

Міністерство освіти і науки України
Криворізький національний університет
Електротехнічний факультет

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до кваліфікаційної роботи бакалавра

за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Дослідження надійності електромереж шахти «Ювілейна»

ПАТ «ДСН Суха балка»

Виконав: здобувач групи ЕЕМ-23ск _____ Олександр ЛУЦЕНКО

Керівник випускної роботи _____ к.т.н., доц. Олексій МИХАЙЛЕНКО

Нормоконтролер _____ к.т.н., доц. Олексій МИХАЙЛЕНКО

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

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

Кривий Ріг

2026

Криворізький національний університет

Факультет: *електротехнічний*

Освітній рівень: *бакалавр*

Спеціальність: *141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка*

**ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ
ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ**

Луценка Олександра Євгеновича

1. Тема роботи: Дослідження надійності електромереж шахти «Ювілейна» ПАТ «DCH Суха балка»

2. Строк подання студентом роботи: 15 червня 2026 р.

3. Мета та завдання кваліфікаційної роботи: підвищення якості електропостачання шахти «Ювілейна» «DCH Суха балка» шляхом дослідження надійності різних варіантів живлення підземних електроприймачів

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які необхідно розробити): аналіз наявних варіантів схем живлення шахтних електроприймачів; обчислення електричних навантажень головної знижувальної та центральної підземної підстанції шахти; вибір трансформаторів, комутаційного обладнання і кабельних ліній; перевірка обладнання на стійкість до струмів короткого замикання; дослідження надійності основних схем живлення підземних електроприймачів шахти

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень): основні схеми живлення підземних електроприймачів шахти; однолінійна схема електропостачання шахти «Ювілейна»; схеми електрична та заступна електромережі шахти для розрахунків струму короткого замикання; показники надійності схем електромереж шахти

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Консультант	Дата, підпис	
		Завдання видав	Завдання прийняв
I	Олексій МИХАЙЛЕНКО		
II	Олексій МИХАЙЛЕНКО		
III	Олексій МИХАЙЛЕНКО		

7. Календарний план

№	Етапи роботи	Термін виконання
1	Загальна частина	12.05.25–22.05.25
2	Спеціальна частина	23.05.25–30.05.25
3	Проектно-конструкторська розробка	31.05.25–07.06.25
4	Оформлення пояснювальної записки	08.06.25–14.06.25
5	Оформлення презентації	15.06.25–16.06.25
6		
7		

Дата видачі завдання: 12.05.2025 р.

Здобувач вищої освіти _____

Олександр ЛУЦЕНКО

Керівник роботи _____

Олексій МИХАЙЛЕНКО

Реферат

Дипломна робота присвячена дослідженню надійності електромереж шахти «Ювілейна» ПАТ «ДСН Суха Балка». У роботі проведено комплексний аналіз електропостачання підприємства, зокрема розглянуто загальні характеристики електромереж залізрудних шахт, особливості електропостачання шахтних електроприймачів та вибір оптимальної схеми електропостачання.

Основна увага приділена розрахунку електричних навантажень, вибору силових трансформаторів, обчисленню струмів короткого замикання та підбору комутаційної апаратури. Також проведено дослідження надійності електромережі з використанням методів теорії ймовірностей та математичної статистики. Порівняно дві схеми електропостачання: через розподільний пункт лави та через пересувні дільничні підстанції. Результати показали, що схема з пересувними дільничними підстанціями має на 22% вищу надійність завдяки зниженню інтенсивності відмов на 40%.

Робота містить практичні рекомендації щодо підвищення надійності електропостачання шахти, зокрема резервування критичних елементів мережі та використання сучасного обладнання. Дослідження має важливе значення для забезпечення безпеки та ефективності роботи гірничодобувного підприємства.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: шахта, електромережах, обчислення електропостачання, надійність, імовірнісні методи, інтенсивність відмов, час наробітку на відмову.

					<i>ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.250с-05</i>	Арк.
						4
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Зміст

Розділ I. Загальні характеристики електромереж залізорудних шахт	9
1.1 Відомості про ПАТ «ДСН Суха Балка» і шахту «Ювілейна»	10
1.2 Характеристика елементів електромереж шахти за надійністю	11
1.3 Відомості про електромережі підземних виробок	13
1.4 Особливості електропостачання електроприймачів шахти	17
1.4.1 Електропостачання горизонтів шахти через ствол.....	17
1.4.2 Електропостачання діляниць шахти через шурфи і свердловини ...	20
1.5 Підходи до пересування діляничних знижувальних підстанцій і розподільних пунктів лав	21
1.6 Вибір варіанту схеми електропостачання.....	22
Висновки	22
Розділ II. Розрахунок електромережі шахти «Ювілейна»	23
2.1 Обчислення електричних навантажень з обранням силових трансформаторів електромережі	24
2.2 Обчислення струмів короткого замикання в електромережі шахти «Ювілейна».....	29
2.2.1 Обчислення струмів короткого замикання в електромережі шахти «Ювілейна» на боці 6 кВ.....	31
2.2.2 Обчислення струмів короткого замикання в електромережі шахти «Ювілейна» на боці 0,4 кВ.....	35
2.3 Вибір устаткування розподільного пункту високої напруги.....	38
2.3.1 Шини	38
2.3.2 Ізолятори	40
2.3.3 Комутаційне обладнання.....	40
2.3.4 Вимірювальні пристрої.....	40

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.250с-05	Арк.
						5
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

2.4	Вибір проводів для кабельних ліній.....	41
2.5	Вибір комутаційної апаратури для приймачів шахти на 0,4 кВ.....	43
	Висновки.....	43
Розділ III. Дослідження надійності електромереж шахти «Ювілейна»		45
3.1	Методика дослідження надійності електричної мережі шахти.....	46
3.2	Дослідження надійності електромережі шахти «Ювілейна»	49
3.2.1	Інтенсивність відмов елементів шахтної електромережі.....	50
3.2.2	Розрахунок надійності кожної ланки.....	52
	Висновки.....	55

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.250с-05	Арк.
						6
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Вступ

Аналіз надійності електричних мереж шахти «Ювілейна» з використанням методів теорії імовірності та статистики є необхідним для забезпечення безперебійного та безпечного функціонування гірничодобувного підприємства. Електропостачання шахти має критичне значення, оскільки від нього залежить робота вентиляційних систем, підземного транспорту, водоотведення, а також освітлення та зв'язку, що безпосередньо впливає на безпеку працівників та ефективність видобутку корисних копалин. Випадкові відмови в електромережах можуть призвести до аварійних ситуацій, зупинки виробничих процесів, фінансових втрат і навіть загрози життю людей, тому оцінка їх надійності є вельми важливою.

Застосування теорії імовірності дозволяє врахувати стохастичну природу відмов у складних енергетичних системах шахти. Наприклад, інтенсивність відмов кабелів, комутаційного обладнання чи трансформаторів може змінюватися залежно від умов експлуатації, таких як підвищена вологість, механічні навантаження або хімічно агресивне середовище. Математичні моделі, засновані на класичних розподілах, дають змогу прогнозувати імовірність виходу обладнання з ладу, оцінювати середній час безвідмовної роботи та визначати критичні компоненти, які потребують резервування або модернізації.

Математична статистика дозволяє аналізувати історичні дані про відмови, виявляти закономірності та кореляції між різними факторами, що впливають на стабільність електропостачання. Наприклад, регресійний аналіз може показати, як зростання навантаження в окремі періоди впливає на частоту аварій, а методи кластерного аналізу – виявити типові сценарії розвитку несправностей. Це дає змогу оптимізувати графіки профілактичного обслуговування, розподіляти резервні потужності та планувати модернізацію мережі з мінімальними витратами.

Особливістю шахти «Ювілейна» є її підземні умови експлуатації, які суттєво відрізняються від наземних енергосистем. Високий рівень пилу,

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.250с-05	Арк.
						7
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

вібрації, можливість механічних пошкоджень і обмежений доступ для ремонту збільшують імовірність відмов, що потребує більш ретельного підходу до аналізу надійності. Імовірнісні методи дозволяють оцінити кумулятивний ефект цих факторів, розрахувати інтегральні показники, такі як коефіцієнт готовності системи, і обґрунтувати необхідність додаткових заходів захисту, таких як дублювання ліній живлення або встановлення автоматичних систем відновлення напруги.

Таким чином, аналіз надійності електричних мереж шахти «Ювілейна» є вельми актуальною задачею для даної випускної роботи.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.250с-05	Арк.
						8
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Розділ І. Загальні характеристики електромереж залізорудних шахт

					<i>ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.250с-05</i>			
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підп.</i>	<i>Дата</i>				
<i>Розроб.</i>		<i>Луценко О.С.</i>			<i>Загальна частина</i>	<i>Літ.</i>	<i>Аркуш</i>	<i>Аркушів</i>
<i>Перевір.</i>		<i>Михайленко О.Ю.</i>				<i>Н</i>	<i>9</i>	
<i>Конс.</i>						<i>ЕЕМ-22ск</i>		
<i>Н.контр.</i>		<i>Михайленко О.Ю.</i>						
<i>Затверд.</i>		<i>Пересунько І.І.</i>						

1.1 Відомості про ПАТ «ДСН Суха Балка» і шахту «Ювілейна»

Шахта «Ювілейна» – одне з двох ключових видобувних підприємств ПАТ «ДСН Суха Балка», яке має виробничі потужності за аглорудою 2,4 млн. тонн/рік з вмістом заліза 56–60% [1]. Вона є стратегічно важливим залізорудним підприємством, що входить до складу однієї з найбільших гірничодобувних компаній України. Розташована в Дніпропетровській області, вона спеціалізується на підземному видобутку залізної руди високої якості, яка є головною сировиною для металургійної промисловості. Підприємство має сучасну виробничу інфраструктуру, що включає глибокі горизонти видобутку, механізовані комплекси з підготовки та транспортування руди, а також поверхневі дробарно-сортувальні комплекси [1].

Шахтні родовища ПАТ «ДСН Суха Балка» містять значні запаси високоякісних залізних руд, які становлять основну сировинну базу підприємства. Геологічна структура родовища характеризується наявністю потужних покладів природно багатих руд, переважно мартитового типу, з меншою часткою гематитових руд. Особливістю цих родовищ є їхня глибинна протяжність – на шахті «Ювілейна» промислові запаси підтверджені до позначки 2060 метрів, тоді як у родовищі шахти імені Фрунзе вони розвідані до глибини 1500 метрів.

Усе підприємство демонструє стабільні виробничі показники, щорічно видобуваючи близько 3,1 мільйона тонн товарної руди (на обидвох шахтах) [1]. Високий технологічний рівень збагачення дозволяє отримувати продукцію з винятково високим вмістом заліза, що робить її особливо цінною для металургійного виробництва. Якість руди забезпечує стабільний попит на ринку та дозволяє підприємству займати міцні позиції серед постачальників залізорудної сировини.

Запаси родовища забезпечують довгострокову перспективу розвитку підприємства. За оцінками фахівців, наявних запасів багатих руд на шахтах рудника достатньо для безперебійної роботи протягом наступних 25 років, при цьому загальний обсяг оцінених запасів становить близько 75 мільйонів тонн.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.250с-05	Арк.
						10
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Окремо варто відзначити наявність значних ресурсів магнетитових кварцитів, запаси яких перевищують 580 мільйонів тонн. Ці поклади становлять важливий резерв для майбутнього розвитку видобутку, особливо з урахуванням постійного вдосконалення технологій збагачення.

Перспективи подальшого освоєння родовища пов'язані з можливістю розширення глибинних горизонтів видобутку та впровадженням новітніх технологій переробки руд. Особливу цінність представляє той факт, що нафтові родовища характеризуються високою концентрацією корисного компонента, що значно підвищує економічну ефективність їх розробки. Комбінована розробка як багатих залізних руд, так і магнетитових кварцитів відкриває широкі можливості для оптимізації виробничих процесів і збільшення терміну експлуатації родовища [1].

Технологічний процес на шахті «Ювілейна» організований з урахуванням сучасних вимог до ефективності та безпеки, включаючи автоматизовані системи контролю газового режиму, моніторингу стану виробок та управління вентиляцією.

Підприємство постійно модернізує свою технічну базу, впроваджуючи новітні методи кріплення гірничих виробок та сучасні схеми розкриття родовища. Сьогодні шахта «Ювілейна» продовжує розвиватися як сучасне, технологічно оснащене підприємство, що поєднує багаторічний досвід у галузі підземного видобутку залізної руди з інноваційними підходами до організації виробництва. Вона залишається важливою ланкою у ланцюжку постачання сировини для вітчизняної металургійної промисловості, сприяючи економічному розвитку регіону та країни в цілому [1].

1.2 Характеристика елементів електромереж шахти за надійністю

Електричні мережі шахти «Ювілейна» представляють собою складну систему взаємопов'язаних елементів, кожен з яких відіграє вирішальну роль у забезпеченні безперебійного електропостачання та безпеки гірничих робіт. З точки зору надійності ключовими компонентами є кабельні лінії, розподільчі підстанції, комутаційна апаратура, електродвигуни, системи захисту та

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.250с-05	Арк.
						11
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

автоматики, які функціонують в умовах підвищених експлуатаційних навантажень та агресивного середовища. Кабельні лінії, що прокладені у підземних виробках, постійно піддаються впливу механічних навантажень, вологи, хімічно активних речовин і коливань температури, що призводить до старіння ізоляції, корозії металевих елементів і зростання імовірності пошкоджень. Особливу небезпеку становлять пошкодження кабелів при проведенні гірничих робіт, що вимагає ретельного розрахунку їх міцності та застосування додаткових заходів захисту [2, 3].

Розподільчі підстанції, до яких належать центральні підземні підстанції (ЦПП) та пересувні дільничні знижувальні підстанції (ПДЗП), як вузлові елементи мережі характеризуються складністю конструкції та високою залежністю надійності від стану трансформаторів, шинних з'єднань і систем охолодження. Трансформаторне обладнання працює в режимі постійних навантажень, що призводить до теплового старіння ізоляції, а в умовах шахтного середовища ці процеси прискорюються через наявність рудного пилу та підвищеної вологості. Шинні з'єднання схильні до ослаблення контактів унаслідок вібрацій і термічних деформацій, що може спричинити локальні перегіви та пожежонебезпечні ситуації [2, 3].

Комутаційна апаратура, до якої відносяться вимикачі, роз'єднувачі та пускачі, є одним з найбільш вразливих ланок електричної мережі через механічний знос контактів, ерозію дугогасильних пристроїв і вплив забрудненого повітря. Часті комутації під навантаженням, особливо при роботі електродвигунів насосів і вентиляторів, призводять до деградації комутаційних властивостей апаратів, що збільшує ризик відмов і потребує регулярного обслуговування.

Електродвигуни, які живлять насосні агрегати, вентиляційні установки і конвеєрні системи, експлуатуються в особливо жорстких умовах з підвищеними пусковими струмами, механічними навантаженнями і обмеженим тепловідведенням. Їх надійність суттєво залежить від стану ізоляції обмоток, яка під впливом температури, вологості і вібрації втрачає

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.250с-05	Арк.
						12
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

свої діелектричні властивості, що може призвести до міжвиткових замикань і виходу з ладу.

Системи захисту та автоматики, такі як релейний захист, пристрої автоматичного введення резерву і системи контролю ізоляції, є критично важливими для запобігання аварійним ситуаціям, але їх власна надійність залежить від правильності налаштувань, стану датчиків і якості живлення. В умовах шахти, де присутні електромагнітні перешкоди і коливання напруги, імовірність помилкових спрацьовувань або, навпаки, відмов захисту зростає, що вимагає додаткових заходів підвищення стійкості цих систем [2, 3].

Таким чином, надійність електричних мереж шахти «Ювілейна» визначається сукупністю факторів, пов'язаних з експлуатаційними умовами, технічним станом обладнання і якістю планово-профілактичного обслуговування. Кожен елемент шахтної електромережі має свої унікальні вразливості, а їх взаємозалежність призводить до того, що відмова одного компонента може спричинити каскадний розвиток аварії, що підкреслює необхідність комплексного підходу до аналізу надійності з урахуванням специфіки роботи гірничодобувного підприємства.

1.3 Відомості про електромережі підземних виробок

Електропостачання рудних шахт ґрунтується на чітко розроблених технологічних принципах, що враховують як геологічні особливості родовищ, так і специфіку роботи гірничого обладнання. Залежно від глибини знаходження пластів і конфігурації виробок, напруга 6 кВ подається або від ЦПП при глибокому заляганні, або від спеціальних свердловинних трансформаторних установок при дрібному заляганні [4, 5]. Особливу увагу приділяється кабельним магістралям, які прокладаються з урахуванням необхідності забезпечення механічного захисту та термостійкості в умовах підвищеної вологості та вібрацій.

Сучасні системи електропостачання передбачають гнучке розподілення енергії через ПДЗП та розподільних пунктів напругою 6 кВ. Це дозволяє ефективно забезпечувати енергією різні ділянки видобутку, особливо з

					<i>ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.250с-05</i>	Арк.
						13
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

урахуванням сучасних тенденцій до збільшення довжин очисних лав до 300-400 метрів. Кожна така лава обладнується індивідуальною ПДЗП потужністю до 2500 кВА, що забезпечує стабільне живлення потужних забійних комплексів.

На рівні виробничих ділянок електроенергія трансформується до напруги 0,4 кВ або 0,6 кВ і через мережу РП лави та магнітних станцій подається до кінцевих споживачів [4, 5]. Для підключення обладнання, що переміщується, використовуються спеціальні гнучкі кабелі з підвищеною міцністю, обладнані швидкоз'ємними конекторами. В сучасних умовах особливе значення набуває правильний розподіл навантаження між двома ПДЗП – на конвеєрному та вентиляційному штреках, що дозволяє уникнути перевантаження мережі при роботі потужних комбайнів продуктивністю до 3000 т/добу.

Схеми електропостачання постійно вдосконалюються з урахуванням зростання потужності обладнання. Наприклад, сучасні очисні комплекси живляться за індивідуальними схемами, де одна ПДЗП обслуговує комбайн, забійний конвеєр, гідравлічну станцію та насосне обладнання, тоді як стрічкові конвеєри отримують живлення від окремої лінії. Такий підхід дозволяє мінімізувати втрати напруги та забезпечити стабільну роботу всього технологічного ланцюга. Кількість розподільних пунктів на ділянці визначається індивідуально, зазвичай варіюючись від одного до трьох, залежно від кількості та потужності електроприймачів.

Система електропостачання шахтних дільниць через центральну підземну підстанцію може реалізовуватись за кількома принципово різними схемами (див. рис. 1.1). Найпростіший варіант передбачає відсутність електропостачання для підготовчих робіт, коли енергія від ЦПП подається виключно на основні виробничі процеси, що значно обмежує можливості механізації підготовчих виробок та збільшує частку ручної праці. Більш поширеною є схема з підключенням підготовчих робіт через розподільний пункт лави, яка дозволяє забезпечувати енергією прохідницьке обладнання, але має обмеження за потужністю через загальну лінію живлення з очисними

					<i>ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.250с-05</i>	Арк.
						14
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

механізмами. Оптимальним для сучасних умов вважається варіант з використанням ПДЗП, що забезпечує стабільне живлення як очисних, так і підготовчих комплексів через окремі лінії, дозволяючи розподіляти навантаження та підвищувати надійність системи. Особливий інтерес представляє схема живлення двох прохідницьких комбайнів, яка передбачає організацію окремих ліній для кожного агрегату з можливістю паралельної роботи, що особливо актуально при інтенсивній підготовці нових ділень.

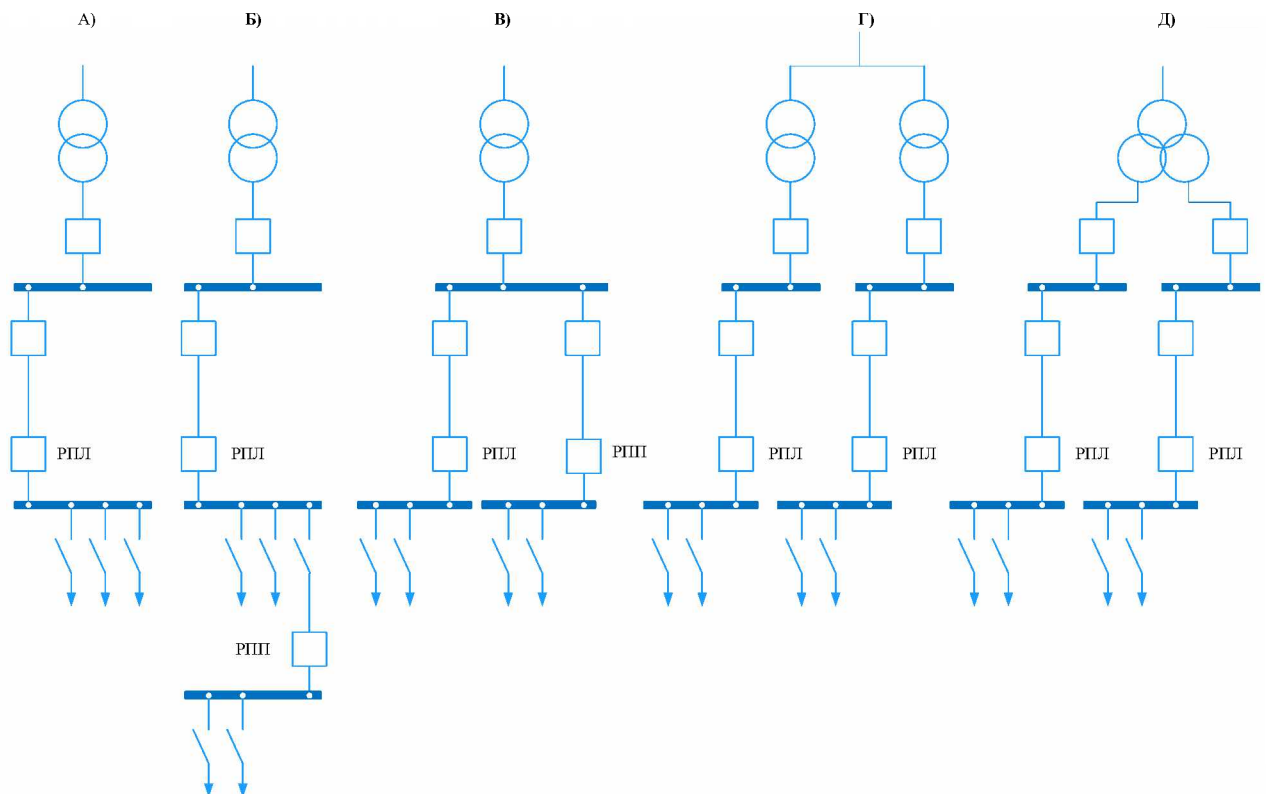


Рисунок 1.1 – Схеми живлення ділень шахти від ЦПП: а) без електропостачання підготовчих робіт; б) електропостачання підготовчих робіт через розподільний пункт лави; в) електропостачання через ПДЗП; г) електропостачання двох прохідницьких комбайнів; д) електропостачання через триобмотковий трансформатор [4, 5]

Найбільш технологічно досконалим варіантом є використання триобмоткових трансформаторів, які дозволяють формувати незалежні мережі живлення – для очисних робіт, підготовчих робіт та допоміжного обладнання, забезпечуючи максимальну гнучкість та надійність електропостачання в умовах високих навантажень сучасних шахт. Кожен з цих варіантів має свої

переваги та обмеження, а їх вибір визначається конкретними виробничими умовами, потужністю обладнання та вимогами до безпеки експлуатації.

Електропостачання шахтних ділень через свердловину також реалізується за різними схемами (див. рис. 1.2).

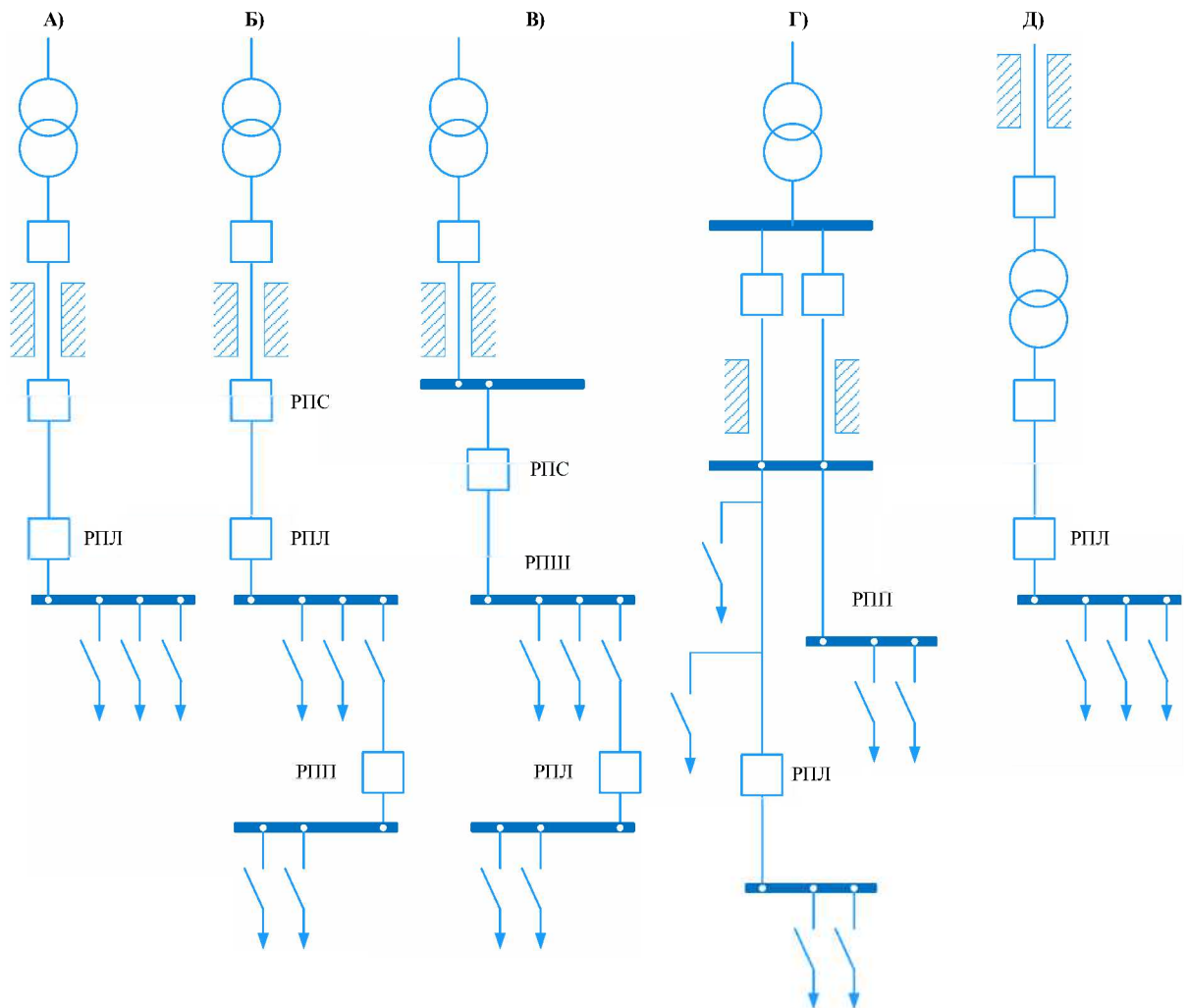


Рисунок 1.2 – Схеми живлення ділень шахти через свердловини: а) без електропостачання підготовчих робіт; б) електропостачання підготовчих робіт від РП лави; в) електропостачання збірною підготовчих робіт, штреку та лави; г) електропостачання робіт окремим кабелем; д) електропостачання ПДЗП через свердловину 6 кВ-кабелем [4, 5]

Найпростіший варіант (як і у випадку живлення від ЦПП) передбачає відсутність електропостачання підготовчих робіт, коли енергія від свердловини подається виключно на основні виробничі процеси, що значно обмежує можливості механізації та автоматизації підготовчих виробок.

Більш поширеною є схема з підключенням через РП лави підготовчих робіт, яка дозволяє забезпечувати енергією прохідницьке обладнання, але має обмеження за потужністю через загальну лінію живлення з очисними механізмами. Оптимальною для багатьох випадків є комплексна схема електропостачання підготовчих робіт, штреку та лави, що забезпечує живлення всіх ключових технологічних ланок через єдину систему, але вимагає ретельного розрахунку навантажень.

Для підвищення надійності застосовується варіант з живленням робіт окремим кабелем, який дозволяє ізолювати критично важливі процеси та уникнути перевантажень у загальній мережі. Є також і схема з електропостачанням ПДЗП через спеціальний 6 кВ-кабель від свердловини, що забезпечує максимальну гнучкість, мобільність та ефективність розподілу електроенергії по дільниці, особливо при роботі потужного сучасного обладнання. Кожен з цих варіантів має свої експлуатаційні переваги та технічні обмеження, а їх вибір залежить від конкретних гірничо-геологічних умов, потужності обладнання та вимог до безпеки та енергоефективності роботи дільниці.

ПДЗП на ділянках змінюють своє місцезнаходження нечасто.

1.4 Особливості електропостачання електроприймачів шахти

1.4.1 Електропостачання горизонтів шахти через ствол

Електропостачання підземного електрообладнання шахти через ствол застосовується переважно при глибокому заляганні пластів, де виникає необхідність організації надійної системи живлення [3].

Від шин головної знижувальної підстанції (ГЗП) на поверхні напругою 6 кВ електроенергія передається по спеціальним кабелям, прокладеним по стволу, до ЦПП, де розподіляється між різними секціями. Ця система дозволяє забезпечувати енергією як критично важливі високовольтні установки біляствольного двору, включаючи насоси головного водовідливу та підстанції для електровозної відкатки, так і низьковольтні споживачі через мережу знижувальних трансформаторів. Особливістю даної схеми є можливість

					<i>ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.250с-05</i>	Арк.
						17
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

живлення ПДЗП, які забезпечують електроенергією очисні та підготовчі ділянки з напругою 0,4 кВ або 0,6 кВ, при цьому при значній відстані та великій кількості ПДЗП використовуються розподільні пункти напругою 6 кВ.

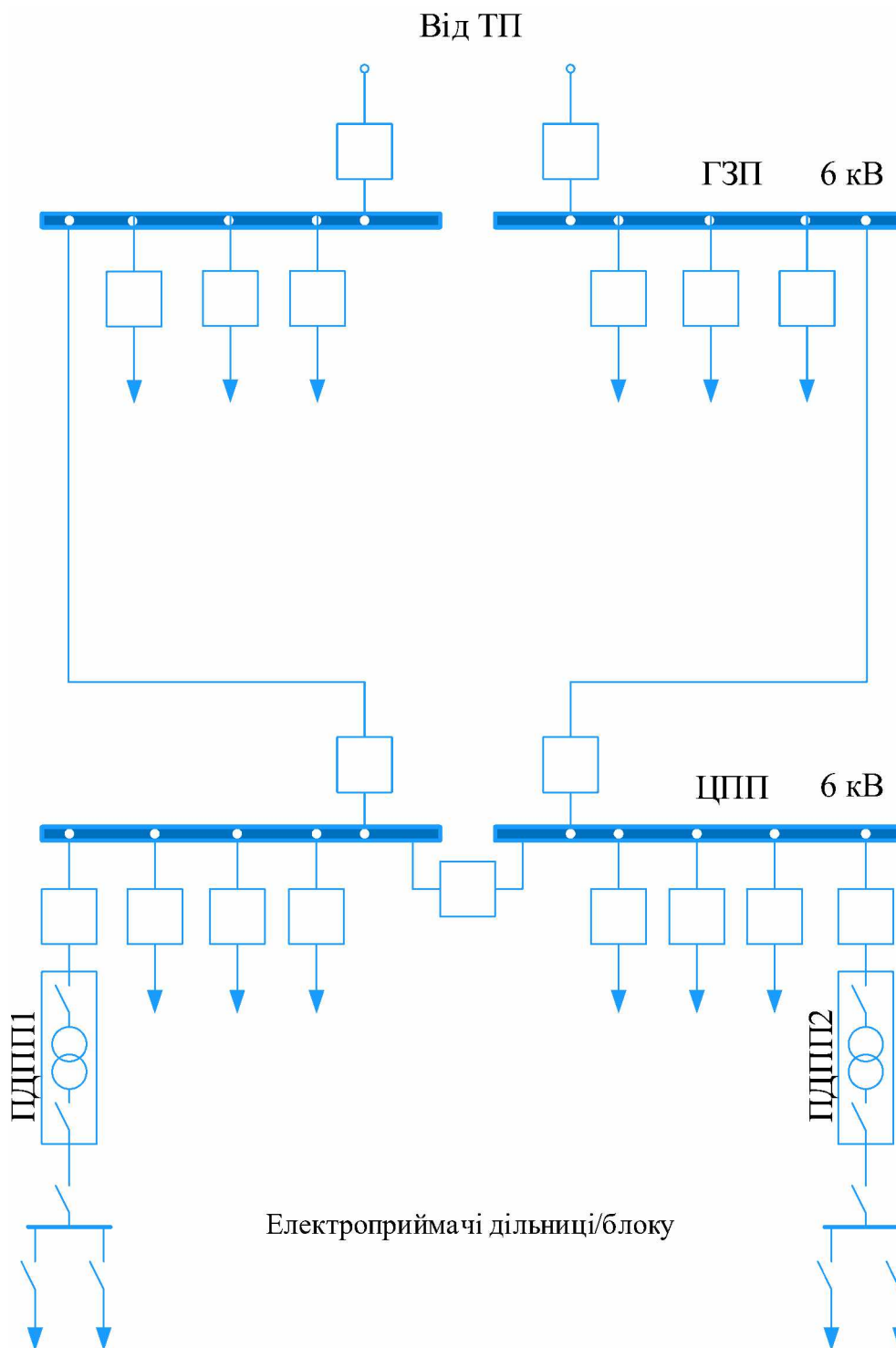


Рисунок 1.3 – Розподільна електромережа шахти від ГЗП до підземних електроприймачів [5]

Надійність системи значно підвищується за рахунок секціонування шин як на ГЗП, так і в ЦПП, що дозволяє створити резервні вводи для всіх електроприймачів. Така конструкція дає можливість у разі аварії на одній з секцій перевести живлення споживачів на іншу секцію, зберігаючи безперебійну роботу системи. Кількість ствольних кабелів визначається кількістю розроблюваних горизонтів, потужністю навантаження та необхідністю резервування, при цьому кожен кабель розраховується на максимальне навантаження шахтних електроприймачів ЦПП. Для особливо відповідальних споживачів, таких як системи водовідливу або вентиляції, передбачається підключення до різних секцій шин, що значно підвищує надійність їх роботи [2, 3].

Специфіка експлуатації високовольного обладнання у шахтних умовах вимагає додаткових заходів безпеки, зокрема використання вибухозахищеної апаратури та спеціальних заходів для обмеження струмів короткого замикання. У випадку перевищення допустимих значень струмів КЗ перед ствольними кабелями встановлюються реактори, які обмежують ці струми до безпечних величин. При наявності кількох горизонтів система значно ускладнюється, оскільки кожен горизонт обладнується окремою центральною підземною підстанцією, а резервне живлення критично важливих споживачів, таких як водовідлив наступного горизонту, організовується безпосередньо від головної знижувальної підстанції [4, 5].

До переваг електропостачання через ствол відносяться можливість використання вже існуючої шахтної інфраструктури для прокладання кабелів, стаціонарність кабельної мережі, зручність централізованого контролю та обслуговування всієї системи з ЦПП, а також простота моніторингу та експлуатації ПДЗП. Однак ця система має і суттєві недоліки, такі як необхідність роботи з високими напругами у підземних виробках, використання дорогої вибухозахищеної апаратури, висока вартість створення кабельної мережі напругою 6 кВ, проблеми з великими ємнісними струмами в кабельній мережі, необхідність застосування спеціальних заходів для обмеження струмів КЗ, а також значні витрати на прокладання великої

					<i>ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.250с-05</i>	Арк.
						19
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

кількості кабелів значного перерізу у стволі при високих потужностях споживання. Ці фактори необхідно враховувати при проектуванні систем електропостачання глибоких шахт, де використання стволової схеми є найбільш доцільним.

1.4.2 Електропостачання ділень шахти через шурфи і свердловини

Електропостачання шахтних ділень через шурфи та свердловини має суттєві відмінності у залежності від величини напруги, що використовується - низької до 1000 В або високої 6000-10000 В. При організації низьковольтного живлення на поверхні біля свердловини монтується стаціонарна або пересувна трансформаторна підстанція (бажано комплектна), яка отримує енергію від ГЗП по повітряній лінії, що має одне коло. Захист трансформаторного обладнання реалізується через плавкі запобіжники на високій стороні, автоматичні вимикачі на низькій стороні та розрядники для захисту від перенапруг. Кабельні лінії від трансформаторної підстанції до РП ділень прокладаються по спеціально пробурених свердловинах, закріплених обсадними трубами, при цьому у міру просування очисних вибоїв виконується періодичне переміщення обладнання та буріння нових свердловин [3].

Даний спосіб особливо ефективний для неглибоких пластів до 200 метрів при напрузі 0,2-0,6 кВ та відносно невеликих потужностях споживачів, проте з появою потужних видобувних комплексів та збільшенням довжин лав виникають значні втрати напруги, що змушує застосовувати кілька свердловин на одну ділянку та часто їх переміщувати. Альтернативою є подача високої напруги 6000 В з наступною трансформацією безпосередньо на ділянках, де свердловини підключаються до повітряних ліній через вимикачі або роз'єднувачі. Така схема дозволяє значно збільшити радіус дії кожної свердловини та зменшити кількість необхідних переміщень, оскільки перенесення виконується лише після повного відпрацювання виробки [4, 5].

Серед основних недоліків обох варіантів слід відзначити необхідність частого переміщення обладнання, витрати на буріння та обсадку свердловин,

					<i>ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.250с-05</i>	Арк.
						20
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

які не підлягають повторному використанню, потребу у будівництві повітряних ліній, складність обслуговування трансформаторних підстанцій, а також труднощі зимового монтажу кабелів, що вимагають їх попереднього підігріву. Більш доцільним у багатьох випадках виявляється використання вже існуючих шурфів або вентиляційних стволів для організації електропостачання, що особливо актуально для високопродуктивних шахт з розробкою групи пластів, де потрібно забезпечувати живлення флангових вентиляційних установок, віддалених блоків та інших відокремлених об'єктів.

1.5 Підходи до пересування дільничних знижувальних підстанцій і розподільних пунктів лав

Оптимізація кабельної мережі ділянки шахти безпосередньо залежить від розрахунку оптимального кроку переміщення дільничної підстанції, який визначає максимально допустиму відстань до розподільного пункту лави. Цей параметр формується під впливом двох ключових факторів: необхідності підтримки стабільної напруги на двигунах обладнання та мінімізації витрат на часті переміщення підстанції та буріння нових свердловин при поверхневому живленні [7]. Сучасні умови експлуатації, що характеризуються використанням потужних видобувних комплексів із швидким темпом проходження, призводять до значного збільшення довжини поверхів. Цей факт обмежує можливість стаціонарного використання трансформаторних підстанцій через неприйнятні втрати напруги [3, 4].

Прагнення зменшити втрати електроенергії в мережі вимагає частішого переміщення пересувних знижувальних підстанцій, що водночас збільшує експлуатаційні витрати, особливо при необхідності облаштування спеціальних майданчиків для їх розміщення. Виникає протиріччя між технічною доцільністю частого переміщення та економічною вигодою від зменшення кількості пересувань, кожне з яких вимагає значних трудовитрат і зупинки виробничого процесу. Технологічним рішенням цієї проблеми є використання спеціальних санчаток для розміщення підстанції на рамі конвеєра-

					<i>ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.250с-05</i>	Арк.
						21
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

перевантажувача при висоті штреку від 1850 мм, що дозволяє організувати синхронне переміщення електроустановок разом із забійним обладнанням.

Важливим аспектом проектування є вибір напруги живлення - при невеликій довжині ствола використовується напруга 0,6 кВ зі стаціонарним розміщенням підстанції, тоді як довжина фідерного кабелю від ПДЗП до розподільного пункту лави залишається постійною і становить крок пересування. При цьому довжина високовольтних кабелів 6000 В може варіюватись залежно від інтенсивності переміщень протягом року. Ідеальним вважається варіант з безперервним автоматичним пересуванням всієї електротехнічної інфраструктури разом із вибоєм, проте реалізацію такого рішення часто обмежує небезпека виникнення надмірних струмів короткого замикання.

1.6 Вибір варіанту схеми електропостачання

На шахті «Ювілейна» ПАТ «ДСН СУХА БАЛКА» приймаємо магістральну розподільну мережу ГЗП, ЦПП, РП високої напруги, ПДЗП, РП низької напруги. Це обумовлено тим, що свердловин для прокладання кабелів немає. Електропостачання ГЗП на території проммайданчика шахти, здійснюється від підстанції «Рудна-330» НЕК «Укренерго» двома повітряними ЛЕП 35 кВ.

Висновки

У даному розділі охарактеризовано систему електропостачання шахти «Ювілейна» «ДСН СУХА БАЛКА». З позиції надійності проаналізовані основні елементи шахтних електромереж. Обрано схему електропостачання шахтних електроприймачів.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.250с-05	Арк.
						22
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Розділ II. Розрахунок електромережі шахти
«Ювілейна»

					<i>ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.250с-05</i>		
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підп.</i>	<i>Дата</i>			
<i>Розроб.</i>		<i>Луценко О.С.</i>			<i>Розрахунок електромережі шахти «Ювілейна»</i>		
<i>Перевір.</i>		<i>Михайленко О.Ю.</i>					
<i>Конс.</i>							
<i>Н.контр.</i>		<i>Михайленко О.Ю.</i>					
<i>Затверд.</i>		<i>Пересунько І.І.</i>					
						<i>Літ.</i>	<i>Аркуш</i>
						<i>Н</i>	<i>23</i>
						<i>ЕЕМ-22ск</i>	

2.1 Обчислення електричних навантажень з обранням силових трансформаторів електромережі

Проведення обчислень електричних навантажень шахти є критично важливим етапом проектування та експлуатації енергосистеми підприємства, оскільки дозволяє точно визначити потреби у електроенергії для всіх технологічних процесів [6]. Такі розрахунки дають змогу правильно підібрати потужність трансформаторів, переріз кабелів та параметри комутаційної апаратури, що безпосередньо впливає на безпеку та ефективність роботи всього гірничого підприємства. Визначення навантажень дозволяє уникнути перевантаження електромережі шахти, запобігає аварійним ситуаціям та забезпечує стабільну роботу обладнання, особливо під час пікових навантажень.

Крім того, точні розрахунки сприяють оптимізації енергоспоживання, знижують витрати на електроенергію та дозволяють планувати розвиток енергетичної інфраструктури шахти з урахуванням майбутнього збільшення потужностей. Врахування коефіцієнтів одночасності роботи обладнання, пускових струмів та особливостей роботи різних електроприймачів у складних гірничих умовах забезпечує надійність електропостачання та довговічність устаткування [6].

Регулярний моніторинг та перерахунок навантажень дозволяють оперативно реагувати на зміни у виробничих процесах, впровадження нового обладнання чи розробка нових горизонтів видобутку, підтримуючи енергосистему шахти в оптимальному стані.

Основне електрообладнання й електроприймачі, що реалізують видобуток залізорудної сировини на шахті «Ювілейна» ПАТ «ДСН СУХА БАЛКА» показано в табл. 2.1.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.250с-05	Арк.
						24
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Таблиця 2.1 – Електрообладнання й електроприймачі шахти «Ювілейна»

Електрообладнання або електроприймач	n , <i>шт</i>	P , <i>МВт</i>	U , <i>В</i>	$\cos \phi$	$\cos \phi$	κ_n
<i>I</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>
ВОД-50	1	2000	6	0,9	0,92	0,95
ЦШ-4x4	1	2000	6	0,88	0,9	0,8
2Ц-3,5 х 1,8	1	1000	6	0,88	0,9	0,5
ЦНС головний	4	800	6	0,89	0,935	0,9
ЦНС нижні горизонти	10	250	6	0,89	0,935	0,9
ЦПП	1	4000	6	0,9	0,9	0,9
Компресори	2	1000	6	0,89	0,92	0,8
Стационарні конвеєри	2	800	0,4	0,89	0,89	0,5
4ПП-2	1	132	0,4	0,85	0,85	0,45
14КА	2	90	0,4	0,87	0,85	0,6
1К101У	3	110	0,4	0,87	0,85	0,6
1ПНБ-2	10	44,5	0,4	0,88	0,85	0,6
Дільничні конвеєри	10	100	0,127	0,89	0,89	0,5
Освітлювання	1	65	0,4	0,9	0,99	1
Власні потреби	1	100	0,4	0,9	0,95	0,8

Обчислюємо активну й реактивну потужності для електричних навантажень 400 В [8, 9].

$$P_p = nP_n \cdot \kappa_n. \quad (2.1)$$

$$Q_p \cdot \operatorname{tg} \phi = P_p \cdot \frac{\sqrt{1 - \cos^2 \phi}}{\cos \phi}, \quad (2.2)$$

$$4\text{ПП-2: } P_{p1} = 132 \cdot 0,45 = 59,4 \text{ кВт.}$$

$$14\text{КА: } P_{p1} = 2 \cdot 90 \cdot 0,6 = 108 \text{ кВт.}$$

$$1\text{К101У: } P_{p3} = 3 \cdot 110 \cdot 0,6 = 198 \text{ кВт.}$$

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.250с-05	Арк.
						25
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

$$1\text{ ПНБ-2: } P_{p4} = 10 \cdot 44,5 \cdot 0,6 = 267 \text{ кВт.}$$

$$\text{Дільничні конвеєри: } P_{p5} = 10 \cdot 100 \cdot 0,5 = 500 \text{ кВт.}$$

$$\text{Освітлювання: } P_{p6} = 65 \cdot 0,99 = 65 \text{ кВт.}$$

$$\text{Власні потреби: } P_{p7} = 100 \cdot 0,95 = 80 \text{ кВт.}$$

$$\begin{aligned} \sum P_p &= P_{p1} + P_{p2} + P_{p3} + P_{p4} + P_{p5} + P_{p6} + P_{p7} = \\ &= 59,4 + 108 + 198 + 267 + 500 + 65 + 80 = \\ &= 1277,4 \text{ кВт.} \end{aligned} \quad (2.3)$$

$$14\text{КА: } Q_{p1} = 108 \cdot 0,57 = 61,21 \text{ кВАр.}$$

$$4\text{ПП-2: } Q_{p2} = 59,4 \cdot 0,62 = 36,81 \text{ кВАр.}$$

$$1\text{К101У: } Q_{p3} = 198 \cdot 0,57 = 112,21 \text{ кВАр.}$$

$$1\text{ ПНБ-2: } Q_{p4} = 267 \cdot 0,54 = 144,11 \text{ кВАр.}$$

$$\text{Дільничні конвеєри: } Q_{p5} = 500 \cdot 0,51 = 256,16 \text{ кВАр.}$$

$$\text{Освітлювання: } Q_{p6} = 65 \cdot 0,48 = 31,48 \text{ кВАр.}$$

$$\text{Власні потреби: } Q_{p7} = 80 \cdot 0,48 = 38,75 \text{ кВАр.}$$

$$\begin{aligned} \sum Q_p &= Q_{p1} + Q_{p2} + Q_{p3} + Q_{p4} + Q_{p5} + Q_{p6} + Q_{p7} = \\ &= 36,81 + 61,21 + 112,21 + 144,11 + \\ &\quad + 256,16 + 31,48 + 38,75 = 680,72 \text{ кВАр.} \end{aligned} \quad (2.4)$$

Загальна потужність [8, 9]:

$$S_p = \sqrt{\sum P_p^2 + \sum Q_p^2} = \sqrt{1277,4^2 + 680,72^2} = 1447,46 \text{ кВА.} \quad (2.5)$$

Беремо силовий трансформатор ТМ-1600/10/0,4 [9] з параметрами:

$$P_{ном}, \text{ кВт} : \quad 1600$$

$$\Delta P_{xx}, \% : \quad 3,55$$

$$\Delta P_{кз}, \% : \quad 18$$

$$u_{кз}, \% : \quad 5,5$$

$$i_{xx}, \% : \quad 1,3$$

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.250с-05	Арк.
						26
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Перевіряємо ТМ-1600/10/0,4 [8, 9]:

$$\beta = \frac{S_p}{S_n} = \frac{1447,46}{1600} = 0,904, \quad (2.6)$$

$$\Delta P_m = 1 \cdot \Delta P_{x.x} + \frac{\Delta P_{\kappa.з}}{1} \cdot \beta^2 = 1 \cdot 3,55 + \frac{18}{1} \cdot 0,73^2 = 18,13 \text{ кВт}, \quad (2.7)$$

$$\Delta Q_m = \frac{U_{\kappa.з} \cdot S_p^2}{1 \cdot 100 \cdot S_n} + 1 \cdot \frac{I_{x.x} \cdot S_n}{100} = \frac{5,5 \cdot 1447,46^2}{1 \cdot 100 \cdot 1600} + 1 \cdot \frac{1,3 \cdot 1600}{100} = 92,82 \text{ кВАр}, \quad (2.8)$$

$$S_p = \sqrt{(\sum P_p + \Delta P_m)^2 + (\sum Q_p + \Delta Q_m)^2} = \sqrt{(1277,4 + 18,13)^2 + (680,72 + 92,82)^2} = 1508,89 \text{ кВА}. \quad (2.9)$$

ТМ-1600/10/0,4 придатний для задіяння.

Здійснено обчислення для приймачів 6 кВ.

ВОД-50: $P_{p1} = 2000 \cdot 1 \cdot 0,95 = 1900 \text{ кВт}.$

ЦШ-5х4: $P_{p2} = 2000 \cdot 0,8 = 1600 \text{ кВт}.$

2Ц-3,5 х 1,8: $P_{p3} = 1000 \cdot 0,5 = 500 \text{ кВт}.$

ЦНС(Г): $P_{p4} = 4 \cdot 800 \cdot 0,9 = 2880 \text{ кВт}.$

ЦНС(Д): $P_{p5} = 10 \cdot 250 \cdot 0,9 = 2250 \text{ кВт}.$

ЦПП: $P_{p6} = 4000 \cdot 0,9 = 3600 \text{ кВт}.$

Компресори: $P_{p7} = 2 \cdot 1000 \cdot 0,8 = 1600 \text{ кВт}.$

Стационарні конвеєри: $P_{p8} = 2 \cdot 800 \cdot 0,5 = 800 \text{ кВт}.$

$$\begin{aligned} \sum P_p &= P_{p1} + P_{p2} + P_{p3} + P_{p4} + P_{p5} + P_{p6} + P_{p7} + P_{p8} + \sum P_{0,4} = \\ &= 1900 + 1600 + 500 + 2880 + 2250 + 3600 + \\ &+ 1600 + 800 + 1277,4 = 16407,4 \text{ кВт}. \end{aligned}$$

ВОД-50: $Q_{p1} = 1900 \cdot 0,48 = 920,21 \text{ кВАр}.$

ЦШ-5х4: $Q_{p2} = 1600 \cdot 0,54 = 863,59 \text{ кВАр}.$

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.250с-05	Арк.
						27
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

$$2Ц-3,5 \times 1,8: Q_{p3} = 500 \cdot 0,54 = 269,87 \text{ кВАр.}$$

$$ЦНС(Г): Q_{p4} = 2880 \cdot 0,51 = 1475,47 \text{ кВАр.}$$

$$ЦНС(Д): Q_{p5} = 2250 \cdot 0,51 = 1152,71 \text{ кВАр.}$$

$$ЦПП: Q_{p6} = 3600 \cdot 0,48 = 1743,56 \text{ кВАр.}$$

$$\text{Компресори: } Q_{p7} = 1600 \cdot 0,51 = 819,7 \text{ кВАр.}$$

$$\text{Стационарні конвеєри: } Q_{p8} = 800 \cdot 0,51 = 409,85 \text{ кВАр.}$$

$$\begin{aligned} \sum Q_p &= Q_{p1} + Q_{p2} + Q_{p3} + Q_{p4} + Q_{p5} + Q_{p6} + Q_{p7} + Q_8 + \sum Q_{0,4} = \\ &= 920,21 + 863,59 + 269,87 + 1475,47 + 1152,71 + \\ &+ 1743,56 + 819,7 + 409,85 + 680,72 = 8335,69 \text{ кВАр.} \end{aligned}$$

$$S_p = \sqrt{\sum P_p^2 + \sum Q_p^2} = \sqrt{16407,4^2 + 8335,69^2} = 18403,4 \text{ кВА.}$$

Беремо два силові трансформатори ТРДНС-25000/35/10 [9]:

$$P_{ном}, \text{кВт} : \quad 25000$$

$$\Delta P_{xx}, \% : \quad 25$$

$$\Delta P_{кз}, \% : \quad 115$$

$$u_{кз}, \% : \quad 9,5$$

$$i_{xx}, \% : \quad 0,5$$

Перевіримо трансформатор ТРДНС-25000/35/10:

$$\beta = \frac{S_p}{S_H} = \frac{18403,4}{25000} = 0,74.$$

$$\Delta P_m = \Delta P_{x.x} + \beta^2 \cdot \Delta P_{кз} = 25 + 0,74^2 \cdot 115 = 87,32 \text{ кВт}, \quad (2.10)$$

$$\begin{aligned} \Delta Q_m &= \frac{U_{кз} \cdot S_p^2}{1 \cdot 100 \cdot S_H} + 1 \cdot \frac{I_{x.x} \cdot S_H}{100} = \frac{9,5 \cdot 18403,4^2}{1 \cdot 100 \cdot 25000} + 1 \cdot \frac{0,5 \cdot 25000}{100} = \\ &= 1412,01 \text{ кВАр,} \end{aligned} \quad (2.11)$$

$$S_p = \sqrt{(16407,4 + 87,32)^2 + (8335,69 + 1412,01)^2} = 19159,7 \text{ кВА.}$$

Трансформатори ТРДНС-25000/35/10 придатні до встановлення.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.250с-05	Арк.
						28
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

2.2 Обчислення струмів короткого замикання в електромережі шахти «Ювілейна»

Розрахунок струмів КЗ у шахтних електромережах напругою 6 кВ та 0,4 кВ є критично важливим етапом проектування, що вимагає ретельного врахування специфіки гірничого виробництва. Для мережі 6 кВ розрахунок починається з визначення параметрів джерела живлення – потужності трансформаторів ГЗП або ЦПП, їх опорів та реактивних опорів кабельних ліній, враховуючи значну протяжність підземних трас. Особливу увагу приділяють обчисленню початкового значення періодичної складової струму КЗ у момент часу $t=0$, що визначає вибір комутаційної апаратури, а також ударного струму КЗ, який враховує аперіодичну складову та необхідний для перевірки електродинамічної стійкості.

Для мережі 0,4 кВ розрахунки мають свої особливості, пов'язані з відносно невеликою потужністю трансформаторних підстанцій та значною довжиною низьковольтних ліній, що призводить до збільшення активних опорів. У цих умовах важливо правильно визначити вплив опору нульового провідника на величину струмів однофазного КЗ, які часто є визначальними для налаштування захистів. В обох випадках враховують зниження напруги живлення під час КЗ, особливо актуальне для віддалених ділянок шахти, а також вплив струмів пуску електродвигунів [3, 6].

Для підвищення точності розрахунків використовують методи приведених довжин кабелів, що дозволяє врахувати реальні умови прокладки, а також спеціальні коефіцієнти для обліку опору контактних з'єднань, які в шахтних умовах можуть істотно впливати на загальний опір петлі КЗ. Особливу увагу приділяють перевірці умов відключення КЗ автоматичними вимикачами, особливо для мережі 0,4 кВ, де важливо забезпечити селективність захистів. Результати розрахунків дозволяють обґрунтовано вибрати параметри захистів, перевірити термічну та електродинамічну стійкість обладнання, а також розробити заходи з обмеження струмів КЗ, особливо актуальні для потужних шахтних мереж 6 кВ [2, 6].

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.250с-05	Арк.
						29
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

2.1).

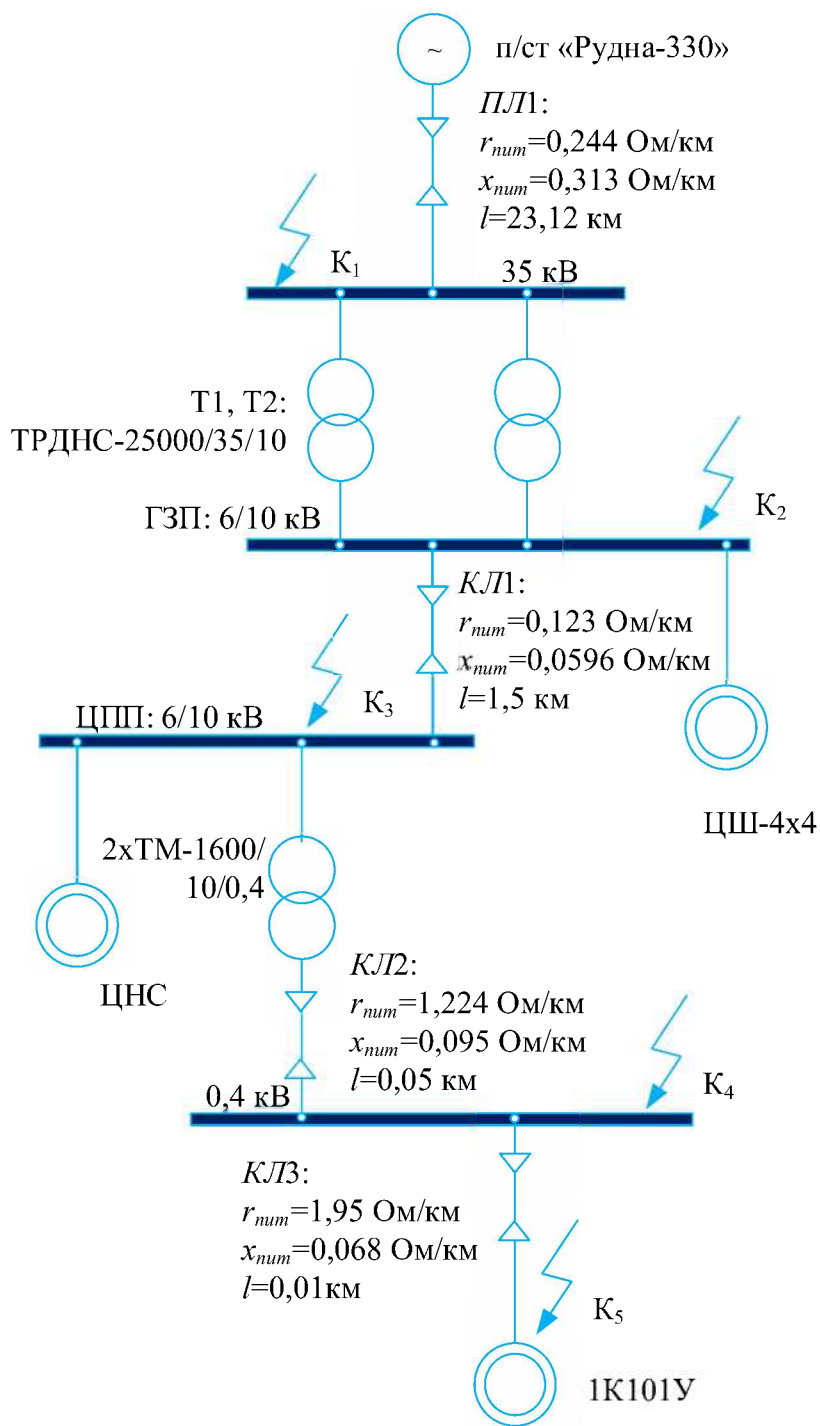


Рисунок 2.1 – Схема електромережі шахти «Ювілейна» для обчислень струмів КЗ

Базисні величини [8, 9]:

$$S_{\hat{\theta}} = 100 \text{ MBA}; U_{\hat{\theta}1} = 35 \text{ KB}; U_{\hat{\theta}2} = 6 \text{ KB}; U_{\hat{\theta}3} = 0,4 \text{ KB}$$

					<i>ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.250с-05</i>	Арк.
						30
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

$$I_{\delta 1} = \frac{S_{\delta}}{\sqrt{3} \cdot U_{\delta 1}} = \frac{100 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 35 \cdot 10^3} = 1650 A;$$

$$I_{\delta 2} = \frac{S_{\delta}}{\sqrt{3} \cdot U_{\delta 2}} = \frac{100 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 6 \cdot 10^3} = 9623 A;$$

$$I_{\delta 3} = \frac{S_{\delta}}{\sqrt{3} \cdot U_{\delta 3}} = \frac{100 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 0,4 \cdot 10^3} = 144300 A,$$

2.2.1 Обчислення струмів короткого замикання в електромережі шахти «Ювілейна» на боці 6 кВ

Частина схеми, що береться для обчислення наводиться на рис. 2.2. Її схема заступна на рис. 2.3.

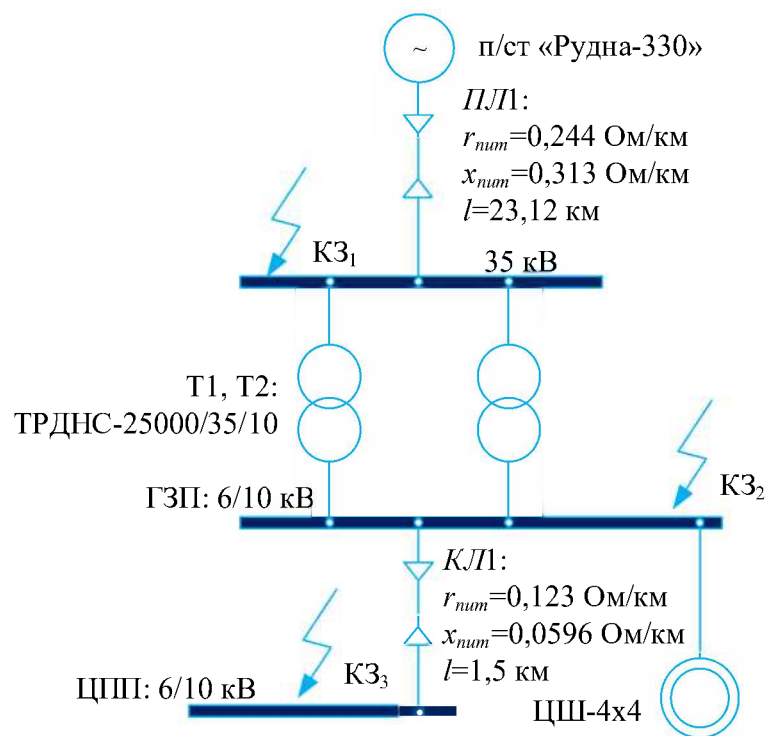


Рисунок 2.2 – Частинна схема електромережі шахти «Ювілейна» для обчислень струмів КЗ

Встановимо індуктивні опори схеми заступної.

Повітряна ЛЕП АС-120/19 від п/ст «Рудна-330»:

$$x_1 = x_{\text{лп}} \cdot l \cdot \frac{S_{\delta}}{U_{\delta 1}^2} = 0,313 \cdot 23,12 \cdot \frac{100 \cdot 10^6}{(35 \cdot 10^3)^2} = 0,591 \text{ в.о.};$$

$$r_1 = r_{\text{номЛЛ}} \cdot l_{\text{ЛЛ}} \cdot \frac{S_{\sigma}}{U_{\sigma 1}^2} = 0,244 \cdot 23,12 \cdot \frac{100 \cdot 10^6}{(35 \cdot 10^3)^2} = 0,461 \text{ в.о.};$$

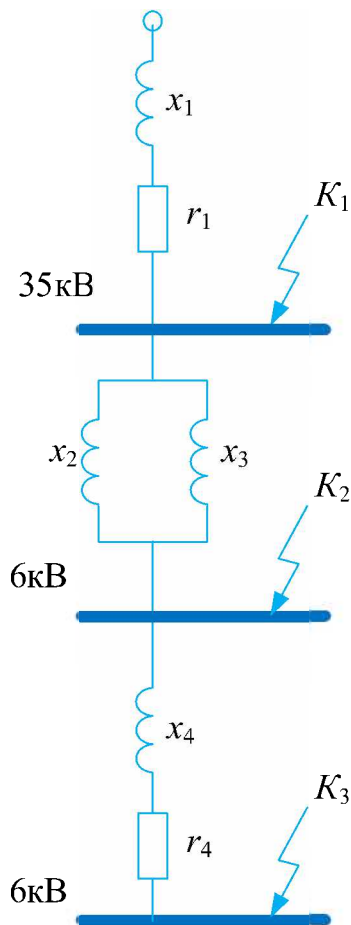


Рисунок 2.3 – Схема заступна частини мережі шахти

Трансформатори Т1, Т2 ТРДНС-25000/35/10:

$$x_2 = x_3 = \frac{U_{\text{к.з\%}}}{100} \cdot \frac{S_{\sigma}}{S_{\text{нтр}}} = \frac{7,5}{100} \cdot \frac{100 \cdot 10^6}{25 \cdot 10^6} = 0,38 \text{ в.о.}$$

Кабельна ЛЕП ВБбШв 3х150 від ГЗП поверхні до ЦПП:

$$x_4 = x_{\text{номКЛ1}} \cdot l_{\text{КЛ1}} \cdot \frac{S_{\sigma}}{U_{\sigma 2}^2} = 0,0596 \cdot 1,5 \cdot \frac{100 \cdot 10^6}{(6 \cdot 10^3)^2} = 0,248 \text{ в.о.};$$

$$r_4 = r_{\text{номКЛ1}} \cdot l_{\text{КЛ1}} \cdot \frac{S_{\sigma}}{U_{\sigma 2}^2} = 0,123 \cdot 1,5 \cdot \frac{100 \cdot 10^6}{(6 \cdot 10^3)^2} = 0,014 \text{ в.о.};$$

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.250с-05	Арк.
						32
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Опори до місць КЗ:

$$x_{K1} = x_1 = 0,591 \text{ в.о.};$$

$$r_{K1} = r_1 = 0,461 \text{ в.о.};$$

$$x_{K2} = x_1 + \frac{x_2 \cdot x_3}{x_2 + x_3} = 0,591 + \frac{0,38 \cdot 0,38}{0,38 + 0,38} = 0,781 \text{ в.о.};$$

$$r_{K1} = r_{K2} = 0,461 \text{ в.о.};$$

$$x_{K3} = x_{K2} + x_4 = 0,781 + 0,248 = 1,029 \text{ в.о.};$$

$$r_{K3} = r_{K2} + r_4 = 0,461 + 0,513 = 0,973 \text{ в.о.};$$

Трифазні струми КЗ:

$$I_{K3}^{(3)K1} = \frac{I_{\phi 1}}{\sqrt{x_{K1}^2 + r_{K1}^2}} = \frac{1650}{\sqrt{0,591^2 + 0,461^2}} = 2202 \text{ A};$$

$$I_{K3}^{(3)K2} = \frac{I_{\phi 2}}{\sqrt{x_{K2}^2 + r_{K2}^2}} = \frac{9623}{\sqrt{0,781^2 + 0,461^2}} = 10620 \text{ A};$$

$$I_{K3}^{(3)K3} = \frac{I_{\phi 2}}{\sqrt{x_{K2}^2 + r_{K2}^2}} = \frac{9623}{\sqrt{1,029^2 + 0,973^2}} = 6794 \text{ A};$$

Двофазні струми КЗ:

$$I_{K3}^{(2)K1} = \frac{\sqrt{3}}{2} I_{K3}^{(3)K1} = \frac{\sqrt{3}}{2} 2202 = 1907 \text{ A};$$

$$I_{K3}^{(2)K2} = \frac{\sqrt{3}}{2} I_{K3}^{(3)K2} = \frac{\sqrt{3}}{2} 10620 = 9197 \text{ A};$$

$$I_{K3}^{(2)K3} = \frac{\sqrt{3}}{2} I_{K3}^{(3)K3} = \frac{\sqrt{3}}{2} 6794 = 5884 \text{ A};$$

Ударні коефіцієнти:

$$T_{a1} = \frac{x_{K1}}{r_{K1}} = \frac{0,591}{0,461} = 1,283 \Rightarrow \kappa_{y\phi 1} = 1,92.$$

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.250с-05	Арк.
						33
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

$$T_{a2} = \frac{x_{K2}}{r_{K2}} = \frac{0,781}{0,461} = 1,695 \Rightarrow \kappa_{y02} = 1,98.$$

$$T_{a3} = \frac{x_{K3}}{r_{K3}} = \frac{1,029}{0,973} = 1,058 \Rightarrow \kappa_{y01} = 1,63.$$

Ударні струми:

$$i_{y0}^{K_1} = \sqrt{2} \cdot \kappa_{y01} \cdot I_{K3}^{(3)K_1} = \sqrt{2} \cdot 1,92 \cdot 2202 = 5980 \text{ A};$$

$$i_{y0}^{K_2} = \sqrt{2} \cdot \kappa_{y02} \cdot I_{K3}^{(3)K_2} = \sqrt{2} \cdot 1,98 \cdot 10620 = 29730 \text{ A};$$

$$i_{y0}^{K_3} = \sqrt{2} \cdot \kappa_{y03} \cdot I_{K3}^{(3)K_3} = \sqrt{2} \cdot 1,63 \cdot 6794 = 15660 \text{ A};$$

Як бачимо у шахтних умовах, де кабельні мережі 6 кВ мають значну протяжність та низький опір, ударні струми КЗ можуть досягати небезпечно високих значень, що загрожує механічним пошкодженням обладнання та порушенням електродинамічної стійкості. Реактори, встановлені послідовно в кабельних лініях, створюють додатковий індуктивний опір, який істотно зменшує амплітуду ударного струму та швидкість його наростання [6].

Особливістю застосування реакторів у шахтних мережах є необхідність врахування специфічних умов експлуатації, таких як обмежений простір для розміщення, підвищена вологість та вимоги до вибухозахисту. Реактори для шахтних умов виконуються у вибухобезпечному виконанні та розраховані на роботу в агресивному середовищі. Їх параметри підбираються таким чином, щоб забезпечити ефективне обмеження струмів КЗ, але при цьому не викликати надмірних втрат напруги в нормальному режимі роботи. Оптимальне місце встановлення реакторів – безпосередньо біля джерела живлення (на ГЗП або ЦПП) [5].

При проєктуванні системи обмеження ударних струмів у шахтних мережах особливу увагу приділяють координації захистів, щоб забезпечити селективність спрацьовування апаратів захисту при одночасному збереженні чутливості до пошкоджень. Використання реакторів дозволяє знизити вимоги до комутаційної здатності вимикачів та іншого обладнання, що істотно

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.250с-05	Арк.
						34
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

зменшує капітальні витрати. Однак при цьому необхідно ретельно аналізувати вплив реакторів на роботу мережі в нормальних режимах, особливо при пуску потужних електродвигунів, коли падіння напруги може стати надмірним [6].

2.2.2 Обчислення струмів короткого замикання в електромережі шахти «Ювілейна» на боці 0,4 кВ

Частина схеми, що береться для обчислення наводиться на рис. 2.4. Її схема заступна на рис. 2.5.

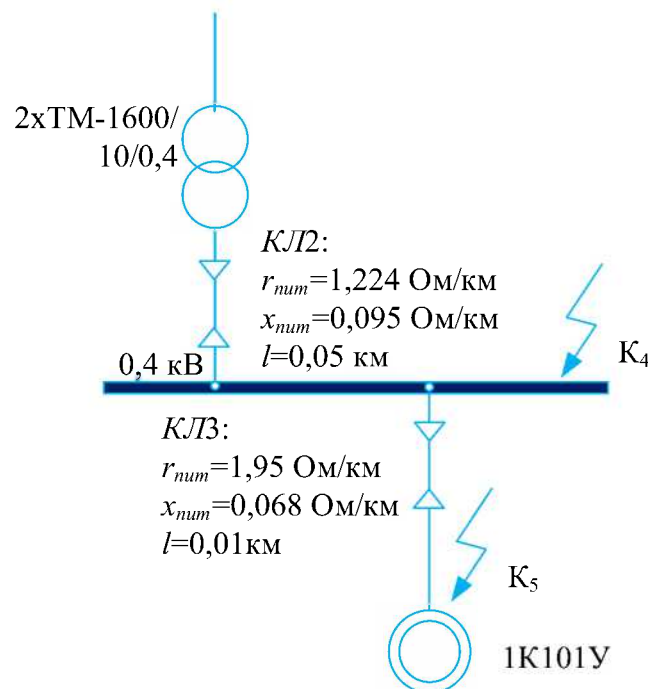


Рисунок 2.4 – Частинна схема електромережі шахти «Ювілейна» для обчислень струмів КЗ

Трансформатори 2хТМ-1600/10/0,4:

$$x_5 = x_6 = \frac{U_{к.з\%}}{100} \cdot \frac{S_{\delta}}{S_{нтр}} = \frac{5,5}{100} \cdot \frac{100 \cdot 10^6}{1,6 \cdot 10^6} = 3,438 \text{ в.о.}$$

Кабельні ЛЕП № 2 від ТП ЦПП до РП і №3 від РП до шахтного електроприймача:

$$x_7 = x_{лнKЛ2} \cdot I_{KЛ2} \frac{S_{\delta}}{U_{\delta 3}^2} = 0,095 \cdot 0,05 \frac{100 \cdot 10^6}{(0,4 \cdot 10^3)^2} = 5,938 \text{ в.о.};$$

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.250с-05	Арк.
						35
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

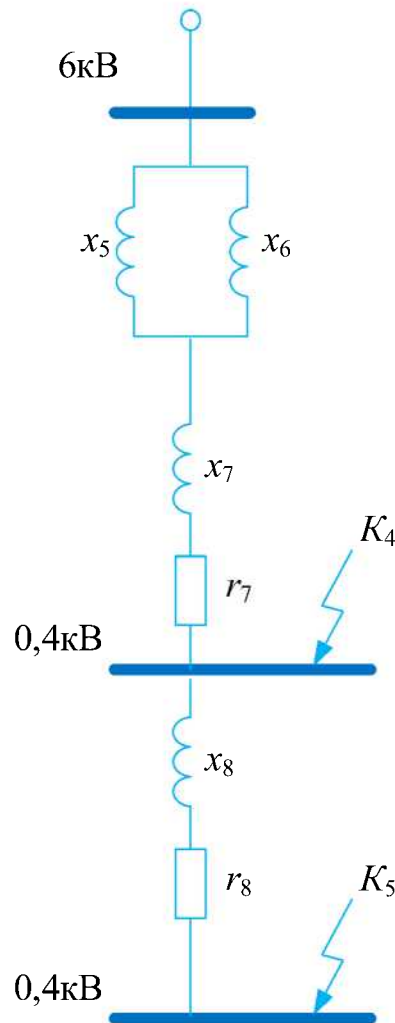


Рисунок 2.5 – Схема заступна частини мережі шахти

$$r_7 = r_{numKL2} \cdot l_{KL2} \frac{S_6}{U_{63}^2} = 1,224 \cdot 0,05 \frac{100 \cdot 10^6}{(0,4 \cdot 10^3)^2} = 76,5 \text{ в.о.};$$

$$x_8 = x_{numKL3} \cdot l_{KL3} \frac{S_6}{U_{63}^2} = 0,068 \cdot 0,01 \frac{100 \cdot 10^6}{(0,4 \cdot 10^3)^2} = 0,425 \text{ в.о.};$$

$$r_8 = r_{numKL3} \cdot l_{KL3} \frac{S_6}{U_{63}^2} = 1,95 \cdot 0,01 \frac{100 \cdot 10^6}{(0,4 \cdot 10^3)^2} = 12,19 \text{ в.о.};$$

Наведений опір з боку 6 кВ до боку 0,4 кВ:

$$x_{K3HH} = x_{K3} \cdot \left(\frac{U_{ном_H}}{U_{ном_B}} \right)^2 = 1,029 \cdot \left(\frac{0,4 \cdot 10^3}{6 \cdot 10^3} \right)^2 = 4,574 \cdot 10^{-3} \text{ в.о.};$$

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.250с-05	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		36

$$r_{K3HH} = r_{K3} \cdot \left(\frac{U_{номH}}{U_{номB}} \right)^2 = 0,973 \cdot \left(\frac{0,4 \cdot 10^3}{6 \cdot 10^3} \right)^2 = 4,325 \cdot 10^{-3} \text{ в.о.};$$

Опори до місць КЗ:

$$x_{K4} = x_{K3HH} + \frac{x_5 \cdot x_6}{x_5 + x_6} + x_7 = 7,661 \text{ в.о.};$$

$$r_{K4} = r_{K3HH} + r_7 = 76,5 \text{ в.о.};$$

$$x_{K5} = x_{K4} + x_8 = 8,086 \text{ в.о.};$$

$$r_{K5} = r_{K4} + r_8 = 12,19 \text{ в.о.}$$

Трифазні струми КЗ:

$$I_{K3}^{(3)K4} = \frac{I_{\phi 3}}{\sqrt{x_{K4}^2 + r_{K4}^2}} = \frac{144300}{\sqrt{7,661^2 + 76,504^2}} = 1877 \text{ A};$$

$$I_{K3}^{(3)K5} = \frac{I_{\phi 3}}{\sqrt{x_{K5}^2 + r_{K5}^2}} = \frac{144300}{\sqrt{8,086^2 + 88,962^2}} = 1621 \text{ A};$$

Двофазні струми КЗ:

$$I_{K3}^{(2)K4} = \frac{\sqrt{3}}{2} I_{K3}^{(3)K4} = \frac{\sqrt{3}}{2} 1877 = 1626 \text{ A};$$

$$I_{K3}^{(2)K5} = \frac{\sqrt{3}}{2} I_{K3}^{(3)K5} = \frac{\sqrt{3}}{2} 1621 = 1404 \text{ A};$$

Ударні коефіцієнти:

$$T_{a4} = \frac{x_{K4}}{r_{K4}} = \frac{7,61}{76,504} = 0,1 \Rightarrow \kappa_{y\phi 4} = 1,25.$$

$$T_{a5} = \frac{x_{K5}}{r_{K5}} = \frac{8,086}{88,692} = 0,091 \Rightarrow \kappa_{y\phi 5} = 1,1.$$

Ударні струми:

$$i_{y\phi}^{K4} = \sqrt{2} \cdot \kappa_{y\phi 1} \cdot I_{K3}^{(3)K4} = \sqrt{2} \cdot 1,25 \cdot 1626 = 3319 \text{ A};$$

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.250с-05	Арк.
						37
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

$$i_{y\partial}^{K5} = \sqrt{2} \cdot \kappa_{y\partial 5} \cdot I_{K3}^{(3)K5} = \sqrt{2} \cdot 1,1 \cdot 1404 = 2521 \text{ A.}$$

Результати показують необхідність заходів зі струмообмеження.

2.3 Вибір устаткування розподільного пункту високої напруги

2.3.1 Шини

Вибір обладнання для розподільного пристрою високої напруги є ключовим етапом проектування електроустановок, що потребує всебічного аналізу технічних характеристик, експлуатаційних умов та економічної доцільності. До складу такого пристрою входять комірки, вимикачі, роз'єднувачі, короткозамикачі, трансформатори струму та напруги, розрядники і шинні з'єднання. При визначенні необхідного обладнання враховуються номінальна напруга й струм, рівень короткозамикальних струмів, кліматичні умови експлуатації, а також вимоги до надійності, безпеки й можливого майбутнього розширення.

Вимикачі високої напруги добираються з урахуванням номінального струму, здатності до комутації та типу приводу. Важливим показником є струм відключення, який має перевищувати потенційний максимальний струм короткого замикання у відповідній точці мережі. Роз'єднувачі, що не виконують функцію відключення навантаження, забезпечують видимий розрив у колі, необхідний для безпечного обслуговування. Короткозамикачі та заземлювачі слугують для оперативного замикання та заземлення окремих ділянок мережі з метою захисту обладнання й персоналу.

Трансформатори струму та напруги вибираються за класом точності, допустимим навантаженням вторинних кіл та відповідністю вимогам захисту і обліку. Розрядники й обмежувачі перенапруг призначені для запобігання пошкодженню ізоляції при впливі грозових чи комутаційних перенапруг. Шинні з'єднання та ізолятори повинні витримувати механічні та динамічні навантаження, що виникають під час коротких замикань.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.250с-05	Арк.
						38
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

На вибір обладнання також впливають тип розподільного пристрою (відкритого або закритого виконання), рівень автоматизації, можливість дистанційного керування й діагностики.

Спочатку обчислимо струм ГЗП шахти «Ювілейна» [9]:

$$I_{розр} = \frac{S_{ном тр}}{\sqrt{3} \cdot U_n} = \frac{25 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 6 \cdot 10^3} = 2406 \text{ A.} \quad (2.12)$$

На основі розрахунку приймаємо рішення про використання двох шин $100 \times 10 \text{ мм}$ з алюмінію для кожної з фаз. Згідно з технічними рекомендаціями [Помилка! Джерело посилання не знайдено.] маємо параметри $I_{дон} = 3350 \text{ A}$, $S_{виб} = 2000 \text{ мм}^2$.

Аналіз придатності обраних шин [9]:

$$F_{\max} = 0,176 \cdot \frac{l}{a} \cdot i_{yd}^2 = 0,176 \cdot \frac{600}{15} \cdot 29,73^2 = 251,75 \text{ H,} \quad (2.13)$$

$$M_{\max} = 0,1 \cdot F_{\max} l = 0,1 \cdot 251,75 \cdot 600 = 15105 \text{ H} \cdot \text{см.} \quad (2.14)$$

Шини плашмя:

$$W = \frac{(2 \cdot b)^2 \cdot h}{6} = \frac{(2 \cdot 1)^2 \cdot 120}{6} = 8 \text{ см}^3. \quad (2.15)$$

$$\sigma_{\max} = \frac{M_{\max}}{W} = \frac{15105}{8} = 1888 \text{ H/см}^2. \quad (2.16)$$

$$\sigma_{\max} < \sigma_{дон} = 1,888 \cdot 10^3 < 7 \cdot 10^3 \text{ H / см}^2 \quad (2.17)$$

Проведена технічна перевірка підтвердила, що обрані шини відповідають встановленим вимогам і є придатними для експлуатації.

$$S_{TC} = \alpha \cdot I_{\infty}^{(3)} \cdot \sqrt{t_n} = 11 \cdot 10,6 \cdot \sqrt{2,2} = 172,9 \text{ мм}^2. \quad (2.18)$$

$$S_{виб} = 2000 \text{ мм}^2 > S_{min} = 34,79 \text{ мм}^2. \quad (2.19)$$

Повторна перевірка також засвідчила відповідність обраних шин.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.250с-05	Арк.
						39
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

2.3.2 Ізолятори

Для забезпечення необхідного рівня ізоляції приймаються штирьові ізолятори типу PSI 12 RD Sicame Ukraine згідно з джерелом [10].

Відповідно до методики перевірки за $F_{розр}^{(3)} \leq 0,6F_{руїн}$, [9], оцінюємо параметри ізолятора. $F_{max} = 251,75 \text{ Н} < F_{руїн} = 0,6 \cdot 1000 \text{ Н} = 600 \text{ Н}$ – аналіз показав, що ізолятор задовольняє вимоги експлуатації.

2.3.3 Комутаційне обладнання

Як роз'єднувач приймається модель BS 15 Sicame Ukraine [11].

Перевіряємо: $I_{p.mc} = I_{\infty}^{(3)} \sqrt{\frac{t_n}{t_n}} = 2 \sqrt{\frac{2,5}{4}} = 1,58 \text{ кА}$. Згідно з перевіркою [9], технічні характеристики роз'єднувача повністю відповідають умовам експлуатації. Властивості підтверджено як прийнятні.

Для захисту та комутації в електроустановках середньої напруги обирається вакуумний вимикач типу ABB VD4 12.06.16 p150 [12].

Приймається КРП серії КСО-393М [14], яка забезпечує необхідну функціональність і придатна до встановлення ABB VD4 12.06.16 p150.

2.3.4 Вимірювальні пристрої

Як трансформатори струму (ТС) вибрано тип TAUD50D600 з коефіцієнтом трансформації 6000/5 та класом точності 0,5 [13].

Перевірка ТС TAUD50D600 згідно з [9]:

$$k_{розр.mc} = \frac{i_{уд.розр}}{\sqrt{2} \cdot I_{н.mc}} = \frac{29730}{\sqrt{2} \cdot 6000} = 3,5, \quad (2.20)$$

$$k_{розр.mc} = \frac{I_{\infty}^{(3)} \sqrt{t_n}}{I_{н.mc} \sqrt{t_{н.mc}}} = \frac{10600 \sqrt{2,2}}{6000 \sqrt{4}} = 1,31 < k_{н.mc} = 1200. \quad (2.21)$$

Проведений аналіз підтвердив, що обрані ТС задовольняють вимогам точності та сумісності з іншими елементами системи.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.250с-05	Арк.
						40
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Беремо трансформатори напруги 3хЗНОЛ-10-12 з $\frac{U_1}{U_2} = \frac{6000V}{100V}$

[Помилка! Джерело посилання не знайдено.].

2.4 Вибір проводів для кабельних ліній

Визначення перерізу проводів і кабелів за економічною щільністю струму є важливим етапом проєктування шахтних електромереж, який дозволяє знайти оптимальний баланс між початковими капітальними витратами та експлуатаційними витратами на втрати електроенергії. Процедура починається зі збору вихідних даних, включаючи розрахунковий струм навантаження, тривалість використання максимального навантаження, вартість електроенергії та капітальні витрати на прокладку кабелів різних перерізів. На основі цих даних виконуються техніко-економічні розрахунки, де для кожного можливого перерізу кабелю визначаються втрати потужності.

Оптимальний переріз знаходиться шляхом аналізу залежності приведених річних витрат від перерізу провідника, де мінімум кривої відповідає економічно найвигіднішому варіанту. Економічна щільність струму визначається як відношення розрахункового струму навантаження до знайденого оптимального перерізу і слугує нормованим показником для подальших проектних рішень. Важливо враховувати, що отриманий переріз повинен також задовольняти вимогам механічної міцності, термічної стійкості при КЗ та допустимим втратам напруги в лінії. У випадках, коли розрахунковий переріз за економічною щільністю струму не задовольняє цим вимогам, приймається найближчий більший стандартний переріз з урахуванням перспективи розвитку шахтної електромережі та можливого зростання навантажень.

Формули обчислення для обрання кабелів і проводів згідно економічної щільності струму [9]:

$$I_n = \frac{P_n}{\sqrt{3} \cdot U_n \cdot \cos \varphi_n \cdot \eta_n}, \quad (2.22)$$

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.250с-05	Арк.
						41
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

$$S_{ек} = \frac{I_n}{j_{ек}}. \quad (2.23)$$

Обчислення зводяться в табл. 2.2.

Таблиця 2.2 – Результати вибору проводів кабельних ліній

Приймач	P , кВт	U , кВ	$I_{ном}$, А	Марка	$I_{дон}$, А	$j_{ек}$	$S_{ек}$
ВОД-50	2000	6	232,43	ВБбШВ-3х95	279	1,7	164,12
ЦШ-4х4	2000	6	242,99	ВБбШВ-3х95	279	1,7	164,12
2Ц-3,5 х 1,8	1000	6	121,50	ВБбШВ-3х35	158	1,7	92,94
ЦНС головний	800	6	92,51	ВБбШВ-3х35	158	1,7	92,94
ЦНС нижні горизонти	250	6	28,91	ВВГ-3х4	37	1,4	26,43
ЦПП	4000	6	475,19	ВБбШВ-3х240	481	1,7	282,94
Компресор и	1000	6	117,52	ВБбШВ-3х35	158	1,7	92,94
Стационарні конвеєри	800	6	97,18	ВБбШВ-3х35	158	1,7	92,94
4ПП-2	100	0,1 3	573,93	ВВГ-3х4	37	1,4	26,43
14КА	65	0,4	105,30	ВВГ-3х35	121	1,4	86,43
1К101У	100	0,4	168,82	ВВГ-3х70	178	1,4	127,14
1ПНБ-2	132	0,4	263,70	ВВГ-3х150	274	1,4	195,71
Дільничні конвеєри	90	0,4	175,66	ВВГ-3х70	178	1,4	127,14
Освітлюван ня	110	0,4	214,70	ВВГ-3х120	241	1,4	172,14
Власні потреби	44,5	0,4	85,87	ВВГ-3х25	100	1,4	71,43

2.5 Вибір комутаційної апаратури для приймачів шахти на 0,4 кВ

Для комутації і захисту беремо до затосування автоматичні вимикачі. Вибір автоматичного вимикача для шахтної електромережі 400 В здійснюється з урахуванням кількох ключових параметрів. По-перше, номінальна напруга вимикача повинна відповідати напрузі мережі, тобто 400 В змінного струму. По-друге, номінальний струм автоматичного вимикача підбирається відповідно до розрахованого струму навантаження, із запасом для тривалого режиму роботи [9]:

$$I_{н.авт.} \geq k_{зан} \cdot I_{розр}, \quad (2.24)$$

де $k_{зан} = 1,1 \dots 1,25$.

Також враховується максимальний струм короткого замикання у точці установки – автомат має бути здатним його витримати, не вийшовши з ладу. Обрані для шахти вимикачі див. у табл. 2.3.

Таблиця 2.3 – Автоматичних вимикачів для приймачів 0,4 кВ

Обладнання	$I_{ном},$ A	$I_{р.розч.},$ A	Марка	$I_{н.авт},$ A	$I_{н.розч.},$ A
4ПП-2	263,70	329,629	ВА 51-37	400	400
14КА	175,66	219,5805	ВА 51-35	250	250
1К101У	214,70	268,3761	ВА 51-37	400	320
1ПНБ-2	85,87	107,3366	ВА 51-33	160	125
Дільничні конвеєри	573,93	717,4071	ВА 51-39	800	630
Освітлювання	105,30	131,621	ВА 51-33	160	160

Усе обране устаткування показується на однолінійні схемі електропостачання шахти.

Висновки

У другому розділі виконано розрахунок електричних навантажень шахти «Ювілейна» з використанням методу коефіцієнта попиту. Обрано силові

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.250с-05	Арк.
						43
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

трансформатори, які відповідають вимогам щодо завантаженості враховуючи можливі втрати в самих трансформаторах. Визначено типи та перерізи кабельних жил для підключення підземних та поверхневих електроприймачів. Здійснено розрахунок струмів короткого замикання в точках електромережі шахти та підібрано пристрої для їх обмеження. Проведено підбір обладнання для розподільних пристроїв 6 кВ і 35 кВ. Крім того, обрано засоби комутації і захисту електроприймачів шахти «Ювілейна» 0,4 кВ, як-то, автоматичні вимикачі.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.250с-05	Арк.
						44
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Розділ ІІІ. Дослідження надійності електромереж шахти «Ювілейна»

					<i>ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.250с-05</i>			
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підп.</i>	<i>Дата</i>				
<i>Розроб.</i>		<i>Луценко О.С.</i>			<i>Дослідження надійності електромереж шахти «Ювілейна»</i>	<i>Літ.</i>	<i>Аркуш</i>	<i>Аркушів</i>
<i>Перевір.</i>		<i>Михайленко О.Ю.</i>				<i>Н</i>	<i>45</i>	
<i>Конс.</i>						<i>ЕЕМ-22ск</i>		
<i>Н.контр.</i>		<i>Михайленко О.Ю.</i>						
<i>Затверд.</i>		<i>Пересунько І.І.</i>						

3.1 Методика дослідження надійності електричної мережі шахти

Методика дослідження надійності електричної мережі шахти з використанням методів теорії імовірностей і математичної статистики передбачає комплексний підхід до оцінки здатності системи забезпечувати безперервне електропостачання в умовах можливих відмов обладнання. На першому етапі здійснюється побудова структурної схеми електричної мережі, яка включає всі основні елементи: шахтні джерела живлення, шахтні трансформатори, шахтні розподільчі пристрої, шахтні кабельні лінії та шахтні електроприймачі. Для кожного шахтного елемента визначаються показники надійності, зокрема імовірність безвідмовної роботи, середній час до відмови, інтенсивність відмов, а також середній час відновлення працездатності. Ці дані можуть бути отримані з паспортної документації, експлуатаційної статистики або результатів випробувань [15].

На основі отриманих статистичних даних формується математична модель електричної мережі у вигляді надійнісної схеми – послідовної, паралельної або комбінованої залежно від конфігурації системи. Застосовуючи закони теорії імовірностей, зокрема правила для обчислення імовірності спільних подій, визначається загальна імовірність безвідмовної роботи мережі протягом заданого інтервалу часу. Додатково розраховується та аналізується функція розподілу часу безвідмовної роботи та щільність імовірності відмов. У разі потреби моделюються різні сценарії експлуатації, включаючи випадки аварій, з урахуванням можливості дублювання або резервування окремих елементів мережі.

Застосовуючи методи математичної статистики, проводиться обробка даних щодо фактичних відмов обладнання, що дозволяє скоригувати імовірнісні моделі та уточнити оцінки надійності. Аналіз результатів включає виявлення найбільш вразливих елементів системи, визначення середнього часу простою, частоти відмов і оцінку впливу кожного компонента на загальну надійність мережі. У підсумку розробляються рекомендації щодо підвищення надійності, зокрема впровадження резервування, оптимізація технічного

					<i>ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.250с-05</i>	Арк.
						46
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

обслуговування та модернізація застарілого обладнання. Такий підхід дозволяє обґрунтовано оцінити поточний стан електропостачальної системи шахти та забезпечити її ефективне і безпечне функціонування [16, 17].

Для оцінювання надійності шахтних електромереж доцільно використовувати систему імовірнісних показників, яка дозволяє кількісно характеризувати надійність як всієї мережі в цілому, так і окремих її елементів.

Першим і основним показником, за яким потрібно оцінювати надійність шахтних електромереж, є імовірність безвідмовної роботи. Цей показник визначає імовірність того, що система або її окремий елемент (наприклад, трансформатор, кабель, розподільчий пристрій) буде працювати безвідмовно протягом певного інтервалу часу. У шахтних умовах цей показник має особливу вагу, адже електрообладнання часто функціонує в агресивному середовищі з підвищеною вологістю, запиленістю, механічними навантаженнями та вібраціями. Високе значення імовірності безвідмовної роботи свідчить про низький ризик аварійної ситуації, що є критичним фактором для підземних виробок.

Час напрацювання на відмову (MTTF) — це ймовірнісний показник надійності, що характеризує середній очікуваний час безперервної роботи елемента або системи до першої відмови [18].

У контексті шахтних електромереж цей показник має особливе значення, адже елементи мережі (кабельні лінії, трансформатори, розподільні пристрої тощо) працюють у складних умовах: висока вологість, наявність агресивних середовищ, механічні впливи, підвищена запиленість. Тому здатність елементів системи працювати тривалий час без виходу з ладу є критично важливою для забезпечення безперебійної подачі електроенергії до виробничого обладнання [15].

Час напрацювання на відмову визначається статистично, як середнє значення часу роботи великої кількості ідентичних пристроїв до моменту їхньої першої відмови.

У практиці експлуатації шахтних електромереж час напрацювання на відмову допомагає:

					<i>ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.250с-05</i>	Арк.
						47
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

- прогнозувати інтервали між обов’язковими оглядами та технічним обслуговуванням;
- вибирати більш надійне обладнання під час проєктування нових або модернізації існуючих мереж;
- розраховувати загальну надійність мережі як сукупності взаємопов’язаних елементів;
- визначати економічну доцільність заміни застарілого обладнання, порівнюючи МТТФ нових і старих систем.

Для компонентів, які не ремонтуються після відмови (наприклад, одноразові запобіжники або певні типи електронних пристроїв), МТТФ є основним показником оцінки їхньої надійності. У той час як для елементів, які підлягають ремонту або заміні, частіше використовують МТБФ (середній час між відмовами), але ці два показники мають подібну інтерпретацію [18].

Отже, чим більшим є значення часу напрацювання на відмову, тим довше система або її елемент може функціонувати без збоїв, що особливо важливо в умовах, коли доступ до обладнання обмежений, а збої в електропостачанні можуть призвести до аварійних ситуацій або зупинки всього технологічного процесу.

Ще одним показником, який доцільно враховувати, є інтенсивність відмов. Цей параметр характеризує частоту виникнення відмов у системі й визначається як кількість відмов за одиницю часу. У шахтних умовах інтенсивність відмов залежить не тільки від якості обладнання, але й від умов експлуатації – температури, вологості, навантаження тощо. Висока інтенсивність відмов свідчить про низьку надійність мережі або її окремих елементів, що вимагає детального аналізу причин і вжиття заходів для зниження цього показника. Зниження інтенсивності відмов призводить до підвищення загальної ефективності та безпеки електропостачання.

Також варто враховувати імовірність відмови, яка доповнює попередні показники та визначає вірогідність того, що система або її елемент зазнає відмови у заданий момент або протягом певного інтервалу часу. Цей показник

					<i>ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.250с-05</i>	Арк.
						48
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

дозволяє прогнозувати ризики і визначати критичні ділянки мережі, на які потрібно звернути особливу увагу під час проектування чи модернізації.

Окрему роль у шахтних електромережах відіграє готовність системи, яка відображає здатність мережі бути в працездатному стані у випадковий момент часу з урахуванням часу відновлення після відмов. Це комплексний показник, який поєднує як надійність, так і ремонтпридатність системи. В умовах шахти, де доступ до обладнання може бути обмеженим, а ремонтні роботи — ускладненими, рівень готовності стає критично важливим для забезпечення безперебійного енергопостачання.

На завершення, для повної картини доцільно враховувати середній час відновлення, який показує, скільки часу в середньому потрібно для усунення відмови й повернення системи до нормального функціонування. У гірничих умовах цей час значною мірою залежить від логістики, доступності запасних частин, кваліфікації персоналу та наявності резервних схем живлення. Зменшення цього показника напряду впливає на підвищення загальної надійності електропостачання в шахті.

Таким чином, комплексна оцінка надійності шахтних електромереж повинна базуватися на системі взаємопов'язаних імовірнісних показників: імовірність безвідмовної роботи, середній час безвідмовної роботи, інтенсивність відмов, імовірність відмови, готовність системи та середній час відновлення. Детальний аналіз кожного з цих параметрів дозволяє не лише кількісно оцінити рівень надійності, а й розробити ефективні технічні та організаційні заходи для її підвищення.

3.2 Дослідження надійності електромережі шахти «Ювілейна»

Розширений порівняльний аналіз надійності схем електропостачання шахти враховує всі ключові елементи системи, починаючи від головної знижувальної підстанції (ГЗП) і закінчуючи кінцевими розподільними ланками. У дослідженні розглядається повний ланцюг електропостачання, що включає два паралельні трансформатори ТРДНС-25000/35/10 на ГЗП, які взаємно резервують один одного, забезпечуючи високу надійність на цьому

					<i>ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.250с-05</i>	Арк.
						49
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

етапі. Від ГЗП електроенергія подається по кабельній лінії 6 кВ до центральної підземної підстанції (ЦПП), де встановлено ще два паралельні трансформатори ТМ-1600/10/0,4, що також працюють у режимі взаємного резервування. Після ЦПП аналізуються дві альтернативні схеми розподілу електроенергії – перша передбачає живлення через РП лави, а друга – через ПДЗП.

Цей комплексний підхід дозволяє оцінити надійність кожної схеми в цілому, враховуючи всі критично важливі ланки системи електропостачання. Особливу увагу приділено аналізу впливу кожного елемента на загальні показники надійності, включаючи трансформатори обох підстанцій, кабельні лінії та кінцеві розподільні пристрої. Проведення такого детального аналізу дає змогу не тільки порівняти ефективність двох схем розподілу, а й виявити потенційні слабкі місця в системі електропостачання шахти. Врахування всіх цих факторів є важливим для прийняття обґрунтованих рішень щодо проектування та модернізації шахтних електромереж

3.2.1 Інтенсивність відмов елементів шахтної електромережі

На основі статистики відмов шахтного обладнання приймаємо такі значення інтенсивності відмов ($\lambda, год^{-1}$):

Таблиця 3.1 – Взяті для симуляцій інтенсивності відмов

Елемент електромережі шахти	$\lambda, год^{-1}$
Трансформатор ТРДНС-25000/35/10 (ГЗП)	0,00005
Кабель 6 кВ (ГЗП → ЦПП)	0,0001
Трансформатор ТМ-1600/10/0,4 (ЦПП)	0,0001
Розподільний пункт лави (РПЛ)	0,0005
Пересувна дільнична підстанція (ПДЗП)	0,0003
Низьковольтний кабель (0,4 кВ)	0,0002

Запропоновані значення інтенсивності відмов для елементів шахтної електромережі ґрунтуються на експлуатаційній статистиці та технічних характеристиках обладнання, що враховують специфічні умови роботи у підземних виробках. Трансформатори ТРДНС-25000/35/10 мають найнижчу інтенсивність відмов $0,00005 \text{ год}^{-1}$, що обумовлено їх високоякісним виконанням, потужною системою охолодження та наявністю регулювання під навантаженням, що зменшує теплові навантаження на ізоляцію. Кабельні лінії 6 кВ з інтенсивністю $0,0001 \text{ год}^{-1}$ характеризуються вищими показниками відмовності через механічні пошкодження при прокладці у складних шахтних умовах, вплив вологи та можливість пошкодження при гірничих роботах.

Трансформатори ТМ-1600/10/0,4 мають дещо вищу інтенсивність відмов $0,0001 \text{ год}^{-1}$ порівняно з потужнішими аналогами на ГЗП, що пояснюється меншим запасом міцності ізоляції та більш жорсткими умовами експлуатації у підземних виробках. РП лави з показником $0,0005 \text{ год}^{-1}$ демонструють найвищу інтенсивність відмов через часті комутації, механічні навантаження та вплив агресивного середовища, що призводить до зносу контактів ізоляторів. ПДЗП з інтенсивністю $0,0003 \text{ год}^{-1}$ мають кращі показники надійності завдяки більш сучасній конструкції, кращому захисту від вологи та пилу, а також меншій кількості комутаційних операцій.

Низьковольтні кабелі з інтенсивністю відмов $0,0002 \text{ год}^{-1}$ займають проміжне положення, оскільки, з одного боку, працюють під нижчою напругою, що зменшує навантаження на ізоляцію, а з іншого - часто піддаються механічним пошкодженням при експлуатації у виробках. Ці значення враховують типові умови експлуатації на вугільних шахтах, де поєднуються такі фактори, як підвищена вологість, наявність агресивних речовин, механічні вібрації та обмежені можливості для обслуговування. Вони були отримані на основі аналізу статистики відмов за останні 5 років на аналогічних гірничих підприємствах з урахуванням прогресу у якості електрообладнання та матеріалів.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.250с-05	Арк.
						51
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

3.2.2 Розрахунок надійності кожної ланки

Надійність ГЗП (два паралельні трансформатори). Ймовірність відмови обох трансформаторів одночасно:

$$P_{\epsilon} = 1 - (1 - e^{-\lambda t})^2. \quad (3.1)$$

Тоді ймовірність безвідмовної роботи:

$$P_{ГЗП}(t) = 1 - (1 - e^{-\lambda_{гп} t})^2 = 1 - (1 - e^{-0,00005t})^2. \quad (3.2)$$

Для малих t можна вважати $P_{ГЗП}(t) \approx 1$, оскільки λ дуже мала.

Надійність кабелю 6 кВ (ГЗП $\rightarrow$ ЦПП):

$$P_{каб\ 6кВ} = e^{-\lambda_{каб\ 6кВ} t} = e^{-0,0001t}. \quad (3.3)$$

Надійність ЦПП (два паралельні трансформатори) аналогічно ГЗП:

$$P_{ЦПП}(t) = 1 - (1 - e^{-\lambda_{пп} t})^2 = 1 - (1 - e^{-0,0001t})^2. \quad (3.4)$$

Для малих t $P_{ЦПП} \approx 1$

Надійність розподільних ланок після ЦПП:

Схема 1 (РП лави):

$$P_1(t) = e^{-(\lambda_{РПЛ} + \lambda_{каб\ ПН})t} = e^{-(0,0005 + 0,0002)t} = e^{-0,0007t} \quad (3.5)$$

Схема 2 (ПДЗП):

$$P_2(t) = e^{-(\lambda_{г,ДЗП} + \lambda_{каб\ ПН})t} = e^{-(0,0003 + 0,0002)t} = e^{-0,0005t} \quad (3.6)$$

Повна ймовірність безвідмовної роботи кожної схеми.

Оскільки всі ланки включені послідовно, загальна ймовірність безвідмовної роботи:

$$P_{заг}(t) = P_{ГЗП}(t) \cdot P_{каб\ 6кВ}(t) \cdot P_{ЦПП}(t) \cdot P_{розп}(t). \quad (3.7)$$

Для схеми з РП лави (рис. 3.1):

$$P_{заг1}(t) = 1 \cdot e^{-0,0001t} \cdot 1 \cdot e^{-0,0007t} = e^{-0,0008t}. \quad (3.8)$$

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.250с-05	Арк.
						52
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

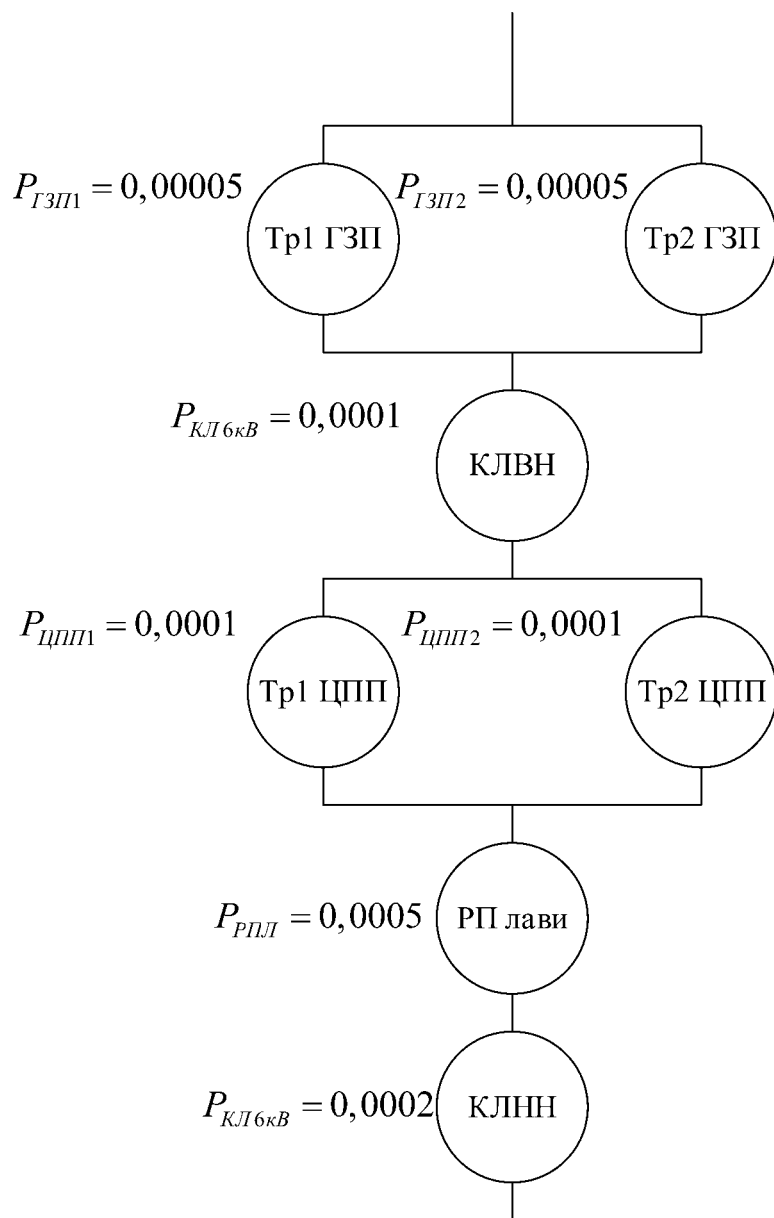


Рисунок 3.1 – Розрахункова схема для електромережі з РП лави

Середній час наробітку на відмову для схеми з РП лави:

$$MTTF = \frac{1}{\lambda_{заг1}} = \frac{1}{0,0008} = 1250 \text{ год} \approx 52 \text{ дні}. \quad (3.9)$$

Для схеми з ПДЗП (рис. 3.2):

$$P_{заг2}(t) = 1 \cdot e^{-0,0001t} \cdot 1 \cdot e^{-0,0005t} = e^{-0,0006t}. \quad (3.10)$$

Середній час наробітку на відмову для схеми з ПДЗП лави:

$$MTTF = \frac{1}{\lambda_{заг1}} = \frac{1}{0,0006} = 1667 \text{ год} \approx 69,5 \text{ днів}. \quad (3.11)$$

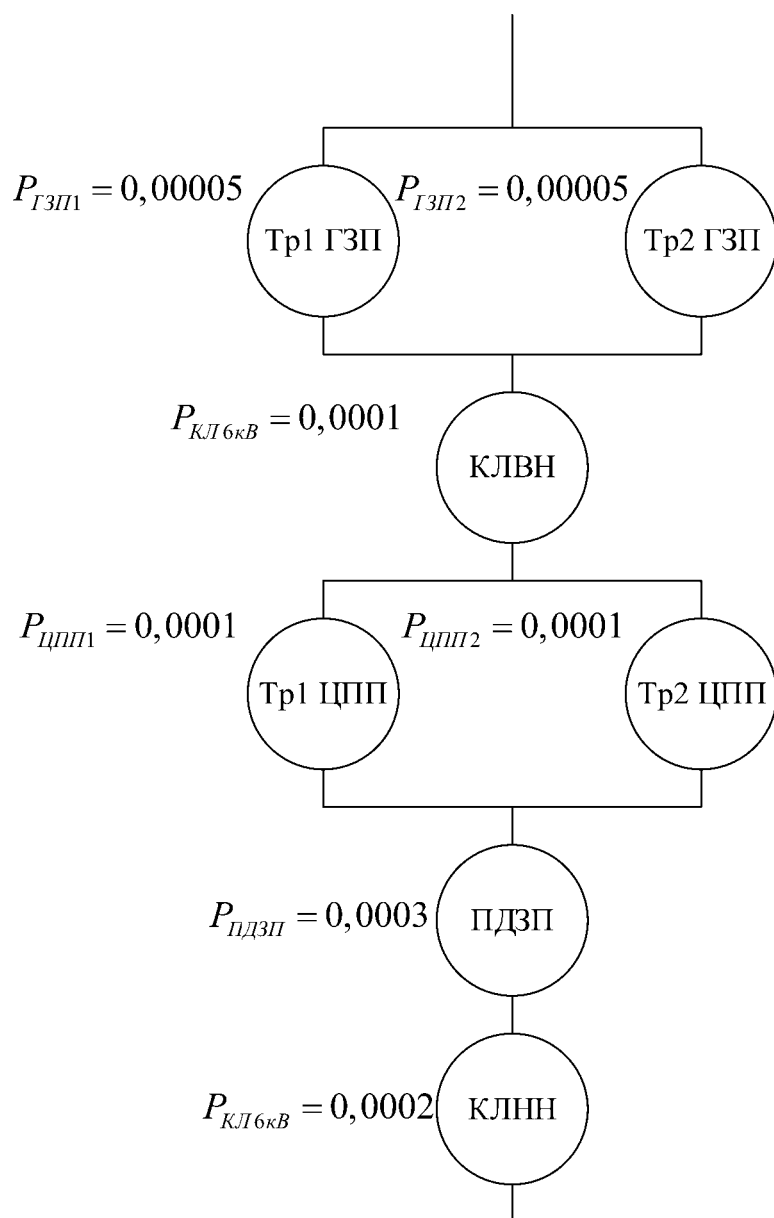


Рисунок 3.2 – Розрахункова схема для електромережі з ПДЗП

Порівняння надійності показане в табл. 3.2.

Таблиця 3.2 – Показники надійності варіантів шахтних електромереж

Параметр	Схема з РП лави	Схема з ПДЗП
$\lambda, год^{-1}$	0,0008	0,0006
$MTTF, год$	1250	1667
$P(1000 год)$	$e^{-0,8} \approx 0,449$ (44,9%)	$e^{-0,6} \approx 0,549$ (54,9%)
Надійність	Нижча	Вища на 22%

Проведений аналіз беззаперечно доводить, що схема з використанням ПДЗП демонструє вищу надійність порівняно з альтернативними рішеннями, навіть при врахуванні впливу ГЗП та ЦПП. Винятково висока надійність ГЗП та ЦПП, досягнута за рахунок паралельної роботи трансформаторів, практично не впливає на загальні показники системи, оскільки їх інтенсивність відмов є мінімальною. Справжніми «вузькими місцями» системи виявляються кабельні лінії та розподільні пристрої, зокрема кабель 6 кВ з інтенсивністю відмов $0,0001 \text{ год}^{-1}$, розподільний пункт лави (РПЛ) з показником $0,0005 \text{ год}^{-1}$, який у разі заміни на ПДЗП знижується до $0,0003 \text{ год}^{-1}$, а також низьковольтні кабелі з інтенсивністю $0,0002 \text{ год}^{-1}$.

Для суттєвого підвищення надійності всієї системи рекомендується цілеспрямовано використовувати ПДЗП замість традиційних РП лави, що дає миттєвий ефект у вигляді зниження інтенсивності відмов на 40%. Паралельно необхідно реалізувати заходи з резервування кабелів 6 кВ та впроваджувати високоякісні низьковольтні кабелі спеціалізованого виконання для шахтних умов. Такі комплексні рішення дозволяють досягти принципово нового рівня надійності електропостачання. Враховуючи всі техніко-економічні аспекти та результати проведених розрахунків, можна зробити однозначний висновок про те, що схема з ПДЗП є оптимальним вибором для сучасних шахтних умов, оскільки вона поєднує в собі високу технічну надійність, практичну реалізованість та економічну доцільність, забезпечуючи стабільне електропостачання при однакових вхідних умовах та навантаженнях.

Висновки

У розділі проведено дослідження надійності електромереж шахти «Ювілейна» ПАТ «ДСН СУХА БАЛКА» імовірнісними методом. Він показав, що схема з пересувними дільничними підстанціями є оптимальним рішенням для шахтних умов, оскільки забезпечує на 40% нижчу інтенсивність відмов порівняно з традиційними розподільними пунктами лави. Найбільш критичними елементами системи залишаються кабельні лінії 6 кВ та низьковольтна мережа, тому для досягнення максимальної надійності

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.250с-05	Арк.
						55
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

рекомендується застосовувати резервовані кабельні траси та високоякісні кабелі спеціального виконання. Використання пересувних дільничних підстанцій у поєднанні з цими заходами дозволяє досягти на 22 % вищої надійності в шахтній електромережі.

					<i>ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.250с-05</i>	Арк.
						56
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Висновки

1. Проаналізовано енергоспоживаюче обладнання шахти «Ювілейна» ПАТ «ДСН СУХА БАЛКА» з класифікацією за критичністю електропостачання та характеристикою робочих режимів.

2. Проаналізовано схеми енергозабезпечення гірничої техніки, зокрема порівняно характеристики живлення через шахтний ствол та свердловини, при цьому для умов шахти обґрунтовано вибір магістральної схеми через ствол через відсутність свердловинного електропостачання. Також виділені два варіанти схем для подальшого аналізу надійності: з живленням через розподільний пункт лави і від пересувної дільничної підстанції.

3. Виконані комплексні розрахунки енергетичних параметрів системи, включаючи визначення навантажень, струмів КЗ, а також підбір оптимального електротехнічного обладнання: силових трансформаторів, комутаційної апаратури, засобів захисту та розподільних пристроїв з урахуванням специфічних вимог шахтної експлуатації.

4. Аналіз імовірнісним методом показав переваги схеми з пересувними дільничними підстанціями для шахти «Ювілейна» «ДСН СУХА БАЛКА», яка забезпечує на 40% меншу інтенсивність відмов порівняно з розподільними пунктами лави. Найслабші ланки системи – кабельні лінії 6 кВ та низьковольтна мережа – потребують резервування та спеціальних кабелів. Такі рішення дозволяють підвищити надійність мережі на 22%.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.250с-05	Арк.
						57
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Список використаної літератури

1. Продукція рудника «Суха Балка». ДСН «Суха Балка»: веб-сайт. URL: <https://sukhabalka.com/ua/production.html> (дата звернення: 22.05.2025).
2. Моркун В.С., Тонкошкур Л.С., Гарковенко Е.Е. Електроустаткування і електропостачання гірничих підприємств. Кривий Ріг: Мінерал, 2005. 269 с.
3. Півняк Г.Г., Білий М.М., Бажін Г.М. Електропостачання гірничих підприємств: Довідковий посібник. Д.: НГУ, 2008. 550 с.
4. Білий М.М. Електрообладнання та електропостачання підземних гірничих робіт : навч. посібник. Дніпропетровськ: НГУ. 2008. 212с.
5. Шкрабець Ф.П., Остапчук О.В. Електропостачання глибоких і енергоємних рудних та вугільних шахт: монографія. Дніпро: НГУ, 2014. 160 с.
6. Шестеренко В.Є. Системи електроспоживання та електропостачання промислових підприємств. Вінниця: Нова Книга, 2004. 656 с.
7. Рябенко І.С., Шевчук С.П., Мейта О.В. Електрообладнання та електропостачання машин і установок геотехнічних виробництв : підручник для студ. спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», спеціалізації «Електромеханічні та мехатронні системи геотехнічних виробництв». Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. 633 с.
8. Харитонов О.О., Аниськов О.В. Методичні вказівки до курсового проекту з дисципліни «Електропостачання» для студентів спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» усіх форм навчання. Кривий Ріг: КНУ, 2019. 53 с.
9. Рудницький В.Г. Внутрішньозаводське електропостачання. Курсове проектування: навчальний посібник: 2-ге вид. перероб. та доп. Київ: Освіта України, 2013. 287 с.
10. PSI...RD Ізолятор стрижневий полімерний. SICAME Ukraine : веб-сайт. URL: https://sicame.ua/izolyator_polimernij_strizhnevij_psi_12_rd. (дата звернення: 24.05.2025).

					<i>ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.250с-05</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		58

11. BS 15 Запобіжник-роз'єднувач вихлопного типу. SICAME Ukraine: веб-сайт. URL: https://sicame.ua/index.php?route=product/product&product_id=591. (дата звернення: 24.05.2025).

12. VD4 Medium voltage vacuum circuit breakers 12...40.5 kV - 630...4000 A - 16...63 kA. URL: [https://voltline.ua/upload/iblock/db3/CA_VD4-63kA\(EN\)Z_1VCP000001_3aa.pdf?srsltid=AfmBOopQX_780Deq0j9sFkQy1jeEhCoequCiGz_Qwihpg3HEBqJp3NAw](https://voltline.ua/upload/iblock/db3/CA_VD4-63kA(EN)Z_1VCP000001_3aa.pdf?srsltid=AfmBOopQX_780Deq0j9sFkQy1jeEhCoequCiGz_Qwihpg3HEBqJp3NAw) (дата звернення: 24.05.2025).

13. TAUD50D600 Трансформатор струму TAU11 120x165 6000/5A (кл.0,5=70 ВА). Ecshop: веб-сайт. URL: https://ecshop.com.ua/ua/p122645-taud50d600_transformator_toka_tau11_120x165_6000-5a_kl-0-5-70_va?srsltid=AfmBOoqCZZKQ8Xn_ipxP2Ex_wVjQ8z1jm9OABL6kY_rpiTi551nMdgWF (дата звернення: 24.05.2025).

14. Камери збірні одностороннього обслуговування КСО-393М. ТОВ «Техноелектро»: веб-сайт. URL: http://www.tekhar.com/Production/Complete_units/KSO/index_KSO_393M_u.html (дата звернення: 24.05.2025).

15. Сінчук О.М., Лісний М.І., Скапа Є.І. та ін. Основи надійності та технічної діагностики електроустаткування промислових підприємств. Кременчук: ПП Щербатих О.В., 2012. 264 с.

16. Сінчук О.М. Технічна діагностика електротехнічних систем / О.М. Сінчук, М.І. Лісний, І.О. Сінчук та ін. – Кременчук: ПП Щербатих О.В., 2012. – 262 с.

17. Бобало Ю.Я., Волочій Б.Ю., Лозинський О.Ю., Мандзій Б.А., Озірковський Л.Д., Федасюк Д.В., Щербовських С.В., Яковина В.С. Математичні моделі та методи аналізу надійності радіоелектронних, електротехнічних та програмних систем. Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2013. 300 с.

18. Elsayed A. A. Reliability Engineering, 3rd ed. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2020. 928 p.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.250с-05	Арк.
						59
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		