

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:

**Адресні рішення для реалізації процесу підвищення надійності елементів
електрообладнання шахтної електровозної відкатки**

Виконав: студент групи ЕЕМ-23ск

Данило ШИМБУЄВ

Керівник випускної роботи _____

д.т.н., проф. Олег СІНЧУК

Нормо контролер _____

д.т.н., проф. Олег СІНЧУК

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

ШИМБУЄВ Данило Євгенійович

(прізвище, ім'я, по батькові)

Тема роботи: Адресні рішення для реалізації процесу підвищення надійності
елементів електрообладнання шахтної електровозної відкатки

1. Термін подання студентом роботи: 19 червня 2026 р.
2. Мета та завдання кваліфікаційної роботи: Метою є розробка рішень для
реалізації процесу підвищення надійності елементів електрообладнання
шахтної електровозної відкатки
3. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які необхідно розробити) I.
Аналіз питання підвищення надійності елементів електрообладнання
шахтної електровозної відкатки; II. Розрахунки для реалізації процесу
підвищення надійності елементів електрообладнання шахтної електровозної
відкатки; III. Практична реалізація рішень щодо процесу підвищення
надійності елементів електрообладнання шахтної електровозної відкатки.
4. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових
креслень) I. Роз'єднувач РТ-600; II. Секційний вимикач (варіант № 1); III.
Секційний вимикач (варіант № 2).

5. Консультанти розділів роботи

Розділ	Ім'я, прізвище консультанта	Дата, підпис	
		Завдання видав	Завдання прийняв
I	Олег СІНЧУК		
II	Олег СІНЧУК		
III	Олег СІНЧУК		

6. Календарний план

№	Етапи роботи	Термін
1	Характеристика елементів електрообладнання шахтної електровозної відкатки	24.05.26
2	Рішення для реалізації процесу підвищення надійності елементів електрообладнання	31.05.26
3	Умови експлуатації	07.06.26
4	Розрахунок тягової підстанції	11.06.26
5	Практична реалізація рішень щодо процесу підвищення надійності елементів електрообладнання шахтної електровозної відкатки	15.06.26

Дата видання завдання 18.05.2026 р.

Здобувач вищої освіти _____
(підпис)

Данило ШИМБУЄВ
(Ім'я, прізвище)

Керівник роботи _____
(підпис)

Олег СІНЧУК
(Ім'я, прізвище)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до випускової атестаційної роботи бакалавра на тему: «Адресні рішення для реалізації процесу підвищення надійності елементів електрообладнання шахтної електровозної відкатки»

40 с., 3 рис., 35 літературних джерел

Мета роботи: Зниження аварійності, мінімізація простоїв підземного транспорту та підвищення безпеки гірничих робіт шляхом обґрунтування, розробки та впровадження комплексу технічних рішень, спрямованих на підвищення експлуатаційної надійності тягового та допоміжного електрообладнання шахтних електровозів, а також обґрунтування та розробка комплексу науково обґрунтованих технічних рішень і модернізаційних заходів, спрямованих на підвищення експлуатаційної надійності, безвідмовності та безпеки елементів силового й захисного електрообладнання шахтного локомотивного транспорту в специфічних та агресивних умовах підземних гірничих виробок.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати такі завдання:

Провести статистичний аналіз відмов та дефектів основних вузлів електрообладнання контактних та акумуляторних електровозів (тягових двигунів, контролерів, захисної апаратури, акумуляторних батарей та струмоприймачів) в умовах діючих шахт.

Провести комплексний аналіз статистичних даних щодо відмов, дефектів та аварійних ситуацій у системі підземного електропостачання та безпосередньо в бортовому електрообладнанні шахтних електровозів.

Дослідити фізико-хімічні механізми деградації електроізоляційних матеріалів та контактних груп під впливом специфічних факторів

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250-22	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		4

середовища (висока вологість, хімічна агресивність шахтних вод, пил, вібраційні навантаження).

Дослідити фізику процесів деградації ізоляційних матеріалів, контактних груп та силових напівпровідникових елементів під сукупним впливом екстремальної вологості, шахтного пилу, вібраційних навантажень та хімічно агресивного середовища.

Розробити математичну модель надійності електрообладнання електровоза як складної системи з метою виявлення "вузьких місць" (найменш надійних елементів).

Розробити ефективні технічні рішення щодо захисту бортової мережі електровоза та тягової контактної мережі від комутаційних та атмосферних перенапруг, а також від струмів витоку та короткого замикання.

Спроекувати та обґрунтувати технічні рішення щодо модернізації вузлів (перехід на твердотільну комутаційну апаратуру, впровадження нових схем безіскрового захисту, покращення волого- та пилозахисту оболонок).

Обґрунтувати параметри та конструктивні особливості модернізованих вузлів струмознімання та елементів секціонування контактної мережі з метою мінімізації дугоутворення та ерозії металу.

Розробити алгоритми та структуру системи безперервного технічного діагностування стану ізоляції та температурного режиму обмоток в процесі експлуатації локомотива.

Запропонувати схеми впровадження безконтактної комутаційної апаратури та інтелектуальних систем безперервного діагностичного моніторингу стану ізоляції обмоток тягових двигунів.

ЕЛЕКТРОВозна ВІДКАТКА, ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ ШАХТ, НАДІЙНІСТЬ СИСТЕМИ, НАДІЙНІСТЬ ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ, ІНТЕНСИВНІСТЬ ВІДМОВ, КОНТАКТНА МЕРЕЖА, ЕКСПЛУАТАЦІЙНИЙ РЕСУРС, ІЗОЛЯЦІЯ ОБМОТОК, КОМУТАЦІЙНА

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250-22	Арк.
						5
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

АПАРАТУРА, АПАРАТИ ЗАХИСТУ, ТЕХНІЧНЕ ДІАГНОСТУВАННЯ,
БЕЗІСКРОВИЙ ЗАХИСТ

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250-22	Арк.
						6
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Зміст

Вступ.....	9
Розділ 1. Аналіз питання підвищення надійності елементів електрообладнання шахтної електровозної відкатки	17
1.1. Характеристика елементів електрообладнання шахтної електровозної відкатки	17
1.2. Рішення для реалізації процесу підвищення надійності елементів електрообладнання шахтної електровозної відкатки	19
1.3. Умови експлуатації щодо надання адресних рішень для реалізації процесу підвищення надійності елементів електрообладнання шахтної електровозної відкатки	21
Розділ 2. Розрахунки для реалізації процесу підвищення надійності елементів електрообладнання шахтної електровозної відкатки	22
2.1. Розрахунок тягової підстанції для реалізації процесу підвищення надійності елементів електрообладнання шахтної електровозної відкатки	22
2.2. Адресні рішення щодо тягових підстанцій для реалізації процесу підвищення надійності елементів електрообладнання шахтної електровозної відкатки	26
Розділ 3. Практична реалізація рішень щодо процесу підвищення надійності елементів електрообладнання шахтної електровозної відкатки	27
3.1. Перший варіант адресних рішень для реалізації процесу підвищення надійності елементів електрообладнання шахтної електровозної відкатки	27
3.2. Другий варіант адресних рішень для реалізації процесу підвищення надійності елементів електрообладнання шахтної електровозної відкатки	32

3.3. Розрахунки щодо реалізації запропонованих варіантів адресних рішень для реалізації процесу підвищення надійності елементів електрообладнання шахтної електровозної відкатки	33
Висновки	35
Список використаних джерел	37

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250-22	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		8

Вступ

Стратегічне значення шахтного локомотивного транспорту

Ефективне функціонування гірничодобувних підприємств із підземним способом розробки корисних копалин жорстко лімітується пропускною здатністю та надійністю транспортних артерій.

Шахтна електровозний відкатка виконує роль головної сполучної ланки між очисними чи підготовчими вибоями та навколоствольним двором.

Вона забезпечує безперервне транспортування тисяч тонн гірничої маси, доставку великогабаритного обладнання, кріпильних матеріалів, а також безпечне перевезення робітників до місць безпосереднього виконання завдань.

Будь-яка незапланована зупинка або відмова локомотивного транспорту призводить до миттєвого затору в усьому технологічному ланцюгу, викликає простої виймальних ділень, знижує темпи видобутку та завдає значних фінансових збитків підприємству.

Саме тому надійність електрообладнання шахтної відкатки є наріжним каменем загальної продуктивності та безпеки шахти.

Специфіка деструктивного впливу підземного середовища

Актуальність розробки нових технічних рішень зумовлена тим, що електрообладнання шахтних електровозів (як контактних, так і акумуляторних) працює в умовах, які за рівнем агресивності не мають аналогів у загальнопромисловому секторі.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250-22	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Елементи силових ланцюгів піддаються тривалій та інтенсивній дії таких шкідливих факторів:

- Критична вологість та агресивні шахтні води. Відносна вологість у підземних виробках часто наближається до абсолютного максимуму. Шахтні води, що насичені солями, кислотами чи лугами, проникають усередину захисних кожухів електричних апаратів, викликаючи інтенсивну корозію струмоведучих частин, різке зниження опору ізоляції та утворення провідних містків.
- Висока концентрація пилу. Вугільний та породний пил має високу дисперсність і проникаючу здатність. Осідаючи на відкритих контактних поверхнях та всередині комутаційних апаратів, він діє як абразив, що прискорює механічний знос, а за умов зволоження перетворюється на електропровідний шлам, який провокує короткі замикання.
- Вібрації та удари. Постійні динамічні навантаження, викликані нерівностями рейкових колій, проходженням стрілочних переводів та стиків, призводять до механічного руйнування паяних та болтових з'єднань, появи тріщин у корпусах та порушення регулювання релейної апаратури.

Проблема незадовільного стану традиційних систем захисту та комутації

Більшість експлуатованих сьогодні шахтних електровозів використовують застарілу релейно-контакторну систему керування та стандартні плавкі запобіжники або електромагнітні вимикачі маховикового типу.

Ці пристрої мають низьку швидкодію, схильні до підгоряння контактів при розриві значних індуктивних струмів тягових двигунів, а їхні механічні вузли часто заклинюють через замулювання пилом.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250-22	Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Особливою зоною ризику є вузол "пантограф — контактний дріт". Через нестабільність натискання струмоприймача в умовах коливань висоти підвісу дроту виникає постійне дугоутворення.

Електрична дуга не лише інтенсивно руйнує робочі поверхні полоза та дроту, але й генерує потужні комутаційні перенапруги в бортовій мережі локомотива, які "пробивають" ізоляцію тягових двигунів та виводять з ладу блоки електронних систем (освітлення, сигналізація, зв'язок).

Необхідність переходу до сучасних технічних рішень

Сучасний вектор розвитку гірничої галузі вимагає радикального перегляду підходів до забезпечення надійності.

Традиційні методи, що полягають у збільшенні частоти планово-попереджувальних ремонтів та потовщенні ізоляційних шарів, вичерпали свій потенціал і є економічно неефективними.

Необхідно розробляти та впроваджувати принципово нові технічні рішення, які базуються на досягненнях сучасної силової електроніки, матеріалознавства та цифрових технологій.

До таких рішень належать:

- Заміна дугових механічних контакторів на твердотільні напівпровідникові ключі, які повністю виключають появу відкритої електричної дуги при комутаціях.
- Застосування інноваційних гідрофобних композитних матеріалів для ізоляції лобових частин двигунів та силових кабелів.
- Впровадження інтелектуальних обмежувачів перенапруг на основі оксидно-цинкових варисторів, адаптованих до специфіки шахтної тягової мережі.

- Створення бортових систем неруйнівного експрес-контролю, які здатні оцінювати поточний стан електрообладнання безпосередньо під час руху поїзда та сигналізувати про перегрів чи зниження опору ізоляції ще до моменту виникнення аварії.

Науково-практична значущість

Наукова цінність даної роботи полягає у встановленні комплексних взаємозв'язків між параметрами навколишнього шахтного середовища та швидкістю деградації характеристик конкретних електротехнічних матеріалів та апаратів.

Практична реалізація запропонованих технічних рішень дозволить значно збільшити міжремонтний інтервал шахтних електровозів, знизити витрати на придбання запасних частин, мінімізувати ризики аварійних пожеж та травмування персоналу під землею, забезпечивши стабільне, безпечне та енергоефективне функціонування всього підземного транспортного комплексу шахти.

Екстремальні умови експлуатації шахтного транспорту

Підземний локомотивний транспорт (шахтна електровозна відкатка) є головною артерією магістрального транспортування гірничої маси, матеріалів та людей на сучасних шахтах і рудниках.

Електрообладнання шахтних електровозів (як контактних типу К10/К14, так і акумуляторних типу АМ8Д/АРП8Г) функціонує в умовах, які за рівнем агресивності перевищують параметри для будь-якого наземного транспорту.

Висока відносна вологість повітря (до **98%**), наявність мінералізованої і кислої шахтної води, висока концентрація струмопровідного вугільного або породного пилу, а також постійні ударно-

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250-22	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		12

вібраційні навантаження викликають прискорене старіння та відмови електротехнічних компонентів.

Найбільш вразливими елементами традиційного електрообладнання є механічні силові контролери (де виникає інтенсивна електрична дуга при комутаціях), пускові резистори, що працюють у режимах значного теплового перегріву, та ізоляція тягових електродвигунів.

Відмова навіть одного елемента призводить до зупинки всього транспортного ланцюга горизонту, що тягне за собою зрив виконання плану з видобутку та значні фінансові втрати.

Тому розробка інженерних рішень для кардинального підвищення надійності цих вузлів є першочерговою науково-практичною задачею.

Математичний аналіз надійності електротехнічного комплексу

Електрообладнання електровоза з погляду теорії надійності є системою з послідовним з'єднанням елементів: вихід з ладу будь-якого ключового компонента (струмоприймача, швидкодіючого вимикача, пускового регулятора чи тягового двигуна) викликає відмову всього локомотива.

Ймовірність безвідмовної роботи такої системи протягом часу за експоненціального закону надійності описується простим виразом.

Традиційні електромеханічні контролери мають високе значення через ерозію контактів.

Зниження сумарної інтенсивності відмов досягається шляхом заміни схильних до зносу механічних елементів на статичні напівпровідникові пристрої та впровадженням засобів безперервного моніторингу, які трансформують стратегію обслуговування від "ремонт за регламентом" до "ремонт за фактичним станом".

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250-22	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		13

Порівняльний аналіз технічних рішень для підвищення надійності

Вузол електрообладнання	Базове (застаріле) рішення	Пропоноване модернізоване рішення	Ефект для надійності
Система регулювання швидкості	Реостатно-контакторна (РКСУ) з кулачковими контролерами.	Транзисторні (IGBT) ШІМ-перетворювачі частоти / напруги.	Ліквідація відкритої електричної дуги, виключення механічного зносу контактів, плавність пуску без перевантажень.
Захисна апаратура колів живлення	Плавкі запобіжники, електромагнітні реле максимального струму.	Мікропроцесорні блоки захисту з датчиками струму Холла та швидкісними твердотільними розчеплювачами.	Зменшення часу спрацьовування захисту до мікросекундного рівня, виключення вигорання міді при КЗ.

Комутація допоміжних кіл (освітлення, сигнали)	Механічні тумблери та вимикачі у звичайному виконанні.	Твердотільні реле (Solid State Relay) у герметичних оболонках IP67.	Повна ізоляція від вологи та пилу, необмежений ресурс за кількістю циклів увімкнення.
Моніторинг стану двигунів	Періодичний вимір опору ізоляції мегомметром під час ТО в депо.	Бортові модулі безперервного контролю струмів витоку та температури обмоток (термодатчики Pt100).	Попередження про пробій ізоляції на ранніх стадіях, виключення критичного перегріву обмоток.

Практична цінність впровадження рішень

Застосування запропонованого комплексу технічних рішень дозволяє збільшити середній час між відмовами електрообладнання шахтних електровозів у **2.5–3 рази**.

Заміна реостатного пуску на електронний не лише усуває головне джерело тепловиділення та замикань на корпус, а й заощаджує до **20%** електроенергії (для контактних мереж) або подовжує ресурс роботи акумуляторної батареї на одному заряді.

Окрім того, підвищення надійності електроізоляційних оболонок та систем захисту від витоків струму безпосередньо знижує ризик ураження підземного персоналу електричним струмом та виключення іскроутворення, що є критично важливим для шахт, небезпечних за вибухами газу чи пилу.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250-22	Арк.
						16
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Розділ 1. Аналіз питання підвищення надійності елементів електрообладнання шахтної електровозної відкатки

1.1. Характеристика елементів електрообладнання шахтної електровозної відкатки

Для секціонування контактної мережі, захисту від аварійних режимів та комутаційних перемикачів під навантаженням потрібні секційні вимикачі.

Розглянемо якою мірою застосовувані цих цілей комутаційні апарати відповідають зазначеним вимогам.

В даний час для секціонування контактної мережі шахтного електровозного відкочування використовуються роз'єднувачі в металевому або ізоляційному корпусі типу РТ-600 на номінальний струм 600 А, а також автоматичні вимикачі типу АВ-8А-1.

Ці секційні роз'єднувачі розроблені та випускаються спеціалізованим управлінням " Укрзв'язокчермет ".

Роз'єднувач РТ-600, рис. 1.1 складається з капронового корпусу 1, кришки 2, однополюсного рубильника 3 на номінальний струм 600 А, рукоятки приводу 4 для включення і відключення рубильника, планки з фіксатором 5, механічної засувки 6, кабельних введень 7 і оглядового вікна 8 дозволяють. рубильник.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250-22						
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	Розділ 1			Лім.	Лист	Листів	
Розробив		Шимбурев Д.Є.									
Перевірив		Сінчук О.М.								17	5
Реценз.								КНУ ЕЕМ-23ск			
Н. Контр.		Сінчук О.М.									
Затвердив		Пересунько І.І.									

Основний недолік роз'єднувача РТ-600 - це застосування як комутаційний апарат рубильника.

З цієї причини неможливо забезпечити захист мережі від струмів короткого замикання (т.к.з.), неприпустимих перевантажень і відключення мережі при аварійних режимах роботи і під навантаженням.

На шахтах Кривбасу, крім роз'єднувачів РТ-600, для секціонування контактних мереж широко використовуються автоматичні вимикачі типу АВ-8А-1 у загальнопромисловому виконанні, що мають такі технічні дані:

Номінальна напруга, В - 250

Тривалий струм, А - 240

Уставка по струму спрацьовування, А - 700

Вага, кг - 12,2

Габарити, мм - 360×246×140

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250-22	Арк.
						18
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1.2. Рішення для реалізації процесу підвищення надійності елементів електрообладнання шахтної електровозної відкатки

У перспективі, як показує аналіз конструкції та досвід експлуатації, автоматичні вимикачі АВ-8А-1 не можуть бути рекомендовані як комутаційний апарат для секціонування контактних мереж, оскільки вони:

1. Не захищені від проникнення у внутрішню порожнину апарату пилу, вологи та води, які порушують нормальну роботу розчіплювача максимального струмового захисту.
2. Значне відхилення фактичного струму спрацьовування від уставки досягає $\pm 25\%$.
3. При русі двох і більше електровозів роблять помилкове відключення секційованої ділянки мережі.
4. Не забезпечують захист від струмів короткого замикання у віддалених точках контактної мережі.

Наведений короткий аналіз показує, що на базі наявної апаратури не може бути виконане секціонування контактних мереж шахтного електровозного відкочування — потрібна розробка секційних вимикачів спеціальної конструкції, максимально можливо уніфікованих із електрообладнанням, що випускається серійно. Для вибору цих вимикачів визначено значення струмів короткого замикання в контактних мережах.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250-22	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		19

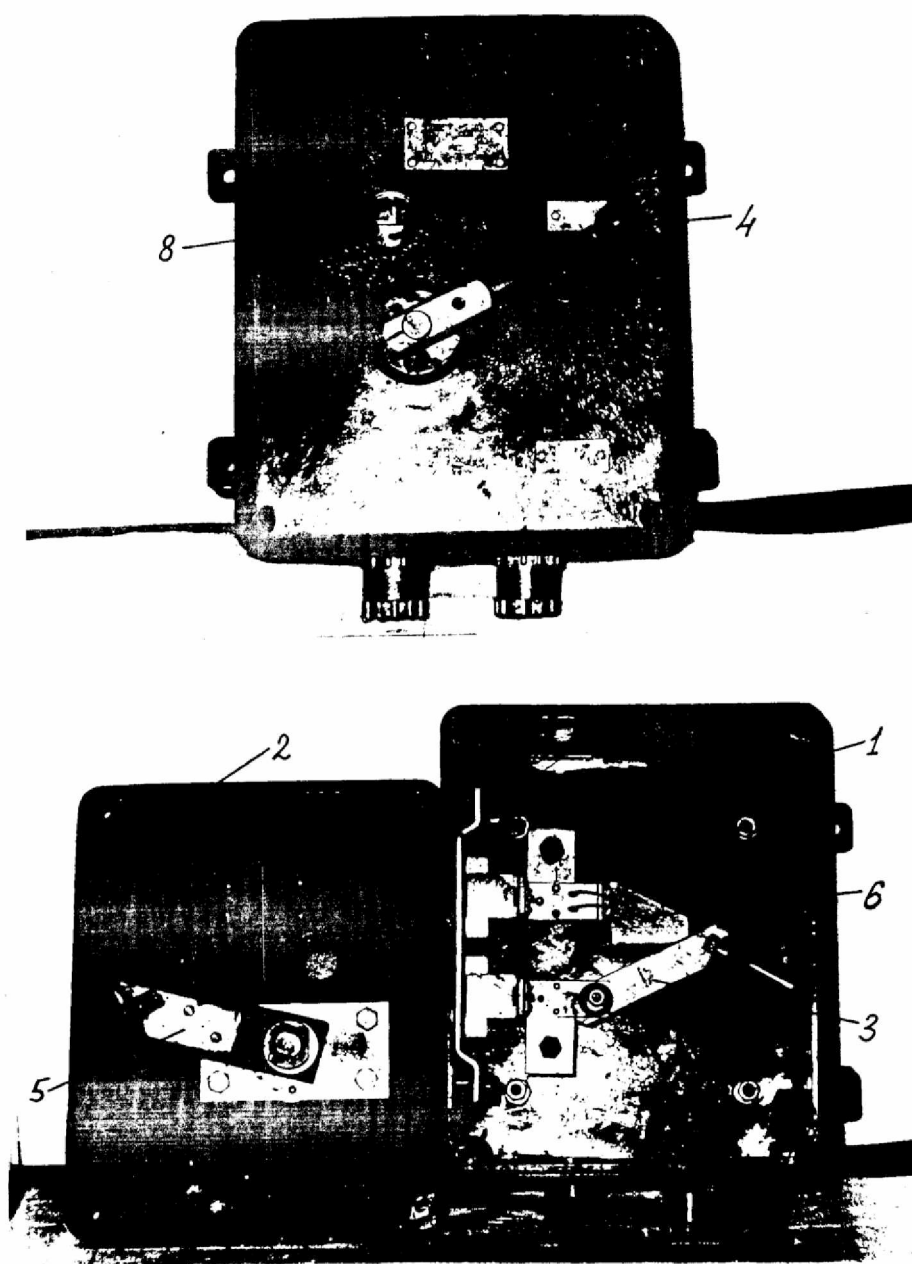


Рис. 1.1. Роз'єднувач РТ-600

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250-22	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		20

1.3. Умови експлуатації щодо надання адресних рішень для реалізації процесу підвищення надійності елементів електрообладнання шахтної електровозної відкатки

Розглянуто такі схеми:

1. Тупикової відкатки при одному польовому штреку в лежачому боці родовища та централізованому електропостачанні контактної мережі від тягової підстанції, розташованої в центрі навантаження.

2. Тупикової відкатки з децентралізованим електропостачанням окремих ділянок контактної мережі від кількох тягових підстанцій, які розташовані по простяганню родовища.

3. Кільцевий відкатки з двома польовими штреками у лежачому боці родовища, при децентралізованому електропостачанні ділянок контактної мережі від кількох тягових підстанцій.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250-22	Арк.
						21
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Розділ 2. Розрахунки для реалізації процесу підвищення надійності елементів електрообладнання шахтної електровозної відкатки

2.1. Розрахунок тягової підстанції для реалізації процесу підвищення надійності елементів електрообладнання шахтної електровозної відкатки

Усі тягові підстанції обладнані напівпровідниковими перетворювальними агрегатами типу АТП 275/500 М, що працюють паралельно загальну шинну збірку. Мінімальне значення встановленого т.к.з. у найбільш електрично віддалених точках контактної мережі знаходимо використовуючи вираз [17]

$$J_{кз\ min} = \frac{KU_{xx} - \Delta U'}{R_{п.с.} + R_{п} + R_0 + (R_{к} + R_p)} \quad (2.1)$$

де $J_{кз\ min}$ - Встановився т.к.з., А;

K - Коефіцієнт, що враховує коливання напруги мережі змінного струму, $K = 1 \pm 0,05$;

U_{xx} - Напруга холостого ходу перетворювального агрегату, 300 В;

$\Delta U'$ - Втрати напруги в електричній дузі в точці к.з., 100 В;

$R_{п.с.}$ - Опір перетворювальної підстанції, Ом;

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250-22		
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дат			
Розробив	Шимбусь Д.Є.				Розділ 2	Літ.	Лист
Перевірів	Сінчук О.М.						22
Реценз.							5
Н. Контр.	Сінчук О.М.					КНУ ЕЕМ-23ск	
Затвердив	Пересунько І.І.						

R_{Π}, R_0 - Опір відповідно живильного і відсмоктуючого кабелю, Ом;

R_{κ}, R_p - Опір відповідно контактного проводу та рейкового шляху, Ом.

Опір перетворювального агрегату визначаємо за формулою

$$R_{\Pi.c} = \frac{U_{xx} - U_H}{P_H \cdot n} \cdot U_H, \text{ Ом} \quad (2.2)$$

де U_H - номінальна випрямлена напруга, 275 В;

P_H - Номінальна потужність агрегату, 150 кВт;

n - Число одночасно працюючих агрегатів, 1-3 шт.

Опір 1 км кабелю, що живить і відсмоктує, обчислюємо за формулою

$$R_{\Pi.o.} = \frac{\alpha_t \cdot \rho}{S \cdot m} \cdot 1000, \text{ Ом} \quad (2.3)$$

де ρ - питомий опір матеріалу жил кабелю, Ом · мм² / м;

S - Перетин жили кабелю, мм²;

m - Число паралельно з'єднаних жил кабелю;

1,18 - коефіцієнт приведення опору жил кабелю до температури 65°C.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250-22	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		23

Опір 1 км контактної дроту та рейкового шляху з урахуванням їхнього зносу в процесі експлуатації знаходимо за формулою

$$R_{\text{к.п.}} = \frac{\rho}{S \cdot m \cdot E_{\text{и}}} \cdot 1000, \text{ Ом} \quad (2.4)$$

$$R_{\text{р}} = \frac{K \cdot r_{\text{р}}}{m_i}, \text{ Ом} \quad (2.5)$$

де $E_{\text{и}}$ - Коефіцієнт, що враховує знос контактної дроту марки ТФ-100 (0,9825);

$r_{\text{р}}$ - Опір 1 км рейкової колії без урахування зносу та стикових з'єднань;

$K = 2 \div 2,7$ - Коефіцієнт, що враховує знос рейок і опір стиків;

m_i - Число паралельних ниток рейкового шляху.

Виконані розрахунки показують, що величина струму короткого замикання в контактних мережах шахтної електровозної відкатки (ш. Глибока, ш. № 1 ім. Артема, ш. “Гігант”, ш. Батьківщина, ш. “Суха Балка”, на підставі розрахункових значень струмів короткого замикання та величини номінального робочого навантаження 215 - 385 А [18].

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250-22	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		24

Тому зроблено вибір автоматичних вимикачів для вбудовування в апаратуру секціонування контактних мереж, технічні характеристики яких наведені у таблиці 3.1.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250-22	Арк.
						25
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2.2. Адресні рішення щодо тягових підстанцій для реалізації процесу підвищення надійності елементів електрообладнання шахтної електровозної відкатки

Для секціонування контактної мережі в ортах-заїздах необхідно встановити автоматичні вимикачі типу АЗ720Б з номінальним струмом 250 А, у головних виробах відкатування — АЗ730Б з номінальним струмом 400 А.

Перевага цих вимикачів:

1. Висока здатність відключати до 100 кА.
2. Виконує максимальний струмовий захист на напівпровідникових елементах.
3. Можливість регулювання в широких межах номінального струму уставки та витримки часу напівпровідникових розчіплювачів максимального струму.
4. Наявність електромеханічного приводу дозволяє дистанційно керувати вимикачем.

Використовуючи описаний автоматичний вимикач, розроблено два варіанти конструкції вимикачів для секціонування контактних мереж.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250-22	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		26

Розділ 3. Практична реалізація рішень щодо процесу підвищення надійності елементів електрообладнання шахтної електровозної відкатки

3.1. Перший варіант адресних рішень для реалізації процесу підвищення надійності елементів електрообладнання шахтної електровозної відкатки

За першим варіантом конструкції передбачена уніфікація основних вузлів вимикача з електрообладнанням, яке випускає підприємство “Укрзв’язокчермет”.

Це дозволяє освоїти виробництво зазначених вимикачів у найбільш стислий термін.

Секційний вимикач Рис. 3.1 складається з корпусу роз'єднувача (РТ-600) 1, рубильника 2, рукоятки 3, механічного блокування 4, пиловодонепроникного ящика 5, автоматичного вимикача 6. Корпус роз'єднувача 1 з'єднується з шахтним розподільним ящиком 5, фланцем 7. приводом автомата 10. Механічна блокування зчленована з системою важеля валиком 11 і отвором 12.

Увімкнення секційного вимикача відбувається в такий спосіб. Спочатку включається рукояткою 3 рубильник 2 потім поворотом рукоятки 8 вгору проводиться одночасно включення автоматичного вимикача і механічного блокування рубильника 4.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250-22						
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дат	Розділ 3				Літ.	Лист	Листів
Розробив	Шимбусь Д.Є.										
Перевірів	Сінчук О.М.									27	8
Реценз.									КНУ ЕЕМ-23ск		
Н. Контр.	Сінчук О.М.										
Затвердив	Пересунько І.І.										

Вимкнення секційного вимикача здійснюється у зворотній послідовності.

Рукояткою 8 вмикається автоматичний вимикач: при цьому відбувається одночасний рух вниз шарнірної системи та планки механічного блокування 4. Рукояткою 3 вмикається рубильник 2.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250-22	Арк.
						28
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

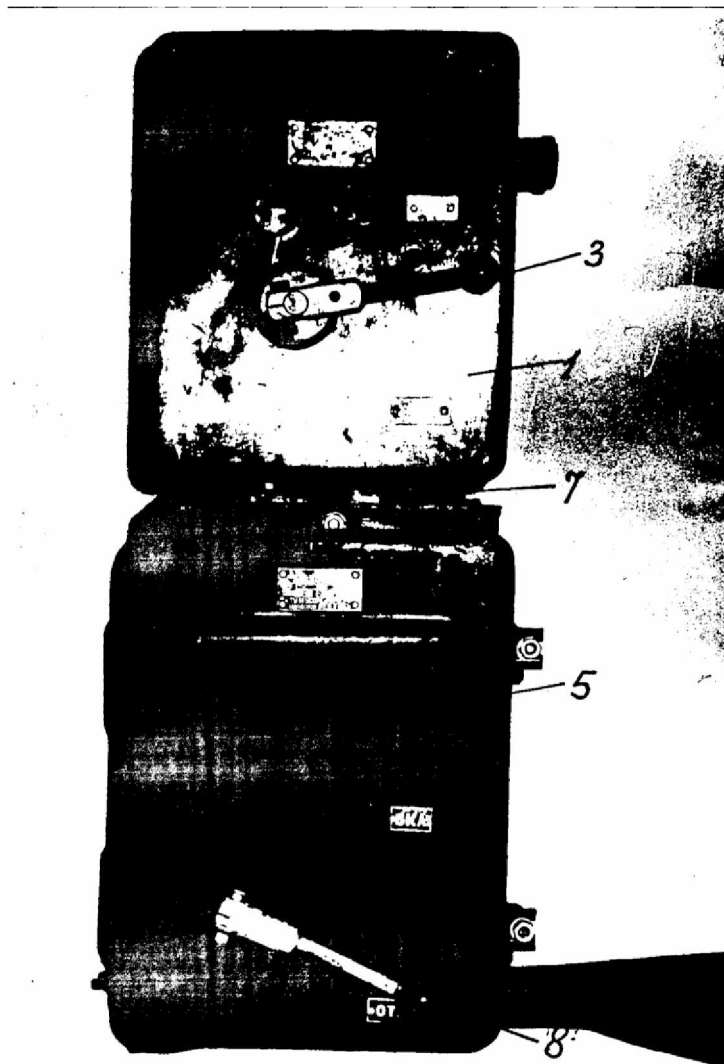


Рис. 3.1. Секційний вимикач (варіант № 1)

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250-22

Арк.

29

Таблиця 3.1. Параметри автоматичних вимикачів

Параметри автоматичних вимикачів	A3710Б	A3720Б	A3730Б	A3740Б
Величина вимикача	I	II	III	IV
Номінальний струм вимикача, А	160	250	400	630
Номінальна напруга,	440	440	440	440
Межі регулювання номінального струму розчіплювача, А	20-40, 40-80, 80-160	160-250	160-250, 250-400	250-400, 400-630
Гранична комутаційна здатність, кА	100	100	100	100
Уставка струму спрацьовування	(2 ÷ 6)	(2 ÷ 6)	(2 ÷ 6)	(2 ÷ 6)
Час спрацьовування в зоні коротких замикань, сік	0,1-0,4	0,1-0,4	0,1-0,4	0,1-0,4
Механічна зносостійкість вимикачів (вмикання та відключення)	16000	16000	16000	16000
Електрична зносостійкість при номінальному струмі	10000	10000	10000	10000
Дистанційний електромеханічний привід змінного струму,	127-660	127-660	127-660	127-660
Дистанційний електромеханічний привід постійного струму,	110-220	110-220	110-220	110-220
Напруга мінімального розчіплювача, В: а) змінний; б) постійний	110 та 220; 440	110 та 220; 440	110 та 220; 440	110 та 220; 440

Напруга блок- контактів, В: а) змінний; б) постійний	660; 440	660; 440	660; 440	660; 440
Виконання вимикача за родом захисту	Струмообмежувальні (з напівпровідниковими розчіплювачами максимального струму)			

3.2. Другий варіант адресних рішень для реалізації процесу підвищення надійності елементів електрообладнання шахтної електровозної відкатки

Другий варіант конструкції секційних вимикачів, рис. 3.2 було розроблено на базі металевих оболонок типу РУС з використанням комутаційних апаратів, прийнятих у секційному вимикачі першого варіанта конструкції.

Ці оболонки випускаються Харківським заводом низьковольтної апаратури та забезпечують захист апаратів від впливу навколишнього середовища.

Вимикач складається з корпусу 1, кришки 2, кабельних вводів 3, рубильника 4, автоматичного вимикача 5 та рукоятки 6.

За допомогою рукоятки 6 здійснюється включення та відключення комутаційних апаратів.

Секційні вимикачі рис. 3.2 мають значно менші габарити порівняно з вимикачем рис. 3.1.

Однак для підготовки серійного виробництва цих вимикачів потрібен більш тривалий час.

Прийнято рішення до освоєння виробництва секційних вимикачів другого варіанта конструкції здійснювати на підприємстві "Укрзв'язокчермет" випуск секційних вимикачів, показаних на рис. 3.1.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250-22	Арк.
						32
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3.3. Розрахунки щодо реалізації запропонованих варіантів адресних рішень для реалізації процесу підвищення надійності елементів електрообладнання шахтної електровозної відкатки

Для розроблених секційних вимикачів визначаємо уставки захисту при уставці:

- В орті-заїзді

$$J_y \geq 1,25 \cdot J_{\text{раб.мах}} = 1,25 \cdot 215 = 270 \text{ А} \quad (3.1)$$

— у головних відкатних виробках

$$J_y \geq 1,25 \cdot J_{\text{раб.мах}} = 1,25 \cdot 385 = 480 \text{ А} \quad (3.2)$$

де J_y - Струм уставки спрацьовування максимального струмового захисту секційного вимикача, А;

1,25 - коефіцієнт надійності захисту;

$J_{\text{раб.мах}}$ — найбільший робочий струм одночасно включених на колійній ділянці електровозів, що захищається, А.А.

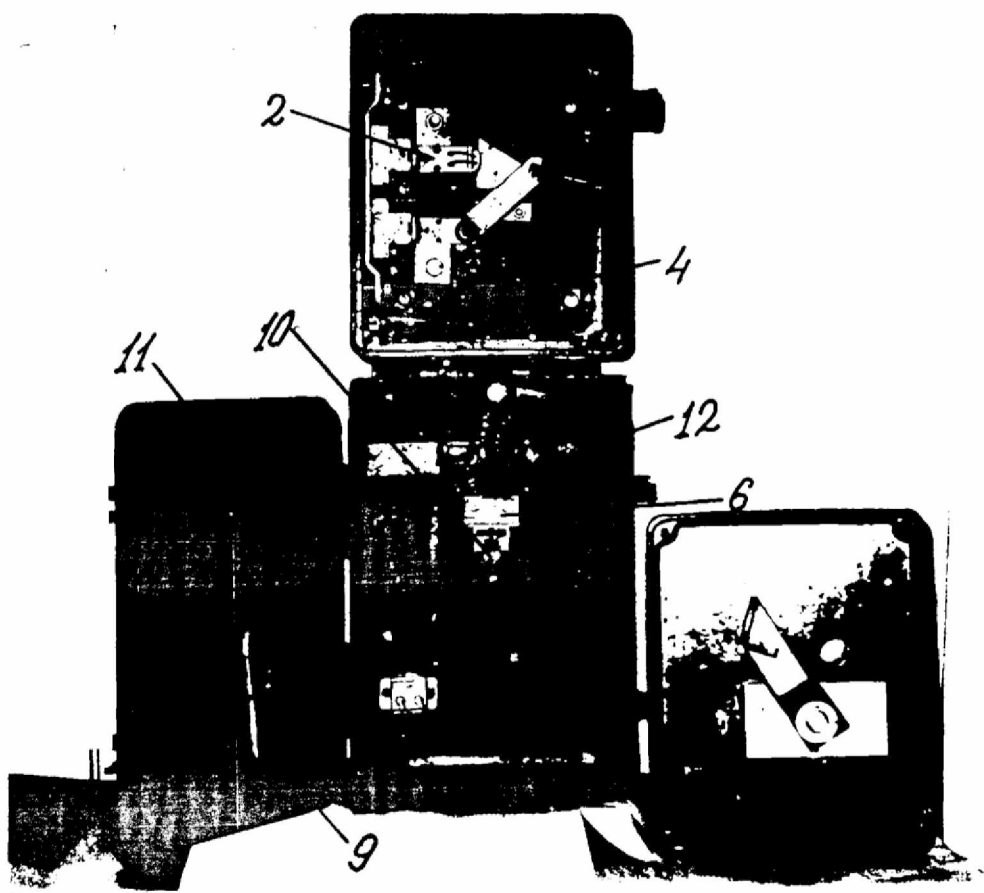


Рис. 3.2. Секційний вимикач (варіант № 2)

Висновки

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

Провести статистичний аналіз відмов та дефектів основних вузлів електрообладнання контактних та акумуляторних електровозів (тягових двигунів, контролерів, захисної апаратури, акумуляторних батарей та струмоприймачів) в умовах діючих шахт.

Провести комплексний аналіз статистичних даних щодо відмов, дефектів та аварійних ситуацій у системі підземного електропостачання та безпосередньо в бортовому електрообладнанні шахтних електровозів.

Дослідити фізико-хімічні механізми деградації електроізоляційних матеріалів та контактних груп під впливом специфічних факторів середовища (висока вологість, хімічна агресивність шахтних вод, пил, вібраційні навантаження).

Дослідити фізику процесів деградації ізоляційних матеріалів, контактних груп та силових напівпровідникових елементів під сукупним впливом екстремальної вологості, шахтного пилу, вібраційних навантажень та хімічно агресивного середовища.

Розробити математичну модель надійності електрообладнання електровоза як складної системи з метою виявлення "вузьких місць" (найменш надійних елементів).

Розробити ефективні технічні рішення щодо захисту бортової мережі електровоза та тягової контактної мережі від комутаційних та атмосферних перенапруг, а також від струмів витоку та короткого замикання.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250-22	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		35

Спроекувати та обґрунтувати технічні рішення щодо модернізації вузлів (перехід на твердотільну комутаційну апаратуру, впровадження нових схем безіскрового захисту, покращення волого- та пилозахисту оболонок).

Обґрунтувати параметри та конструктивні особливості модернізованих вузлів струмознімання та елементів секціонування контактної мережі з метою мінімізації дугоутворення та ерозії металу.

Розробити алгоритми та структуру системи безперервного технічного діагностування стану ізоляції та температурного режиму обмоток в процесі експлуатації локомотива.

Запропонувати схеми впровадження безконтактної комутаційної апаратури та інтелектуальних систем безперервного діагностичного моніторингу стану ізоляції обмоток тягових двигунів.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250-22	Арк.
						36
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Список використаних джерел

1. Pivnyak, G., Volkov, A., & Shirin, L. (2014). Transport in the Mining Industry: Modern Challenges and Innovations. CRC Press.
2. Dhillon, B. S. (2008). Mining Equipment Reliability, Maintainability, and Safety. Springer-Verlag.
3. Синчук, О. М., & Афанасьев, В. В. (2013). Системы тягового электропривода рудниковых электровозов. Кривий Ріг: КНУ.
4. Birolini, A. (2017). Reliability Engineering: Theory and Practice (8th ed.). Springer.
5. O'Connor, P., & Kleyner, A. (2012). Practical Reliability Engineering (5th ed.). John Wiley & Sons.
6. Steimel, A. (2008). Electric Traction - Motive Power and Energy Supply: Basics and Practical Experience. Oldenbourg Industrieverlag.
7. Bose, B. K. (2006). Power Electronics and Motor Drives: Advances and Trends. Academic Press.
8. IEC 60077-1:2017. Railway applications - Electric equipment for rolling stock - Part 1: General service conditions and general rules. International Electrotechnical Commission. (Адаптований контекст для підземного транспорту).
9. IEC 60349-2:2010. Electric traction - Rotating electrical machines for rail and road vehicles - Part 2: Electronic converter-fed alternating current motors. International Electrotechnical Commission.
10. Ramakumar, R. (1993). Engineering Reliability: Analysis and Prediction. Prentice Hall.

11. Toliyat, H. A., Nandi, S., Choi, S., & Meshgin-Kelk, H. (2012). Electric Machines: Modeling, Condition Monitoring, and Fault Diagnosis. CRC Press.
12. Babokin, G. I., & Shchutsky, V. I. (2005). Reliability of Electrical Equipment in Mining Industry. Nedra.
13. Synchuk, O. M., & Kozakevych, I. A. (2015). Improving the reliability of mine contact locomotive traction networks. Electrical Engineering & Electromechanics, (2), 41-45.
14. Volkov, A., & Maly, V. (2018). Investigation of the operational reliability of battery-powered mine locomotives. E3S Web of Conferences, 41, 01022.
15. IEEE Std 493-2007. IEEE Recommended Practice for the Design of Reliable Industrial and Commercial Power Systems (Gold Book). IEEE Power and Electronics Society.
16. Broadwater, R., & Dilek, M. (2010). Electrical infrastructure reliability and analysis in extreme environments. IEEE Transactions on Power Delivery, 25(3), 1812-1819.
17. Candelo-Zuluaga, C., Riba, J. R., & Lopez-Garcia, C. (2019). Solid-state relays and power converters reliability in harsh industrial conditions. Electronics, 8(9), 1024.
18. Chorny, O., & Zachepa, N. (2016). Diagnostics of insulation condition of induction motors used in mining. Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, 3(98), 54-60.
19. Grachev, M., & Kuvaev, I. (2014). Analysis of failures of contact wires and power systems in underground rail transport. Journal of Mining Science, 50(4), 743-751.

20. Shevchenko, V., & Parakhonnyi, V. (2019). Automation of electrical insulation protection systems for mining traction networks. Mining Informatics and Automation, (2), 85-92.
21. Hartman, H. L., & Mutmansky, J. M. (2002). Introductory Mining Engineering (2nd ed.). John Wiley & Sons.
22. Novak, T. (2010). Electric tech in mining: Winding, hauling, and power distribution. IEEE Industry Applications Magazine, 16(2), 52-60.
23. Morley, L. A. (2005). Mine Power Systems. Society for Mining, Metallurgy, and Exploration (SME).
24. Standard IEC 60079-0:2017. Explosive atmospheres - Part 0: Equipment - General requirements. International Electrotechnical Commission.
25. Schenk, J., & Miller, G. (2013). Energy-efficient and automated control of battery-powered mining locomotives. Journal of Cleaner Production, 52, 210-218.
26. Raza, A., & John, M. (2018). Wireless communication and reliability engineering for underground mines. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 20(4), 3121-3145.
27. Bednarz, S., & Lowe, R. (2012). Fail-safe electronic control and protection architecture for underground electric haulage systems. Safety Science, 50(7), 1589-1596.
28. Gao, W., Gu, Y., & Jiang, L. (2018). Insulation aging mechanisms under complex environmental stresses in traction motors. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 25(6), 2110-2118.
29. Stone, G. C., Boulter, E. A., Culbert, I., & Dhirani, H. (2004). Electrical Insulation for Rotating Machines: Design, Evaluation, Aging, Testing, and Repair. Wiley-IEEE Press.

30. McInerney, P., & Davies, R. (2011). Reliability and risk analysis of DC traction networks in underground operations. Mining Technology, 120(3), 142-151.

31. Pugi, L., Rindi, S., & Ercole, G. (2012). Modelling and simulation of harsh environment industrial locomotives with DC traction systems. International Journal of Heavy Vehicle Systems, 19(2), 115-134.

32. Chadha, R., & Kumar, R. (2015). Mitigation of switching overvoltages in industrial and mining DC traction systems using metal-oxide varistors. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 68, 230-239.

33. ISO 19296:2018. Mining — Mobile machines intended for use in underground mines — Machine safety. International Organization for Standardization.

34. Andrews, H. I. (2002). Railway Electric Traction and Mine Haulage Systems. Butterworths.

35. Ribeiro, E., & Marques, G. D. (2007). Power quality issues, reliability and filter design in industrial locomotive supply systems. European Power Electronics and Drives Journal, 17(3), 22-31.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250-22	Арк.
						40
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		