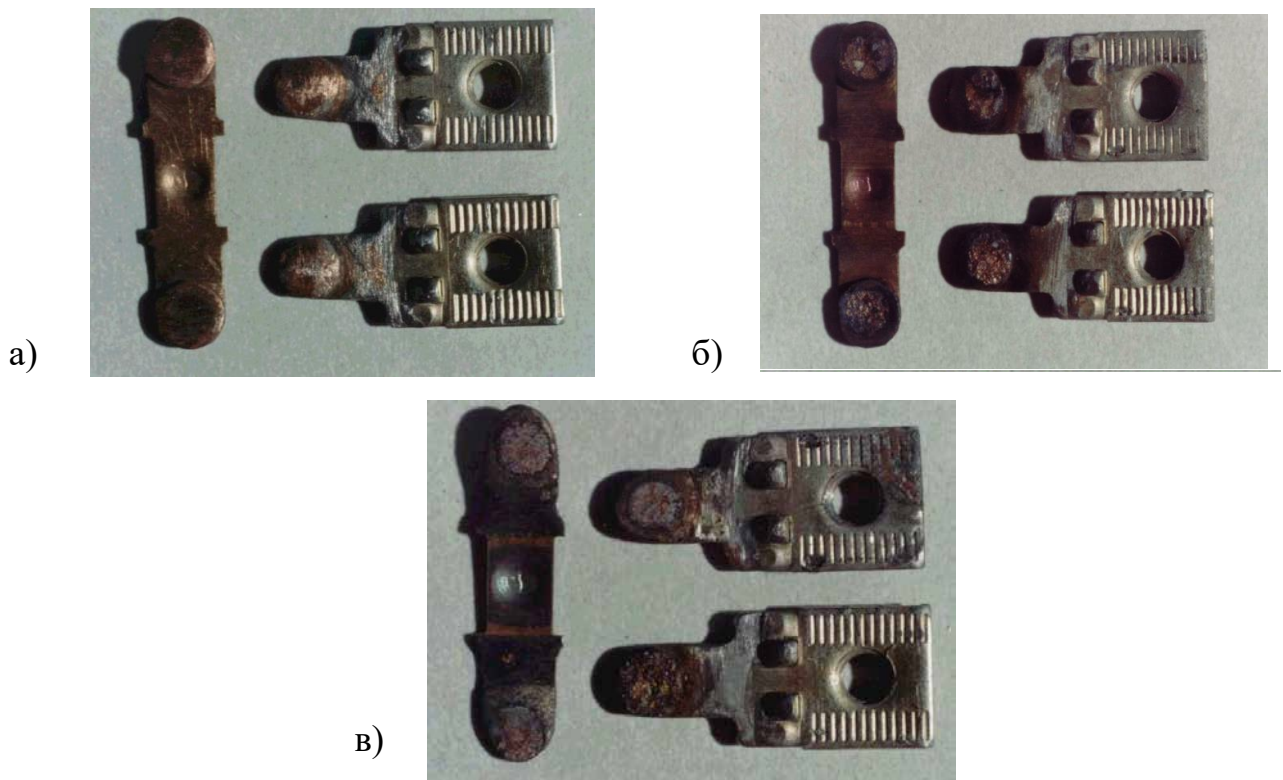


Рис.4.1. Зовнішній вигляд дослідних контактів пускача ПМЛ-1100 після наробітку: а) – 0 тис. комутаційних циклів; б) – 150 тис. циклів; в) – 300 тис. циклів. Категорія АС-3 ($U=380 \text{ В}$; $I=10 \text{ А}$). Збільшення $\times 4$. Матеріал $81,3\% \text{ Cu} + 10\% \text{ Cr} + 3\% \text{ TiB}_2 + 3\% \text{ Nb} + 2\% \text{ C} + 0,7\% \text{ Zr}$.

Для випробувань було відібрано по чотири пускачі на кожен дослідний КМ. Кожен пускач виконав 25 циклів операцій увімкнення-вимкнення. За

результатами тестування можна зробити висновок, що всі досліджені композиційні матеріали успішно витримали заданий режим. Під час випробувань не зафіксовано випадків зварювання контактів та перекривання дугою між полюсами головного кола.

4.2.3. Дослідження контактного опору пускачів з серійними і дослідними контактами. Перехідний опір контактних пар серійного та дослідного виконання визначали методом амперметра-вольтметра після сумарної кількості 300 тис. комутаційних циклів. Вимірювання падіння напруги ΔU виконували через кожні 50 тис. циклів при протіканні номінального струму 10 А. У кожній комутаційній серії проводили по 100 замірів падіння напруги з витримкою контактів у замкнутому стані протягом 10 с. Проведення всіх необхідних вимірювань забезпечувала електрична схема експериментальної установки, наведена на рис. 2.6. Падіння напруги для пускача вимірювали окремо на кожному полюсі головного кола. Отриманий масив даних по спаду напруги для серійних контактів марки CrM-0,2+M1 та дослідних контактів складу $81,3\%\text{Cu}+10\%\text{Cr}+3\%\text{TiB}_2+3\%\text{Nb}+2\%\text{C}+0,7\%\text{Zr}$ обробляли методами математичної статистики в програмі «Statistika». Значення опору контакту ΔR (мОм) розраховували за формулою (2.4). В результаті обробки були отримані експериментальні залежності перехідного контактного опору від кількості циклів комутації, які представлені на рис. 4.2. Ці залежності апроксимували поліномом першого ступеня, завдяки чому визначено відповідні вирази для математичного очікування контактного опору:

- для серійних контактів CrM0,2+M1 :

$$R_c(n) = 14,22 + 0,191 \cdot n, \quad (4.2)$$

- середньоквадратична похибка апроксимації $E_c = 2,141$;
- для дослідних контактів $81,3\%\text{Cu}+10\%\text{Cr}+3\%\text{TiB}_2+3\%\text{Nb}+2\%\text{C}+0,7\%\text{Zr}$:

$$R_d(n) = 21,84 + 0,128 \cdot n, \quad (4.3)$$

середньоквадратична похибка апроксимації $E_c = 1,855$.

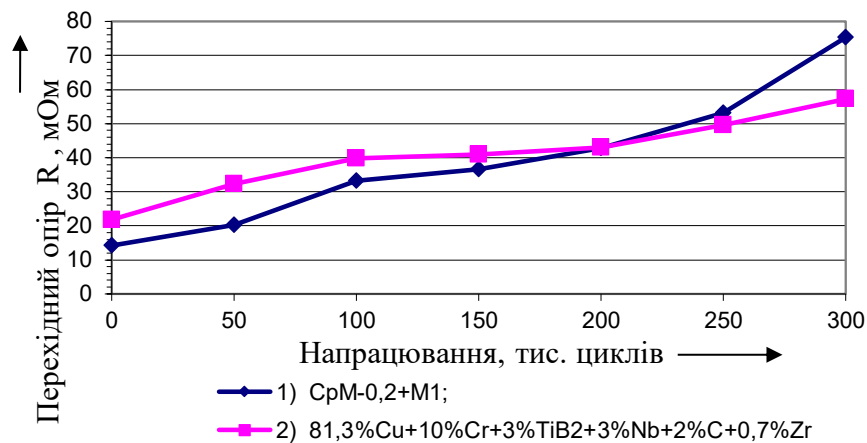


Рис.4.2. Залежність перехідного опору контактів пускачів ПМЛ-1100 0x4 з серійними (1) та дослідними контактами (2)

Дослідження впливу хімічно-активного середовища на контактний опір показало, що початкове значення перехідного опору зростає зі збільшенням тривалості витримки та кількості комутаційних циклів. У серійних контактах марки СрМ-0,2+М1 опір збільшується майже в 5 разів відносно початкового рівня, тоді як у дослідних контактах зростання відбувається повільніше — приблизно в 2,7 раза, що є кращим показником порівняно із срібловмісними матеріалами. Таку відмінність пояснюється формуванням на поверхні граничного шару плівок однорідного складу, товщина яких збільшується з часом впливу агресивного середовища. Подібна плівкова структура сприяє зниженню перехідного опору завдяки подрібненню локалізованих частинок і забезпеченню стабільного металічного контакту. Як відомо, оксидні плівки міді утворюються навіть за кімнатної температури і досягають товщини не більше 5 мкм. Вони захищають мідь від подальшого окислення і сприяють стабілізації контактного опору.

4.2.4. Експлуатаційні виробничі випробування пускачів з дослідними контактами. Виробничі випробування пускачів з дослідними контактами (матеріал 81,3%Cu+10%Cr+3%TiB2+3%Nb+2%C+0,7%Zr) проводили у складі шаф керування електроприводом транспортера ТНС-3,0Б типу ЯАА5910-3274ТУЗ. Тестування здійснювалося безпосередньо у виробничих приміщеннях

тваринницьких ферм радгоспу «Совки» Києво-Святошинського району Київської області протягом трьох років. Шафа призначена для керування двома асинхронними електродвигунами з короткозамкнутим ротором потужністю 5,5 і 2,2 кВт, номінальний струм яких становить відповідно 8,0 та 2,8 А. Спостереження з фіксацією експлуатаційних параметрів проводили протягом перших двох років випробувань. Після дворічної підконтрольної експлуатації пускачі залишалися повністю працездатними і продовжували використовуватись персоналом господарства.

Для проведення випробувань було взято чотири нових пускачі ПМЛ-1200.04, оснащені серійними контактотримачами, до яких приварили дослідні контакт-деталі. Розміри дослідних контакт-деталей були ідентичними серійним. Пускачі комплектувалися електротепловими реле РТЛ 1012.04. Для порівняння паралельно здійснювали спостереження за серійними електромагнітними пускачами:

- ПМЕ-111, які оснащені контактами КМК-А10(4 шт.);
- MDSt-16, які оснащені контактами срібло-оксид кадмію (15% CdO) (країна-виробник - НДР, 2 шт.);
- SLA7-1 з контактами срібло-нікель (10%Ni) (країна-виробник - ПНР, 2 шт.).

Умови роботи пускачів відповідають реальним виробничим умовам, характерним для технологічних приміщень тваринницьких комплексів. У процесі експлуатації через регламентовані проміжки часу виконувалася фіксація параметрів: опору ізоляції, контактного опору та накопиченого наробітку. Для визначення кількості комутаційних операцій біля кожного пускача були встановлені імпульсні лічильники типу СИ-206, що дозволило отримувати об'єктивні дані щодо режиму роботи апаратів. Пускачі ПМЕ-111 були відібрані зі складського резерву та встановлені як нові в шафи керування. Для проведення досліджень використовувалися дві шафи керування типу ЯАА5910-3274ТУЗ. Перед початком випробувань усі апарати пройшли однаковий комплекс технічного обслуговування, що включав очищення та промивання контактних

груп, завдяки чому були забезпечені максимально рівноцінні умови для всіх дослідних зразків. Результати вимірювань наведені в таблиці 4.2.

У ході виробничих випробувань відмов у пусках типу ПМЛ із розробленими мідними контактами не зафіксовано. Усі дослідні апарати стабільно працювали в межах встановлених технічних характеристик. Показники електроерозійного зносу для дослідних і серійних контактів практично не відрізнялися. Огляд внутрішніх поверхонь металевих шаф показав наявність значної кількості конденсованої вологи, а також відкладень нерозчинних хімічних сполук. Лакофарбове покриття місцями мало тріщини, що свідчить про розвиток корозійних процесів. На конструктивних елементах пускачів (кріпильні деталі, контактотримачі, різьбові з'єднання тощо) виявлено світло-сірий порошкоподібний наліт у вигляді конгломератів. Разом із тим встановлено, що контактний опір дослідних контактів є більш стабільним у порівнянні з контактами на основі срібла (рис. 4.5).

Таблиця 4.2

Значення опору ізоляції пускачів, контактного опору та наробітку за час спостережень

Тип пускача	Опір на початку досліджень		Опір в кінці досліджень		Наробіток за час досліджень, тис.
	ізоляції, МОм	контактний, МОм	ізоляції, МОм	контактний, МОм	
1. ПМЛ-1200.04	550	6,8-7,8	370	14,1-19,3	5460
2. ПМЛ-1200.04	580	3,0-4,5	410	19,4-21,0	5120
3. ПМЛ-1200.04	560	4,6-5,2	400	13,4-16,0	5635
4. ПМЛ-1200.04	557	8,5-9,5	405	13,7-18,7	5385
5. ПМЕ-111	120	3,0-4,5	15,0	24,3-26,7	4560
6. ПМЕ-111	110	2,8-3,5	18,0	22,7-25,5	4390
7. ПМЕ-111	125	3,5-5,0	14,0	15,6-18,0	4660
8. ПМЕ-111	120	3,0-4,0	23,0	24,2-26,0	4490
9. MDSt-16	380	5,1-7,2	250	28,2-30,4	4450
10. MDSt-16	375	6,2-8,5	220	25,9-27,7	4320
11. SLA7-1	120	2,9-3,6	20,0	30,8-33,0	4125
12. SLA7-1	130	3,3-4,5	17,0	27,7-29,7	4385

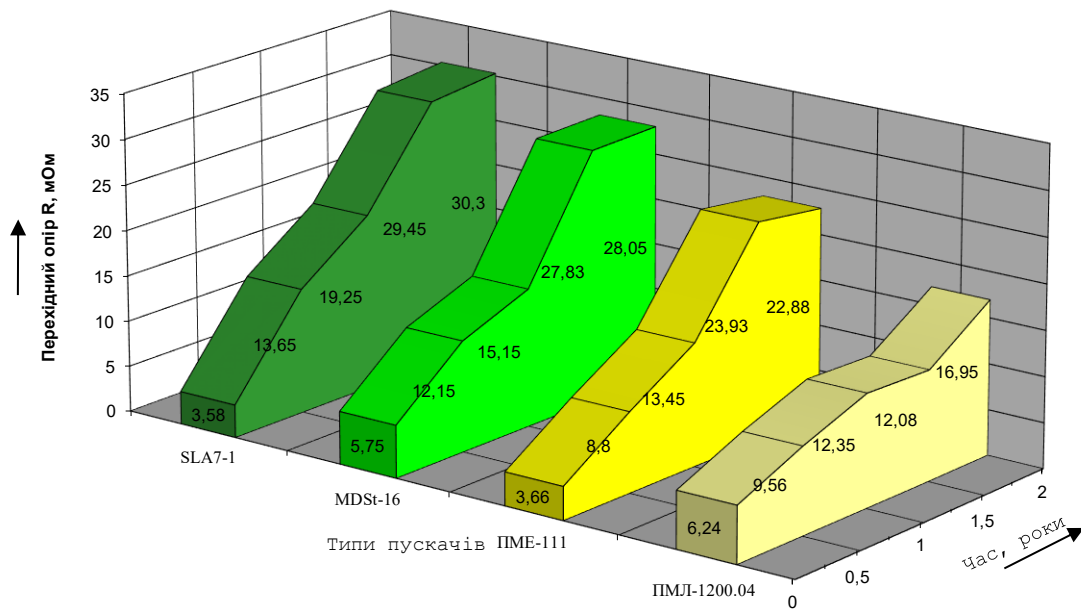


Рис.4.3. Залежність перехідного опору контактів різних типів пускачів.

Порівняння величини контактного опору матеріалу CrM-0,2+M1 , отриманого в умовах лабораторної установки (підрозділ 4.2.3), із контактним опором пускачів SLA7–1 (контактний матеріал $\text{Ag-10\%Ni}$) показує, що на початковому етапі випробувань значення опору для CrM-0,2+M1 приблизно у 2,5 раза вище. Така різниця пояснюється як відмінністю питомих електричних опорів матеріалів, так і особливостями режимів комутації, зокрема величинами робочих струмів. Вказана тенденція зберігається і в процесі подальших досліджень. При цьому слід враховувати, що лабораторні випробування проводилися в більш жорстких умовах (підвищена концентрація агресивних домішок у середовищі, збільшена кількість комутаційних циклів), тоді як у реальних умовах експлуатації пускачі частково захищені металевими оболонками шаф керування, що зменшує інтенсивність впливу зовнішнього середовища тваринницьких приміщень.

Таким чином, результати експлуатаційних випробувань електромагнітних пускачів ПМЛ-1200.04 із дослідними контактними матеріалами ($81,3\%\text{Cu} + 10\%\text{Cr} + 3\%\text{TiB}_2 + 3\%\text{Nb} + 2\%\text{C} + 0,7\%\text{Zr}$) підтверджують їхню придатність для використання в електрообладнанні сільськогосподарського призначення та стабільність основних електричних характеристик у реальних умовах роботи.

РОЗДІЛ 5

ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ЗАСТОСУВАННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПУСКАЧІВ З ДОСЛІДНИМИ КОНТАКТАМИ НА ОСНОВІ МІДІ

Економічна ефективність E^* використання пускачів із дослідними контактами, виготовленими на основі міді, оцінюється за методикою, прийнятою в електротехнічній галузі. Розрахунок здійснюється для однієї одиниці продукції.:

$$E^* = 3_1^* \cdot \frac{\Pi_2}{\Pi_1} \cdot \frac{p_1 + E_n}{p_2 + E_n} - 3_2^* + \frac{(B_1^* - B_2^*) - E_n(K_2^* - K_1^*)}{p_2 + E_n}, \quad (5.1)$$

де 3_1^* - наведені витрати серійного пускача ПМЛ-1100 0x4 Б у гривнях. Замість витрат за базовим пускачем використовується відпускна оптова ціна; для пускача ПМЛ-1100 0x4 Б.:

$3_1^* = OB_1 = 585,4$ грн. (дані АТ “НВО “ЕТАЛ”);

3_2^* - витрати пускача ПМЛ-1100 з експериментальними контактними деталями (проект оптової вартості OB_2), грн.;

Π_2/Π_1 – коефіцієнт, що враховує зростання продуктивності дослідного зразка пускача порівняно із серійним, приймаємо: $\Pi_2/\Pi_1 = 1$;

$\frac{p_1 + E_n}{p_2 + E_n}$ - Коефіцієнт, що враховує зміну терміну експлуатації дослідного пускача порівняно із серійним;

p_1, p_2 – частки відрахувань від балансової вартості, призначені для повного відновлення серійних і дослідних пускачів; $p = 1/T_{сл}$, де $T_{сл}$ – термін експлуатації пускачів. Для серійних пускачів, що використовуються в електроустановках тваринництва відповідно до розділу 1, строк служби становить $T_{сл.1} = 3-5$ років (розділ 1). Для дослідного пускача планується термін служби не менший, ніж у серійного, тобто: $T_{сл.1} = 5$ років, $T_{сл.2} = 5$ років.;

E_n – нормативний коефіцієнт ефективності основних фондів (для НВА встановлюємо значення $E_n = 0,15$).

V_1^* , V_2^* - річні витрати на експлуатацію споживачем серійного та дослідного пускачів враховують лише частину амортизації, відведену на капітальний ремонт цих пристроїв. При цьому не беруться до уваги кошти, необхідні для їх повного відновлення, а також амортизаційні відрахування, пов'язані зі супутніми капітальними вкладеннями споживача. Розглянемо спрощений варіант, коли експлуатаційні витрати для обох типів пускачів вважаються рівними

K_1^* , K_2^* - супутні питомі капіталовкладення та інші одноразові витрати при використанні серійних і дослідних пускачів зазвичай мінімізуються. Щорічні обсяги використання відновлених пускачів сягають десятків тисяч одиниць, що призводить до зменшення питомих капіталовкладень та інших одноразових витрат на одиницю продукції.

Індекси 1 і 2 позначають відповідно серійний пускач та пускач із дослідним контактним матеріалом, склад якого становить $81,3\%Cu + 10\%Cr + 2,0\%TiB_2 + 3,0\%Nb + 2,0\%C + 0,7\%Zr$. Параметри, позначені знаком *, відповідають одному пускачу (одиниці продукції).

Економічна ефективність використання пускачів із дослідними контактами обумовлена двома основними факторами. По-перше, значно знижуються витрати завдяки більш доступній вартості контактних деталей, які виготовляються на основі міді. По-друге, споживач отримує економію електроенергії W , що виділяється в комутаційних пристроях пускача під час перемикання струму. Це досягається завдяки скороченню часу горіння електричної дуги при розмиканні контактів: у серійних пускачах ПМЛ-1100 0x4 Б цей показник становить 34 мс, тоді як у пускачах із модернізованими контактними деталями він зменшений до 25 мс.

5.1. Розрахунок проекту вартості пускача з дослідними зразками контакт-деталей

Маса срібла в контактах $CrM-0,2+M1\ 50БПГ-4052$ і $CrM-0,2+M1\ 50БСГ-4052$ для одного пускача ПМЛ-1100 0x4 Б становить: $M1 = 0,91$ г. Вартість срібла для одного пускача складає:

$$B_c = M_1 \cdot v_1, \quad (5.2)$$

де v_1 – вартість одного граму срібла, яке використовується для виготовлення контактів, $v_1=106,5$ грн.

$$B_c = 0,91 \cdot 106,5 = 96,92 \text{ грн.}$$

Вартість пускача без вартості срібла складає:

$$B_{1п} = OB_1 - B_c = 558,4 - 96,92 = 488,48 \text{ грн.} \quad (5.3)$$

Маса композиційного матеріалу на основі міді, необхідного для виготовлення одного відновленого пускача, становить:

$$M_2 = 16 \cdot m_2, \quad (5.4)$$

де m_2 – маса однієї із 16 контакт-деталей, що складають комутуючий пристрій пускача, г;

$$m_2 = \gamma \cdot V = \gamma \cdot h \cdot \frac{\pi d^2}{4}, \quad (5.5)$$

де $h=1,1$ мм і $d=4,0$ мм – висота і діаметр дослідних контакт-деталей;

$\gamma=8,47$ г/см³ – густина матеріалу 81,3%Cu+10%Cr+2,0%TiB₂+3,0%Nb+2,0%C+0,7%Zr.

$$M_2 = 16 \cdot 0,117 = 1,87 \text{ г.}$$

Вартість контакт-деталей з композиційного матеріалу для одного пускача дорівнює:

$$B_m = M_2 \cdot v_2, \quad (5.6)$$

де v_2 – вартість одного граму композиційного матеріалу, $v_2=1,85$ грн.

$$B_m = 1,87 \cdot 1,85 = 3,46 \text{ грн.}$$

Проект вартості пускача з композиційними контакт-деталлями:

$$OB_2 = B_{1п} + B_m = 488,48 + 3,46 = 491,94 \text{ грн.}$$

Економічна ефективність дорівнює:

$$E^* = OB_1 - OB_2 = 585,4 - 491,94 = 93,46 \text{ грн.}$$

Оскільки річні програми відновлення пускачів включають десятки тисяч апаратів, економічний ефект для народного господарства має бути значним.

Якщо порівняти сукупну вартість матеріалів, які входять до складу комутуючого пристрою серійного пускача ПМЛ-1100 0х4 Б (за даними АТ "НВО "ЕТАЛ"), з вартістю комутуючого пристрою пускача з експериментальними контактними деталями на основі міді, то витрати можуть зменшитися майже в 2-3 рази.

5.2. Розрахунок втрат електричної енергії в комутуючих пристроях пускачів.

Розрахунок величини електричної енергії W_1 та W_2 , що виділяється в головному колі пускачів під час розмикання, виконується за формулами (5.7; 5.8). Обчислення проводиться для одного пускача в рамках одного циклу комутації, а дані для аналізу беруться з осцилограм. Величина електричної енергії, що виділяється на одному контакті пускача:

– для серійного пускача:

$$W_1 = U_0 I_0 t_{01} \cdot \omega_1 = 0,065 \text{ кВ} \cdot 10 \text{ А} \cdot 9,44 \cdot 10^{-6} \text{ год} \cdot 0,705 = 4,33 \cdot 10^{-6} \text{ кВт} \cdot \text{год}; \quad (5.7)$$

– для пускача з дослідними контакт-деталлями:

$$W_2 = U_0 I_0 t_{02} \cdot \omega_2 = 0,065 \text{ кВ} \cdot 10 \text{ А} \cdot 6,44 \cdot 10^{-6} \text{ год} \cdot 0,908 = 4,09 \cdot 10^{-6} \text{ кВт} \cdot \text{год}. \quad (5.8)$$

Зниження втрат електричної енергії для трьох полюсів головного кола пускачів з контактами мостикового типу складає:

$$\Delta W = 6 \cdot (W_1 - W_2) = 6 \cdot (4,33 - 4,09) \cdot 10^{-6} = 1,44 \cdot 10^{-6} \text{ кВт} \cdot \text{год}.$$

При використанні пускачів із розробленими композиційними матеріалами економія електроенергії досягає майже 6%. Це дозволяє зробити такі висновки:

1. Глибина плавлення матеріалу серійних контакт-деталей при струмі 10 А становить 9–11 мікрометрів, тоді як для композиційних контакт-деталей на основі міді — лише 7–8 мікрометрів. Цей показник залежить від енергії дуги, типу навантаження та фізико-механічних властивостей матеріалів контактів.

2. Енергія дуги визначається тривалістю її горіння, що, своєю чергою, залежить від теплофізичних характеристик матеріалу контактів. Встановлено, що близько 20–35% теплової енергії дуги використовується для плавлення матеріалу контактів, а решта йде на процес кипіння.

3. Скорочення часу горіння електричної дуги при комутації струму можливо досягти завдяки введенню в склад композицій матеріалів таких елементів, як С, Мо, МоО₃ і Cr.

4. Глибина проплавлення контактного матеріалу безпосередньо впливає на масштаб електричної ерозії.

5. Аналізуючи характер електроерозійного зносу, можна визначити термін служби пускачів і спрогнозувати їх комутаційну зносостійкість. Основним фактором, що визначає термін служби пускачів, є величина електроерозійного зносу рухомих контакт-деталей.

6. Використання пускачів ПМЛ 1100 із дослідними контактами забезпечує економічну ефективність у розмірі 93,46 грн на один пускач завдяки значно нижчій вартості контакт-деталей (у 25–28 разів дешевше). Для споживача це означає зменшення втрат електроенергії на 6% під час комутації струму в контактах.

ВИСНОВКИ

Проведені дослідження експлуатаційної надійності контактних вузлів електромагнітних пускачів першої величини показали, що їх працездатність у значній мірі визначається комплексною дією електричних, механічних та хімічних факторів. Основними процесами, які формують відмови та зношування контактних систем, є електроерозія, дугова дія, механічне стирання та корозійні процеси в агресивному середовищі. Встановлено, що характер і інтенсивність руйнування суттєво залежать від режимів комутації, складу контактного матеріалу та умов експлуатації.

Аналіз експериментальних результатів показав, що застосування композиційних контактних матеріалів на основі міді дозволяє підвищити стабільність роботи контактних вузлів та зменшити коливання перехідного опору в процесі тривалої експлуатації. При цьому введення тугоплавких та легуючих компонентів сприяє підвищенню електроерозійної стійкості, зменшенню інтенсивності зварювання контактів і стабілізації поверхневих процесів, що відбуваються при дії електричної дуги.

Встановлено, що експлуатаційні умови, характерні для виробничих приміщень з підвищеною вологістю та наявністю агресивних домішок, суттєво впливають на процеси корозійного зношування. Формування поверхневих оксидних та сульфідних плівок призводить до зміни контактного опору, однак використання вдосконалених композиційних матеріалів дозволяє частково стабілізувати ці процеси та підвищити загальну надійність пускачів у довготривалому режимі роботи.

У підсумку можна зазначити, що підвищення експлуатаційної надійності електромагнітних пускачів першої величини досягається шляхом оптимізації складу контактних матеріалів, удосконалення конструкції контактних вузлів та врахування реальних умов експлуатації. Отримані результати мають практичне значення для підвищення довговічності комутаційної апаратури, зменшення

відмов та забезпечення стабільної роботи електрообладнання в промислових і аграрних системах.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Закон України «Про енергетику». В редакції від 1 липня 2010 року №2388-VI.
2. Закон України «Про енергозбереження». (Відомості Верховної Ради України (ВВР), 2006, № 15, ст.126).
3. Закон України №555-IV від 20.02.2003р «Про альтернативні джерела енергії».
4. Правила улаштування електроустановок. – Видання офіційне. Міненерговугілля України. – Харків: Видавництво «Форт», 2017. – 760 с.
5. Правила технічної експлуатації електроустановок споживачів (ПТЕЕС). Затверджено Наказ Міністерства палива та енергетики 25.07.2006 №258 (у редакції наказу Міністерства енергетики та вугільної промисловості №91 від 13.02.2012 та № 905 від 16.11.2012).
6. Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів. Затверджено Наказ Держнаглядохоронпраці від 09.01.98 №4. Зареєстровано в Міністерстві юстиції України 10.02.98 за № 93/2533ДНАОП 0.00.–1.32–01. Правила будови електроустановок. Електрообладнання спеціальних електроустановок. – К.: ПП „Фірма Гранмна”, 2001. – 117 с.
7. Правила користування електричною енергією. Затверджено постановою НКРЕ 31.07.96 №28 у редакції постанови НКРЕ від 17.10.2005 №910. Зареєстровано в Міністерстві юстиції України 18 листопада 2005 р. за №1399/11679.
8. ДБН А.2.2. –1 – 2003 Проектування. Склад і зміст матеріалів оцінки впливів на навколишнє середовище (ОВНС) при проектуванні і будівництві підприємств, будинків і споруд.
9. ДБН А.2.2. –3 – 2012 Склад та зміст проектної документації.
10. ДБН В.2.5. – 23 – 2003. Інженерне обладнання будинків і споруд. Проектування електрообладнання об’єктів цивільного призначення. Державний комітет України з будівництва та архітектури. – К.: 2004. – 128 с. 87
11. ДБН В.2.5-27-2006 Інженерне обладнання будинків і споруд. Захисні заходи електробезпеки в електроустановках будинків і споруд.
12. Червінський Л.С. Електричне освітлення та опромінення: Посібник / Л.С.Червінський, Л.О.Сторожук. – К.: Вид-во ТОВ «Аграр Медіа Груп», 2011. – 214 с.
13. Філіпенко А.С. Основи наукових досліджень. Конспект лекцій: Посібник / А.С.Філіпенко. – К.: Академвидав, 2004. – 208 с.
14. Korobskyi, V.V., Mrachkovskyi, A.M. New aspects of creation of environmentally friendly composite materials for contact systems of electric equipment in the agriculture sector: Volume 671, 2018 – Issue 1: 1th International Conference on Electronic Processes in Organic and

Inorganic Materials (ICEPOM11): Part 2. Molecular Crystals and Liquid Crystals. Published online: 03 Jun 2019. P. 35 – 40.(<http://dx.doi.org/10.1080/15421406.2018.1542083> Scopus).

15. Коробський В.В. Дослідження перехідного опору контактних матеріалів та контактів електричних апаратів при взаємодії із агресивним оточуючим середовищем / В.В.Коробський, О.О. Чорноволенко // Енергетика і автоматика. – 2023. – №6. – С.84 - 98.

16. Електричні контакти та електроди: 3б. наук. пр. - К.: НАН України. ІПМ, 2005. - 163 с.

17. Корчемний М.О. Підвищення надійності електрообладнання в сільському господарстві / М.О.Корчемний, В.П.Машевський. - К.: Урожай, 1988. - 176 с.

28. ДСТУ 2862-94. Надійність техніки. Методи розрахунку показників надійності.

19. ДСТУ 3004-95. Надійність техніки. Методи оцінки показників надійності за експериментальними даними.

20. ДСТУ 2993 - 95 (ГОСТ 2933 - 93). Апарати електричні низьковольтні. Методи випробувань.

21. Dräger Hans-Joachim. Fremdschritzwachstum bei Kontaktmaterialien der Energietechnik in aggressiven Atmosphären / Hans-Joachim Dräger. // Elektrotechn. Z.. - 2013. - A94, №9. - S. 562-564.

22. Campbell W.E. Reduction of the rate of film formation on silver and brass by purification of the atmosphere / W.E.Campbell. // Electrical Contacts. - 2012. - vol.2. -S. 186-194.

23. Іванов В.М. Про руйнування комутаційних плівок на слаботочних контактах / В.М.Іванов, Є.І.Ботов, Ю.М.Дацков, Є.В.Рожещенко, М.С.Куцак // Вістн. Харьк. політехн. ін-ту. - 1999. - №14. - С.31-32.

24. Sato Y. Кинетика коррозии серебра в окружающей среде / Y.Sato, M.Matsuba, Y.Morioka, M.Handa. // Sony Res. Cent. Repts. - 2015. - 24. - С. 206- 210.