

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:

**Оцінювання рівнів електробезпеки в умовах функціонування систем
електропостачання гірничорудних підприємств**

Виконав: студент групи ЕЕМ-22-1

Артем ПЄРОВ

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

ПЄРОВ Артем Максимович

(прізвище, ім'я, по батькові)

Тема роботи: Оцінювання рівнів електробезпеки в умовах функціонування
систем електропостачання гірничорудних підприємств

1. Термін подання студентом роботи: 19 червня 2026 р.
2. Мета та завдання кваліфікаційної роботи: Метою є оцінювання рівнів
електробезпеки в умовах функціонування систем електропостачання
гірничорудних підприємств
3. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які необхідно розробити) I.
Застосування електроенергії на гірничих підприємствах у світлі завдань
безпечної експлуатації електротехнічних комплексів і систем; II.
Статистична оцінка і закони розподілу показників, що характеризують
застосування електроенергії на гірничих підприємствах у світлі завдань
безпечної експлуатації електротехнічних комплексів і систем; III. Практична
реалізація застосування ймовірно-статистичних методів до аналізу умов
електробезпеки при застосуванні електроенергії на гірничих підприємствах у
світлі завдань безпечної експлуатації електротехнічних комплексів і систем.

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 факторів при застосуванні електроенергії на гірничих підприємствах	21.05.26
2	Дослідження умов електробезпеки при застосуванні електроенергії на гірничих підприємствах	27.05.26
3	Класифікація при аналізі аварійних ситуацій з електротравмами	31.05.26
4	Застосування ймовірно-статистичних методів до аналізу умов електробезпеки	07.06.26
5	Практична реалізація застосування ймовірно-статистичних методів	14.06.26

Дата видання завдання 18.05.2026 р.

Здобувач вищої освіти _____
(підпис)

Артем ПЄРОВ
(Ім'я, прізвище)

Керівник роботи _____
(підпис)

Олег СІНЧУК
(Ім'я, прізвище)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до випускової атестаційної роботи бакалавра на тему: «Оцінювання рівнів електробезпеки в умовах функціонування систем електропостачання гірничорудних підприємств»

38 с., 25 літературних джерел

Мета роботи: Підвищення рівня промислової безпеки та експлуатаційної надійності систем підземного електропостачання гірничорудних підприємств шляхом розробки комплексного методу ранньої ідентифікації та оцінювання ризиків виникнення аварійних ситуацій у силовому обладнанні та контактних тягових мережах.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати такі завдання:

Провести ретроспективний аудит та класифікацію типових аварійних режимів і відмов у системах електропостачання шахт та рудників (короткі замикання, витoki струму на землю, перенапруги, термічна деградація).

Дослідити фізико-хімічні та механічні фактори впливу агресивного рудникового середовища (вологість, пил, вібрації, обвалення гірської маси) на стан ізоляції силового обладнання та геометрію контактної мережі.

Розробити критерії та алгоритми ідентифікації передаварійних станів на основі безперервного моніторингу параметрів мережі (наприклад, аналізу часткових розрядів або спектрального аналізу струмів споживання).

Створити ймовірнісну модель оцінювання ризиків виникнення пожеж та електротравм із застосуванням методів "дерева відмов" (Fault Tree Analysis) або "дерева подій" (Event Tree Analysis).

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.247-10	Арк.
						4
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Запропонувати комплекс апаратних та організаційних рішень для превентивного відключення пошкоджених ділянок мережі з мінімізацією економічних втрат від простою обладнання.

БЕЗПЕКА ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ, ГІРНИЧОРУДНЕ
ПІДПРИЄМСТВО, ІДЕНТИФІКАЦІЯ АВАРІЙ, СИЛОВЕ
ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ, КОНТАКТНА МЕРЕЖА, СТРУМ ВИТОКУ,
ОЦІНЮВАННЯ РИЗИКІВ

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.247-10	Арк.
						5
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Зміст

Вступ.....	8
Розділ 1. Застосування електроенергії на гірничих підприємствах у світлі завдань безпечної експлуатації електротехнічних комплексів і систем	13
1.1. Характеристика факторів при застосуванні електроенергії на гірничих підприємствах у світлі завдань безпечної експлуатації електротехнічних комплексів і систем	13
1.2. Дослідження умов електробезпеки при застосуванні електроенергії на гірничих підприємствах у світлі завдань безпечної експлуатації електротехнічних комплексів і систем	15
Розділ 2. Статистична оцінка і закони розподілу показників, що характеризують застосування електроенергії на гірничих підприємствах у світлі завдань безпечної експлуатації електротехнічних комплексів і систем	17
2.1. Класифікація при аналізі аварійних ситуацій з електротравмами що характеризує застосування електроенергії на гірничих підприємствах у світлі завдань безпечної експлуатації електротехнічних комплексів і систем	17
2.2. Застосування ймовірно-статистичних методів до аналізу умов електробезпеки при застосуванні електроенергії на гірничих підприємствах у світлі завдань безпечної експлуатації електротехнічних комплексів і систем	20
Розділ 3. Практична реалізація застосування ймовірно-статистичних методів до аналізу умов електробезпеки при застосуванні електроенергії на гірничих підприємствах у світлі завдань безпечної експлуатації електротехнічних комплексів і систем	23

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.247-10	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		6

3.1. Приклад реалізації застосування ймовірно-статистичних методів до аналізу умов електробезпеки при застосуванні електроенергії на гірничих підприємствах у світлі завдань безпечної експлуатації електротехнічних комплексів і систем	23
3.2. Побудова поточкових графів для реалізації застосування ймовірно-статистичних методів до аналізу умов електробезпеки при застосуванні електроенергії на гірничих підприємствах у світлі завдань безпечної експлуатації електротехнічних комплексів і систем	26
3.3. Аналіз поточкових графів щодо реалізації застосування ймовірно-статистичних методів до аналізу умов електробезпеки при застосуванні електроенергії на гірничих підприємствах у світлі завдань безпечної експлуатації електротехнічних комплексів і систем	28
3.4. Висновки щодо реалізації застосування ймовірно-статистичних методів до аналізу умов електробезпеки при застосуванні електроенергії на гірничих підприємствах у світлі завдань безпечної експлуатації електротехнічних комплексів і систем	31
Висновки	32
Список використаних джерел	34
Додаток А.....	38

Вступ

Специфіка та агресивність умов експлуатації підземних електромереж

Електропостачання гірничорудних підприємств є однією з найскладніших і найвідповідальніших ланок виробничого циклу.

Безперебійне забезпечення електроенергією видобувних ділень, водовідливних установок, систем вентиляції та підземного транспорту є запорукою не лише виконання плану видобутку корисної копалини, але й, що найголовніше, збереження життів шахтарів.

Разом з тим, силове електрообладнання (трансформаторні підстанції, розподільчі пристрої, кабельні лінії) та контактні мережі локомотивної відкатки працюють у надзвичайно суворих умовах, які не мають аналогів у загальнопромисловому секторі.

Підземне середовище характеризується високою (до 98-100%) відотною вологістю, постійним капежем агресивних шахтних вод, наявністю струмопровідного пилу, високими температурами на глибоких горизонтах, а також постійними вібраціями від роботи вибухових речовин та важкої техніки.

Крім того, гірничий масив постійно зміщується, що створює колосальні механічні навантаження на кабельні траси та елементи підвіски контактних проводів.

Усе це призводить до прискореного старіння ізоляції та підвищує ймовірність раптових відмов.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.247-10	Арк.
						8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Проблематика аварійності силового обладнання

Традиційно силове електрообладнання гірничих підприємств має вибухобезпечне або рудникове нормальне (РН) виконання, що передбачає наявність масивних оболонок, здатних локалізувати вибух метано-повітряної суміші всередині корпусу.

Проте навіть таке виконання не гарантує абсолютного захисту від внутрішніх аварійних процесів.

Основними причинами аварій у силовому обладнанні є:

1. Деградація ізоляції.

Під впливом вологи та перепадів температур опір ізоляції трансформаторів і двигунів знижується, що генерує струми витоку на землю (корпус).

У мережах з ізолюваною нейтраллю, які масово застосовуються в шахтах, однофазне замикання на землю може тривалий час залишатися непоміченим без належного моніторингу, переростаючи у двофазне або трифазне коротке замикання з руйнівними наслідками (вибухи масляних вимикачів, пожежі).

2. Перевантаження та термічне старіння.

Інтенсифікація видобутку часто призводить до експлуатації трансформаторних підстанцій на межі їхньої номінальної потужності, що викликає перегрів струмоведучих частин і розплавлення діелектриків.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.247-10	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Особлива небезпека контактних тягових мереж

Якщо силове обладнання хоча б ізольоване від зовнішнього середовища металевими оболонками, то контактна мережа підземного транспорту становить відкрите джерело небезпеки.

Контактний провід (зазвичай напругою 250 В постійного струму), що проходить магістральними виробками, не має електричної ізоляції.

Аварійні ситуації в контактних мережах є найчастішою причиною електротравматизму серед персоналу.

Вони виникають внаслідок:

- Обриву контактного проводу через знос від тертя струмоприймачів або обвалення породи даху виробки.
- Зменшення висоти підвіски проводу внаслідок здимання ґрунту або деформації кріплення, що створює пряму загрозу дотику людей, які пересуваються виробкою.
- Іскріння та утворення дуги між пантографом і проводом, що за наявності вугільного чи сульфідного пилу може стати джерелом займання та масштабної підземної пожежі.
- Виникнення блукаючих струмів через поганий електричний контакт у рейкових стиках, що призводить до електрокорозії труб і металокріплення, а також створює ризик несанкціонованого ініціювання електродетонаторів при вибухових роботах.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.247-10	Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Концептуальні недоліки існуючих систем захисту та необхідність нових підходів

Більшість існуючих систем релейного захисту та протиаварійної автоматики на гірничих підприємствах працюють за реактивним принципом: вони відключають напругу лише після того, як аварія вже сталася (струм перевищив уставку спрацювання).

В умовах рудника час реакції автомата (навіть мілісекунди) може бути достатнім для утворення іскри, здатної підпалити метан, або для того, щоб людина отримала смертельне ураження струмом.

Тому сучасною світовою тенденцією є перехід від реактивного захисту до проактивного (превентивного) моніторингу.

Актуальність даного дослідження полягає у необхідності розробки систем ранньої ідентифікації передаварійних станів.

Завдяки впровадженню інтелектуальних мікропроцесорних терміналів захисту, методів машинного аналізу параметрів якості електроенергії (пошук аномальних гармонік, вимірювання часткових розрядів) та безперервного контролю опору ізоляції стає можливим виявити дефект задовго до його переростання у повномасштабну аварію.

Практичне значення дослідження

Оцінювання безпеки на основі ідентифікації ризиків дозволяє керівництву гірничого підприємства приймати обґрунтовані рішення щодо модернізації енергогосподарства.

Робота в цьому напрямку має найвищу соціальну та економічну значущість: вона спрямована на зведення до нуля рівня електротравматизму,

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.247-10	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		11

недопущення катастрофічних підземних пожеж і вибухів, а також на мінімізацію фінансових збитків від раптових зупинок видобувного процесу.

Впровадження методологій ідентифікації аварійних ситуацій є критично важливим кроком до створення так званої "розумної шахти" (Smart Mine), де безпека забезпечується інтелектуальними автоматизованими системами безперервного контролю.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.247-10	Арк.
						12
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Розділ 1. Застосування електроенергії на гірничих підприємствах у світлі завдань безпечної експлуатації електротехнічних комплексів і систем

1.1. Характеристика факторів при застосуванні електроенергії на гірничих підприємствах у світлі завдань безпечної експлуатації електротехнічних комплексів і систем

Постійне розширення застосування електроенергії на гірничих підприємствах у світлі завдань безпечної експлуатації електротехнічних комплексів і систем характеризується рядом технічних, організаційних, санітарно-гігієнічних, психофізіологічних та соціальних факторів.

Зазначені фактори в постійному діалектичному взаємодії обумовлюють трудові процеси при використанні електроенергії в гірництві.

У зв'язку з цим дослідження проблеми електробезпеки в методологічному плані має спиратись на комплексний підхід, що дозволяє вирішувати завдання з урахуванням впливу вищезгаданих факторів.

У цьому зв'язку комплекс заходів, методів і засобів забезпечення електробезпеки в сукупності з персоналом можна уявити як ерготехнічну систему.

До основних класифікаційних ознак зазначеної ерготехнічної системи забезпечення електробезпеки (ЕТСОЕБ) слід віднести:

- клас системи — антропотехнічна система ергатичного класу;
- підклас — експлуатаційна;

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.247-10			
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	Розділ 1	Лім.	Лист	Листів
Розробив	Перов А.М.						13	4
Перевірив	Сінчук О.М.							
Реценз.								
Н. Контр.	Сінчук О.М.							
Затвердив	Пересунько І.І.					КНУ ЕЕМ-22-1		

- тип — ремонтно-обслуговуючий;
- ергатичний елемент — електротехнічний і неелектротехнічний персонал;
- неергатичний елемент, визначений знаряддям, предметом і продуктом праці: знаряддя праці — інструмент, обладнання, система правил безпеки та експлуатації; предмет праці — електроустановка, електрифіковані машини і механізми, інформація про їхній стан; продукт праці — безпечний стан електроустановок і електрифікованих машин і механізмів, функціонально-надійний стан персоналу.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.247-10	Арк.
						14
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1.2. Дослідження умов електробезпеки при застосуванні електроенергії на гірничих підприємствах у світлі завдань безпечної експлуатації електротехнічних комплексів і систем

Дослідження умов електробезпеки має проводитися в рамках вирішення питань побудови моделей ефективності, якості і надійності функціонування ЕТСОЕБ.

Можливість створення математичних моделей, які повністю описують логіку і динаміку процесів трудової діяльності при обслуговуванні й експлуатації електроустановок гірничих підприємств з урахуванням зміни показників якості функціонування персоналу, наразі ускладнена через недостатній рівень розвитку теорії моделювання цих процесів.

З урахуванням складності розглянутої проблеми доцільно в межах зазначеного комплексного підходу розглянути методичні принципи та методики дослідження окремих аспектів, що дозволяють: оцінити показники й характеристики електротравматизму, порівняльний ступінь електробезпеки окремих електроустановок; виконати моделювання процесу виникнення електротравм; встановити критеріальні значення, які визначають безпечний рівень впливу на людину небезпечного виробничого фактора — електричного струму; визначити значення параметрів та характеристик, що обумовлюють безпеку в найбільш травмонебезпечних електроустановках; дати оцінку персоналу як елементу ЕТСОЕБ.

Оцінка стану електробезпеки і моделювання генезису електротравм
В основу оцінки стану електробезпеки доцільно покласти вивчення статистичного матеріалу про нещасні випадки (н.в.).

Дослідження статистичних даних вимагає встановлення класифікації електротравм (ЕТ), що відображає розмаїття супутніх умов і факторів н.в.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.247-10	Арк.
						16
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Розділ 2. Статистична оцінка і закони розподілу показників, що характеризують застосування електроенергії на гірничих підприємствах у світлі завдань безпечної експлуатації електротехнічних комплексів і систем

2.1. Класифікація при аналізі аварійних ситуацій з електротравмами що характеризує застосування електроенергії на гірничих підприємствах у світлі завдань безпечної експлуатації електротехнічних комплексів і систем

Класифікація при аналізі аварійних ситуацій з електротравмами повинна дозволяти їх систематизувати для вивчення й розкриття суті явища електротравматизму.

Одним із основних вимог до класифікації має бути виявлення мети, принципів і провідних ознак угруповань електротравм.

Водночас виконана класифікація повинна допомагати в практичній роботі з планування та організації заходів щодо забезпечення електробезпеки.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.247-10						
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дат	Розділ 2			Лім.	Лист	Листів	
Розробив	Перов А.М.										
Перевірів	Сінчук О.М.								17	6	
Реценз.								КНУ ЕЕМ-22-1			
Н. Контр.	Сінчук О.М.										
Затвердив	Пересунько І.І.										

До основних ознак класифікації аварійних ситуацій відносяться:

- Галузь.

Електротравми класифікуються за галузевою (відомчою) приналежністю підприємств, на яких вони сталися.

У сучасних українських реаліях доцільно вести таку класифікацію за видами економічної діяльності (наприклад: вугільна промисловість, чорна та кольорова металургія, виробництво будівельних матеріалів, хімічна промисловість і виробництво добрив, електроенергетика тощо) та за підпорядкуванням відповідним державним органам і галузевим адміністраціям (наприклад,

Міністерству енергетики України, Міністерству економіки України, Державній службі України з питань праці тощо).

Класифікація має відповідати чинним українським нормативно-правовим актам і стандартам (ДСТУ, накази профільних міністерств і відомств) та бути придатною для статистичного обліку й аналізу нещасних випадків [2].

- Технологічний процес виробництва.

З урахуванням різних умов виробництва виокремлені підсистеми — підприємства з відкритою розробкою та підприємства з підземною розробкою (у останній підсистемі введені градації: поверхневі комплекси шахт і рудників та підземні виробки).

- Динаміка електротравматизму — зіставлення оцінок рівня електротравматизму в різні роки.
- Рід струму і робоча напруга електроустановок.

Аналіз виконано з градацією за родами струму — змінний промислової частоти та випрямлений; за класом напруги — до 1000 В і вище 1000 В.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.247-10	Арк.
						18
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- Вид електрообладнання.

При аналізі виконано класифікацію електротравм за видами електрообладнання з застосуванням елементно-електротехнічного підходу.

- Місце пригоди.

Аналіз за цим класифікаційним ознакою базувався на територіальному принципі.

- Класифікація електротравм за часом враховувала місяць, день тижня та годину випадку.

- Професія.

Нещасні випадки поділялися на ті, що сталися з особами електротехнічних і неелектротехнічних професій; кожна група, в свою чергу, розбивалася на низку професій.

- Стаж роботи та вік потерпілих.

- Причини електротравматизму класифіковані за характером обставин нещасних випадків.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.247-10	Арк.
						19
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2.2. Застосування ймовірісно-статистичних методів до аналізу умов електробезпеки при застосуванні електроенергії на гірничих підприємствах у світлі завдань безпечної експлуатації електротехнічних комплексів і систем

Застосування ймовірісно-статистичних методів до аналізу електротравматизму призводить до отримання статистичних оцінок і законів розподілу показників, що характеризують електротравматизм.

У зв'язку з цим при дослідженні потрібно виконати оцінку статистик і описати закони розподілу цих показників.

Одне з питань методики дослідження електротравматизму — питання репрезентативності отриманих оцінок.

З урахуванням того, що н.в. з точки зору збору статистичного матеріалу є досить рідкісними подіями, до дослідження доцільно приймати повні вибірки по гірничих підприємствах розглянутих галузей.

Аналіз статистичних даних про електротравми з застосуванням наведеної класифікації дозволяє встановити основні умови, осередки та причини виробничого електротравматизму.

Водночас дослідження, виконані на базі цієї класифікації, не дозволяють розглянути процес виникнення н.в. у часі.

З цією метою слід розглянути методичні принципи дослідження й моделювання процесу виникнення ЕТ.

Процес виникнення електротравми характеризується різноманіттям явищ, що перебувають у причинно-наслідкових зв'язках.

Зазначені явища відбуваються в часі і становлять ланцюг послідовних подій, у якому кожна з попередніх подій обумовлює наступні.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.247-10	Арк.
						20
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

У зв'язку з цим для аналізу виникнення електротравм доцільно застосувати методологію причинного аналізу.

Допустимість такого підходу пояснюється тим, що поняття причинності застосовується у випадках, коли здійснення однієї події є достатньою підставою для очікування здійснення іншої.

Причинна обумовленість призводить до побудови моделі події, під якою розуміють електротравмування.

Вивчення моделі дозволяє зрозуміти причинні відносини, що породили електротравму.

Ще однією корисною властивістю методу причинного аналізу є певна можливість абстрагуватися від фізичного змісту конкретних явищ, що входять до ланцюга послідовних подій при виникненні електротравми.

За допомогою такого підходу можна досліджувати причинність шляхом висновків на моделях, побудованих на подіях.

Цінність цього підходу при аналізі електротравматизму обумовлена тим, що при виникненні ЕТ мають місце технічні, організаційні, соціальні, психологічні та інші явища.

Для побудови причинних моделей походження ЕТ необхідно розглянути визначення причинності і основні положення причинного аналізу.

В основі причинного аналізу електротравматизму лежить поняття події.

Подією вважається настання в певному об'єкті певного стану.

Наприклад: зниження значення опору ізоляції електричної мережі нижче допустимого, відключення електроустановки, замикання на землю, дія персоналу, виникнення струму через тіло людини тощо.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.247-10	Арк.
						21
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Аналіз статистичного матеріалу про ЕТ дозволяє зробити такі міркування.

Події у часовому ланцюгу походження ЕТ впорядковані і відбуваються таким чином, що можна висунути припущення про причинні зв'язки між ними.

У загальному вигляді формулювання цієї причинної зв'язку таке: подія А є причиною іншої події В, якщо перша подія викликала настання другої події або якщо здійснення А є достатнім, але не обов'язковим для настання В.

У часовому аспекті А, будучи причиною, передує В — наслідку. З урахуванням логічного і тимчасового аспектів причинну зв'язок можна визначити як зв'язок, при якому здійснення першої події є достатньою умовою для здійснення пізнішої події.

Причинні зв'язки проявляються у зміні станів об'єктів під впливом операторів, під якими розуміють матеріальні пристрої або процеси зі структурою, що забезпечують реалізацію причинних зв'язків.

Оператори й причинні зв'язки можуть підрозділятися на складові (компоненти), що дозволяє спрощувати дію причинних зв'язків для аналізу перетворення однієї події в іншу.

Це розділення доцільно проводити до рівнів, що забезпечують розуміння дії причинності.

Розділ 3. Практична реалізація застосування ймовірнісно-статистичних методів до аналізу умов електробезпеки при застосуванні електроенергії на гірничих підприємствах у світлі завдань безпечної експлуатації електротехнічних комплексів і систем

3.1. Приклад реалізації застосування ймовірнісно-статистичних методів до аналізу умов електробезпеки при застосуванні електроенергії на гірничих підприємствах у світлі завдань безпечної експлуатації електротехнічних комплексів і систем

Як приклад розглянемо наступний н.в.

Постраждалий (електрослюсар, 49 років, стаж за спеціальністю 27 років) на вентиляційному штреку після зняття напруги на ділянковій підстанції виконував роботи з підключення кабелю до автоматичного вимикача (АВ).

Раптово було подано напругу, внаслідок чого настала смертельна травма.

При розслідуванні встановлено, що блок захисту від витоків струму на землю типу БЗП-1 на ділянковій підстанції був відключений, а подача напруги сталася через невузгоджені дії персоналу.

У цьому випадку подія «відключений блок захисту від витоків струму на землю» є причиною події «ураження електричним струмом».

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.247-10		
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дат			
Розробив		Перов А.М.			Розділ 3	Літ.	Лист
Перевірів		Сінчук О.М.					23
Реценз.							9
Н. Контр.		Сінчук О.М.				КНУ ЕЕМ-22-1	
Затвердив		Пересунько І.І.					

Саме відключення блоку ще не викликає причинну дію — вона реалізується за наявності оператора — напруги на АВ.

Слід зазначити, що відключення блоку БЗП-1, у свою чергу, могло бути наслідком іншої причини — «недопустимого зниження рівня опору ізоляції».

Ця причина могла бути наслідком причини — «низький рівень експлуатації» тощо.

Як причину, що привела до ураження, можна також розглядати подію «неузгоджені дії (помилкові дії) персоналу», причому причинна зв'язок забезпечена оператором — напругою на АВ.

Такі події, як відключення блоку БЗП-1, неправильні дії персоналу, контакт постраждалого з частинами під напругою, ураження електричним струмом — для реалізації причинної зв'язку мають бути узгоджені в часі і просторі.

Можна стверджувати, що перша подія є причиною другої лише тоді, коли перша подія узгоджується з певним оператором і має здатність викликати другу подію.

Узгодження в просторі та часі передбачає настання окремих станів у межах дії поля подій.

Подія, яка раніше не породжувала наслідків, може почати породжувати їх, якщо в її полі з'явиться відповідний оператор.

Причинний висновок починається з припущення, що подія може бути причиною будь-якої іншої події.

Виключаючи потім зв'язки, які неможливі або неправдоподібні, будуються моделі причинних відносин [3].

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.247-10	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		24

Для аналізу причинних зв'язків доцільно виконати графічне зображення причинних відносин, що виникають при електротравмуванні.

Це зображення доцільно виконувати за допомогою поточних (потоківих) графів, які передбачають подання подій у вигляді потоків.

У цьому випадку причинна зв'язок між різними подіями можна характеризувати за допомогою поточних характеристик.

Потокові графи є теоретичною моделлю процесу електротравмування як процесу з причинно-наслідковими зв'язками.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.247-10	Арк.
						25
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3.2. Побудова потокових графів для реалізації застосування ймовірнісно-статистичних методів до аналізу умов електробезпеки при застосуванні електроенергії на гірничих підприємствах у світлі завдань безпечної експлуатації електротехнічних комплексів і систем

При побудові потокових графів доцільно виходити з наступних положень:

- кожна змінна на діаграмі зображується символом або аббревіатурою; змінні утворюють вершини графа;
- суцільна лінія між вершинами позначає безпосередню причинну зв'язок для даної пари змінних; стрілка вказує напрямок дії причинної зв'язку — у бік залежної змінної;
- кожний причинний шлях позначається сигналом, що у загальному випадку є характеристичною таблицею, складною формулою або числом;
- індексація шляхового символу, представленого числом, виконується за допомогою двох індексів: перший характеризує залежну, другий — незалежну змінну.

Якщо позначити, застосовуючи попередній приклад, такі події: проходження через постраждалого недопустимого струму — А, відключене реле витоку — В, помилкова подача напруги — С, то причинні зв'язки можна відобразити, як це показано на рис. 3.1а.

Якщо до розгляду додати події: зниження рівня опору ізоляції — D, неправильна дія особи, яка помилково подала напругу — Е, то причинні зв'язки відображаються діаграмою на рис. 3.1б.

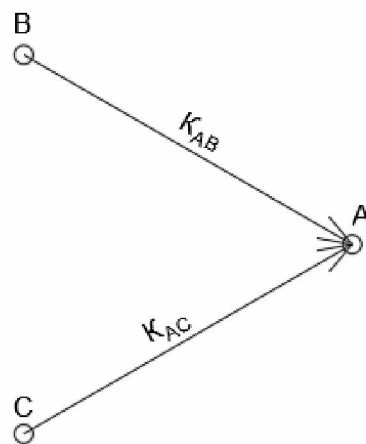
					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.247-10	Арк.
						27
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3.3. Аналіз поточкових графів щодо реалізації застосування ймовірнісно-статистичних методів до аналізу умов електробезпеки при застосуванні електроенергії на гірничих підприємствах у світлі завдань безпечної експлуатації електротехнічних комплексів і систем

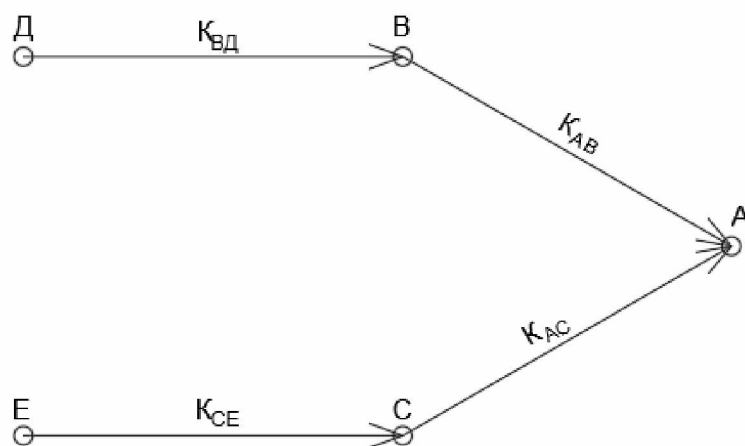
Аналіз поточкових графів дозволяє простежити всі наслідки вхідних змінних, під якими виступають потоки подій, що мають місце при виникненні ЕТ.

При аналізі поточкового графа процесу електротравмування розглядаються всі можливі результати дії системи, визначається ступінь корельованості між змінними, робляться висновки про шляхи зміни системи з метою отримання потрібних вихідних характеристик.

Для аналізу поточкових графів доцільно скласти структурні рівняння, за допомогою яких якісні оцінки виражаються кількісно.



а)



б)

Рисунок 3.1. – Приклад діаграми причинно-наслідкових зв'язків: а – з урахуванням причин В та С; б – з урахуванням причин Д, Е, В та С.

Для розглядуваного н.в. і причинних діаграм, приведених на рис. 3.1, маємо такі структурні рівняння:

$$A = K_{AB} \cdot B + K_{AC} \cdot C, \quad (3.1)$$

$$A = K_{AB} \cdot (K_{BD} \cdot D) + K_{AC} \cdot (K_{CE} \cdot E) , \quad (3.2)$$

де K_{AB} , K_{AC} , K_{BD} — структурні коефіцієнти, що показують, яким чином кількісно перетворюється зміна однієї змінної (події) у зміну іншої

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.247-10	Арк.
						30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3.4. Висновки щодо реалізації застосування ймовірно-статистичних методів до аналізу умов електробезпеки при застосуванні електроенергії на гірничих підприємствах у світлі завдань безпечної експлуатації електротехнічних комплексів і систем

Аналіз структурних рівнянь дозволяє зробити висновок про вихідні величини на підставі інформації про вхідні.

Оцінка стану електротравматизму, виконана за допомогою викладених методичних принципів, дозволяє разом з оцінкою динаміки, умов, осередків та обставин н.в. отримати причинно-наслідкову модель процесу електротравмування, необхідну для прийняття управлінських рішень щодо забезпечення безпеки процесу електроспоживання [4].

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.247-10	Арк.
						31
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Висновки

Метою роботи було підвищення рівня промислової безпеки та експлуатаційної надійності систем підземного електропостачання гірничорудних підприємств шляхом розробки комплексного методу ранньої ідентифікації та оцінювання ризиків виникнення аварійних ситуацій у силовому обладнанні та контактних тягових мережах.

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

Провести ретроспективний аудит та класифікацію типових аварійних режимів і відмов у системах електропостачання шахт та рудників (короткі замикання, витоки струму на землю, перенапруги, термічна деградація).

Дослідити фізико-хімічні та механічні фактори впливу агресивного рудникового середовища (вологість, пил, вібрації, обвалення гірської маси) на стан ізоляції силового обладнання та геометрію контактної мережі.

Розробити критерії та алгоритми ідентифікації передаварійних станів на основі безперервного моніторингу параметрів мережі (наприклад, аналізу часткових розрядів або спектрального аналізу струмів споживання).

Створити ймовірнісну модель оцінювання ризиків виникнення пожеж та електротравм із застосуванням методів "дерева відмов" (Fault Tree Analysis) або "дерева подій" (Event Tree Analysis).

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.247-10	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		32

Запропонувати комплекс апаратних та організаційних рішень для превентивного відключення пошкоджених ділянок мережі з мінімізацією економічних втрат від простою обладнання.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.247-10	Арк.
						33
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Список використаних джерел

1. Sinchuk O., Kobeliatskyi D. Model studies to identify input parameters of an algorithm controlling electric supply/consumption process by underground iron ore enterprises. *Mining of Mineral Deposits*. 2023. Vol. 17, Iss. 3. P. 86–93.
2. ДСТУ EN 50160:2023. Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загального призначення. [Чинний від 2023-08-12]. Вид. офіц. Київ, 2023. 32 с.
3. Sinchuk O., Strzelecki R., Sinchuk I., Beridze T., Fedotov V., Baranovskyi V., Budnikov K. Mathematical model to assess energy consumption using water inflow-drainage system of iron-ore mines in terms of a stochastic process. *Mining of Mineral Deposits*. 2022. Vol. 16, Iss. 4. P. 19–28.
4. Півняк Г.Г., Жежеленко І.В., Ю.А. Папаїка, Несен Л.І. Перехідні процеси в системах електропостачання: підручник для ВНЗ / за ред. Півняка Г.Г.; М-во освіти і науки України, Нац. гірн. ун-т. – 5-те вид., доопрац. та допов. – Дніпро: НГУ, 2016. – 600 с.
5. Ghahramani M., Habibi D., Shahnia F. Addressing Uncertainty in Renewable Energy Integration for Western Australia’s Mining Sector: A Robust Optimization Approach. *Energies*. 2024. Vol. 17, Iss. 22. 5679.
6. Khomenko M., Tuliupa S., Khomenko O., Ilkiv B. Determination of Dynamic Characteristics for Predicting Electrical Load Curves

of Mining Enterprises. *Electricity*. 2022. Vol. 3, Iss. 2. P. 216–227.

7. Li Y., Xu Y., Zhang Y. Stochastic Optimization Scheduling Method for Mine Electricity–Heat Energy Systems Considering Power-to-Gas and Conditional Value-at-Risk. *Energies*. 2024. Vol. 18.
8. Касаткіна І.В., Бойко С.М., Жуков О.А. Інтелектуальні системи електропостачання. Навчальний посібник / 2023. – 151 с.
9. Morkun V. Distributed control of ore beneficiation interrelated processes under parametric uncertainty / V. Morkun, N. Morkun, V. Tron // Metallurgical and Mining Industry. 2015. No 8. p. 18–21.
10. Morkun V., Tcvirkun S. Investigation of methods of fuzzy clustering for determining ore types. Metallurgical and Mining Industry. 2014. No 5, p. 12-15
11. Dhillon, B. S. (2010). Mine Safety: A Modern Approach. Springer Science & Business Media.
12. Kecojevic, V., Komljenovic, D., Groves, W., & Radomsky, M. (2007). An analysis of equipment-related fatal accidents in US mining operations: 1995–2005. Safety Science, 45(8), 864-874.
13. Novak, T., & Snyder, J. W. (2004). Extensive overview of electrical safety in non-coal mining. IEEE Transactions on Industry Applications, 40(6), 1485-1492.
14. Cawley, J. C. (2003). Electrical accidents in the mining industry, 1990–1999. IEEE Transactions on Industry Applications, 39(6), 1570-1577.

15. Sottile, J., & Trutt, F. C. (2000). Condition monitoring of synchronous motors. IEEE Transactions on Industry Applications, 36(5), 1431-1436.
16. Yenchek, M. R., & Cole, G. P. (2001). Thermal modeling of portable power cables. IEEE Transactions on Industry Applications, 37(3), 914-920.
17. Sottile, J., Trutt, F. C., & Leedy, A. W. (2001). Condition monitoring of stator electrical faults in induction machines. IEEE Transactions on Industry Applications, 37(5), 1434-1439.
18. Shao, Z., & Zhang, Y. (2014). Risk assessment of electric shock accidents in coal mine based on fault tree analysis. Safety Science and Engineering, 71-77.
19. Broadhurst, J. L., & Petrie, J. G. (2010). Towards a sustainable life cycle perspective in the mining industry. Journal of Cleaner Production, 18(8), 844-845.
20. Tien, J. C. (2001). Practical Coal Mine Safety. Intertec Publishing.
21. Burr, P., & Homce, G. T. (2006). Preventing electrical accidents in the mining industry: A review of MSHA databases. IEEE Industry Applications Magazine, 12(6), 33-38.
22. Visser, M. (2015). Condition-based maintenance in the mining industry. Journal of Quality in Maintenance Engineering, 21(2), 213-228.
23. 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.
24. IEEE. (2014). IEEE Standard for the Protection of Communication Installations from Lightning Effects and AC

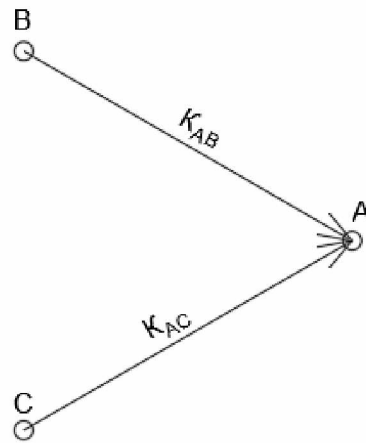
Power Faults in Mining Environments (IEEE Std 1692-2014).
IEEE Standards Association.

25. Koval, D. O. (2001). Rural and remote power systems safety and reliability constraints. IEEE Transactions on Industry Applications, 37(1), 168-173.

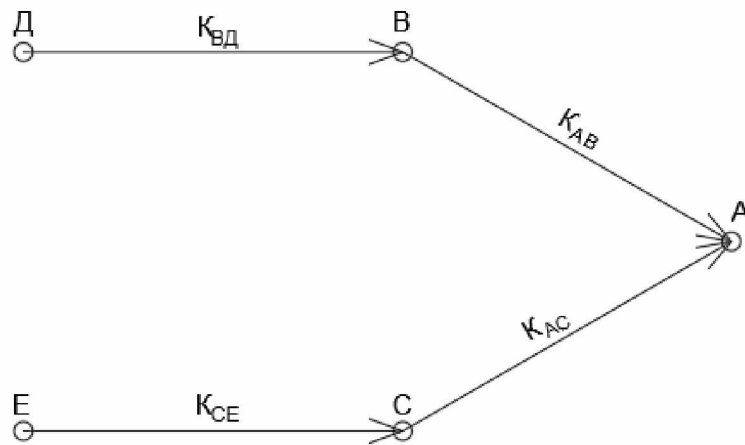
					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.247-10	Арк.
						37
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Додаток А

Приклад діаграми причинно-наслідкових зв'язків: а – з урахуванням причин В та С; б – з урахуванням причин Д, Е, В та С.



а)



б)