

УДК 621.316.925:622.82

А.В. ПИРОЖЕНКО, канд. техн. наук, Т.В. ПИРОЖЕНКО, наук. співробітник
НДІБПГ ДВНЗ «Криворізький національний університет»
А.А. ПЕТРИЧЕНКО, асистент, Криворізький національний університет

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ОБГРУНТУВАННЯ ОСНОВНИХ ВИМОГ ДО ЗАСОБІВ ЗАХИСНОГО ВИМИКАННЯ КОНТАКТНИХ МЕРЕЖ ЕЛЕКТРОВОЗНОЇ ВІДКАТКИ ЗАЛІЗОРУДНИХ ШАХТ ВІД ПОЖЕЖОНЕБЕЗПЕЧНИХ ДУГОВИХ ЗАМИКАНЬ

Аналіз причин пожеж в наслідок дугових замикань в шахтних електричних мережах та електроустаткуванні показує, що біля половини з них припадає на контактну електровозну відкатку. Основною причиною критичного стану пожежної безпеки залізорудних шахт під час експлуатації електровозної відкатки слід вважати відсутність обґрунтування вимог до засобів захисного вимикання контактних мереж від пожежонебезпечних дугових замикань, що, в свою чергу, гальмує їх розробку. Відомі дослідження пожежонебезпечних контактних мереж були виконані для умов вугільних шахт і не можуть бути поширені на залізорудні шахти, де, на відміну від вугільних, контактною відкаткою транспортується велика кількість вибухових речовин і існує реальна небезпека їх займання під час аварійних ситуацій в контактній мережі. Крім того, сучасні керовані напівпровідникові тягові перетворювачі мають значно більш жорсткішу вольт-амперну характеристику, внаслідок чого збільшилось значення постійної і знизилось значення змінної складової випрямленої напруги, що призвело до зниження величин мінімального струму, здатного підтримувати горіння дуги. Для можливості проведення досліджень був розроблений спеціальний стенд, який дозволяє здійснити натурне моделювання дугових замикань. Визначені вольт-амперні характеристики електричної дуги при різних її довжинах. Встановлено, що мінімальний струм, при якому спостерігається стійке горіння дуги, складає 2-3 А при довжині дуги 5-10мм. Досліджувались найбільш легкозаймисті матеріали, що знаходяться у відкотних виробках: промаслена бумага броньованого кабелю, дрібні дерев'яні тріски та найбільш небезпечні з точки зору займання – вибухові речовини. Отримані граничні струмочасові характеристики займання матеріалів, що випробувались. Визначена пожежонебезпечна струмочасова характеристика, сформульовані основні вимоги до засобів захисного вимикання шахтних контактних мереж від пожежонебезпечних дугових замикань.

Ключові слова: вимикання, захист, замикання, пожежонебезпечний, тягові перетворювачі.

Проблема та її зв'язок з практичними завданнями. Контактна електровозна відкатка є основним видом транспортування корисних копалин по магістральним виробкам залізорудних шахт. На гірничодобувних підприємствах чорної металургії практично 100% локомотивного парку складають контактні електровози. Протяжність шахтних контактних мереж складає всього 10...12% протяжності кабельних ліній. Однак з точки зору пожежної безпеки електровозна відкатка є найбільш небезпечною з усього підземного електроустаткування. Аналіз причин пожеж в наслідок дугових замикань в шахтних електричних мережах та електроустаткуванні показує, що біля половини з них припадає на контактну електровозну відкатку [1]. Високий рівень пожежної небезпеки відмічається і за кордоном. Так, аналіз пожеж на рудниковому транспорті в шахтах Великої Британії показав, що електровозна відкатка у два рази частіше є причиною пожеж, ніж інші види підземного транспорту [2].

Основною причиною критичного стану пожежної безпеки залізорудних шахт під час експлуатації електровозної відкатки слід вважати відсутність обґрунтування вимог до засобів захисного вимикання контактних мереж від пожежонебезпечних дугових замикань, що, в свою чергу, гальмує їх розробку.

Аналіз досліджень та публікацій. Для виключення можливості виникнення пожеж під час дугового замикання в контактних мережах засоби захисного вимикання повинні відключати контактну мережу, що захищаються, за час, менший часу займання від теплового імпульсу дуги горючих матеріалів, що знаходяться у відкотних виробках. Цим пояснюється необхідність визначення струмочасової пожежонебезпечної характеристики, тобто залежності між величиною струму дуги і допустимого часу її існування (часу відключення дуги), протягом якого займання горючих матеріалів не відбудеться.

Крім того, для можливості розроблення засобів захисного вимикання, що виключають виникнення пожеж від контактної мережі, необхідно проведення досліджень щодо визначення достатньої їх чутливості. Для цього необхідно визначення величини мінімальних струмів, що здатні підтримувати горіння дуги від контактного проводу.

Відомі дослідження первинних критеріїв пожежонебезпечності контактних мереж, що проводились МАКНДІ [3]. Однак їх об'єм обмежувався дослідженнями тільки займанням кабелю, що

живить контактну мережу, хоча основною причиною виникнення пожеж у відкотній виробці є дугові замикання між контактним проводом, пантографом електровозу і заземленими струмовідними елементами (рейками, металевим кріпленням і т.ін.).

Найбільш повними слід вважати дослідження, які були проведені в ДПП [4]. Однак, ці дослідження були виконані для умов вугільних шахт і не можуть бути поширені на залізородні шахти. В залізородних шахтах, на відміну від вугільних, контактною відкоткою транспортується велика кількість вибухових речовин (ВР) і існує реальна небезпека їх займання під час аварійних ситуацій в контактній мережі. Горіння вибухових речовин супроводжується виділенням великої кількості отруйних газів, до того ж загасити вибухові речовини звичайними способами практично неможливо. Тому вибухові речовини, що транспортуються контактною відкоткою, слід розглядати як особливо небезпечні з точки зору займання.

Слід відмітити, що дослідження [4] не відповідають сучасному рівню електропостачання шахтних контактних мереж, тому що проводились при живленні контактної мережі від ртутного випрямляча типу РМ-300, які у теперішній час взагалі не використовуються. Сучасні керовані напівпровідникові тягові перетворювачі мають значно більш жорсткішу вольт-амперну характеристику, що є більш безпечним в пожежному відношенні при тих самих струмах дугового замикання. Крім того, в ртутних випрямлячах використовувалась схема трифазного випрямлення з нульовим виводом, а в сучасних перетворювачах - трифазна мостова схема. Внаслідок цього збільшилось значення постійної і знизилось значення змінної складової випрямленої напруги [5], що призвело до зниження величин мінімального струму, здатного підтримувати горіння дуги.

Отже, відомі дослідження не відповідають сучасному рівню електропостачання шахтних контактних мереж і не враховують особливості залізородних шахт щодо транспортування електровозною відкоткою вибухових речовин.

Постановка завдання. Проведення експериментальних досліджень щодо визначення пожежобезпечної струмочасової характеристики дугових замикань в контактних мережах електровозної відкотки залізородних шахт.

Викладення матеріалу та результати. Для можливості проведення досліджень був розроблений спеціальний стенд, блок-схема якого наведена на рис. 1, який дозволяє здійснити натурне моделювання дугових замикань. Живлення здійснювалось від штатного перетворювача 1 типу ВТПЕ-500-275. Струм дуги регулювався силовим змінним опором 2 при закороченому дугоутворювачі 3. Важливим моментом під час розроблення стенду був правильний вибір матеріалів дугоутворюючих електродів, тому що тільки від них залежить напруга запалювання електричної дуги [6]. Оскільки найбільш типовими дуговими замиканнями в шахтній контактній мережі є дугові замикання між контактним проводом, пантографом електровозу та заземленими струмовідними елементами (рейками, металевим кріпленням і т.ін.), моделювання дуги здійснювалось у переході мідь-сталь. Рухомий контакт дугоутворювача був виконаний з контактного проводу, а в якості нерухомого був застосований сталевий кутик, імітуючий металеве кріплення. Під час розходження контактів дугоутворювача 3 виникає дуга, що призводить до спрацювання фототиристора 11. Імпульси, що поступають від генератора імпульсів 7 через одновібратор 6 та елемент збігу 5 на електроди керування перетворювача 1, також поступають на перелічувально-імпульсний блок 10, яким задається час горіння дуги. Плавне регулювання часу горіння здійснюється блоком затримки 9.

По закінченні заданої витримки часу імпульс поступає на тригер 8, який накладає заборону на надходження імпульсів з виходу елемента збігу 5. Так здійснюється безконтактне відключення дуги по закінченні заданого часу її горіння.

Максимальний тепловий імпульс в активно-індуктивних колах має місце під час розмикання кола [7], тому моделювання дуги здійснювалось розведенням попередньо замкнутих електродів.

Отже, очікуваний струм дуги повинен визначатися величиною струму при закороченому вимикачем 4 дугоутворювачі.

Струм при закорочених контактах дугоутворювача зв'язаний зі струмом дуги наступним співвідношенням [4]

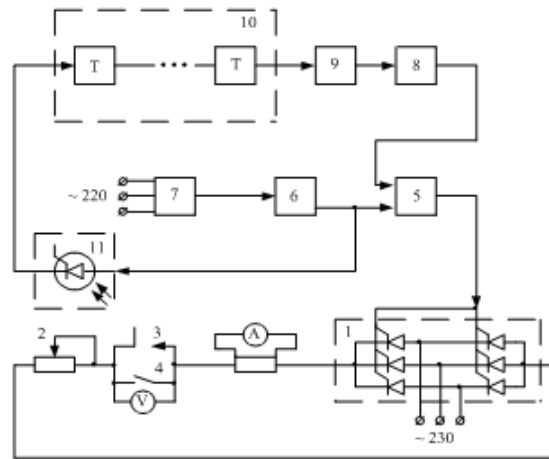


Рис. 1. Блок-схема випробувального стенду: 1–перетворювач ВТПЕ-500-275; 2– силовий змінний опір; 3–дугоутворювач; 4–вимикач; 5–елемент збігу; 6–одновібратор; 7–генератор імпульсів; 8–тригер; 9–блок затримки; 10–перелічувально-імпульсний блок; 11–датчик виникнення дуги

$$I_3 = I_0 \frac{U}{U - \Delta U_0}, \quad (1)$$

де I_3 - струм при закороченому дугоутворювачі, А; I_0 - струм дуги, А; U - напруга живлення, В; ΔU_0 - падіння напруги в дузі, В.

Для визначення струму дуги необхідно знати її вольт-амперні характеристики в переході мідь-сталь при різних відстанях між електродами дугоутворювача та його живленні від тягового перетворювача типу ВТПЕ-500-275, які до теперішнього часу не були визначені.

Кореляційний аналіз значень падінь напруги в дузі і відповідних струмів дуги [8] дозволив встановити регресивну вольт-амперну залежність, яка визначається виразом

$$\Delta U_0 = \frac{A}{I_0^2} + \frac{B}{I_0} + C. \quad (2)$$

Значення постійних коефіцієнтів, обчислених методом найменших квадратів, та індекси корекції при різних довжинах дуги, наведені в табл. 1.

Таблиця 1

Значення постійних коефіцієнтів

Довжина дуги, мм	Постійні коефіцієнти			Індекс кореляції
	A	B	C	
5	-29,19	72,95	30,05	0,992
10	22,58	175,05	37,21	0,998
15	1366,1	278,62	38,98	0,998
20	3947,1	516,9	43,83	0,990
25	404610	6684,6	78,91	0,956
30	1112530	16381,4	114,98	0,996

Індекси кореляції отриманих регресивних залежностей близькі до одиниці, що свідчить про високу ступінь щільності зв'язку між значеннями падіння напруги в дузі і відповідними струмами дуги.

На рис. 2 за виразом (2) побудовані вольт-амперні характеристики електричної дуги при різних її довжинах. Вони мають явно визначений нелінійний характер при струмах дуги менше за 60 А. По вольт-амперній характеристиці визначались падіння напруги в дузі і після цього за виразом (1) вираховувався струм при закороченому дугоутворювачі, який необхідно виставити для отримання заданого значення струму дуги.

Як видно з рис. 2, мінімальний струм, при якому спостерігається стійке горіння дуги, складає 2-3 А при відстані між електродами дугоутворювача (довжині дуги) 5-10 мм. Крива 1 являє собою залежність граничних мінімальних струмів дуги і відповідних падінь напруги, при який дуга горить стійко.

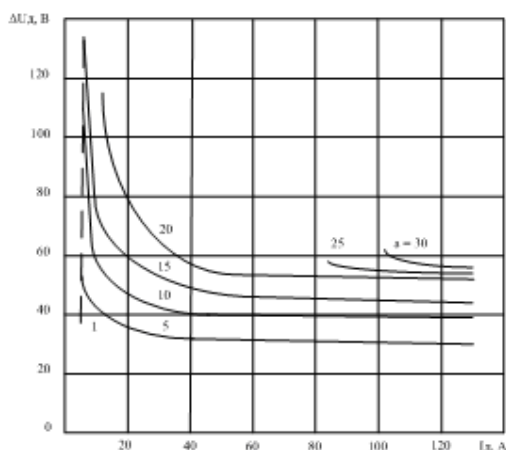


Рис. 2. Вольт-амперні характеристики електричної дуги: 1 - граничні мінімальні струми дуги, здатні підтримувати її горіння; *a* - довжина дуги, мм

При менших струмах спостерігається обрив дуги. При відстані між електродами дугоутворювача 25 та 30 мм дуга займається при значно більших струмах (85 А та 110 А відповідно) і характеризується значною нестійкістю, а при відстані більш за 30 мм має місце обрив дуги в усьому діапазоні струмів. Тому дослідження проводились при довжині дуги 20 мм. При малих струмах дуги, коли при відстані між електродами дугоутворювача 20 мм відбувався обрив дуги, дослідження проводились при довжині дуги 10-15 мм.

Досліджувались найбільш легкозаймисті матеріали, що знаходяться у відкотних виробках: промаслена бумага броньованого кабелю [9], дрібні дерев'яні тріски та найбільш небезпечні з точки зору займання - ВР.3 ВР, що застосовуються в шахтах, випробувались на займання ВР, які найбільш часто застосовуються під час масових вибухів та транспортуються контактними електровозами - Україніт - АНФО, грануліт - К та граммоніт 79/21. Дослідження проводились при мінімально можливій відстані між дугою та зразками, що випробувались (1,5-2 мм), та останні розташовувались над дугою. ВР, в наслідок того, що їм властива сипучість, розташовувались на тій же відстані під дугою. Граничними вважались такі співвідношення між струмом дуги і часом її горіння, при яких не відбувається займання, але незначне збільшення одного з параметрів призводить до займання зразків матеріалів, що випробувались. Повторні включення при тих самих значеннях струму дуги і часу її горіння складали не менше 100 при струмах дуги до 800 А и не менше 50 при струмах дуги більше 800 А, що забезпечить достовірність не займання 0,99 та 0,98 відповідно [10].

Кореляційний аналіз співвідношень значень струмів дуги і відповідних їм граничних пожежобезпечних значень часу горіння дуги дозволив встановити регресивну пожежобезпечну струмочасову залежність, обчислену методом найменших квадратів, яка визначається виразом

$$I_d = \exp[A \exp(B \ln^2 t_d + C \ln t_d)], \quad (3)$$

де t_d - граничне пожежобезпечне значення часу горіння дуги, с.

В табл. 2 наведено значення коефіцієнтів A, B, C для матеріалів, що досліджувались. При цьому індекс кореляції регресивних залежностей складає не менше 0,983.

Таблиця 2

Значення коефіцієнтів A, B, C

Постійні коефіцієнти	Промаслена бумага кабелю	Дрібні дерев'яні тріски	Граммоніт 79/21	Україніт-АНФО	Грануліт-К	Пожежобезпечна характеристика
A	10,40	27,14	36,08	115,41	21,31	11,41
B	-0,123	-0,058	0,015	0,010	0,0007	-1,124
C	-0,328	-0,134	-0,372	-0,670	-0,183	-0,239

На рис. 3 наведено в логарифмічних координатах граничні струмочасові характеристики займання промасленої бумаги броньованого кабелю (крива 1), дрібної дерев'яної тріски (крива 2), граммоніту 79/21, україніту - АНФО та грануліту - К (криві 3,4,5 відповідно), побудовані за виразом (3).

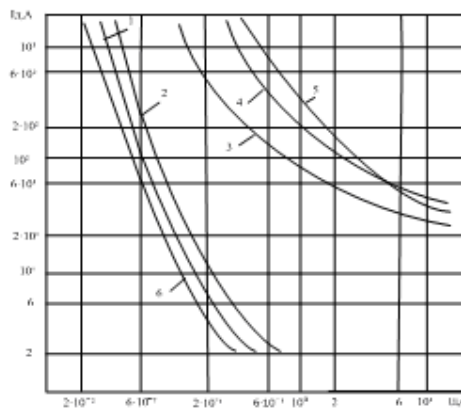


Рис. 3. Граничні струмочасові характеристики: 1 – промасленої папи броньованого кабелю; 2 – дерев'яної тріски; 3,4,5 – грамоніту 79/21, Україніту-АНФО, грануліту-К відповідно; 6 – пожежобезпечна

Як видно з рис. 3, при струмах дугового замикання більше 1000 А час займання промасленої папи броньованого кабелю складає 30 мс, дерев'яної тріски - 40 мс, ВР - не менше 100 мс.

Найбільш легкозаймистим матеріалом є промаслена папа броньованого кабелю, тому струмочасова характеристика засобів захисного вимикання шахтних контактних мереж повинна бути не вище характеристики 1.

В якості пожежобезпечної струмочасової характеристики слід рекомендувати характеристику 6, яка отримана шляхом введення півторакратного запасу за часом існування дуги відносно характеристики 1.

Таким чином, в результаті експериментальних досліджень визначені наступні основні вимоги щодо засобів захисного вимикання шахтних контактних мереж від пожежонебезпечних дугових замикань:

струм дугового замикання, що повинен вимикатися, складає 2 А, тобто опір спрацювання при номінальній напрузі контактної мережі повинен бути не менше 140 Ом;

час відключення контактної мережі може бути залежним від величини струму дугового замикання у відповідності з отриманою пожежобезпечною струмочасовою характеристикою;

у разі незалежного часу відключення засобів захисного вимикання повний час відключення контактної мережі не повинен перевищувати 20 мс.

Висновки та напрямки подальших досліджень. Отримана експериментальна струмочасова пожежобезпечна залежність визначає основні вимоги до засобів захисного вимикання, реалізація яких унеможливило б займання при виникненні дугових замикань в відкотних виробках залізрудних шахт.

Подальші дослідження повинні бути направлені на розроблення засобів захисного вимикання шахтних контактних мереж, які відповідають визначеним вимогам.

Список літератури

1. Пироженко А.В. К вопросу защиты шахтных контактных сетей от пожароопасных утечек тока // Безопасность и надежность электроснабжения горнорудных предприятий: Тез. докл. и сообщ. III Всесоюзной научн. – техн. конф., 13-15 окт. 1982г. – Днепропетровск, 1982.- С.68-70.
2. Alcook K. Safe high speed underground transport.// The Mining Engineer. - 1985. v. 144, № 284.- P. 638- 643.
3. Сумин И.Ф. Повышение пожарной безопасности рудничных тяговых сетей.- В кн.: Техника безопасности в угольной промышленности.- М.: Госгортехиздат, 1963, С.214-217.
4. Сидоренко И.Г. Токовременные характеристики защиты рудничных тяговых сетей от токов короткого замыкания и утечки, опасных в пожарном отношении. – Горная электромеханика и автоматика. 1967, С.19-27.
5. Славик И. Конструирование силовых полупроводниковых преобразователей: Пер. с чешск. - М.: Энергоатомиздат, 1989.-222с.
6. Ерыгин А.Т., Трембицкий А.Л., Яковлев В.П. Методы оценки искробезопасности электрических цепей. - М.- Наука, 1984.-222с.
7. Буткевич Г.В. Дуговые процессы при коммутации электрических цепей.- М.: Высшая школа: 1967.- 195с.
8. Езекиэл М., Фокс К.А. Методы анализа корреляций и регрессий: Пер. с англ.- М.: Статистика, 1966.- 342с.
9. Смелков Г.И. Пожарная опасность электропроводок при аварийных режимах.- М.: Энергоатомиздат, 1984.- 184 с.
10. Джонсон Н., Лион Ф. Статистика и планирование эксперимента в технике и науке. Методы обработки данных: Пер. с англ. - М.: Мир, 1980. - 610с.

Рукопис подано до редакції 22.03.16