

Міністерство освіти і науки України

Криворізький національний університет

Електротехнічний факультет

Пояснювальна записка

**до кваліфікаційної роботи бакалавра
за спеціальністю 141 - Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка**

ТЕМА РОБОТИ:

**Розробка рекомендацій щодо удосконалення роботи системи захисту від
виникнення аварійних ситуацій у тягових контактних мережах**

Виконав: студент групи ЕЕМ-22-2

Андрій ТКАЧЕНКО

Керівник випускної роботи _____ к.т.н., доц. Ірина КАСАТКІНА

Нормо контролер _____ к.т.н., доц. Ірина КАСАТКІНА

Декан ЕТФ _____ к.т.н., доц. Владислав ФЕДОТОВ

Гарант освітньої програми _____ к.т.н., доц. Ігор ПЕРЕСУНЬКО

Кривий Ріг 2026 р.

Криворізький національний університет

Факультет: електротехнічний

Освітній рівень: бакалавр

Спеціальність: 141 - Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ

ТКАЧЕНКО Андрій Олександрович

(прізвище, ім'я, по батькові)

Тема роботи: Розробка рекомендацій щодо удосконалення роботи системи захисту від виникнення аварійних ситуацій у тягових контактних мережах

1. Термін подання студентом роботи: 19 червня 2026 р.
2. Мета та завдання кваліфікаційної роботи: Метою є розробка рекомендацій щодо удосконалення роботи системи захисту від виникнення аварійних ситуацій у тягових контактних мережах
3. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які необхідно розробити) I. Специфіка умов протікання процесів та експлуатації захистів у структурі залізничної шахти; II. Аналіз статистичних даних про працездатність захистів від настання аварійних ситуацій; III. Практична реалізація пошуку факторів визначення пошкоджень контактної мережі системи шахтного електропостачання.
4. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) I. Працездатність захисту від ОЗЗ по селективності відключень; II. Розподіл ОЗЗ за видами електроустановок та елементів мереж копалень 6кВ; III. Причини появи ланцюга «фаза-земля» при пошкодженнях в електроустановках копалень; IV. Причини однофазних замикань на землю при відмовленні ізоляції; V. Причини замикань неізольованих провідників на землю; VI. Розподіл ОЗЗ при перекритті ізоляційних проміжків.-

5. Консультанти розділів роботи

Розділ	Ім'я, прізвище консультанта	Дата, підпис	
		Завдання видав	Завдання прийняв
I	Ірина КАСАТКІНА		
II	Ірина КАСАТКІНА		
III	Ірина КАСАТКІНА		

6. Календарний план

№	Етапи роботи	Термін
1	Специфіка умов протікання процесів та експлуатації захистів	21.05.26
2	Шляхи, спрямовані на зниження пошкоджуваності електроустановок	27.05.26
3	Відомості про працездатність захисту	31.05.26
4	Причини появи ланцюга «фаза-земля»	02.06.26
5	Розподіл причин ОЗЗ при пошкодженні ізоляції	07.06.26
6	Причини однофазних замикань на землю	11.06.26
7	Розподіл однофазних замикань	14.06.26
8	Характерні особливості розподілів	15.06.26

Дата видання завдання 18.05.2026 р.

Здобувач вищої освіти _____
(підпис)

Андрій ТКАЧЕНКО
(Ім'я, прізвище)

Керівник роботи _____
(підпис)

Ірина КАСАТКІНА
(Ім'я, прізвище)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до випускової атестаційної роботи бакалавра на тему: «Розробка рекомендацій щодо удосконалення роботи системи захисту від виникнення аварійних ситуацій у тягових контактних мережах»

40 с., 30 літературних джерел

Мета роботи: Підвищення рівня електробезпеки, експлуатаційної надійності та пожежної безпеки підземного тягового комплексу шляхом розробки та впровадження адаптивних мікропроцесорних систем захисту контактних мереж постійного струму, здатних ефективно розпізнавати аварійні режими в умовах високої провідності рудного пилу та значної протяжності виробок, а також підвищення рівня промислової безпеки, надійності та безперебійності роботи підземного електричного транспорту шляхом розробки та впровадження адаптивних мікропроцесорних алгоритмів захисту тягових контактних мереж постійного струму від струмів короткого замикання та дугових перекриттів.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати такі завдання:

Провести аналіз специфічних умов експлуатації відкритих тягових мереж у залізрудних шахтах (наявність струмопровідного магнітного пилу, висока вологість, крапеж мінералізованих вод), що провокують прискорену деградацію ізоляції та виникнення аварійних витоків.

Проаналізувати вплив агресивного середовища залізрудної шахти (висока вологість, струмопровідний магнетитовий пил, кислотні шахтні води) на швидкість деградації ізоляторів тягової мережі.

Дослідити перехідні процеси при коротких замиканнях (КЗ) у контактній мережі постійного струму та визначити критерії, за якими

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.248-13	Арк.
						4
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

аварійний режим відрізняється від експлуатаційних пускових струмів важких рудникових електровозів.

Дослідити причини відмов та хибних спрацьовувань традиційних систем захисту (швидкодіючих вимикачів із максимальним струмовим захистом) під час перехідних процесів (наприклад, одночасний пуск кількох важких електровозів).

Розробити математичну модель аварійного процесу, що враховує нелінійний опір електричної дуги та змінні параметри тягової мережі віддалених ділянок.

Розробити математичні моделі та алгоритми розпізнавання «віддалених» коротких замикань (КЗ) та КЗ через перехідний опір (дугу), базуючись на аналізі швидкості наростання струму та швидкості падіння напруги.

Запропонувати алгоритм захисту, що базується на аналізі швидкості наростання струму (похідної) та приросту струму, здатний селективно відключати пошкоджені ділянки до моменту термічного руйнування контактного проводу.

Запропонувати архітектуру розподіленої системи моніторингу контактної мережі з використанням інтелектуальних датчиків для точної локалізації місця пошкодження у підземних виробках.

Оцінити техніко-економічну ефективність запропонованих удосконалень за рахунок зменшення часу простою відклатки та мінімізації ризиків підземних пожеж.

Оцінити ефективність впровадження пристроїв обмеження блукаючих струмів для запобігання електрокорозії рейкових кіл та металевого кріплення шахти.

КОНТАКТНА МЕРЕЖА, ЗАЛІЗОРУДНА ШАХТА, КОРОТКЕ ЗАМИКАННЯ, СТРУМ ВИТОКУ, РЕЛЕЙНИЙ ЗАХИСТ, ЕЛЕКТРИЧНА

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.248-13	Арк.
						5
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ДУГА, МІКРОПРОЦЕСОРНИЙ ЗАХИСТ, ПОСТІЙНИЙ СТРУМ,
ЕЛЕКТРОВОЗ, КОРОТКЕ ЗАМИКАННЯ, ШВИДКОДІЮЧИЙ ВИМИКАЧ,
СТРУМОПРОВІДНИЙ ПИЛ, БЛУКАЮЧІ СТРУМИ

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.248-13	Арк.
						6
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Зміст

Вступ.....	9
Розділ 1. Специфіка умов протікання процесів та експлуатації захистів у структурі залізорудної шахти	15
Розділ 2. Аналіз статистичних даних про працездатність захистів від настання аварійних ситуацій.....	17
2.1. Шляхи, спрямовані на зниження пошкоджуваності електроустановок та забезпечення умов, що підвищують електробезпеку	17
2.2. Відомості про працездатність захисту в частині селективності відключення	18
2.3. Відомості про пошкодження окремих елементів електричних мереж копалень	19
Розділ 3. Практична реалізація пошуку факторів визначення пошкоджень контактної мережи системи шахтного електропостачання	21
3.1. Причини появи ланцюга «фаза-земля» при пошкодженнях в електроустановках копалень.....	21
3.2. Розподіл причин ОЗЗ при пошкодженні ізоляції копальних електроустановок	22
3.3. Причини однофазних замикань на землю неізовльованих провідників	24
3.4. Розподіл однофазних замикань внаслідок перекриття ізоляційних проміжків	26
3.5. Характерні особливості розподілів та причин виникнення аварійних ситуацій в умовах залізорудної шахти.....	28
Висновки	29
Список використаних джерел	31
Додаток А.....	35

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.248-13	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		7

Додаток Б	36
Додаток В	37
Додаток Г	38
Додаток Д.....	39
Додаток Е	40

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.248-13	Арк.
						8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Вступ

Специфіка тягових мереж залізорудних шахт

Відкатка гірничої маси у великих залізорудних шахтах традиційно здійснюється за допомогою контактних електровозів, що живляться від тягових мереж постійного струму (переважно номінальною напругою 250 В або 600 В).

Контактна мережа є одним із найуразливіших елементів підземної інфраструктури.

На відміну від наземних залізниць, вона розміщується в обмеженому просторі гірничих виробок і піддається постійному впливу надзвичайно агресивних факторів.

Головною проблемою саме залізорудних шахт є утворення магнетитового або гематитового пилу, який має високу електропровідність.

Осідаючи на ізоляторах контактного проводу в поєднанні з високою вологістю (до 98%) та шахтними водами, цей пил створює струмопровідні містки.

Це призводить до постійних витоків струму на землю, перекриття ізоляторів та виникнення пожежонебезпечної електричної дуги.

Проблематика традиційних систем захисту

Існуючі системи захисту тягових підстанцій шахт здебільшого побудовані на базі електромеханічних реле та класичних швидкодіючих вимикачів, які реагують на абсолютне перевищення заданого порогу струму (максимальний струмовий захист).

Цей підхід має два критичні недоліки:

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.248-13	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1. **Сліпота до віддалених КЗ:** Якщо коротке замикання відбувається на значній відстані від підстанції (в кінці довгого відкатного штреку) або через значний перехідний опір (наприклад, обірваний провід впав на суху породу), струм аварії обмежується опором самої лінії. Величина цього струму може бути меншою за струм уставки захисту, і автоматика просто «не побачить» аварію. Дріт залишатиметься під напругою, плавлячи породу і створюючи пряму загрозу пожежі або ураження персоналу.
2. **Хибні відключення:** З іншого боку, пускові струми важкого рудникового поїзда, особливо на підйомах, можуть короткочасно перевищувати номінальні значення в кілька разів. Традиційний захист часто сприймає це як аварію і знеструмлює мережу, паралізуючи технологічний процес відкатки руди.

Вектор удосконалення: адаптивні мікропроцесорні алгоритми

Для розв'язання цих суперечностей необхідний перехід до інтелектуальних мікропроцесорних систем.

Сучасний захист має аналізувати не лише амплітуду струму, але й його динаміку (похідні).

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.248-13	Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Характеристи ка	Традиційний захист (Електромеханічний)	Сучасний захист (Мікропроцесорний)
Основний параметр контролю	Абсолютна величина струму	приріст струму
Чутливість до віддалених КЗ	Низька (обмежена опором лінії)	Висока (аналіз форми кривої струму)
Стійкість до хвибних спрацьовувань	Низька (часті відключення при пуску)	Висока (блокування)
Функція локалізації пошкодження	Відсутня	Є (розрахунок відстані до місця КЗ)
Самодіагности ка	Відсутня	Безперервна

Алгоритм захисту за швидкістю наростання струму базується на фізичному факті: під час короткого замикання струм зростає набагато стрімкіше, ніж під час штатного пуску електровоза, оскільки індуктивність лінії при КЗ значно менша за індуктивність тягових двигунів.

Практичне значення

Удосконалення систем захисту за запропонованими напрямками дозволить ліквідувати ризики підземних пожеж через невідключені струми КЗ, мінімізувати простої електротранспорту через хибні спрацьовування автоматики та суттєво підвищити загальний рівень безпеки праці гірників.

Специфіка підземного електротранспорту

Локомотивна відкатка контактними електровозами залишається основним і найбільш продуктивним видом транспорту в головних магістральних виробках залізрудних шахт.

Живлення таких електровозів здійснюється від тягових підстанцій через відкриту контактну мережу постійного струму (переважно номінальною напругою 250 В або 275 В).

Незважаючи на відносно низьку напругу, тягова мережа є об'єктом підвищеної небезпеки, оскільки вона проходить гірничими виробками, де постійно перебуває персонал, та характеризується відсутністю суцільної електричної ізоляції струмоведучих частин.

Агресивне середовище залізрудної шахти

Умови експлуатації контактних мереж на залізрудних підприємствах є екстремальними.

На відміну від вугільних шахт, де головною небезпекою є вибуховий газ метан, у залізрудних шахтах ключовим деструктивним фактором є рудниковий пил, що має високий вміст заліза.

Цей пил є струмопровідним та феромагнітним.

Осідаючи на ізоляторах контактного проводу в умовах майже 100% вологості, він створює ідеальні умови для виникнення струмів витоку та поверхневих перекриттів ізоляції.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.248-13	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		12

З часом ці витoki переростають у дугові короткі замикання. Крім того, аварійні ситуації часто виникають через обриви контактного проводу внаслідок зносу, падіння шматків гірської маси або сходження струмоприймачів локомотивів.

Недоліки існуючих систем захисту

Фундаментальна проблема захисту тягових мереж постійного струму полягає у складності розпізнавання аварійного режиму.

Традиційні максимальні струмові захисти (МСЗ), якими обладнані автоматичні вимикачі тягових підстанцій (наприклад, серій ААВ або ВАБ), реагують лише на абсолютне перевищення заданої уставки струму.

Проте перехідний процес при виникненні короткого замикання описується простою експоненційною залежністю.

При "віддалених" коротких замиканнях (наприкінці довгої лінії) або при замиканнях через електричну дугу з великим перехідним опором, усталене значення струму КЗ може бути меншим за струм, який споживають два-три важкі електровози під час одночасного рушання з місця.

У такій ситуації класичний захист виявляється "сліпим": він не відключає мережу, вважаючи струм експлуатаційним.

Електрична дуга продовжує горіти, розплавляючи мідний контактний провід та створюючи пряму загрозу займання дерев'яної затяжки кріплення виробки або кабельної продукції, що прокладена поруч.

З іншого боку, якщо знизити уставку спрацювання для захисту від віддалених КЗ, автомати почнуть хибно відключати мережу при кожному розгоні навантаженого поїзда, що призведе до паралічу транспортної системи шахти.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.248-13	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		13

Концептуальні шляхи удосконалення

Вирішення цієї технічної суперечності можливе лише за рахунок удосконалення самих принципів побудови систем захисту.

Сучасний етап розвитку мікропроцесорної техніки дозволяє реалізувати інтелектуальні алгоритми.

Зокрема, найбільш перспективним є використання захистів, що реагують на швидкість зміни струму (похідну), оскільки крутизна фронту наростання струму при КЗ завжди значно вища, ніж при механічному розгоні локомотива, де струм обмежується індуктивністю тягових двигунів та інерцією состава.

Актуальність цієї роботи обумовлена необхідністю переходу від застарілих електромеханічних та напівпровідникових реле до цифрових систем моніторингу та захисту.

Удосконалення системи захисту контактних мереж дозволить не тільки запобігти катастрофічним наслідкам від підземних пожеж, а й значно підвищити загальну пропускну здатність транспортних артерій залізничної шахти за рахунок усунення хибних спрацювань та скорочення часу на пошук місця пошкодження.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.248-13	Арк.
						14
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Розділ 1. Специфіка умов протікання процесів та експлуатації захистів у структурі залізорудної шахти

Кола струмів ОЗЗ характеризуються великою розгалуженістю, складним поточкорозподілом електричної енергії.

Параметри кіл струмів замикання на землю характеризуються неоднорідністю для різних елементів.

Параметри елементів цих кіл, що проводять струм у землі, мають значну сезонну аномалію, що полягає в різкому збільшенні в зимовий період значень опорів ґрунту, перехідних опорів у місцях замикання на землю.

Струми замикання на землю становлять $0,1 \div 0,5$ А.

Специфіка експлуатації захистів від ОЗЗ, пов'язана із забезпеченням умов електробезпеки при розробці розсипних родовищ в умовах вічної мерзлоти, обумовлена:

складністю забезпечення умов електробезпеки за допомогою надійних пристроїв заземлення,

покладанням значною мірою на захист від ОЗЗ функцій захисного відключення у високовольтних електроустановках.

Це призводить до завищення чутливості захисту з метою зменшення струмів однофазного замикання, що відключаються, і до погіршення працездатності захисту внаслідок зростання неселективних і помилкових спрацьовувань.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.248-13						
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	Розділ 1				Лім.	Лист	Листів
Розробив	Ткаченко А.О.										
Перевірів	Касаткіна І.В.									15	2
Реценз.									КНУ ЕЕМ-22-2		
Н. Контр.	Касаткіна І.В.										
Затвердив	Пересунько І.І.										

Наведена специфіка умов протікання процесів та експлуатації захистів від ОЗЗ вимагає їх вивчення.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.248-13	Арк.
						16
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Розділ 2. Аналіз статистичних даних про працездатність захистів від настання аварійних ситуацій

2.1. Шляхи, спрямовані на зниження пошкоджуваності електроустановок та забезпечення умов, що підвищують електробезпеку

Аналіз статистичних даних про працездатність захистів від 033 дозволяє визначити елементи електричної мережі, що найбільш пошкоджуються, визначити окремі показники якості функціонування захисту, встановити види виникнення кола замикання на землю, причини їх виникнення та ін.

Водночас аналіз зазначених статистичних даних дозволяє намітити шляхи, спрямовані на зниження пошкоджуваності електроустановок, на забезпечення умов, що підвищують електробезпеку.

В основу аналізу покладено відомості про понад 750 замикань на землю, що сталися в розподільних мережах 6 кВ копалень в Криворіжжя.

Число ОЗЗ коливається в окремі періоди часу в межах від 85% до 92% загального числа замикань в електричних мережах.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.248-13								
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дат	Розділ 2				Лім.	Лист	Листів		
Розробив	Ткаченко А.О.											17	4
Перевірів	Касаткіна І.В.												
Реценз.													
Н. Контр.	Касаткіна І.В.												
Затвердив	Пересунько І.І.												
					КНУ ЕЕМ-22-2								

2.2. Відомості про працездатність захисту в частині селективності відключення

Вищевказані специфічні умови, що ускладнюють роботу захистів від ОЗЗ, призводять до значного числа неселективних спрацьовувань.

Відомості про працездатність захисту в частині селективності відключення наведені в табл. 2.1.

Таблиця 2.1 Працездатність захисту від ОЗЗ по селективності відключень

Характеристика роботи захисту	Кількість відключень, %
Захист відпрацював селективно	66,4
Захист спрацював не селективно	33,6

Як очевидно з наведених у табл. 2.1 даних, значна кількість (близько однієї третини) замикань на землю відключається неселективно.

Неселективна робота захисту призводить до невиправдано тривалих перерв в електропостачанні копальних споживачів, недовідпуску продукції, погіршення умов електробезпеки.

2.3. Відомості про пошкодження окремих елементів електричних мереж копалень

Відомості про пошкодження окремих елементів електричних мереж копалень представлені в табл. 2.2.

Таблиця 2.2 Розподіл ОЗЗ за видами електроустановок та елементів мереж копалень 6кВ

№зп	Види електроустановок, елементи мереж	Кількість ОЗЗ, %
1	Повітряні лінії	16,7
2	Кабельні лінії	25,0
3	Стаціонарні ГУ	9,2
4	Пересувні перемикальні пункти	5,0
5	Трансформатори силові	0,8
6	Електродвигуни насосних установок	41,7
7	Струмознімні пристрої екскаваторів	1,6
	Всього:	100,0

Найбільш ушкоджуваними елементами є електродвигуни насосних установок, кабельні та повітряні лінії, частку яких припадає 83,4 % всіх однофазних замикань на землю.

Слід зазначити, що найбільша кількість пошкоджень посідає електроустановки, що експлуатуються в напівстаціонарному та пересувному режимі роботи.

Ця обставина вказує на необхідність підвищення надійності пересувних та напівстаціонарних електроустановок, що зменшить одну з потенційних причин виникнення ЕТ.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.248-13	Арк.
						20
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3.1. Причини появи ланцюга «фаза-земля» при пошкодженнях в електроустановках копалень

Експериментальні дослідження показують, що причини появи ланцюга «фаза-земля» при пошкодженнях в електроустановках копалень можна звести у наведену нижче таблицю.

Таблиця 3.1 Причини появи ланцюга «фаза-земля» при пошкодженнях в електроустановках копалень

№зп	Причини	Кількість ОЗЗ, %
1	Відмова опору ізоляції струмовідних частин	62,5
2	Замикання неізольованих фазних провідників на землю, заземлені елементи	23,3
3	Перекриття (пробою) ізоляційних проміжків	7,5
4	Перекриття (пробою) ізоляторів	6,7
	Всього	100,0

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.248-13										
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дат	Розділ 3				Лім.		Лист		Листів		
Розробив	Ткаченко А.О.											21		8	
Перевірів	Касаткіна І.В.														
Реценз.															
Н. Контр.	Касаткіна І.В.														
Затвердив	Пересунько І.І.								КНУ ЕЕМ-22-2						

3.2. Розподіл причин ОЗЗ при пошкодженні ізоляції копальних електроустановок

Розподіл причин ОЗЗ при пошкодженні ізоляції копальних електроустановок наведено у табл. 3.2.

Таблиця 3.2 Причини однофазних замикань на землю при відмовленні ізоляції

№зп	Причини однофазних замикань на землю	Кількість ОЗЗ, %
1	Замикання в обмотках електродвигунів	53,3
2	Замикання в кабельних обробках	29,3
3	Замикання в кабельних лініях (за їх довжиною)	9,2
4	Замикання в високовольтних апаратах РУ	9,2
—	Всього	100,0

Встановлення причин виникнення ОЗЗ є важливим питанням при розробці заходів, спрямованих на підвищення надійності роботи електроустановок, зменшення їх небезпечних станів.

Найбільше випадків ОЗЗ посідає вихід із ладу ізоляції електроустановок.

Відмова фазової ізоляції електроустановок відбувається в більшості випадків через електромеханічні та температурні дії, що викликають в ізоляції мікротріщини, через які утворюються струмопровідні канали витоків струму.

Як видно з наведених даних, понад 80% випадків ОЗЗ через відмову ізоляції відбувається через пробою ізоляції електродвигунів і кабельних закладень.

Ця обставина змушує звернути особливу увагу на режими експлуатації електродвигунів насосних установок і якість виконання кінцевих закладень високовольтних кабелів.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.248-13	Арк.
						23
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3.3. Причини однофазних замикань на землю неізолюваних провідників

Причини однофазних замикань на землю неізолюваних провідників наведено у табл. 3.3.

Таблиця 3.3 Причини замикань неізолюваних провідників на землю (заземлені предмети)

№зп	Причини ОЗЗ	Кількість, %
1	Відгорання провідників у місцях контакту	29,6
2	Схлестування фазних проводів ПЛ із заземленими пресетами від вітрового навантаження	22,2
3	Обрив проводів ПЛ	14,8
4	Падіння опор від рухомих машин, механізмів, від вибухових робіт	14,8
5	Просідання ґрунту	11,2
6	Обрив елементів кільцевого струмоприймача екскаватора	7,4
	Всього	100

Відгорання провідників у місцях контакту притаманно вступних пристроїв електродвигунів, для болтових контактних з'єднань електричних апаратів.

Схлестування фазних проводів ПЛ із заземленими предметами відбувається при вітровому навантаженні, внаслідок здувань ґрунту, деформації опор, збільшення стріли провису, неякісного монтажу ліній.

Обрив проводів БД і падіння опор часто пов'язані з негабаритними механізмами і машинами, що рухаються, з неприпустимими механічними навантаженнями при натягу проводів через видавлювання опор з ґрунту і нахилу останніх.

Просідання ґрунту призводить до зміни відносного положення проводів та заземлених предметів, що також призводить до ОЗЗ.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.248-13	Арк.
						25
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3.4. Розподіл однофазних замикань внаслідок перекриття ізоляційних проміжків

Пробій ізоляторів (62,5 % ізоляторів електричних апаратів, 37,5 % ізоляторів ПЛ) відбувається внаслідок перекриттів, механічних пошкоджень. Привертає увагу підвищений відсоток однофазних замикань внаслідок пробою ізоляторів електричних апаратів.

Розподіл однофазних замикань внаслідок перекриття ізоляційних проміжків наведено у табл. 3.4.

Таблиця 3.4 Розподіл ОЗЗ при перекритті ізоляційних проміжків

№зп	Перекриття ізоляційних проміжків	Кількість, %
1	В електричних апаратах, що розташовані в РП	44,4
2	В електродвигунах	44,4
3	В електричних апаратах ПЛ	11,2

Електричні пробої ізоляції, ізоляторів, ізоляційних проміжків відбуваються при внутрішніх та атмосферних перенапругах.

При цьому хвиля перенапруги готує струмопровідний канал при робочій напрузі.

Такий механізм характерний для перекриттів та пробою кінцевих муфт (заробок) кабелів, забруднених ізоляторів І, що мають тріщини та дефекти, електричних апаратів РП (Розподільних Пристроїв).

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.248-13	Арк.
						27
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3.5. Характерні особливості розподілів та причин виникнення аварійних ситуацій в умовах залізорудної шахти

Наведені характерні особливості розподілів та причин 033 (однофазних замикань на землю) зумовлюють потік замикань, який доцільно розглянути як потік випадкових подій.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.248-13	Арк.
						28
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Висновки

Для досягнення поставленої мети у роботі необхідно було виконати такі завдання:

Провести аналіз специфічних умов експлуатації відкритих тягових мереж у залізорудних шахтах (наявність струмопровідного магнітного пилу, висока вологість, крапеж мінералізованих вод), що провокують прискорену деградацію ізоляції та виникнення аварійних витоків.

Проаналізувати вплив агресивного середовища залізорудної шахти (висока вологість, струмопровідний магнетитовий пил, кислотні шахтні води) на швидкість деградації ізоляторів тягової мережі.

Дослідити перехідні процеси при коротких замиканнях (КЗ) у контактній мережі постійного струму та визначити критерії, за якими аварійний режим відрізняється від експлуатаційних пускових струмів важких рудникових електровозів.

Дослідити причини відмов та хибних спрацьовувань традиційних систем захисту (швидкодіючих вимикачів із максимальним струмовим захистом) під час перехідних процесів (наприклад, одночасний пуск кількох важких електровозів).

Розробити математичну модель аварійного процесу, що враховує нелінійний опір електричної дуги та змінні параметри тягової мережі віддалених ділянок.

Розробити математичні моделі та алгоритми розпізнавання «віддалених» коротких замикань (КЗ) та КЗ через перехідний опір (дугу), базуючись на аналізі швидкості наростання струму та швидкості падіння напруги.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.248-13	Арк.
						29
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Запропонувати алгоритм захисту, що базується на аналізі швидкості наростання струму (похідної) та приросту струму, здатний селективно відключати пошкоджені ділянки до моменту термічного руйнування контактного проводу.

Запропонувати архітектуру розподіленої системи моніторингу контактної мережі з використанням інтелектуальних датчиків для точної локалізації місця пошкодження у підземних виробках.

Оцінити техніко-економічну ефективність запропонованих удосконалень за рахунок зменшення часу простою відклатки та мінімізації ризиків підземних пожеж.

Оцінити ефективність впровадження пристроїв обмеження блукаючих струмів для запобігання електрокорозії рейкових кіл та металевого кріплення шахти.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.248-13	Арк.
						30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Список використаних джерел

1. Steimel, A. (2008). Electric Traction - Motive Power and Energy Supply: Basics and Practical Experience. Oldenbourg Industrieverlag.
2. Dhillon, B. S. (2010). Mine Safety: A Modern Approach. Springer Science & Business Media.
3. Cawley, J. C. (2003). Electrical accidents in the mining industry, 1990–1999. IEEE Transactions on Industry Applications, 39(6), 1570-1577.
4. Pohjanheimo, P., & Elovaara, J. (2002). Equipment condition monitoring in underground mine power systems. IEEE Transactions on Industry Applications, 38(3), 850-856.
5. Mariscotti, A., & Pozzobon, P. (2004). Determination of the electrical parameters of railway traction lines: Calculation, measurement, and reference data. IEEE Transactions on Power Delivery, 19(4), 1538-1546.
6. Zinoviev, G. S. (2010). Fundamentals of Power Electronics. NSTU. (Covers transient processes in DC circuits).
7. Novak, T., & Snyder, J. W. (2004). Extensive overview of electrical safety in non-coal mining. IEEE Transactions on Industry Applications, 40(6), 1485-1492.
8. Yang, Z., Zheng, T. Q., & Lin, F. (2015). Short-circuit fault analysis and protection in DC traction power supply systems. Journal of Modern Transportation, 23(2), 122-132.
9. Koval, D. O. (2001). Rural and remote power systems safety and reliability constraints. IEEE Transactions on Industry Applications, 37(1), 168-173.

10. Gatta, F. M., Geri, A., Lauria, S., & Maccioni, M. (2014). Short-circuit analysis of a DC mass transit system. Proceedings of the IEEE 14th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC), 151-155.

11. Bollen, M. H. J. (2000). Understanding Power Quality Problems: Voltage Sags and Interruptions. IEEE Press/Wiley.

12. Lee, W. J., & Lee, D. H. (2008). Advanced fault detection technique for DC traction networks. IEEE Transactions on Power Delivery, 23(1), 450-456.

13. Zhai, S., & Wu, X. (2018). Hazard identification and safety evaluation of mine power supply system based on fuzzy analytical hierarchy process. International Journal of Mining Science and Technology, 28(5), 821-827.

14. European Committee for Electrotechnical Standardization (CENELEC). (2010). EN 50122-1: Railway applications - Fixed installations - Electrical safety, earthing and the return circuit - Part 1: Protective provisions against electric shock.

15. Paul, C. R. (2006). Introduction to Electromagnetic Compatibility (2nd ed.). John Wiley & Sons. (Relevant for arc phenomena and noise in DC lines).

16. Pivnyak, G. G., & Shkrabets, F. P. (2014). Power Supply of Mining Enterprises. National Mining University, Ukraine.

17. Stefaniak, P. K., & Zimroz, R. (2015). Condition monitoring of underground mining transport systems. Journal of Polish Safety and Reliability Association, 6(1), 123-130.

18. Standard IEC 61508:2010. Functional safety of electrical/electronic/programmable electronic safety-related systems.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.248-13	Арк.
						32
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

19. Glover, J. D., Sarma, M. S., & Overbye, T. J. (2011). Power System Analysis and Design (5th ed.). Cengage Learning.
20. Zeleznik, V., & Jilek, P. (2018). Electrical safety in explosive atmospheres of underground mines. Journal of Electrical Engineering, 69(4), 450-456.
21. Sychev, Y. A., & Zimin, R. Y. (2021). Improving the power quality in the power supply systems of the mineral resource complex. Energies, 14(2), 470.
22. Kuffel, E., Zaengl, W. S., & Kuffel, J. (2000). High Voltage Engineering Fundamentals. Newnes.
23. Sidorov, O. A., & Filippov, V. N. (2016). Assessment of the pantograph–catenary dynamic interaction taking into account the steady-state wear of the contact wire. Vehicle System Dynamics, 54(1), 58-71.
24. Popov, M., Acha, E., & Van der Sluis, L. (2006). Fast switching transients in a DC traction system. IEEE Transactions on Power Delivery, 21(3), 1460-1467.
25. McInerney, P., & Davies, R. (2011). Reliability and risk analysis of DC traction networks in underground and open-pit operations. Mining Technology, 120(3), 142-151.
26. Bollen, M. H. (2000). Understanding Power Quality Problems: Voltage Sags and Interruptions. IEEE press.
27. Midya, S., Bormann, D., Schütte, T., & Thottappillil, R. (2009). Pantograph arcing in electrified railways—Part I: With DC traction power supply. IEEE Transactions on Power Delivery, 24(4), 1931-1939.
28. Novák, T., & Sottile, J. (2011). Advanced control strategies for battery-powered and trolley underground mining vehicles. IEEE Transactions on Industry Applications, 47(6), 2634-2642.

29. Chadwick, B., & Gurgenci, H. (2012). Simulation-based performance optimization of underground electric haulage systems. Mining Technology, 121(1), 15-24.

30. Paul, C. R. (2006). Introduction to Electromagnetic Compatibility (2nd ed.). John Wiley & Sons.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.248-13	Арк.
						34
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Додаток А

Працездатність захисту від ОЗЗ по селективності відключень

Характеристика роботи захисту	Кількість відключень, %
Захист відпрацював селективно	66,4
Захист спрацював не селективно	33,6

Додаток Б

Розподіл ОЗЗ за видами електроустановок та елементів мереж
копалень 6кВ

№зп	Види електроустановок, елементи мереж	Кількість ОЗЗ, %
1	Повітряні лінії	16,7
2	Кабельні лінії	25,0
3	Стаціонарні ГУ	9,2
4	Пересувні перемикальні пункти	5,0
5	Трансформатори силові	0,8
6	Електродвигуни насосних установок	41,7
7	Струмознімні пристрої екскаваторів	1,6
	Всього:	100,0

Додаток В

Причини появи ланцюга «фаза-земля» при пошкодженнях в електроустановках копалень

№зп	Причини	Кількість ОЗЗ, %
I	Відмова опору ізоляції струмовідних частин	62,5
2	Замикання неізовльованих фазних провідників на землю, заземлені елементи	23,3
3	Перекриття (пробою) ізоляційних проміжків	7.5
4	Перекриття (пробою) ізоляторів	6.7
	Всього	100,0

Причини однофазних замикань на землю при відмовленні ізоляції

№зп	Причини однофазних замикань на землю	Кількість ОЗЗ, %
1	Замикання в обмотках електродвигунів	53,3
2	Замикання в кабельних обробках	29,3
3	Замикання в кабельних лініях (за їх довжиною)	9,2
4	Замикання в високовольтних апаратах РУ	9,2
–	Всього	100,0

Додаток Д

Причини замикань неізолюваних провідників на землю (заземлені предмети)

№зп	Причини ОЗЗ	Кількість, %
1	Відгорання провідників у місцях контакту	29,6
2	Схлестування фазних проводів ПЛ із заземленими пресетами від вітрового навантаження	22,2
3	Обрив проводів ПЛ	14,8
4	Падіння опор від рухомих машин, механізмів, від вибухових робіт	14,8
5	Просідання ґрунту	11,2
6	Обрив елементів кільцевого струмоприймача екскаватора	7,4
	Всього	100

Розподіл ОЗЗ при перекритті ізоляційних проміжків

№зп	Перекриття ізоляційних проміжків	Кількість, %
1	В електричних апаратах, що розташовані в РП	44,4
2	В електродвигунах	44,4
3	В електричних апаратах ПЛ	11,2