

Міністерство освіти і науки України
Криворізький національний університет
Електротехнічний факультет

Пояснювальна записка
до кваліфікаційної роботи бакалавра
за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

РОЗРАХУНОК ТА ВИБІР ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ
ВІТРОЗАРЯДНОЇ СТАНЦІЇ ДЛЯ УМОВ ПІДЗЕМНИХ РУДНИКІВ

Виконав: здобувач групи ЕЕМ-22-1

Владислав СОВЕНКО

Керівник випускної роботи _____

к.т.н., доц. Олександр ІЛЬЧЕНКО

Нормоконтролер _____

к.т.н., доц. Олександр ІЛЬЧЕНКО

Декан ЕТФ _____

к.т.н., доц. Владислав ФЕДОТОВ

Гарант освітньої програми _____

к.т.н., доц. Ігор ПЕРЕСУНЬКО

Кривий Ріг

2026 р.

ЗАЯВА

щодо самостійності виконання кваліфікаційної роботи

Я, Совенко Владислав Віталійович, здобувач вищої освіти за першим (бакалаврським) рівнем за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка заявляю, що моя кваліфікаційна робота, яка подана до екзаменаційної комісії для публічного захисту, виконана самостійно і в ній не міститься елементів плагіату. Всі запозичення з друкованих та електронних джерел, а також із захищених раніше кваліфікаційних робіт, кандидатських і докторських дисертацій мають відповідні посилання.

Я ознайомлений з діючим Положенням про запобігання і виявлення академічного плагіату. Згідно з яким виявлення плагіату є підставою для відмови в допуску письмової роботи до захисту та застосування дисциплінарних заходів.

10 червня 2026 р.

Криворізький національний університет

Факультет: електротехнічний

Освітній рівень: бакалавр

Спеціальність: 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

**ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ
ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ**

Совенка Владислава Віталійовича
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розрахунок та вибір електротехнічного обладнання вітрозарядної станції для умов підземних рудників

2. Строк подання студентом роботи 10 червня 2026 р.

3. Мета та завдання кваліфікаційної роботи

Мета роботи – розрахунок та вибір електротехнічного обладнання вітрозарядної станції для умов підземних рудників, яка використовує енергію вентиляційного потоку для часткового заряду штатної тягової акумуляторної батареї рудничного електровоза та живлення шахтної освітлювальної мережі.

Завдання кваліфікаційної роботи: проаналізувати актуальність використання локальних відновлюваних джерел енергії в системах електропостачання підземних рудників; дослідити особливості вентиляційних потоків підземних виробок як джерела механічної енергії; обґрунтувати вибір вертикально-осьової вітроенергетичної установки для підземних умов експлуатації; визначити структуру вітрозарядної станції та вимоги до її електротехнічного обладнання; сформувати вихідні дані для проектування з урахуванням режимів роботи рудничного електровоза; виконати розрахунок енергетичних параметрів вітроустановки; розробити структурну та функціональну схему станції; виконати вибір тягової акумуляторної батареї, генераторно-перетворювального обладнання, зарядного пристрою, кабельних ліній, комутаційної та захисної апаратури; сформувати алгоритм роботи вітрозарядної станції; виконати попередню техніко-економічну оцінку запропонованого рішення.

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які необхідно розробити)

1. Актуальність використання локальних відновлюваних джерел енергії в системах електропостачання підземних рудників; 2. Особливості вентиляційних потоків підземних виробок як джерела механічної енергії; 3. Обґрунтування вибору вертикально-осьової ВЕУ для підземних умов експлуатації; 4. Структура вітрозарядної станції та особливості заряду тягових акумуляторних батарей; 5. Вимоги до електротехнічного обладнання в умовах підземних рудників; 6. Вихідні дані для проектування з урахуванням режимів роботи рудничного електровоза; 7. Розрахунок енергетичних параметрів

вітроустановки; 8. Розробка структурної та функціональної схеми вітрозарядної станції; 9. Розрахунок і вибір основного електротехнічного обладнання, кабелів, комутаційної та захисної апаратури; 10. Алгоритм роботи вітрозарядної станції та техніко-економічна оцінка запропонованого рішення.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

1. Місце розташування ВЕУ на спряженні квершлагів; 2. Узагальнена схема функціонування рудничного електровозного транспорту; 3. Розрахунок енергетичних параметрів вітроустановки; 4. Структурна та функціональна схеми вітрозарядної станції для заряду тягової АКБ та живлення ШОМ; 5. Прийняте генераторно-перетворювальне обладнання вітрозарядної станції; 6. Вибір провідників, комутаційної та захисної апаратури; 7. Узагальнений алгоритм роботи вітрозарядної станції під час заряду тягової АКБ; 8. Техніко-економічна оцінка запропонованого рішення.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали консультанта	Дата, підпис	
		Завдання видав	Завдання прийняв
I	Ільченко О.В.		
II	Ільченко О.В.		

7. Календарний план

№	Етапи роботи	Термін виконання
1	Дослідження особливостей вентиляційних потоків підземних виробок як джерела механічної енергії	21 травня 2026 р.
2	Формування структури вітрозарядної станції та визначення вимог до електротехнічного обладнання	24 травня 2026 р.
3	Формування вихідних даних для проєктування з урахуванням режимів роботи рудничного електровоза	28 травня 2026 р.
4	Розрахунок енергетичних параметрів вітроустановки та оцінка можливої генерації електроенергії	31 травня 2026 р.
5	Розробка структурної та функціональної схеми вітрозарядної станції	3 червня 2026 р.
6	Розрахунок і вибір основного електротехнічного обладнання	6 червня 2026 р.
7	Виконання техніко-економічної оцінки, формулювання висновків та оформлення пояснювальної записки	10 червня 2026 р.

Дата видачі завдання 18.05.2026 р.

Здобувач вищої освіти _____
(підпис)

Владислав СОВЕНКО
(Ім'я, прізвище)

Керівник роботи _____
(підпис)

Олександр ІЛЬЧЕНКО
(Ім'я, прізвище)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до кваліфікаційної роботи на тему «Розрахунок та вибір електротехнічного обладнання вітрозарядної станції для умов підземних рудників» містить: 66 с., 14 рис., 25 табл., 22 літературних джерел.

Робота присвячена розрахунку та вибору електротехнічного обладнання вітрозарядної станції, призначеної для використання в умовах підземних рудників. Основну увагу приділено можливості застосування вентиляційних потоків підземних виробок як локального джерела механічної енергії з подальшим її перетворенням в електричну енергію для часткового заряду тягових акумуляторних батарей рудничних електровозів та живлення шахтної освітлювальної мережі.

Об'єкт дослідження – електротехнічний комплекс вітрозарядної станції для умов підземного рудника.

Мета роботи – розрахунок та вибір електротехнічного обладнання вітрозарядної станції для умов підземних рудників, яка використовує енергію вентиляційного потоку для часткового заряду штатної тягової акумуляторної батареї рудничного електровоза та живлення шахтної освітлювальної мережі.

Практичне значення роботи полягає у можливості використання запропонованого технічного рішення для попереднього проектування локальних вітрозарядних станцій у підземних виробках. Результати розрахунків можуть бути застосовані під час вибору вертикально-осьової вітроенергетичної установки, зарядного пристрою, кабельних ліній, комутаційної та захисної апаратури, допоміжної акумуляторної батареї власних потреб і засобів керування.

Запропонована станція буде використовуватися як допоміжне джерело енергії для підзаряду тягових акумуляторних батарей, живлення шахтної

					КНУ.РБ.141.26.247с-11.Р			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Реферат	Літ.	Арк.	Акрушів
Розробив		Совенко В.В.					5	2
Перевірив		Ільченко О.В.						
Н. Контр.		Ільченко О.В.						
Затвердж.		Пересунько І.І.						
						КНУ гр. ЕЕМ-22-1		

освітлювальної мережі та підвищення енергетичної стійкості окремої дільниці.

У першому розділі розглянуто теоретичні основи побудови вітрозарядної станції для умов підземних рудників. Проаналізовано актуальність використання локальних відновлюваних джерел енергії, особливості вентиляційних потоків підземних виробок як джерела механічної енергії, обґрунтовано вибір вертикально-осьової ВЕУ та визначено вимоги до електротехнічного обладнання, що працює у складних підземних умовах.

У другому розділі виконано проектування, розрахунок та вибір електротехнічного обладнання вітрозарядної станції. Сформовано вихідні дані з урахуванням режимів роботи рудничного електровоза, виконано розрахунок енергетичних параметрів ВЕУ RX-HV4K потужністю 4 кВт, розроблено структурну та функціональну електричну схему станції. Як типовий об'єкт заряду прийнято тягову акумуляторну батарею 40×3 PzS 180 напругою 80 В і ємністю 180 А·год. Обрано генераторно-перетворювальне обладнання, зарядний пристрій, кабельні лінії, комутаційну та захисну апаратуру, сформовано алгоритм роботи станції та виконано попередню техніко-економічну оцінку. Розрахунковий строк окупності запропонованого рішення становить близько 4,3 року.

У висновках наведено основні результати виконаної роботи та підтверджено доцільність використання вітрозарядної станції як допоміжного локального джерела енергії для умов підземних рудників

ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНА УСТАНОВКА, ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНА МЕРЕЖА, ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ, АКУМУЛЯТОРНА БАТАРЕЯ, СИСТЕМА КЕРУВАННЯ, ПІДЗЕМНИЙ РУДНИК

					КНУ.РБ.141.26.247с-11.Р	Арк.
						6
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ЗМІСТ

ВСТУП.....	8
РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ПОБУДОВИ ВІТРОЗАРЯДНОЇ СТАНЦІЇ ДЛЯ УМОВ ПІДЗЕМНИХ РУДНИКІВ.....	9
1.1 Актуальність використання локальних відновлюваних джерел енергії в системах електропостачання підземних рудників.....	9
1.2 Особливості вентиляційних потоків підземних виробок як джерела механічної енергії.....	12
1.3 Обґрунтування вибору типу вітроенергетичної установки для підземних умов експлуатації	16
1.4 Структура вітрозарядної станції та особливості заряду тягових акумуляторних батарей.....	18
1.5 Вимоги до електротехнічного обладнання в умовах підземних рудників.....	23
РОЗДІЛ 2. ПРОЄКТУВАННЯ, РОЗРАХУНОК ТА ВИБІР ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ ВІТРОЗАРЯДНОЇ СТАНЦІЇ.....	26
2.1 Вихідні дані для проектування вітрозарядної станції з урахуванням режимів роботи рудничного електровоза	26
2.2 Розрахунок енергетичних параметрів вітроустановки	32
2.3 Розробка структурної та електричної схеми вітрозарядної станції.....	37
2.4 Розрахунок та вибір тягової акумуляторної батареї.....	43
2.5 Вибір генераторно-перетворювального обладнання та зарядного пристрою	46
2.6 Розрахунок кабелів, комутаційної та захисної апаратури	51
2.7 Алгоритм роботи вітрозарядної станції	55
2.8 Техніко-економічна оцінка запропонованого рішення	58
ВИСНОВКИ	62
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	64

					КНУ .РВ .141.26.247с-11.3		
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Зміст		
Розробив		Совенко В.В.					
Перевірів		Льченко О.В.					
Н. Контр.		Льченко О.В.					
Затвердж.		Пересунько І.І.					
					Літ.	Арк.	Акрюшів
					7	1	
					КНУ гр. ЕЕМ-22-1		

ВСТУП

Підземні рудники належать до складних і енергоємних промислових об'єктів, у яких надійність електропостачання безпосередньо впливає на безпеку персоналу, безперервність технологічного процесу та ефективність роботи гірничотранспортного комплексу [1]. Значну частину електроспоживання таких підприємств формують вентиляційні установки, водовідливні системи, освітлення, засоби зв'язку, автоматики, сигналізації, а також зарядні пристрої для тягових акумуляторних батарей (АКБ) рудничних електровозів [2].

Одним із напрямів підвищення енергоефективності та енергетичної стійкості підземних рудників є використання локальних джерел електричної енергії (ЕЕ) [3]. Для таких умов особливий інтерес становлять вентиляційні потоки підземних виробок, які створюються роботою вентиляційної системи рудника та мають певний енергетичний потенціал. На відміну від природного вітру на поверхні, вентиляційний потік у шахтних виробках має примусовий характер, тривалий час дії та відносно визначений напрям руху. Це створює передумови для використання частини його кінетичної енергії за допомогою компактних вітроенергетичних установок (ВЕУ) малої потужності.

Актуальність теми роботи полягає у необхідності розроблення технічного рішення, яке дозволяє використовувати вентиляційний потік підземної виробки як додаткове локальне джерело енергії для заряду тягових АКБ рудничних електровозів та живлення допоміжних споживачів, зокрема шахтної освітлювальної мережі.

Запропонована вітрозарядна станція не розглядається як повна заміна централізованого електропостачання, а є допоміжним електротехнічним комплексом, здатним частково зменшити навантаження на стаціонарні зарядні пункти, підвищити гнучкість енергозабезпечення окремої дільниці та забезпечити додаткове джерело енергії для малопотужних споживачів.

					КНУ.РБ.141.26.247с-11.ВС			
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>	Вступ	<i>Літ.</i>	<i>Арк.</i>	<i>Акрушів</i>
<i>Розробив</i>		<i>Совенко В.В.</i>					8	1
<i>Перевірив</i>		<i>Ільченко О.В.</i>						
<i>Н. Контр.</i>		<i>Ільченко О.В.</i>						
<i>Затвердж.</i>		<i>Пересунько І.І.</i>						
						КНУ гр. ЕЕМ-22-1		

РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ПОБУДОВИ ВІТРОЗАРЯДНОЇ СТАНЦІЇ ДЛЯ УМОВ ПІДЗЕМНИХ РУДНИКІВ

1.1 Актуальність використання локальних відновлюваних джерел енергії в системах електропостачання підземних рудників

Підземні рудники належать до енергоємних промислових об'єктів, оскільки технологічний процес видобутку та транспортування руди потребує безперервної роботи вентиляційних установок, водовідливу, компресорного обладнання, підйомних машин, освітлення, засобів зв'язку, автоматики та зарядних пристроїв для тягових АКБ рудничних електровозів [4].

При цьому система електропостачання повинна забезпечувати не лише економічність, а й високу надійність, оскільки порушення живлення може призвести до технологічних простоїв і погіршення умов безпеки у виробках [2]. Додатковими ускладнювальними чинниками є віддаленість окремих ділянок, підвищена вологість, запиленість, механічні впливи та обмежений простір для розміщення електрообладнання.

Одним із напрямів підвищення енергетичної стійкості таких об'єктів є використання локальних відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) [3, 5]. Для підземних рудників перспективним є застосування компактних ВЕУ, що працюють від вентиляційних повітряних потоків. На відміну від природного вітру на поверхні, шахтний вентиляційний потік має примусовий характер, відносно прогнозований напрям і тривалий час дії, що створює передумови для перетворення частини його кінетичної енергії в електричну.

Ідея вітрозарядної станції полягає у встановленні вертикально-осьової ВЕУ в зоні стійкого вентиляційного потоку з подальшим перетворенням отриманої енергії для підзаряду штатних тягових АКБ рудничних електровозів. Таке рішення не замінює стаціонарні зарядні пункти, але може частково

					КНУ.РБ.141.26.247с-11.01			
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>	Розділ 1	<i>Лім.</i>	<i>Арк.</i>	<i>Акрушів</i>
<i>Розробив</i>	<i>Совенко В.В.</i>						9	23
<i>Перевірив</i>	<i>Ільченко О.В.</i>							
<i>Н. Контр.</i>	<i>Ільченко О.В.</i>							
<i>Затвердж.</i>	<i>Пересунько І.І.</i>							
						КНУ гр. ЕЕМ-22-1		

зменшити навантаження на них і підвищити гнучкість енергозабезпечення транспортної дільниці.

Таблиця 1.1 – Основні передумови використання локальних ВДЕ в системі електропостачання підземного рудника

Передумова	Технічний зміст	Очікуваний результат
Енергоемність підземного рудника	Наявність вентиляції, водовідливу, транспорту, освітлення та зарядних пристроїв	Зростання потреби в раціональному використанні ЕЕ
Стабільний вентиляційний потік	Цілодобовий рух повітря в окремих виробках і спряженнях квершлагів	Можливість використання кінетичної енергії потоку
Потреба у заряді тягових АКБ	Періодична необхідність накопичення енергії для рудничних електровозів	Часткове розвантаження стаціонарних зарядних пунктів
Аварійні та допоміжні споживачі	Освітлення, сигналізація, зв'язок, контроль параметрів середовища	Підвищення енергетичної стійкості дільниці

Локальну вітрозарядну станцію доцільно розглядати не як заміну централізованого електропостачання шахти, а як допоміжний електротехнічний комплекс для часткового покриття потреб окремих споживачів. Її основними функціями можуть бути підзаряд тягових АКБ, живлення малопотужних допоміжних споживачів, підтримання локального аварійного освітлення, засобів зв'язку, сигналізації та контрольно-вимірювальних пристроїв. Наявність такого джерела з накопичувачем підвищує енергетичну стійкість окремої дільниці, оскільки частина функцій може підтримуватися навіть у разі обмеження потужності від основної мережі.



Рисунок 1.1 – Концепція використання локального ВДЕ в підземному руднику

Актуальність рішення також узгоджується з напрямками Енергетичної стратегії України на період до 2050 року [6], яка орієнтує розвиток енергетики на підвищення енергоефективності, децентралізацію, декарбонізацію та кліматичну нейтральність. Для промислових підприємств це означає потребу у впровадженні технічних рішень, що зменшують питоме електроспоживання та підвищують автономність локальних систем електропостачання.

Для підземних рудників локальні ВДЕ мають прикладне значення передусім як елемент енергетичної оптимізації, а не як джерело великої встановленої потужності. ВЕУ, розміщена у вентиляційному потоці, використовує вже наявний технологічний процес провітрювання виробок і може впроваджуватися поетапно на окремих дільницях [5]. Це дає змогу уточнити фактичний енергетичний потенціал повітряного потоку та оцінити доцільність подальшого масштабування системи.

З практичної точки зору таке рішення не потребує зміни основної технологічної схеми рудника, а може впроваджуватися поетапно на окремих дільницях. Це зручно для дослідно-промислового випробування, уточнення фактичного енергетичного потенціалу вентиляційного потоку та подальшого масштабування системи у разі підтвердження її технічної ефективності.

Узагальнену оцінку напрямів використання вітрозарядної станції в умовах підземного рудника наведено в табл. 1.2.

Таблиця 1.2 – Можливі функції вітрозарядної станції в підземному руднику

Функція	Основний споживач	Технічний ефект	Обмеження застосування
Заряд тягових АКБ	Рудничний електровоз	Накопичення енергії для транспортного циклу	Потрібен контроль струму, напруги та температури
Допоміжне живлення	Освітлення, зв'язок, датчики	Підтримання роботи малопотужних систем	Потужність залежить від швидкості повітря
Резервування	Локальна дільниця виробки	Підвищення енергетичної стійкості	Не замінює основну мережу шахти
Енергоефективність	Зарядний пункт або DC-шина	Зменшення частки енергії, що відбирається з мережі	Потрібна економічна оцінка доцільності

Важливою перевагою локального джерела з акумуляторним накопичувачем є можливість узгодження нерівномірної генерації з дискретним споживанням енергії рудничним електровозом [7]. Тому вітрозарядна станція повинна включати не лише вітроколесо і генератор, а й перетворювач, контролер заряду, систему захисту та засоби контролю стану АКБ. Це забезпечує безпечний заряд, обмеження струму, запобігання перезаряду та підвищення ресурсу тягової АКБ.

Таким чином, використання локальної вітрозарядної станції в системі електропостачання підземного рудника є актуальним, оскільки дозволяє частково використовувати енергію вентиляційного потоку, підвищити ефективність електроспоживання, підтримати роботу допоміжних споживачів і створити додаткове джерело енергії для заряду тягових АКБ. Подальший розгляд доцільно спрямувати на аналіз особливостей вентиляційних потоків підземних виробок як джерела механічної енергії для ВЕУ.

1.2 Особливості вентиляційних потоків підземних виробок як джерела механічної енергії

Вентиляційна система є одним із ключових елементів функціонування підземного рудника, оскільки забезпечує подавання свіжого повітря, видалення забрудненого повітря та підтримання безпечних умов праці [8]. У процесі роботи головних вентиляторних установок у виробках формується організований повітряний потік із певною швидкістю, напрямом руху та об'ємною витратою. На відміну від природного вітру, вентиляційний потік має примусовий характер, тривалий час дії та рухається у геометрично обмеженому просторі. Тому його можна розглядати як техногенне джерело механічної енергії, яке вже наявне в технологічному процесі підземного рудника.

Енергетичний потенціал вентиляційного потоку визначається його швидкістю, густиною рудничного повітря та площею взаємодії потоку з вітроколесом [9]. У підземних виробках швидкість повітря залежить від перерізу виробки, схеми провітрювання, місцевих опорів, розгалужень і поворотів. Для

					КНУ.РБ.141.26.247с-11.01	Арк.
						12
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

попередньої оцінки доцільно розглядати ділянки, де швидкість вентиляційного потоку становить орієнтовно 5–15 м/с.

Основна фізична залежність, яка пояснює можливість енергетичного використання вентиляційного потоку, пов'язана з кінетичною енергією рухомої маси повітря. Кінетична енергія тіла масою m , яке рухається зі швидкістю V , визначається за виразом [10]:

$$W = \frac{mV^2}{2} \quad (1.1)$$

де W – кінетична енергія, Дж; m – маса повітря; V – швидкість руху повітряного потоку.

Для повітряного потоку, що проходить через певну площу за одиницю часу, масову витрату можна подати як [10]:

$$m = \rho \cdot S \cdot V \quad (1.2)$$

де ρ – густина повітря кг/м³; S – площа перерізу потоку або ометана площа вітроколеса, м²; V – швидкість повітряного потоку, м/с.

Тоді потужність повітряного потоку, що проходить через площу S , може бути визначена за формулою [10]:

$$P_0 = \frac{\rho \cdot S \cdot V^3}{2} \quad (1.3)$$

Із залежності (1.3) видно, що потужність повітряного потоку найбільше залежить від швидкості, оскільки вона входить до формули у третьому степені. Тому навіть незначне збільшення швидкості вентиляційного потоку суттєво підвищує доступну механічну потужність. Саме тому під час вибору місця встановлення ВЕУ важливо враховувати ділянки локального прискорення повітря.

Фактична електрична потужність ВЕУ завжди менша за теоретичну потужність потоку через аеродинамічні, механічні та електричні втрати у роторі, генераторі, випрямлячі й контролері заряду [10–11]. Тому для практичної оцінки використовують коефіцієнт використання енергії потоку, який враховує частку енергії, що може бути перетворена ВЕУ у корисну механічну або електричну

					КНУ.РБ.141.26.247с-11.01	Арк.
						13
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

потужність. Для вертикально-осьових та ортогональних ВЕУ цей коефіцієнт, як правило, є нижчим, ніж для ідеального вітроколеса, однак така конструкція має переваги для роботи в обмеженому просторі підземних виробок.

Крім того, у підземних умовах необхідно враховувати параметри рудничного повітря, оскільки його густина залежить від температури, вологості, тиску та глибини розташування виробки [9]. Тому під час практичних розрахунків доцільно використовувати уточнені параметри повітряного середовища та коефіцієнти корисного перетворення енергії.

Для узагальнення основних особливостей вентиляційного потоку як джерела механічної енергії доцільно подати їх у вигляді табл.1.3.

Таблиця 1.3 – Особливості вентиляційного потоку підземних виробок як джерела механічної енергії

Особливість вентиляційного потоку	Вплив на можливість використання ВЕУ
Примусовий характер руху повітря	Потік формується вентиляційною системою шахти і може мати тривалу дію
Відносно сталий напрям руху	Спрощує вибір місця встановлення та умови взаємодії потоку з ротором
Діапазон швидкостей 5-15 м/с	Дозволяє розглядати потік як потенційне джерело механічної енергії
Кубічна залежність потужності від швидкості	Підвищує значення ділянок із локальним прискоренням повітряного потоку
Зміна густини рудничного повітря	Потребує врахування температури, вологості, тиску та глибини виробки
Наявність турбулентності	Вимагає вибору конструкції ВЕУ, стійкої до нерівномірності потоку
Обмежений простір виробки	Впливає на габарити, спосіб монтажу та вимоги до безпеки обладнання

Одним із доцільних місць для встановлення ВЕУ може бути ділянка спряження квершлагів, через яку проходять значні об'єми вентиляційного повітря [12]. Спряження квершлагів є ділянкою, де відбувається поєднання або перерозподіл повітряних потоків, тому у таких зонах можливі локальне підвищення швидкості потоку, зміна його напрямку та формування турбулентних ділянок, що потребує вибору конструкції ВЕУ, стійкої до нерівномірного обтікання [3, 5].

Розміщення ВЕУ у виробці повинно виконуватися так, щоб не створювати надмірного аеродинамічного опору, не погіршувати режим провітрювання, не заважати руху персоналу, транспорту, прокладанню кабельних ліній та технічному обслуговуванню обладнання. Тому оцінка вентиляційного потоку як джерела механічної енергії повинна виконуватися разом з аналізом габаритів виробки, напрямку руху повітря, рівня турбулентності та умов безпечної експлуатації електротехнічного обладнання [3, 5].

Отже, вентиляційні потоки підземних виробок можуть розглядатися як додаткове локальне джерело механічної енергії для малопотужної ВЕУ. Їх перевагами є тривалість дії, організований напрям руху, наявність ділянок із достатньою швидкістю повітря та можливість використання вже існуючого технологічного процесу провітрювання шахти. Водночас підземні умови висувають обмеження щодо габаритів, рівня турбулентності, безпеки та недопущення погіршення вентиляційного режиму. Саме ці особливості визначають потребу у виборі типу ВЕУ, придатного для роботи в обмеженому просторі підземних виробок.

1.3 Обґрунтування вибору типу вітроенергетичної установки для підземних умов експлуатації

Результати аналізу вентиляційних потоків підземних виробок показують, що вони можуть розглядатися як локальне техногенне джерело механічної енергії [3, 5, 12]. Однак ефективність його використання залежить від правильного вибору типу ВЕУ. Для підземних умов цей вибір має враховувати обмежений простір виробки, нерівномірність повітряного потоку, вимоги безпеки, зручність монтажу та можливість технічного обслуговування.

У загальному випадку ВЕУ поділяють на горизонтально-осьові та вертикально-осьові [10]. Горизонтально-осьові ВЕУ є найбільш поширеними у традиційній вітроенергетиці, оскільки вони мають високий коефіцієнт використання енергії вітру та добре відпрацьовану конструкцію. Їх ефективність значною мірою залежить від правильного орієнтування ротора за напрямом

					КНУ.РБ.141.26.247с-11.01	Арк.
						16
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

повітряного потоку. Для відкритої місцевості це вирішується за допомогою системи повороту гондоли, проте у підземній виробці така система ускладнює конструкцію, збільшує габарити, підвищує вимоги до монтажу та може створювати додаткові експлуатаційні ризики.

Вертикально-осьові ВЕУ мають іншу конструктивну логіку: вісь обертання ротора розташована вертикально, а тому установка здатна сприймати повітряний потік без спеціальної системи орієнтації на його напрям. Для підземних умов це є суттєвою перевагою, оскільки вентиляційний потік у місцях спряження виробок може мати локальні завихрення, нерівномірний розподіл швидкостей та зміну напрямку в окремих зонах. Відсутність потреби в механізмі орієнтації спрощує конструкцію, зменшує кількість рухомих вузлів і підвищує експлуатаційну надійність комплексу.

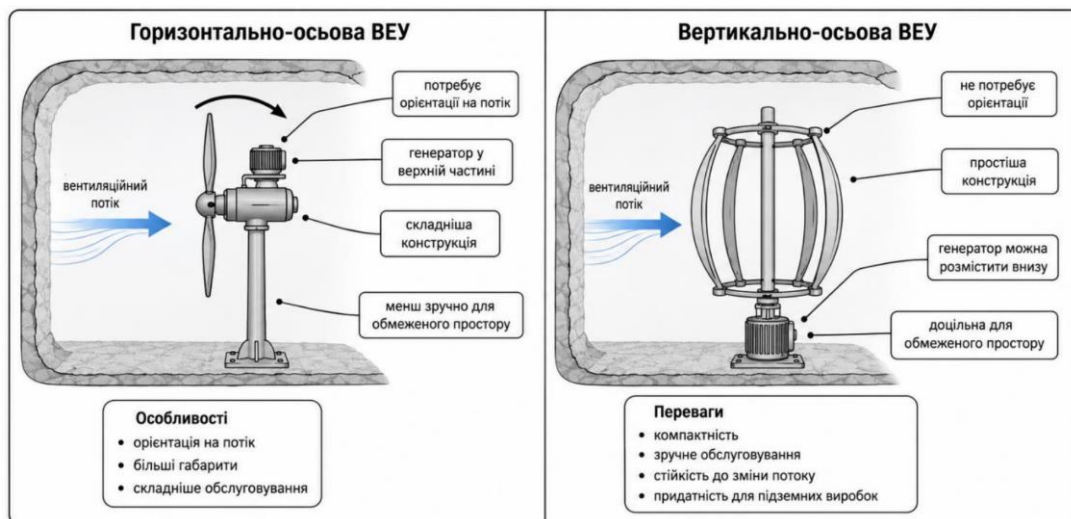


Рисунок 1.4 – Порівняння горизонтально-осьової та вертикально-осьової ВЕУ для умов підземних рудників

Додатковою перевагою вертикально-осьової ВЕУ є зручніше розміщення генератора та перетворювального обладнання, що спрощує огляд, обслуговування і ремонт у підземній виробці.

Горизонтально-осьова ВЕУ у підземній виробці може бути застосована лише за наявності достатнього простору, сталого напрямку потоку та можливості безпечного розміщення ротора [3, 5]. У більшості випадків для умов підземного

рудника такі вимоги є обмежувальними, тому вертикально-осьова ВЕУ є практичнішою.

Таблиця 1.4 – Порівняльна характеристика горизонтально-осьової та вертикально-осьової ВЕУ для підземних умов

Критерій порівняння	Горизонтально-осьова ВЕУ	Вертикально-осьова ВЕУ
Орієнтація на потік	Потребує орієнтування ротора за напрямом повітряного потоку	Не потребує окремої системи орієнтації
Конструктивна складність	Вища через наявність гондоли та механізмів повороту	Нижча, менша кількість складних механічних вузлів
Розміщення та обслуговування генератора	Зазвичай у гондолі, що ускладнює доступ	Генератор може бути розміщений біля основи ротора, що спрощує обслуговування
Придатність до обмеженого простору	Обмежена через габарити ротора та вимоги до орієнтації	Вища завдяки компактнішому компонуванню
Робота за турбулентного потоку	Менш зручна при зміні напрямку потоку	Більш доцільна для нерівномірного вентиляційного потоку

З наведеного порівняння видно, що для підземних умов експлуатації більш обґрунтованим є використання вертикально-осьової ВЕУ. Вона краще відповідає особливостям вентиляційного потоку, не потребує складної системи орієнтації, має простішу механічну структуру та дає змогу розмістити обладнання у зоні, зручній для обслуговування. Крім того, така установка є придатнішою для роботи у виробках з обмеженим простором, де важливо не створювати перешкод для транспорту, персоналу та вентиляційного режиму.

Наступним етапом є розгляд структури вітрозарядної станції та особливостей заряду тягових АКБ.

1.4 Структура вітрозарядної станції та особливості заряду тягових акумуляторних батарей

Після обґрунтування доцільності використання вентиляційних потоків підземних виробок та вибору вертикально-осьової ВЕУ важливо визначити загальну структуру вітрозарядної станції. У межах даної роботи така станція розглядається не як окреме вітроколесо з генератором, а як локальний електротехнічний комплекс, призначений для перетворення частини механічної

					КНУ.РБ.141.26.247с-11.01	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		18

енергії вентиляційного потоку в ЕЕ, її стабілізації, контролю та подальшого використання для заряду тягової АКБ.

Особливістю підземних рудників є наявність споживачів, які працюють у змінних режимах і потребують підвищеної надійності живлення [2]. До таких споживачів належить рудничний акумуляторний електровоз, тягове живлення якого забезпечується АКБ. Заряд такої батареї зазвичай виконується дискретно, відповідно до графіка роботи транспорту, тоді як енергія від ВЕУ може надходити нерівномірно через зміну швидкості вентиляційного потоку. Тому АКБ в складі вітрозарядної станції виконує подвійну роль: є об'єктом заряду і одночасно накопичувачем, що узгоджує режим генерації з режимом споживання.

Узагальнена структура вітрозарядної станції повинна включати механічну, електрогенерувальну, перетворювальну, накопичувальну та захисно-керувальну частини [13]. Механічна частина представлена вертикально-осьовою ВЕУ, яка сприймає вентиляційний потік і перетворює його енергію в обертальний момент на валу. Генератор перетворює механічну енергію в електричну, після чого напруга подається на перетворювальне обладнання. Оскільки параметри напруги генератора можуть змінюватися залежно від швидкості потоку, до складу станції доцільно включати випрямляч, DC/DC-перетворювач або контролер заряду, який забезпечує узгодження параметрів джерела з вимогами АКБ.



Рисунок 1.5 – Структурна схема вітрозарядної станції для заряду тягових АКБ

Згідно зі структурною схемою, основним енергетичним каналом є послідовність [3]: вентиляційний потік – вертикально-осьова ВЕУ – генератор – випрямляч або перетворювач – контролер заряду – тягова АКБ. При цьому контролер заряду не лише передає енергію до батареї, а й виконує функцію керування режимом заряду. До нього надходить інформація від датчиків напруги, струму, температури та стану заряду батареї. За результатами контролю система обмежує струм, стабілізує напругу, дозволяє або блокує заряд, а також відключає батарею у разі аварійного режиму.

Таблиця 1.5 – Основні функціональні елементи вітрозарядної станції

Функціональний елемент	Призначення у складі вітрозарядної станції
Вертикально-осьова ВЕУ	Сприймає вентиляційний потік і перетворює його енергію в механічне обертання
Генератор	Перетворює механічну енергію в ЕЕ змінної або постійної напруги
Випрямляч / перетворювач	Узгоджує електричні параметри генератора з параметрами DC-шини та зарядного кола
Контролер заряду	Формує безпечний режим заряду, обмежує струм, контролює напругу та температуру АКБ
Тягова АКБ	Накопичує ЕЕ для подальшого використання рудничним електровозом
Система захисту і комутації	Забезпечує відключення при короткому замиканні, перегріві, перенапрузі, перезаряді або глибокому розряді
Датчики U, I, T, SOC	Забезпечують контроль напруги, струму, температури та стану заряду батареї

Під час заряду тягової АКБ необхідно враховувати, що вона є відповідальним елементом системи електроживлення рудничного транспорту. Неправильно організований заряд може призвести до зменшення фактичної ємності, перегріву, прискореного старіння, газовиділення, сульфатації пластин або зниження кількості циклів заряд-розряд. Тому заряд повинен виконуватися за контрольованим алгоритмом із дотриманням допустимих меж струму, напруги, температури та глибини розряду [14].

У теоретичному вигляді процес заряду доцільно розглядати не через конкретну модель зарядного пристрою, а через загальні етапи роботи системи керування [3]. На першому етапі контролер перевіряє наявність ЕЕ від генератора та достатній рівень напруги на DC-шині. На другому етапі

					КНУ.РБ.141.26.247с-11.01	Арк.
						20
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

виконується діагностика стану АКБ: контролюються її напруга, температура, залишковий заряд і допустимість приймання зарядного струму. Якщо параметри перебувають у допустимих межах, контролер дозволяє заряд. У разі відхилення параметрів заряд блокується або припиняється.

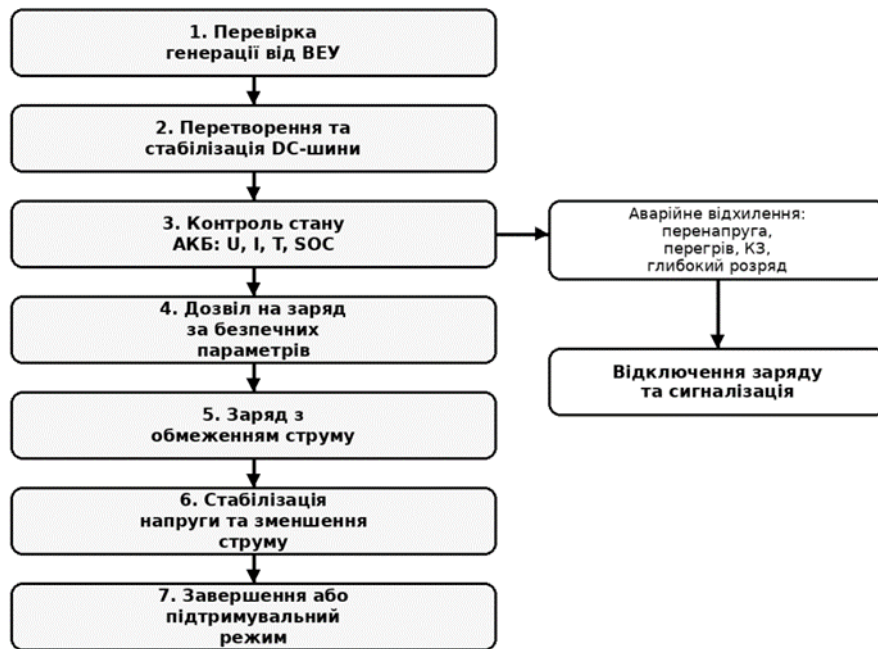


Рисунок 1.6 – Узагальнений алгоритм заряду тягової АКБ

Найбільш поширеним підходом до заряду АКБ є поєднання етапів обмеження зарядного струму та стабілізації напруги [15]. На початковому етапі, коли батарея має нижчий рівень заряду, зарядний пристрій або контролер може працювати в режимі обмеження струму, щоб не допустити надмірного навантаження на батарею і перетворювач. У міру зростання напруги батареї система переходить до режиму стабілізації напруги, а зарядний струм поступово зменшується. Завершення заряду визначається за досягненням заданої напруги, зниженням струму до допустимого рівня або за результатами оцінки стану заряду.

В умовах живлення від ВЕУ особливе значення має нерівномірність генерації. Якщо швидкість вентиляційного потоку знижується, контролер повинен зменшити зарядний струм або тимчасово припинити заряд, не допускаючи нестійкої роботи перетворювача [15]. Якщо ж батарея повністю заряджена, енергія може не подаватися на неї, а зарядна система переходить у

					КНУ.РБ.141.26.247с-11.01	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		21

підтримувальний режим або відключає канал заряду. За наявності допоміжних споживачів частина енергії може бути спрямована на аварійне освітлення, засоби контролю, сигналізації або інші малопотужні навантаження, якщо це передбачено структурою станції.

Захисні функції є обов'язковими для підземних умов експлуатації. Система повинна запобігати перезаряду, глибокому розряду, короткому замиканню, перегріву АКБ та роботі за недопустимих параметрів ізоляції [16]. Крім того, важливо забезпечити можливість ручного та автоматичного відключення зарядного кола, сигналізацію аварійного стану і контроль справності основних елементів. Саме тому вітрозарядна станція повинна розглядатися як система з керуванням і захистом, а не лише як джерело ЕЕ.

Таблиця 1.6 – Узагальнені етапи заряду тягової АКБ

Етап	Основна дія	Контрольований параметр
Підготовчий	Перевірка наявності генерації та стану АКБ	$U_{ген}$, $U_{АКБ}$, $T_{АКБ}$, SOC
Початок заряду	Дозвіл на заряд і обмеження початкового струму	$I_{зар}$, $U_{АКБ}$
Основний заряд	Передавання енергії від ВЕУ до АКБ через контролер	$I_{зар}$, P, $T_{АКБ}$
Дозаряд	Стабілізація напруги та поступове зменшення струму	$U_{АКБ}$, $I_{зар}$
Завершення	Відключення або підтримувальний режим	SOC, $U_{АКБ}$, $I_{зар}$
Аварійний режим	Блокування заряду та сигналізація	КЗ, перегрів, перенапруга, глибокий розряд

Отже, вітрозарядна станція для умов підземного рудника повинна мати комплексну структуру, у якій вертикально-осьова ВЕУ і генератор забезпечують отримання ЕЕ, перетворювальне обладнання узгоджує її параметри, а контролер заряду й система захисту забезпечують безпечне накопичення енергії в тяговій АКБ. Оскільки всі елементи станції працюють у підземних умовах, наступним логічним етапом є розгляд вимог до електротехнічного обладнання, його захисту, безпечного розміщення та експлуатації в умовах підземних рудників.

1.5 Вимоги до електротехнічного обладнання в умовах підземних рудників

Електротехнічне обладнання вітрозарядної станції, що встановлюється у підземних виробках, повинно відповідати не лише розрахунковим електричним параметрам, а й умовам безпечної експлуатації у складному гірничотехнічному середовищі [17]. До основних чинників впливу належать обмежений простір, підвищена вологість і запиленість, механічні навантаження, вібрації, складність доступу для обслуговування та підвищені вимоги до електро- і пожежної безпеки.

Базовою вимогою є забезпечення електробезпеки персоналу [17]. Для цього обладнання повинно мати захисне заземлення, контроль стану ізоляції, автоматичне відключення аварійних режимів і конструктивний захист від випадкового дотику до струмовідних частин.

Кабельні лінії є одним із найбільш відповідальних елементів станції. Кабельні лінії необхідно вибирати з урахуванням робочого струму, допустимої втрати напруги, способу прокладання, механічної міцності оболонки, стійкості до вологи, пилу та можливих ударних навантажень [18]. У підземних умовах особливу увагу слід приділяти кріпленню кабелів, захисту місць вводу в шафи та недопущенню пошкодження ізоляції.

Комутаційна та захисна апаратура повинна забезпечувати надійне відключення при короткому замиканні, перевантаженні, перенапрузі, перегріві, порушенні режиму заряду АКБ та зниженні опору ізоляції [17]. Для кіл постійного струму апарати необхідно обирати з урахуванням відповідної напруги, струму та здатності гасити електричну дугу.

Заземлення є обов'язковим елементом електробезпеки [18]. Усі металеві корпуси генератора, перетворювачів, зарядного пристрою, шаф керування, кабельних муфт і допоміжних конструкцій повинні бути приєднані до захисного провідника РЕ. Захисне заземлення має бути безперервним, доступним для перевірки та захищеним від механічних пошкоджень. Для DC-кіл доцільно

					КНУ.РБ.141.26.247с-11.01	Арк.
						23
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

передбачати контроль ізоляції відносно землі та автоматичне відключення пошкодженої ділянки.

Корпуси шаф, контролерів, датчиків і з'єднувальних коробок повинні мати достатній ступінь захисту від пилу, вологи та механічних впливів, а також забезпечувати нормальне тепловідведення [19]. Окремо необхідно враховувати пожежну безпеку: захист від перевантаження і короткого замикання, контроль температури, якість контактних з'єднань, вентиляцію місця розміщення АКБ та недопущення іскроутворення. Якщо обладнання встановлюється у виробках із можливістю утворення вибухонебезпечного середовища, його виконання має відповідати вимогам рудничної або вибухозахищеної експлуатації [17, 19].

Не менш важливою є експлуатаційна придатність. Обладнання станції повинно бути доступним для огляду, очищення, перевірки кріплень, контролю заземлення, діагностики АКБ і перевірки спрацювання захистів. Розміщення ВЕУ, шаф, кабельних трас і датчиків не повинно заважати руху персоналу й транспорту або погіршувати вентиляційний режим виробки.

Відповідно до рис. 1.7 метою вимог до електрообладнання вітрозарядної станції є: безпека персоналу, надійність роботи та придатність до підземної експлуатації.



Рисунок 1.7 – Узагальнена система вимог до електрообладнання вітрозарядної станції

Таблиця 1.7 – Основні вимоги до елементів вітрозарядної станції в підземних умовах

					КНУ.РБ.141.26.247с-11.01	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		24

Елемент станції	Основні вимоги	Призначення вимог
Кабельні лінії	Вибір за струмом, втратою напруги, умовами прокладання, механічною міцністю оболонки	Недопущення перегріву, пошкодження ізоляції та аварійного відключення станції
Генератор	Захищене виконання, надійне кріплення, виведення тепла, заземлення корпусу	Безпечне перетворення механічної енергії у електричну
Випрямляч і контролер заряду	Захист від перенапруги, перевантаження, перегріву, неправильного режиму заряду	Стабілізація параметрів заряду та захист тягової АКБ
Комутаційні апарати	Розрахунок на відповідний рід струму, номінальну напругу та струм відключення	Надійне розмикання аварійних і робочих кіл
Система заземлення	Безперервність захисного провідника, контроль опору, захист від механічних пошкоджень	Зниження небезпеки ураження електричним струмом
Датчики та контроль	Контроль U, I, T, стану ізоляції, стану заряду АКБ	Раннє виявлення небезпечних режимів роботи

Перед впровадженням обладнання необхідно перевірити електробезпеку, механічну надійність кріплень, відповідність оболонок умовам середовища, пожежну безпеку, справність захисного заземлення, контроль ізоляції та доступність обладнання для обслуговування [17–19].

Отже, електротехнічне обладнання вітрозарядної станції для підземного рудника повинно відповідати вимогам електробезпеки, механічної стійкості, захисту від вологи й пилу, пожежної безпеки, надійного заземлення та придатності до обслуговування. Дотримання цих вимог є необхідною умовою безпечної роботи станції та створює основу для подальшого розрахунку її електротехнічного обладнання.

					КНУ.РБ.141.26.247с-11.01	Арк.
Змн.	Арк.	№ докum.	Підпис	Дата		25

РОЗДІЛ 2. ПРОЄКТУВАННЯ, РОЗРАХУНОК ТА ВИБІР ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ ВІТРОЗАРЯДНОЇ СТАНЦІЇ

2.1 Вихідні дані для проєктування вітрозарядної станції з урахуванням режимів роботи рудничного електровоза

Проєктування вітрозарядної станції для умов підземного рудника доцільно починати з формування узгодженого набору вихідних даних. На відміну від загальної оцінки можливості використання вентиляційного потоку, проєктний розрахунок повинен одночасно враховувати параметри джерела енергії, умови підземної експлуатації та особливості споживача, для якого призначена станція. У даній роботі таким споживачем є тягова АКБ рудничного електровоза, тому вихідні дані мають відображати не лише швидкість вентиляційного потоку та геометрію ВЕУ, а й режим роботи електровозного транспорту.

Рудничний електровоз працює у специфічних умовах, які суттєво відрізняються від умов експлуатації наземного електротранспорту [20]. Його робота пов'язана з обмеженим простором виробок, змінною масою складу, частими пусками і зупинками, маневровими операціями біля пунктів навантаження та розвантаження, ділянками з різним станом рейкового шляху і можливим погіршенням умов зчеплення коліс з рейками. Саме ці чинники формують режимне поле роботи тягового електроприводу і визначають навантаження на тягову АКБ.

Основним технологічним параметром шахтного електровозного транспорту є пропускна здатність, тобто здатність транспортної системи приймати і перевозити заданий обсяг корисної копалини за одиницю часу [20]. У загальному вигляді технологічна вимога до транспортної системи може бути подана умовою:

$$Q_p \geq Q_{п},$$

					КНУ.РБ.141.26.247с-11.02			
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>	Розділ 2	<i>Літ.</i>	<i>Арк.</i>	<i>Акрушів</i>
Розробив		Совенко В.В.					26	36
Перевірів		Ільченко О.В.						
Н. Контр.		Ільченко О.В.						
Затвердж.		Пересунько І.І.						
						КНУ гр. ЕЕМ-22-1		

де Q_p – розрахункова пропускна здатність електровозного транспорту з урахуванням умов експлуатації; $Q_{п}$ – заданий або розрахунковий вантажопотік.

Виконання цієї умови залежить від типу електровоза, кількості вагонеток у складі, продуктивності навантажувально-розвантажувальних операцій, часу простоїв та надійності тягового живлення [21].

Для залізорудних шахт характерне транспортування руди значної об'ємної маси. Електровозосклади формуються з одного рудничного електровоза та групи вагонеток, або зі спарених електровозів і збільшеної кількості вагонеток [20]. Такий режим роботи потребує достатнього запасу енергії у тяговій батареї та стабільного відновлення її заряду після транспортних циклів. Тому вітрозарядна станція розглядається не як основне тягове джерело електровоза, а як локальний зарядний комплекс, який може частково компенсувати витрати енергії тягової АКБ і зменшити навантаження на стаціонарні зарядні пункти.

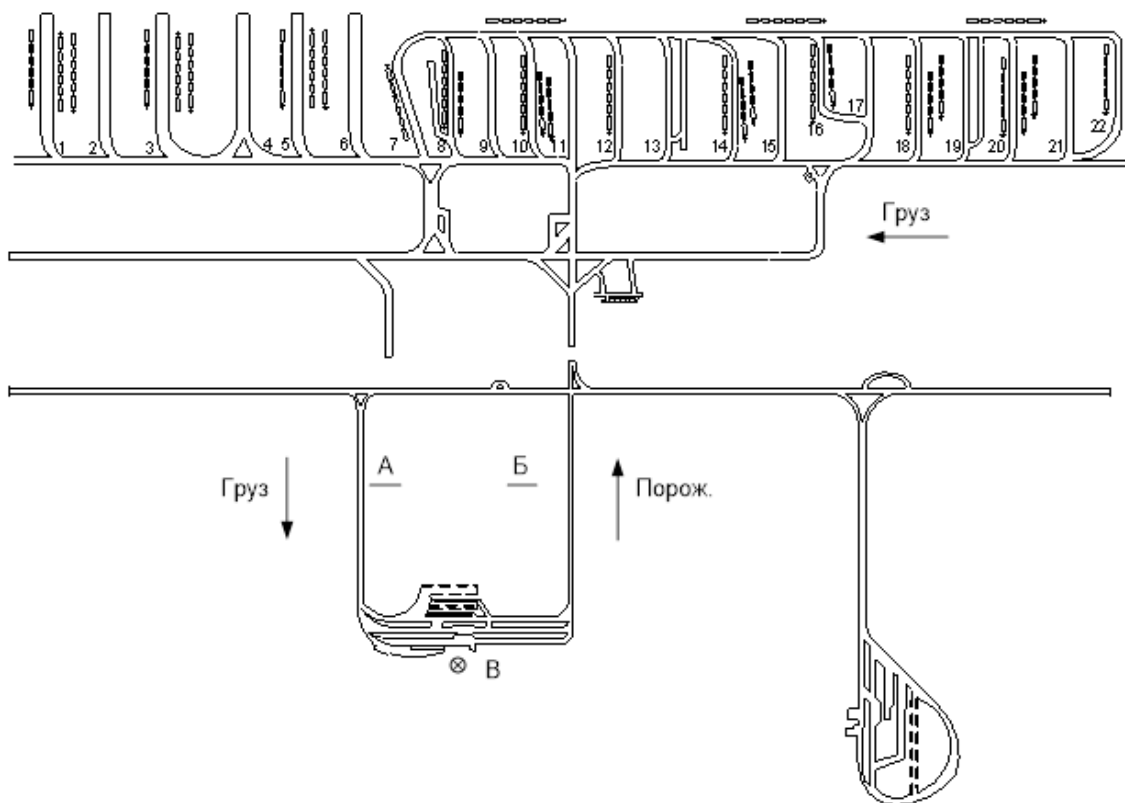


Рисунок 2.1 – Узагальнена схема функціонування рудничного електровозного транспорту: 1-22 – завантажувальні виробки; А, Б – квершлаг; В – розвантажувальні пункти

Загальна тривалість рейсу електровоза є важливим показником для вибору типу тягового електропривода та визначення його основних параметрів [20–21]. Вона залежить від довжини відкатки, середньої швидкості руху електровозного складу, а також часу, необхідного для виконання навантажувально-розвантажувальних операцій. У загальному вигляді тривалість одного рейсу електровозного складу може бути подана відповідною розрахунковою залежністю.

Час завантаження складу та виконання маневрових операцій у межах одного рейсу зазвичай становить 10–30 хв [20–21]. За наявності зависання руди в дучках або рудоспусках тривалість завантаження може збільшуватися.

Розподіл часу циклу руху складів по відкатних горизонтах рудних шахт, а також швидкості руху, визначені як середньозважені значення з урахуванням допустимих швидкостей на окремих ділянках і довжини цих ділянок, наведено в табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – Розподіл тривалості циклу роботи рудничного електровоза

Характеристика стану	Час, хв	% циклу одного рейсу
Порожній по відкатному штреку	15-25 хв	25 %
З вантажем по відкатному штреку	13-15 хв	15 %
Завантаження	10-30 хв	30 %
Розвантаження	5 хв	5 %
Очікування (простій)	10-30 хв	30 %

Під час формування вихідних даних доцільно розділити параметри на дві групи: параметри джерела енергії та параметри споживача. До першої групи належать швидкість вентиляційного потоку, густина рудничного повітря, геометричні розміри ротора та коефіцієнт використання енергії повітряного потоку. До другої групи належать номінальна напруга тягової батареї, необхідна енергія для одного або кількох транспортних циклів, допустимий струм заряду, режим заряду, температурні умови та вимоги до безпеки.

Місцем встановлення ВЕУ приймається ділянка стійкого вентиляційного потоку у підземній виробці [12]. З урахуванням попереднього обґрунтування, перспективною є зона спряження квершлагів, де можливі достатній простір для

розміщення обладнання та локальне підвищення швидкості повітряного потоку. Для подальших розрахунків швидкість вентиляційного потоку приймається в межах $V = 5...15$ м/с, а для робочої оцінки на перспективній ділянці встановлення може використовуватися діапазон $V_p = 8...15$ м/с.

Густина рудничного повітря не є сталою величиною і залежить від глибини виробки, температури, тиску та вологості [9]. Для розрахунків приймається діапазон $\rho = 1,078...1,265$ кг/м³. Цей діапазон дозволяє врахувати зміну властивостей повітряного середовища у підземних умовах та надалі оцінити вплив густини на можливу потужність ВЕУ.

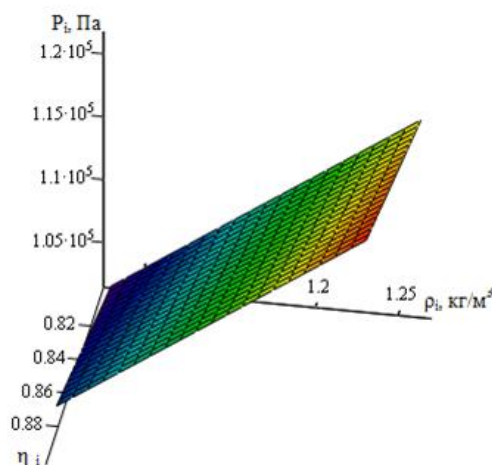


Рисунок 2.2 – Залежність густини рудничного повітря від тиску та вологості

Тип ВЕУ для подальшого проектування приймається відповідно до висновків першого розділу: вертикально-осьова ВЕУ. Такий тип установки краще відповідає підземним умовам, оскільки не потребує постійної орієнтації на потік, може бути компактно розміщений у виробці, а генератор і частину електротехнічного обладнання можна встановити у нижній частині конструкції або поблизу фундаменту [10]. Геометричні параметри ротора приймаються за наявним проєктним рішенням ВЕУ RX-HV4K, 4 кВт: радіус $R = 0,7$ м, висота ротора $H = 2$ м. Коефіцієнт використання енергії потоку для вертикально-осьової ВЕУ приймається на рівні $C_p = 0,20$, що відповідає попередній оцінці для ортогональних ВЕУ.

					КНУ.РБ.141.26.247с-11.02	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		29

Важливо підкреслити, що у даному підрозділі ці значення задаються саме як вихідні дані. Розрахунок ометаної площі ротора, теоретичної потужності потоку, корисної потужності ВЕУ та оцінка її достатності для заряду тягової АКБ виконуються у підрозділі 2.2.

Таблиця 2.2 – Вихідні дані для розрахунку енергетичних параметрів вітрозарядної станції

Група параметрів	Позначення / параметр	Прийняте значення	Використання у розрахунках
Вентиляційний потік	Швидкість потоку V	5...15 м/с	Розрахунок потужності повітряного потоку
Робоча зона встановлення	Швидкість у спряженні квершлагів V_p	8...15 м/с	Оцінка перспективної ділянки монтажу
Рудничне повітря	Густина ρ	1,078...1,265 кг/м ³	Визначення енергетичного потенціалу потоку
ВЕУ	Тип ВЕУ	вертикально-осьова	Вибір конструкції для підземних умов
Геометрія ротора	Радіус R	0,7 м	Розрахунок ометаної площі
Геометрія ротора	Висота H	2,0 м	Розрахунок ометаної площі
Аеродинамічна оцінка	Коефіцієнт C_p	0,20	Оцінка корисної потужності ВЕУ
Попередній електричний рівень	Напруга змінного кола	380 В	Подальший вибір генератора, комутації та кабелів
Споживач	Тягова АКБ електровоза	$U_{ном} = 80$ В	Формування вимог до заряду та вибору батареї
Умови експлуатації	Середовище	підземна виробка, пил, волога, вібрації	Вибір виконання обладнання і захистів

Вихідні дані, наведені в табл. 2.2, поєднують параметри, які були обґрунтовані у теоретичному розділі, та параметри, необхідні для виконання подальших розрахунків.

Як попередній електричний рівень для вибору генератора, комутаційної апаратури та кабельних ліній приймається напруга змінного кола 380 В; остаточне узгодження електричних параметрів виконується після вибору генератора та перетворювального обладнання.

					КНУ.РБ.141.26.247с-11.02	Арк.
						30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Для формування вимог до тягової АКБ необхідно врахувати режим роботи рудничного електровоза. Електровоз має два тягові електродвигуни потужністю 50 кВт кожний, а за зміну виконує 10 транспортних циклів [20–21]. У межах кожного циклу передбачаються маневрові операції під час навантаження та розвантаження руди: 5 перестановок тривалістю 3 с при навантаженні та 5 аналогічних перестановок при розвантаженні. За таких умов активний час маневрового навантаження в одному циклі становить 30 с, а за 10 циклів – 300 с.

При цьому наведені значення характеризують саме активний час маневрових операцій і не враховують повну тривалість рейсу, яка включає рух порожнього та навантаженого складу, завантаження, розвантаження й очікування.

Ці значення є важливими для визначення мінімальної ємності, необхідної енергії та перевірки доцільності використання вітрозарядної станції. Остаточний розрахунок та вибір тягової АКБ виконується у підрозділі 2.5, де враховані номінальна напруга батареї, допустима глибина розряду, запас ємності, габарити батарейного ящика та умови експлуатації.

Таблиця 2.3 – Вихідні режимні дані тягового споживача

Параметр	Прийняте значення	Значення для проєктування
Тип споживача	тягова АКБ рудничного електровоза	визначає режим накопичення та заряду енергії
Кількість тягових електродвигунів	2	визначає сумарне навантаження електровоза
Потужність одного тягового двигуна	50 кВт	використовується для оцінки енерговитрат
Кількість циклів за зміну	10	визначає повторюваність навантаження АКБ
Кількість перестановок при навантаженні	5	формує активний час роботи у циклі
Кількість перестановок при розвантаженні	5	формує активний час роботи у циклі
Тривалість однієї перестановки	3 с	використовується для розрахунку енерговитрат
Активний час одного циклу	30 с	основа для визначення енергії одного циклу
Активний час за зміну	300 с	основа для попереднього вибору ємності АКБ

Заряд тягової АКБ має виконуватися у контрольованому режимі [15–16]. Для подальшого проєктування необхідно передбачити вимірювання напруги, струму, температури батареї та стану заряду. У випадку застосування конкретного зарядного пристрою його зарядна характеристика, допустимий початковий струм, тривалість повного заряду та кількість батарей, які можуть одночасно заряджатися, повинні аналізуватися окремо.

Отже, у підрозділі сформовано вихідні умови для проєктування вітрозарядної станції: визначено параметри вентиляційного потоку, прийнято геометричні дані вертикально-осьової ВЕУ, охарактеризовано режим роботи рудничного електровоза та задано основні вимоги до тягової АКБ як споживача енергії. Ці дані є основою для розрахунку енергетичних параметрів ВЕУ, що виконується у наступному підрозділі

2.2 Розрахунок енергетичних параметрів вітроустановки

Метою розрахунку енергетичних параметрів є визначення розрахункової потужності ВЕУ, оцінка енергетичного потенціалу вентиляційного потоку підземної виробки та перевірка доцільності використання прийнятої ВЕУ для підзаряду тягової АКБ рудничного електровоза. На відміну від теоретичного аналізу, у цьому підрозділі розрахунок виконується з урахуванням конкретного технічного аналога вертикально-осьової ВЕУ, прийнятої для подальшого проєктування.

За основу приймається вертикально-осьовий вітрогенератор Н-типу RX-NV4K номінальною потужністю 4 кВт. Доцільність використання саме цього типу пояснюється його відносно малими габаритами, вертикальною віссю обертання, можливістю роботи за змінного напрямку потоку та зручністю розміщення генераторного вузла у нижній частині конструкції. Для умов підземних виробок важливо, що діаметр ротора становить 1,4 м, а висота вітроколеса – 2,0 м, тобто установка може бути розглянута як компактне локальне джерело енергії для обмеженого простору виробки.

					КНУ.РБ.141.26.247с-11.02	Арк.
						32
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 2.4 – Основні технічні параметри прийнятого вітрогенератора RX-HV4K

Параметр	Прийняте значення	Значення для подальших розрахунків
Тип ВЕУ	вертикально-осьова, Н-тип	придатність для обмеженого простору виробки
Номінальна потужність	4 кВт	приймається як встановлена потужність ВЕУ
Діаметр ротора	1,4 м	визначення розрахункової площі взаємодії з потоком
Висота вітроколеса	2,0 м	визначення розрахункової площі взаємодії з потоком
Кількість лопатей	3	характеристика ротора Н-типу
Номінальна швидкість потоку	10 м/с	орієнтир для оцінки паспортної потужності
Початкова швидкість обертання	1,5 м/с	можливість запуску за малих швидкостей потоку
Швидкість включення	2,5 м/с	умова переходу до генераторного режиму
Тип генератора	безсердечниковий генератор	подальший вибір випрямляча та контролера заряду
Номінальна напруга	48, 96, 120 або 220 В	потребує узгодження з напругою тягової АКБ

Паспортна номінальна потужність вітрогенератора використовується у роботі як проєктна встановлена потужність. Водночас фактична потужність у конкретній підземній виробці залежатиме від швидкості вентиляційного потоку, густини рудничного повітря, розташування ротора у перерізі виробки, аеродинамічних втрат, ККД генератора та режиму роботи перетворювача. Тому у розрахунку доцільно розділяти фізичну оцінку енергетичного потенціалу повітряного потоку і подальшу оцінку генерації за встановленою потужністю прийнятої ВЕУ.

Розрахункова площа взаємодії вертикально-осьового ротора з вентиляційним потоком визначається як добуток діаметра ротора на висоту вітроколеса [10]:

$$S = D \cdot H, \text{ м}^2 \quad (2.2)$$

де S – розрахункова площа взаємодії ротора з потоком, м^2 ; D – діаметр ротора, м; H – висота вітроколеса, м.

Для прийнятого вітрогенератора RX-HV4K:

$$S = 1,4 \cdot 2,0 = 2,8 \text{ м}^2.$$

					КНУ.РБ.141.26.247с-11.02	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		33

Теоретична потужність вентиляційного потоку, що проходить через площу S , визначається за залежністю [10]:

$$P_0 = \frac{\rho \cdot S \cdot V^3}{2}, \text{ Вт} \quad (2.3)$$

де P_0 – теоретична потужність повітряного потоку, Вт; ρ – густина рудничного повітря, кг/м³; V – швидкість вентиляційного потоку, м/с. Для попередньої оцінки приймається середнє значення густини $\rho=1,20$ кг/м³, що знаходиться у межах прийнятого в підрозділі 2.1 діапазону 1,078...1,265 кг/м³.

Таблиця 2.5 – Теоретична потужність вентиляційного потоку для ротора RX-HV4K

Швидкість потоку V , м/с	Теоретична потужність P_0 при $\rho = 1,20$ кг/м ³ , кВт	Характеристика режиму
5	0,21	малопотужний режим
8	0,86	робочий режим підзаряду
10	1,68	номінальний паспортний орієнтир
12	2,90	підвищений енергетичний потенціал
15	5,67	підвищений енергетичний потенціал

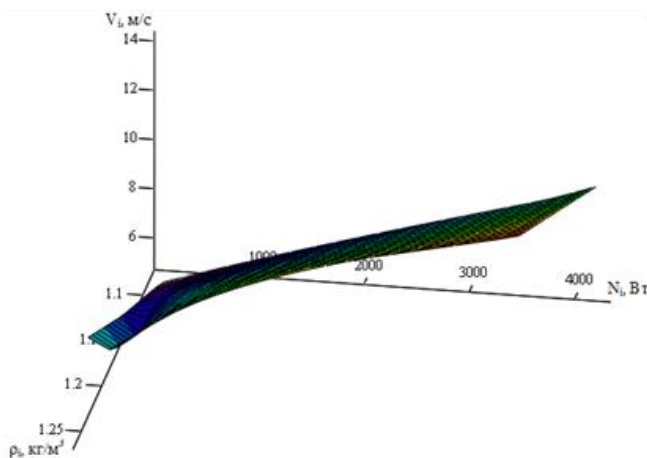


Рисунок 2.3 – Залежність можливої потужності від швидкості потоку та густини повітря

Наведені значення характеризують лише енергетичний потенціал потоку в межах геометричної площі ротора. Паспортна потужність серійної ВЕУ формується за результатами випробувань конкретної конструкції, її аеродинамічного профілю, генератора та системи керування. Тому в подальших проєктних розрахунках встановлена потужність приймається за паспортним

					КНУ.РБ.141.26.247с-11.02	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		34

значенням $P_{\text{ном}}=4$ кВт, а розрахунок енергетичного потенціалу використовується для обґрунтування впливу швидкості вентиляційного потоку на режим роботи установки.

Для оцінки реальної генерації протягом зміни або доби необхідно враховувати, що ВЕУ не працює постійно на номінальній потужності. Її середня потужність залежить від швидкості потоку, режиму зарядного пристрою, обмежень контролера, технічних простоїв і можливих коливань вентиляційного режиму. Тому середню електричну потужність доцільно визначати через коефіцієнт використання встановленої потужності [10–11]:

$$P_{\text{сер}} = k_{\text{вик}} \cdot P_{\text{ном}}, \text{ кВт} \quad (2.4)$$

де $P_{\text{сер}}$ – середня електрична потужність ВЕУ за розрахунковий період, кВт; $k_{\text{вик}}$ – коефіцієнт використання встановленої потужності; $P_{\text{ном}}$ – номінальна потужність ВЕУ, кВт. Для подальших розрахунків як базовий варіант приймається $k_{\text{вик}} = 0,6$.

$$P_{\text{сер}} = 0,6 \cdot 4,0 = 2,4 \text{ кВт.}$$

Енергія, яку може виробити ВЕУ за певний проміжок часу, визначається за формулою [10]:

$$W = P_{\text{сер}} \cdot t, \text{ кВт} \cdot \text{год} \quad (2.5)$$

де W – вироблена ЕЕ, кВт·год; t – тривалість роботи, год. Для оцінки приймається тривалість однієї зміни 8 год та добовий інтервал 24 год.

$$W_{\text{зм}} = 2,4 \cdot 8 = 19,2 \text{ кВт} \cdot \text{год};$$

$$W_{\text{доб}} = 2,4 \cdot 24 = 57,6 \text{ кВт} \cdot \text{год.}$$

Таблиця 2.6 – Оцінка змінної та добової генерації ВЕУ RX-HV4K

Коефіцієнт використання $k_{\text{вик}}$	Середня потужність $P_{\text{сер}}$, кВт	Генерація за зміну, кВт·год	Генерація за добу, кВт·год
0,5	2	16	48
0,6	2,4	19,2	57,6
0,7	2,8	22,4	67,2
0,8	3,2	25,6	76,8

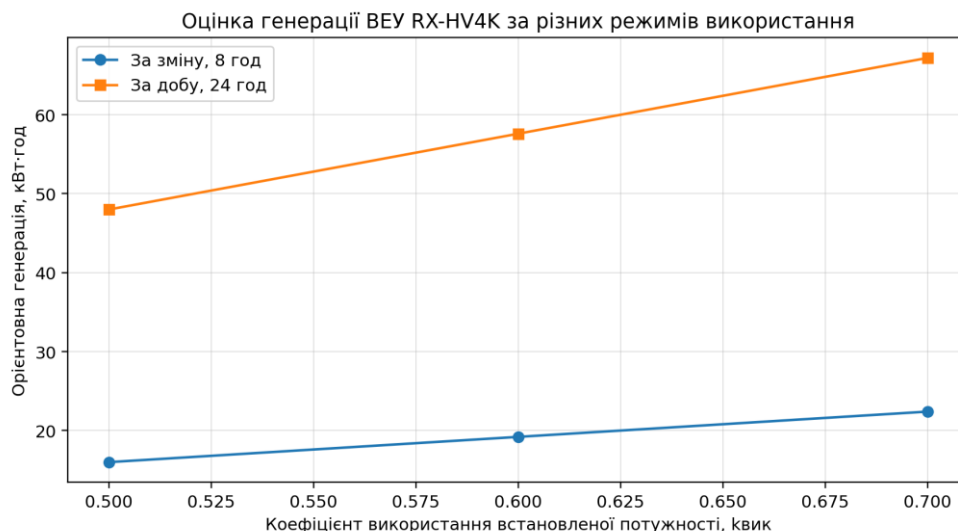


Рисунок 2.4 – Орієнтовна змінна та добова генерація ВЕУ RX-HV4K за різних коефіцієнтів використання встановленої потужності

Отримана оцінка показує, що за прийнятого базового коефіцієнта використання $k_{\text{вик}}=0,6$ вертикально-осьова ВЕУ RX-HV4K може забезпечити орієнтовно 19,2 кВт·год ЕЕ за одну 8-годинну зміну та 57,6 кВт·год за добу. Ці значення не слід розглядати як гарантовані для будь-яких умов, оскільки фактична генерація потребує уточнення за результатами вимірювання швидкості вентиляційного потоку у конкретній виробці. Проте вони дають підставу розглядати установку як реальне допоміжне джерело енергії для підзаряду тягових АКБ.

Для попередньої перевірки достатності отриманої енергії порівнюємо її з енерговитратами активних маневрових операцій рудничного електровоза, прийнятими у підрозділі 2.1. Електровоз має два тягові електродвигуни потужністю 50 кВт кожний, а сумарний активний час маневрового навантаження за зміну становить 300 с. Тоді енергія, необхідна для активних маневрових операцій, може бути оцінена за формулою:

$$W_{\text{ман}} = P_{\Sigma} \cdot t_{\text{акт}}, \text{ кВт}\cdot\text{год} \quad (2.6)$$

$$W_{\text{ман}} = 100 \cdot (300/3600) = 8,33 \text{ кВт}\cdot\text{год}.$$

З урахуванням втрат у тяговому електроприводі та АКБ при орієнтовному ККД $\eta=0,85$ необхідна енергія може становити близько 9,8 кВт·год. Отже,

очікувана генерація ВЕУ RX-HV4K за одну зміну у базовому режимі $k_{\text{вик}}=0,6$ перевищує енергетичну потребу активних маневрових операцій. Водночас повний транспортний цикл електровоза включає також рух порожнього та навантаженого складу, очікування, завантаження і розвантаження, тому отриманий результат слід трактувати як попередню оцінку можливості компенсації частини енерговитрат, а не як доказ повного автономного забезпечення тягового електровоза.

Таким чином, прийняття вертикально-осьового вітрогенератора RX-HV4K номінальною потужністю 4 кВт є більш доцільним для подальших розрахунків, ніж використання заниженої розрахункової потужності, отриманої лише за спрощеною площею ротора. За рахунок компактних габаритів, діаметра ротора 1,4 м і висоти вітроколеса 2,0 м така установка відповідає умовам обмеженого простору підземної виробки, а її встановлена потужність дозволяє розглядати вітрозарядну станцію як допоміжне джерело підзаряду тягової АКБ. Подальше проектування потребує розроблення структурної та електричної схеми станції, вибору генераторного, випрямного та зарядного обладнання, а також узгодження вихідної напруги ВЕУ з номінальною напругою тягової АКБ, що розглядається у наступних підрозділах.

2.3 Розробка структурної та електричної схеми вітрозарядної станції

Після визначення вихідних даних та оцінки енергетичних параметрів ВЕУ необхідно сформувавши структурну і функціональну електричну схему вітрозарядної станції. Схема має забезпечувати перетворення механічної енергії вентиляційного потоку у ЕЕ, її стабілізацію, накопичення у тяговій АКБ та, за необхідності, передавання частини згенерованої енергії до шахтної освітлювальної мережі.

Електрична частина станції розглядається як система, що включає генератор ВЕУ, випрямляч, вітровий контролер, DC-шину, зарядний DC/DC-пристрій для тягової АКБ, перетворювач для живлення шахтної освітлювальної мережі, систему захисту, комутації, контролю та моніторингу.

					КНУ.РБ.141.26.247с-11.02	Арк.
						37
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Структурна схема вітрозарядної станції наведена на рис. 2.5.

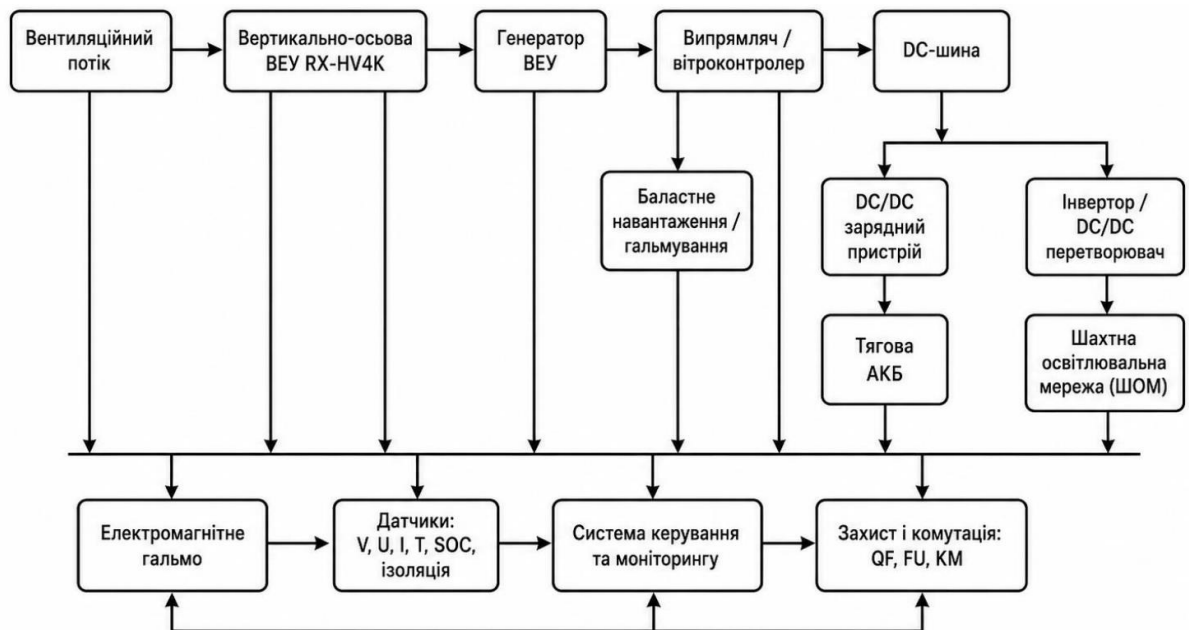


Рисунок 2.5 – Структурна схема вітрозарядної станції для заряду тягової АКБ та живлення ШОМ

У структурній схемі основний енергетичний потік проходить через такі функціональні блоки: вентиляційний потік → вертикально-осьова ВЕУ RX-HV4K → генератор ВЕУ → випрямляч / вітроконтролер → DC-шина.

Вентиляційний потік підземної виробки є первинним джерелом механічної енергії. Вертикально-осьова ВЕУ перетворює кінетичну енергію потоку в механічну енергію обертання ротора [10]. Генератор ВЕУ перетворює цю механічну енергію у змінну електричну напругу, параметри якої залежать від швидкості обертання ротора та швидкості вентиляційного потоку.

Випрямляч і вітроконтролер виконують функції перетворення змінної напруги генератора у постійну, обмеження перенапруги, стабілізації роботи системи та керування режимами відбору потужності. Після випрямлення ЕЕ надходить на DC-шину, яка є центральною ланкою розподілу ЕЕ вітрозарядної станції.

Від DC-шини передбачено дві основні вихідні гілки. Перша гілка призначена для заряду тягової АКБ. Вона включає DC/DC зарядний пристрій, який узгоджує напругу DC-шини з напругою тягової АКБ, обмежує зарядний

					КНУ.РБ.141.26.247с-11.02	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		38

струм і забезпечує контрольований режим заряду батареї. Тягову АКБ не можна підключати безпосередньо до DC-шини, оскільки це може призвести до неконтрольованого зарядного струму, перенапруги або пошкодження батареї. Тому зарядний пристрій є обов'язковою проміжною ланкою між DC-шиною і АКБ.

Друга гілка призначена для живлення шахтної освітлювальної мережі. У цьому випадку енергія з DC-шини надходить до інвертора або DC/DC-перетворювача, який формує напругу необхідного рівня для ШОМ. Такий підхід дозволяє використовувати вітрозарядну станцію не лише для підзаряду тягової АКБ, а й для живлення малопотужних допоміжних споживачів, зокрема освітлення, сигналізації або окремих елементів моніторингу.

Окремо у структурній схемі передбачено баластне навантаження або режим електричного гальмування. Цей блок підключається через вітроконтролер і використовується у випадках, коли АКБ повністю заряджена, навантаження ШОМ відсутнє або виникає надлишок енергії при підвищеній швидкості вентиляційного потоку. Підключення баластного навантаження дає змогу обмежити напругу DC-шини та запобігти аварійному режиму роботи генератора і перетворювального обладнання.

Нижня частина структурної схеми містить систему керування та моніторингу, блок датчиків, електромагнітне гальмо, а також блок захисту і комутації. Блок датчиків забезпечує вимірювання швидкості вентиляційного потоку, напруги, струму, температури, стану заряду АКБ та опору ізоляції. Система керування на основі цих даних формує команди на підключення або відключення зарядного пристрою, перетворювача ШОМ, баластного навантаження, електромагнітного гальма та комутаційної апаратури.

Функціональна схема вітрозарядної станції наведена на рис. 2.6.

					КНУ.РБ.141.26.247с-11.02	Арк.
						39
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

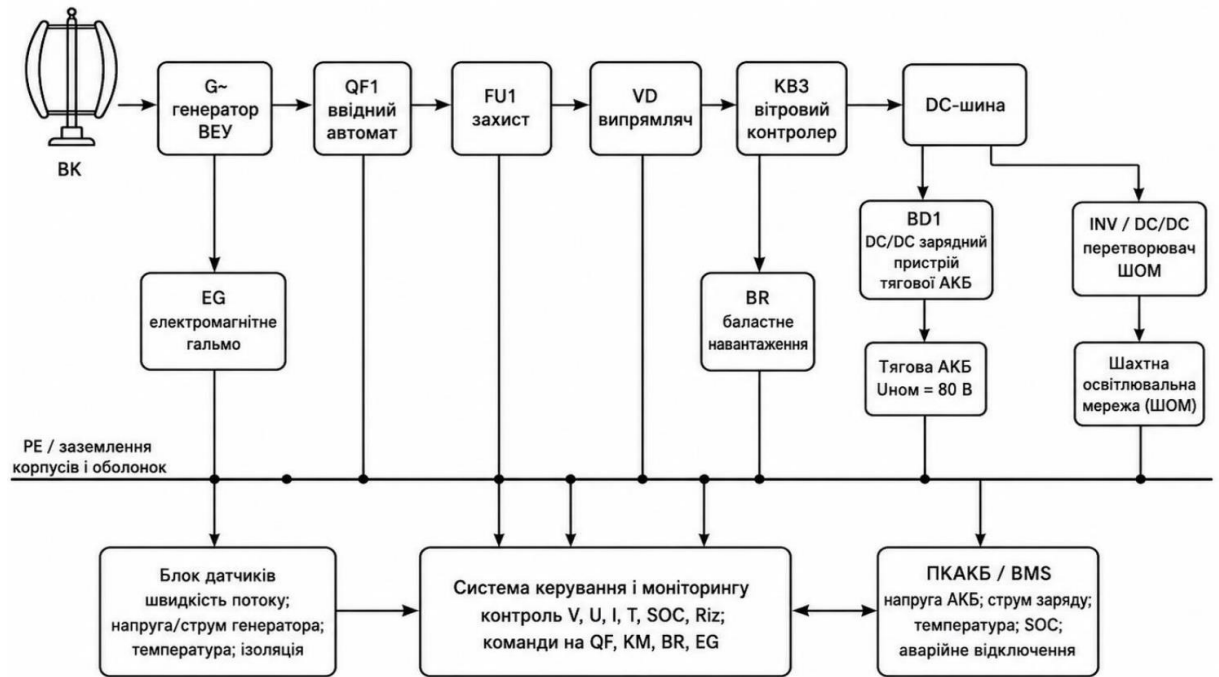


Рисунок 2.6 – Функціональна схема вітрозарядної станції із можливістю заряджання тягової АКБ та живлення ШОМ

Функціональна схема деталізує склад силової частини, засобів захисту, комутації, контролю та заземлення. Основна силова частина включає вітроколесо BK, генератор ВЕУ G~, ввідний автомат QF1, захист FU1, випрямляч VD, вітровий контролер KB3 та DC-шину.

Генератор ВЕУ підключається до електричної частини через ввідний автомат QF1. Автоматичний вимикач забезпечує можливість оперативного відключення генератора від подальших елементів схеми у разі аварії, ремонту або технічного обслуговування. Захист FU1 виконує функцію захисту від коротких замикань та перевантажень. Випрямляч VD перетворює змінну напругу генератора у постійну, після чого енергія надходить на вітровий контролер KB3.

Вітровий контролер KB3 виконує кілька важливих функцій: контролює параметри вихідної напруги генератора, обмежує перенапругу, керує передаванням енергії на DC-шину та підключає баластне навантаження BR у випадку надлишкової генерації. Баластне навантаження необхідне для

					КНУ.РБ.141.26.247с-11.02	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		40

безпечного розсіювання надлишкової енергії, коли основні споживачі не можуть її прийняти.

Від DC-шини живляться дві незалежні гілки. Перша гілка містить блок BD1 – DC/DC зарядний пристрій тягової АКБ. Його призначенням є узгодження рівня напруги DC-шини з номінальною напругою тягової АКБ $U_{ном}=80$ В, а також обмеження зарядного струму, контроль напруги та забезпечення безпечного режиму заряду. Саме цей блок у схемі виконує функцію зарядного пристрою.

Друга гілка від DC-шини містить інвертор або DC/DC-перетворювач для живлення ШОМ. Цей перетворювач формує необхідні параметри напруги для шахтної освітлювальної мережі. Важливо, що ШОМ живиться не через зарядний пристрій тягової АКБ, а окремою гілкою від DC-шини. Це дозволяє незалежно керувати режимами заряду батареї і живлення освітлювальної мережі.

У схемі також передбачено електромагнітне гальмо EG. Воно використовується для аварійної або технологічної зупинки ротора ВЕУ. Команда на гальмування може подаватися системою керування у разі перевищення допустимої швидкості обертання, підвищення напруги DC-шини, несправності контролера, пошкодження ізоляції або необхідності виконання технічного обслуговування.

Система керування і моніторингу отримує сигнали від блоку датчиків та від пристрою контролю АКБ / BMS. До контрольованих параметрів належать швидкість вентиляційного потоку, напруга і струм генератора, температура обладнання, напруга АКБ, зарядний струм, стан заряду SOC та опір ізоляції R_{iz} . На основі цих даних система керування формує команди на QF, KM, BR, EG та інші комутаційні елементи.

Окремим елементом функціональної схеми є шина захисного заземлення PE. До неї приєднуються корпуси та оболонки генератора, перетворювального обладнання, зарядного пристрою, інвертора, акумуляторної частини, апаратури захисту і керування. Наявність захисного заземлення є обов'язковою умовою безпечної експлуатації електротехнічного обладнання у підземних виробках,

					КНУ.РБ.141.26.247с-11.02	Арк.
						41
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

оскільки дозволяє знизити ризик ураження персоналу електричним струмом і забезпечити коректну роботу захисного відключення.

Основні функціональні елементи електричної схеми наведено в табл. 2.7.

Таблиця 2.7 – Основні функціональні елементи електричної схеми

Елемент схеми	Позначення	Основне призначення
Вітроколесо	ВК	Перетворення енергії вентиляційного потоку в механічну енергію обертання
Генератор ВЕУ	(G\sim)	Перетворення механічної енергії в електричну змінну напругу
Ввідний автомат	QF1	Оперативне та аварійне відключення генераторного кола
Захист	FU1	Захист від коротких замикань і перевантажень
Випрямляч	VD	Перетворення змінної напруги генератора у постійну
Вітровий контролер	КВЗ	Контроль напруги, керування DC-шиною та баластним навантаженням
DC-шина	—	Розподіл постійної напруги між зарядом АКБ і живленням ШОМ
Зарядний пристрій тягової АКБ	BD1	Узгодження напруги DC-шини з АКБ та регулювання зарядного струму
Тягова АКБ	—	Накопичення ЕЕ для рудничного електровоза
Перетворювач ШОМ	INV/DC/DC	Формування параметрів напруги для шахтної освітлювальної мережі
Шахтна освітлювальна мережа	ШОМ	Допоміжний споживач ЕЕ
Баластне навантаження	BR	Поглинання надлишкової енергії та захист від перенапруги
Електромагнітне гальмо	EG	Зупинка ротора ВЕУ в аварійному або сервісному режимі
BMS / пристрій контролю АКБ	ПКАКБ / BMS	Контроль напруги, струму, температури та стану заряду АКБ
Система керування	—	Моніторинг параметрів і формування команд керування
Шина заземлення	PE	Захисне заземлення корпусів і оболонок обладнання

Таблиця 2.8 – Основні режими роботи схеми вітрозарядної станції

Режим роботи	Стан основних елементів	Призначення режиму
Пуск системи	Система керування перевіряє сигнали датчиків, стан ізоляції, напругу АКБ, готовність QF1, FU1, VD, КВЗ	Підготовка станції до роботи та недопущення запуску при аварійних умовах
Нормальна генерація	ВК обертається, генератор виробляє змінну напругу, VD і КВЗ формують напругу DC-шини	Перетворення енергії вентиляційного потоку в ЕЕ
Заряд тягової АКБ	DC-шина живить BD1, зарядний пристрій регулює струм і напругу заряду тягової АКБ	Контрольований заряд тягової АКБ

Живлення ШОМ	DC-шина живить INV/DC/DC, який формує напругу для шахтної освітлювальної мережі	Передавання частини згенерованої енергії до ШОМ
Повний заряд АКБ	BMS або ПКАКБ подає сигнал про досягнення допустимого рівня заряду, VD1 обмежує або припиняє заряд	Захист АКБ від перезаряду
Надлишкова генерація	КВЗ підключає BR або формує команду на гальмування	Обмеження напруги DC-шини і захист генератора та перетворювачів
Недостатня швидкість потоку	Генерація зменшується або припиняється, заряд АКБ і живлення ШОМ обмежуються	Недопущення нестійкого режиму роботи
Аварійний режим	Система керування відключає силові кола через QF/КМ, активує EG або BR	Захист обладнання і персоналу

Розроблена структурна та функціональна електрична схема забезпечує два основні режими використання енергії ВЕУ: заряд тягової АКБ та живлення шахтної освітлювальної мережі. Центральним елементом схеми є DC-шина, від якої живляться незалежні гілки заряду АКБ і ШОМ. Це дозволяє гнучко розподіляти згенеровану енергію залежно від поточного стану АКБ, наявності навантаження та параметрів вентиляційного потоку.

Наявність вітрового контролера, баластного навантаження, системи моніторингу, BMS, захисного заземлення та комутаційної апаратури дозволяє реалізувати контрольовані режими роботи станції та забезпечити її безпечну експлуатацію в умовах підземного рудника.

2.4 Розрахунок та вибір тягової акумуляторної батареї

Тягова АКБ є основним накопичувачем енергії у складі проекрованої вітрозарядної станції. Вона повинна забезпечувати роботу рудничного електровоза у маневрових режимах, а також мати достатній запас ємності з урахуванням нерівномірного навантаження, умов підземної експлуатації та можливості періодичного підзаряду від ВЕУ RX-HV4K.

Відповідно до вихідних даних приймається, що електровоз має два тягові електродвигуни потужністю 50 кВт кожний. Сумарна потужність тягового навантаження становить:

$$P_{\Sigma} = 2 \cdot 50 = 100 \text{ кВт.}$$

					КНУ.РБ.141.26.247с-11.02	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		43

У межах одного транспортного циклу електровоз виконує 5 перестановок під час навантаження та 5 перестановок під час розвантаження [20]. Тривалість однієї перестановки приймається 3 с. Тоді активний час роботи тягової батареї в одному циклі становить:

$$t_{ц} = (5 + 5) \cdot 3 = 30 \text{ с.}$$

За 10 циклів протягом зміни активний час маневрового навантаження дорівнює:

$$t_{зм} = 30 \cdot 10 = 300 \text{ с} = 0,083 \text{ год.}$$

Необхідна енергія для забезпечення зазначених активних маневрових режимів визначається за виразом:

$$W_{роб} = P_{\Sigma} \cdot t_{зм} = 100 \cdot 0,083 = 8,3 \text{ кВт}\cdot\text{год.}$$

Отримане значення характеризує мінімальну енергію саме для активних маневрових операцій і не враховує повну тривалість рейсу, простої, додаткові втрати у тяговому електроприводі та погіршення умов руху. Тому для вибору батареї необхідно врахувати допустиму глибину розряду, ККД процесу заряду-розряду та експлуатаційний запас.

Мінімальна розрахункова ємність тягової АКБ визначається за формулою:

$$C_{\min} = W_{роб} \cdot 1000 / (U_{ном} \cdot D_{OD} \cdot \eta), \text{ А}\cdot\text{год.}$$

де $W_{роб}$ – енергія, необхідна для активних режимів роботи, кВт·год; $U_{ном}$ – номінальна напруга батареї, В; D_{OD} – допустима глибина розряду; η – коефіцієнт, що враховує втрати у батареї та зарядно-розрядному процесі.

Для свинцево-кислотної тягової батареї приймаємо $U_{ном} = 80 \text{ В}$, $D_{OD} = 0,8$, $\eta = 0,9$. Тоді:

$$C_{\min} = 8,3 \cdot 1000 / (80 \cdot 0,8 \cdot 0,9) = 144 \text{ А}\cdot\text{год.}$$

З урахуванням експлуатаційного запасу 15 % розрахункова ємність становить:

$$C_{розр} = 1,15 \cdot 144 = 166 \text{ А}\cdot\text{год.}$$

За результатами розрахунку доцільно прийняти свинцево-кислотну тягову АКБ 40×3 PzS 180 номінальною напругою 80 В та номінальною ємністю 180 А·год. Її паспортний запас енергії становить:

					КНУ.РБ.141.26.247с-11.02	Арк.
						44
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$W_{\text{АКБ}} = U_{\text{ном}} \cdot C_{\text{ном}} / 1000 = 80 \cdot 180 / 1000 = 14,4 \text{ кВт}\cdot\text{год.}$$

Корисна енергія при допустимій глибині розряду 80 % становить приблизно 11,5 кВт·год, що перевищує мінімально необхідні 8,3 кВт·год для прийнятого активного маневрового навантаження. Отже, вибрана батарея забезпечує необхідний запас енергії та може працювати у складі рудничного електровоза з періодичним підзарядом від вітрозарядної станції.

Основні параметри прийнятої тягової АКБ наведено в табл. 2.9.

Таблиця 2.9 – Основні параметри вибраної тягової АКБ

Параметр	Значення	Примітка
Тип батареї	40×3 PzS 180	свинцево-кислотна тягова
Номінальна напруга	80 В	відповідає вихідним даним електровоза
Номінальна ємність	180 А·год	перевищує розрахункову потребу 166 А·год
Паспортний запас енергії	14,4 кВт·год	за $U_{\text{ном}} = 80 \text{ В}$
Орієнтовна корисна енергія	$\approx 11,5 \text{ кВт}\cdot\text{год}$	при $D_{\text{OD}} = 0,8$
Габарити	966×664×405 мм	розміщення у батарейному ящику електровоза
Маса	570 кг	враховується при компонуванні

Для підземних умов експлуатації також необхідно враховувати температурний режим батареї. Найбільш сприятливими є помірні температури без різких коливань, оскільки перегрів прискорює деградацію пластин і підвищує газоутворення, а переохолодження зменшує доступну ємність [20–21]. Тому під час експлуатації батареї необхідно контролювати температуру, зарядний струм, напругу та не допускати тривалого перебування у розрядженому стані.

Окрім основної тягової АКБ, доцільно передбачити допоміжну власних потреб для живлення системи керування, датчиків, реле, сигналізації, BMS та електромагнітного гальма.

Приймаємо потужність власних потреб $P_{\text{кер}} = 100 \text{ Вт}$, необхідний час автономної роботи $t_{\text{рез}} = 4 \text{ год}$, напругу допоміжної системи $U_{\text{кер}} = 24 \text{ В}$. Необхідна ємність допоміжної батареї становить:

$$C_{\text{кер}} = P_{\text{кер}} \cdot t_{\text{рез}} / (U_{\text{кер}} \cdot D_{\text{OD}} \cdot \eta) = 100 \cdot 4 / (24 \cdot 0,7 \cdot 0,9) = 26,54 \text{ А}\cdot\text{год.}$$

					КНУ.РБ.141.26.247с-11.02	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		45

Отже, для живлення системи керування доцільно прийняти допоміжну АКБ 24 В ємністю не менше 20 А·год або еквівалентну батарейну збірку з двох послідовно з'єднаних акумуляторів 12 В. Така батарея не є тяговою і використовується лише для забезпечення працездатності кіл керування, моніторингу та аварійного відключення.

Під розрахункову вимогу не менше 26,54 А·год для живлення власних потреб вітрозарядної станції доцільно застосувати літій-залізо-фосфатну АКБ LiFePO₄ 24 В, 30 А·год із вбудованою BMS.

Таким чином, для вітрозарядної станції приймається тягова АКБ 40×3 PzS 180 з номінальною напругою 80 В та ємністю 180 А·год. Вибрана батарея має достатній запас енергії для прийнятих активних маневрових режимів електровоза і може заряджатися від DC-шини через окремий DC/DC зарядний пристрій. Параметри цієї батареї є основою для подальшого вибору зарядного та перетворювального обладнання вітрозарядної станції.

2.5 Вибір генераторно-перетворювального обладнання та зарядного пристрою

Після вибору тягової АКБ та допоміжної батареї власних потреб необхідно узгодити генераторну частину ВЕУ з перетворювальним обладнанням. Метою цього підрозділу є вибір такої структури перетворення ЕЕ, яка забезпечує заряд тягової АКБ номінальною напругою 80 В, живлення шахтної освітлювальної мережі та роботу системи керування.

Оскільки у роботі прийнято готову вертикально-осьову ВЕУ RX-HV4K потужністю 4 кВт, генератор не вибирається як окремий самостійний апарат. Генераторна частина розглядається як складова вітрогенератора. За паспортними даними RX-HV4K належить до ВЕУ Н-типу, має безсердечниковий генератор, захист IP54, електромагнітне гальмо, діаметр ротора 1,4 м, стартову швидкість 1,5 м/с, швидкість включення 2,5 м/с і може постачатися на номінальні напруги 48, 96, 120 або 220 В. Для даної вітрозарядної станції доцільно прийняти

					КНУ.РБ.141.26.247с-11.02	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		46

виконання на 96 В, оскільки воно краще узгоджується із зарядом тягової АКБ 80 В через DC/DC зарядний пристрій.

Основна структура генераторно-перетворювального тракту приймається такою:

$G \sim \rightarrow QF1 \rightarrow FU1 \rightarrow VD \rightarrow KB3 \rightarrow DC\text{-шина} \rightarrow BD1 \rightarrow \text{тягова АКБ}$

де $G \sim$ – генератор ВЕУ; QF1 – ввідний автомат; FU1 – захист; VD – випрямляч; KB3 – вітровий контролер; BD1 – DC/DC зарядний пристрій тягової АКБ. Окремою гілкою від DC-шини підключається перетворювач INV/DC/DC для живлення шахтної освітлювальної мережі, а через малопотужний DC/DC-перетворювач заряджається допоміжна АКБ власних потреб 24 В.

Таблиця 2.10 – Обґрунтування вибору генераторної частини вітрозарядної станції

Варіант	Переваги	Недоліки	Висновок для роботи
Асинхронний генератор	Простий, надійний, поширений	Потребує збуджувальних конденсаторів, складніше стабілізувати автономний режим	Не приймається як основний варіант після вибору готової ВЕУ RX-HV4K
Генератор постійного струму	Проста логіка підключення до DC-кола	Щітковий вузол, підвищене обслуговування, нижча надійність у підземних умовах	Недоцільний для даної станції
Генератор у складі ВЕУ RX-HV4K	Входить до складу готової ВЕУ, працює з випрямлячем і контролером, сумісний із DC-шиною	Потребує узгодження напруги через перетворювачі	Приймається для подальшого проектування

Оскільки тягова АКБ має номінальну напругу 80 В, її безпосереднє підключення до DC-шини є недоцільним. Для свинцево-кислотної тягової АКБ зарядна напруга є вищою за номінальну і орієнтовно становить 94–98 В для батареї з 40 послідовно з’єднаних елементів. Тому між DC-шиною та тяговою АКБ передбачається DC/DC зарядний пристрій із регулюванням вихідної напруги і обмеженням зарядного струму.

За ємності тягової батареї 180 А·год допустимий зарядний струм для нормального режиму можна прийняти на рівні 0,1С:

$$I_{\text{зар}} = 0,1 \cdot C = 0,1 \cdot 180 = 18 \text{ А.}$$

Тоді орієнтовна потужність зарядного пристрою при зарядній напрузі близько 96 В становить:

$$P_{\text{зар}} = U_{\text{зар}} \cdot I_{\text{зар}} = 96 \cdot 18 = 1728 \text{ Вт} \approx 1,7 \text{ кВт.}$$

З урахуванням запасу та можливості роботи при підвищеному зарядному струмі доцільно прийняти DC/DC зарядний пристрій тягової АКБ потужністю 2,0-2,5 кВт із вхідним живленням від DC-шини та вихідною напругою орієнтовно 80–100 В.

Таблиця 2.11 – Прийняте генераторно-перетворювальне обладнання вітрозарядної станції

Елемент	Прийняті параметри	Призначення
ВЕУ RX-HV4K	Рном = 4 кВт; D = 1,4 м; Н = 2,0 м; виконання 96 В	Перетворення енергії вентиляційного потоку в ЕЕ
Генератор ВЕУ	Генератор у складі RX-HV4K	Формування змінної напруги, що залежить від швидкості обертання
Випрямляч VD	За потужністю не менше 4 кВт, з запасом за струмом і напругою	Перетворення змінної напруги генератора у постійну
Вітровий контролер KB3	Для ВЕУ 4 кВт, 96 В, з виходом на DC-шину і баластне навантаження	Стабілізація режиму, захист від перенапруги, керування BR
DC-шина	Рівень узгоджується з виконанням ВЕУ 96 В	Розподіл енергії між АКБ, ШОМ і власними потребами
BD1 – DC/DC зарядний пристрій	P = 2,0-2,5 кВт; Uвих ≈ 80-100 В; Iзар = 18-25 А	Контрольований заряд тягової АКБ 80 В
INV/DC/DC для ШОМ	Потужність вибирається за навантаженням ШОМ; орієнтовно 1-2 кВт	Живлення шахтної освітлювальної мережі від DC-шини
DC/DC власних потреб	Вихід 24 В; P = 100–150 Вт	Заряд допоміжної АКБ 24 В, 30 А·год і живлення керування
Баластне навантаження BR	Не менше максимальної надлишкової потужності ВЕУ	Поглинання надлишкової енергії і гальмування при перенапрузі

Перетворювач для шахтної освітлювальної мережі вибирається окремою гілкою від DC-шини. Якщо ШОМ працює на змінній напрузі, застосовується

					КНУ.РБ.141.26.247с-11.02	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		48

інвертор відповідної напруги; якщо передбачена мережа постійного струму, використовується DC/DC-перетворювач. У будь-якому випадку ця гілка не повинна проходити через зарядний пристрій тягової АКБ, оскільки заряд батареї та живлення ШОМ мають керуватися незалежно.

Для власних потреб станції передбачається малопотужний DC/DC-перетворювач 24 В, який живить систему керування, датчики, моніторинг, сигналізацію та кола керування електромагнітним гальмом. Допоміжна АКБ LiFePO₄ 24 В, 30 А·год виконує роль резервного джерела живлення системи керування у разі відсутності генерації або аварійного відключення силової частини.

Таблиця 2.12 – Рекомендований комплект обладнання

Вузол схеми	Позначення	Рекомендоване обладнання	Обґрунтування
Вітрогенератор	BEУ / G~	RX-HV4K, 4 кВт, 96 В, Н-туре, вертикально-осьовий	Прийнята BEУ має потужність 4 кВт, діаметр ротора 1,4 м, висоту лопатей 2 м, стартову швидкість 1,5 м/с, швидкість включення 2,5 м/с, номінальну швидкість 10 м/с, IP54 та електромагнітне гальмо. Виконання доступне на 48/96/120/220 В, тому приймаємо 96 В.
Випрямляч	VD	SEMİKRON Danfoss SKD 100/16 або аналог MDS100-16	Трифазний діодний міст на 100 А і 1600 В має великий запас за струмом і напругою для BEУ 4 кВт. SKD 100/16 є трифазним мостовим випрямлячем із робочим струмом 100 А та напругою блокування 1600 В.
Вітровий контролер DC-шини та баластного навантаження	KB3 / BR	GreenChip PWM 4000 W, 0–100 В, 0–50 А, з керуванням баластом	Підходить за потужністю до BEУ 4 кВт, має максимальну потужність 5 кВт, регульований струм заряду 0–50 А та регульовану напругу заряду 0–100 В. Важливо: у нього немає вбудованого трифазного випрямляча, тому VD залишаємо окремим блоком.
Зарядний пристрій / контролер заряду тягової АКБ	BD1	програмований зарядний пристрій 96 В / 20 А для Lead-Acid або промисловий зарядний модуль із виходом 90–100 В	Для АКБ 40×3 PzS 180 потрібна зарядна напруга близько 94–98 В і струм орієнтовно 18–20 А. Реальні зарядні пристрої 96 В / 20 А для свинцево-кислотних, LiFePO ₄ і літєвих батарей доступні як готові рішення; для промислового варіанта можна застосовувати 96 В зарядні пристрої з регулюванням струму і захистами OVP/OCР.

Інвертор / перетворювач для ШОМ	INV / DC/DC	SWP1500-DA96, 96 В DC → 230 В AC, 1500 Вт, чиста синусоїда	Підходить для живлення шахтного освітлення або допоміжної мережі 230 В від DC-шини 96 В. Має вхідний діапазон 80–120 В DC, вихід 230 В AC і потужність 1500 Вт; за потреби можна вибрати 2000 або 3000 Вт із тієї ж серії.
Перетворювач власних потреб	DC/DC 24 В	Phoenix Contact QUINT-PS/96-110DC/24DC/10	Перетворювач DIN-рейкового виконання з входом 96–110 В DC та виходом 24 В DC / 10 А. Підходить для живлення системи керування, датчиків, реле, сигналізації й підзаряду допоміжної АКБ 24 В.
Допоміжна АКБ власних потреб	АКБ 24 В	LiFePO ₄ 24 В / 30 А·год із BMS	Розрахункова потреба становить не менше 26,54 А·год, тому приймається найближчий більший стандартний номінал 30 А·год.
Баластне навантаження	BR	резистивний баласт 96 В, 4–5 кВт	Має відповідати потужності ВЕУ та контролера. Призначений для скидання надлишкової енергії при повному заряді АКБ або відсутності навантаження ШОМ.
Захист і комутація	QF, FU, KM	DC-автомат / запобіжники / контактори на 100–125 В DC, струм не менше 50–63 А	Для ВЕУ 4 кВт при 96 В розрахунковий струм становить близько ($I = 4000/96 \approx 41,7$) А. Тому апаратуру доцільно брати із запасом на 50–63 А.

Отже, для вітрозарядної станції приймається генераторна частина у складі ВЕУ RX-HV4K та перетворювальна структура з випрямлячем, вітровим контролером, DC-шиною, DC/DC зарядним пристроєм тягової АКБ, перетворювачем для ШОМ, перетворювачем власних потреб і баластним навантаженням. Така структура забезпечує узгодження напруги ВЕУ з тяговою АКБ 80 В, можливість живлення шахтної освітлювальної мережі та безпечну роботу станції при змінній швидкості вентиляційного потоку. Подальшим етапом є вибір зарядного пристрою та уточнення режиму заряду тягової АКБ.

2.6 Розрахунок кабелів, комутаційної та захисної апаратури

Після вибору АКБ, генераторної частини та перетворювального обладнання необхідно виконати попередній вибір кабельних ліній, комутаційної та захисної апаратури. На відміну від попередньої редакції роботи, де розрахунок виконувався для ланцюгів 380 В змінного струму і автоматичних вимикачів на

					КНУ.РБ.141.26.247с-11.02	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		50

10 А, у модернізованій схемі основними є кола постійного струму DC-шини напругою 96 В, коло заряду тягової АКБ 80 В, коло живлення шахтної освітлювальної мережі та кола власних потреб.

Вибір апаратури виконується за робочим струмом, номінальною напругою, видом струму, умовами підземної експлуатації, необхідністю аварійного відключення, захисту від короткого замикання, перевантаження та пошкодження ізоляції [18]. Для силових кіл вітрозарядної станції приймається запас за струмом не менше 20–30 %, оскільки режим роботи ВЕУ залежить від швидкості вентиляційного потоку та може супроводжуватися короткочасними перевантаженнями.

$$I_{DC} = P_{BEU} / (U_{DC} \cdot \eta),$$

$$I_{DC} = 4000 / (96 \cdot 0,95) = 43,9 \text{ А.}$$

Отже, для головної ділянки DC-шини приймається розрахунковий струм близько 44 А. З урахуванням запасу для цієї ділянки доцільно приймати апаратуру на струм 63 А.

Для сторони генератора ВЕУ, яка працює як трифазне коло змінного струму до випрямляча, струм визначається за виразом:

$$I_G = P_{BEU} / (\sqrt{3} \cdot U_G \cdot \eta),$$

$$I_G = 4000 / (1,73 \cdot 96 \cdot 0,95) = 25,3 \text{ А.}$$

Таким чином, для генераторного кола приймається триполюсний автоматичний вимикач на 32 А, а для DC-шини – двополюсний автоматичний вимикач постійного струму на 63 А.

Таблиця 2.13 – Розрахункові струми основних кіл вітрозарядної станції

Ділянка схеми	Напруга	Потужність	Розрахунковий струм	Прийнятий номінал захисту
Генератор ВЕУ – випрямляч	≈96 В AC, 3ф	4,0 кВт	25,3 А	32 А, 3Р AC
DC-шина після контролера	96 В DC	4,0 кВт	43,9 А	63 А, 2Р DC
DC/DC зарядний пристрій тягової АКБ	96 В DC	1,7–2,0 кВт	20–22 А	32 А DC
Інвертор / перетворювач ШОМ	96 В DC	1,5 кВт	17–18 А	25–32 А DC
Власні потреби 24 В	24 В DC	до 0,24 кВт	до 10 А	10–16 А DC

Для генераторного кола приймається автоматичний вимикач Schneider Electric Acti9 iC60N 3P C32. Для головного кола DC-шини доцільно прийняти автоматичний вимикач постійного струму Schneider Electric Acti9 C60H-DC 2P C63, який відповідає використанню у DC-колах і має номінальний струм 63 А.

Для комутації кола тягової АКБ застосовується герметизований DC-контактор TE Connectivity/Kilovac EV200 або аналог, який має значний запас за струмом і напругою та може використовуватися у колах постійного струму. Для захисту окремих гілок DC-шини додатково передбачаються плавкі запобіжники або запобіжникові тримачі постійного струму відповідного номіналу.

Таблиця 2.14 – Прийнята комутаційна та захисна апаратура

Елемент	Позначення	Прийняте обладнання	Призначення
Ввідний автомат генератора	QF1	Schneider Electric Acti9 iC60N 3P C32	Відключення та захист трифазного генераторного кола
Автомат DC-шини	QF2	Schneider Electric Acti9 C60H-DC 2P C63	Захист головного кола постійного струму 96 В
Захист гілки заряду АКБ	FU/FA1	DC-запобіжник або автомат 32 А	Захист DC/DC зарядного пристрою та АКБ
Захист гілки ШОМ	FU/FA2	DC-запобіжник або автомат 25–32 А	Захист інвертора / перетворювача ШОМ
DC-контактор АКБ	KM1	TE Connectivity/Kilovac EV200 або аналог	Дистанційне аварійне відключення тягової АКБ
Контроль ізоляції	Riz	реле контролю ізоляції DC-мережі	Виявлення зниження опору ізоляції у DC-колах

Переріз силових кабелів обирається за робочим струмом, допустимим нагріванням, механічною міцністю та умовами прокладання у підземній виробці [18]. Для попереднього вибору приймається мідний гнучкий гумовий кабель шахтного або промислового виконання типу NSSHÖEU / PROTOMONT 0,6/1 кВ або аналог. Такий тип кабелю призначений для важких умов експлуатації, має гумову оболонку, стійкість до вологи, механічних впливів та може застосовуватися у гірничих умовах за умови відповідності вимогам конкретної виробки.

Орієнтовний переріз силового кабелю DC-шини перевіряється за допустимою втратою напруги. Для ділянки довжиною 20 м і струму 43,9 А при мідній жилі перерізом 10 мм²:

					КНУ.РБ.141.26.247с-11.02	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		52

$$\Delta U = 2 \cdot I \cdot \rho_{\text{п}} \cdot l / S,$$

$$\Delta U = 2 \cdot 43,9 \cdot 0,018 \cdot 20 / 10 = 3,16 \text{ В},$$

$$\Delta U\% = 3,16 / 96 \cdot 100 = 3,3 \text{ \%}.$$

Отримана втрата напруги є допустимою для попереднього проєктного розрахунку, тому для головної DC-ділянки приймається кабель із мідними жилами перерізом 10 мм².

Перевірка за економічною густиною струму виконується наступним чином:

$$S_{\text{ек}} = \frac{I_{\text{роз}}}{j_{\text{ек}}},$$

де $S_{\text{ек}}$ – економічний переріз, мм²; $I_{\text{розр}}$ – розрахунковий струм, А; $j_{\text{ек}}$ – економічна густина струму, А/мм².

Відповідно для $I_{\text{DC}} = 43,9 \text{ А}$ при $j_{\text{ек}} = 2,5 \text{ А/мм}^2$:

$$S_{\text{ек}} = 43,9 / 2,5 = 17,56 \text{ мм}^2.$$

Найближчий стандартний переріз $S = 25 \text{ мм}^2$.

Відповідно падіння напруги складе:

$$\Delta U = 2 \cdot 43,9 \cdot 0,018 \cdot 20 / 25 = 1,26 \text{ В},$$

$$\Delta U\% = 1,26 / 96 \cdot 100 = 1,31 \text{ \%}.$$

Для генераторного кола, гілки заряду АКБ, ШОМ і власних потреб перерізи приймаються з урахуванням розрахункових струмів і запасу за нагріванням.

Таблиця 2.15 – Попередній вибір кабельних ліній

Ділянка	Струм, А	Перевірка за економічною густиною струму, мм ²	Рекомендований кабель	Прийнятий переріз	Примітка
Генератор ВЕУ – випрямляч	25,3	$S_{\text{ек}}=25,3/2,5=10,12$	NSSHÖEU / PROTOMONT 0,6/1 кВ	4×16 мм ²	трифазне АС-коло: L1, L2, L3, PE
Головна DC-шина 96 В	43,9	$S_{\text{ек}}=43,9/2,5=17,56$	NSSHÖEU / PROTOMONT 0,6/1 кВ	3×25 мм ²	“+”, “-”, PE
DC-шина – зарядний пристрій тягової АКБ	20–22	$S_{\text{ек}}=22/2,5=8,8$	гнучкий мідний кабель 0,6/1 кВ	3×10 мм ²	“+”, “-”, PE; коло заряду АКБ

					КНУ.РБ.141.26.247с-11.02	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		53

DC-шина – інвертор / перетворювач ШОМ	17–18	Сек=18/2,5=7,2	гнучкий мідний кабель 0,6/1 кВ	3×10 мм ²	“+”, “-”, РЕ; вхід інвертора від DC-шини
Інвертор – ШОМ 230 В	6–8	Сек=8/2,5=3,2	мідний кабель 0,6/1 кВ	3×4 мм ²	живлення шахтної освітлювальної мережі 230 В
Кола власних потреб 24 В	до 10	Сек=10/2,5=4,0	гнучкий мідний кабель	2×4 мм ²	живлення DC/DC 24 В, допоміжної АКБ, кіл керування
Кола сигналів і датчиків	до 1	технічний вибір	екранований контрольний кабель	0,75–1,5 мм ²	моніторинг, BMS, датчики, сигнальні кола

Усі металеві корпуси, оболонки, шафи, рами ВЕУ, перетворювальні пристрої, зарядний пристрій, інвертор, акумуляторні шафи та допоміжне обладнання повинні бути приєднані до шини захисного заземлення РЕ. Для DC-кіл обов’язковим є контроль опору ізоляції, оскільки при підземній експлуатації підвищена вологість, пил і механічні впливи можуть призводити до погіршення ізоляційного стану [17–18]. У разі зниження опору ізоляції система керування повинна формувати команду на відключення відповідної гілки або всієї станції.

Отже, для оновленої схеми вітрозарядної станції прийнято комутаційну апаратуру та кабельні лінії, розраховані на роботу у колах 96 В DC, 80 В тягової АКБ, 24 В власних потреб і 230 В кола ШОМ. Вибір виконано із запасом за струмом, із урахуванням вимог до підземного розміщення, захисного заземлення та контролю ізоляції. Наступним етапом є формування алгоритму роботи станції у пусковому, нормальному, зарядному, допоміжному та аварійному режимах

2.7 Алгоритм роботи вітрозарядної станції

ВЕУ RX-HV4K формує ЕЕ, яка після випрямлення та вітрового контролера надходить на DC-шину, а заряд тягової АКБ виконується через окремий DC/DC зарядний пристрій BD1. Тому алгоритм доцільно будувати не навколо кількості одночасно заряджуваних батарей, а навколо режимів розподілу енергії між тяговою АКБ, шахтною освітлювальною мережею та баластним навантаженням.

					КНУ.РБ.141.26.247с-11.02	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		54

Основним накопичувачем енергії є тягова АКБ 40×3 PzS 180 номінальною напругою 80 В та ємністю 180 А·год. Заряд батареї здійснюється від DC-шини через зарядний пристрій / контролер заряду BD1, який обмежує струм, стабілізує зарядну напругу та відключає батарею при досягненні граничного стану заряду. Безпосереднє підключення АКБ до DC-шини не допускається, оскільки це не забезпечує контрольованого струму заряду та може спричинити перезаряд або перегрів елементів.

Для свинцево-кислотної тягової батареї приймається зарядний струм на рівні приблизно 0,1С [15]:

$$I_{\text{зар}} = 0,1 \cdot C_{\text{ном}} = 0,1 \cdot 180 = 18 \text{ А.}$$

Орієнтовна зарядна напруга для батареї з 40 послідовно з'єднаних елементів становить:

$$U_{\text{зар}} \approx 2,35 \dots 2,45 \cdot 40 = 94 \dots 98 \text{ В.}$$

Тоді розрахункова потужність зарядного пристрою становить:

$$P_{\text{зар}} = U_{\text{зар}} \cdot I_{\text{зар}} = 96 \cdot 18 = 1728 \text{ Вт} \approx 1,73 \text{ кВт.}$$

З урахуванням запасу приймається зарядний пристрій BD1 потужністю не менше 2 кВт, з вихідною напругою 90...100 В та максимальним струмом заряду 18...20 А. Якщо фактична потужність, що надходить від ВЕУ на DC-шину, є меншою за потрібну потужність заряду, система керування повинна зменшити зарядний струм або тимчасово припинити заряд АКБ.

Таблиця 2.16 – Основні контрольовані параметри алгоритму заряду

Параметр	Прийняте значення / умова	Призначення
Номінальна напруга тягової АКБ	80 В	Узгодження з DC/DC зарядним пристроєм
Ємність тягової АКБ	180 А·год	Визначення допустимого зарядного струму
Рекомендований струм заряду	18 А	Обмеження струму для щадного заряду PzS-батареї
Зарядна напруга	94...98 В	Забезпечення повного контрольованого заряду
Мінімальна потужність BD1	не менше 2 кВт	Вибір зарядного пристрою з необхідним запасом
Контрольовані величини	U, I, T, SOC, Riz	Захист АКБ, обладнання і персоналу
Додатковий споживач	ШОМ	Використання енергії DC-шини за потреби

Надлишкова енергія	BR	Обмеження перенапруги та безпечне гальмування ВЕУ
--------------------	----	---

Узагальнений алгоритм роботи вітрозарядної станції під час заряду тягової АКБ включає такі етапи:

1. Після пуску система керування перевіряє справність датчиків, стан ізоляції, готовність захисної та комутаційної апаратури, а також параметри тягової АКБ;

2. За наявності аварійного сигналу, зниження опору ізоляції або перевищення допустимих температур силові кола відключаються, а ВЕУ переводиться в режим гальмування;

3. Якщо швидкість вентиляційного потоку є достатньою, генератор ВЕУ через випрямляч і вітровий контролер формує напругу DC-шини;

4. За потреби заряду тягової АКБ контролер VD1 підключає батарею та задає зарядний струм не вище 18...20 А;

5. Якщо одночасно потрібне живлення ШОМ, частина енергії DC-шини передається через інвертор або DC/DC-перетворювач до шахтної освітлювальної мережі;

6. При повному заряді АКБ зарядний струм зменшується або заряд припиняється, а доступна енергія може спрямовуватися на ШОМ;

7. За відсутності споживання або при надлишковій генерації вітровий контролер підключає баластне навантаження BR;

8. У разі аварії система керування вимикає силові кола, подає команду на BR або електромагнітне гальмо EG і формує сигнал аварійного стану.

					КНУ.РБ.141.26.247с-11.02	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		56

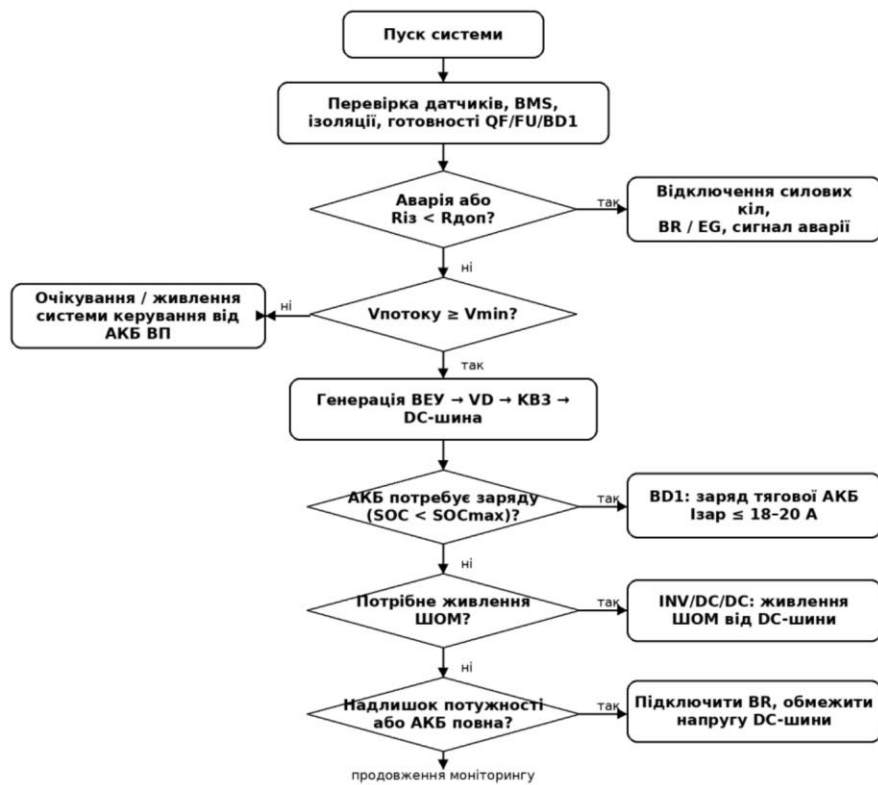


Рисунок 2.7 – Узагальнений алгоритм роботи вітрозарядної станції під час заряду тягової АКБ

У прийнятій схемі основним є керований заряд тільки однієї тягової АКБ через BD1 із можливістю паралельного живлення ШОМ від DC-шини. Така логіка краще відповідає вибраній структурі вітрозарядної станції, у якій DC-шина є центральною ланкою розподілу енергії.

Таблиця 2.17 – Основні режими роботи алгоритму

Режим	Умова переходу	Дія системи керування
Пуск	Наявне живлення власних потреб	Перевірка датчиків, BMS, ізоляції та готовності апаратури
Генерація	$V_{\text{потоку}} \geq V_{\text{min}}$	Підключення генератора через VD та КВЗ до DC-шини
Заряд тягової АКБ	$SOC < SOC_{\text{max}}$, немає аварії	BD1 заряджає АКБ струмом до 18...20 А
Живлення ШОМ	Є потреба у освітленні	INV/DC/DC живить ШОМ від DC-шини
Повний заряд АКБ	$SOC \geq SOC_{\text{max}}$ або $U_{\text{АКБ}}$ досягла межі	Зменшення струму або відключення заряду
Надлишкова генерація	$P_{\text{ген}} > P_{\text{зар}} + P_{\text{ШОМ}}$	Підключення BR або обмеження потужності ВЕУ
Аварійний режим	Перенапруга, перегрів, зниження $R_{\text{із}}$	Відключення силових кіл, BR/EG, сигнал аварії

Отже, запропонований алгоритм забезпечує контрольований заряд тягової АКБ, можливість живлення шахтної освітлювальної мережі та захист обладнання при аварійних або надлишкових режимах. Подальше техніко-економічне обґрунтування має враховувати фактичну добову генерацію ВЕУ, тривалість заряду АКБ та частку енергії, що може передаватися на допоміжні споживачі рудника.

2.8 Техніко-економічна оцінка запропонованого рішення

Техніко-економічна оцінка виконується для попереднього визначення орієнтовної вартості впровадження вітрозарядної станції та строку окупності запропонованого рішення [22]. У роботі прийнято вітрозарядну станцію на базі вертикально-осьової ВЕУ RX-HV4K потужністю 4 кВт, тягової АКБ 40×3 PzS 180 номінальною напругою 80 В та ємністю 180 А·год, допоміжної АКБ власних потреб LiFePO₄ 24 В, 30 А·год, DC-шини 96 В, зарядного пристрою тягової АКБ, інвертора для живлення ШОМ, захисної та комутаційної апаратури. У попередніх підрозділах також визначено, що заряд тягової АКБ виконується через окремий DC/DC зарядний пристрій, а енергія може розподілятися між тяговою АКБ, шахтною освітлювальною мережею та баластним навантаженням.

Орієнтовну вартість обладнання прийнято за відкритими ринковими цінами та наближеними кошторисними оцінками. Поточні ціни можуть змінюватися, тому наведений кошторис є попереднім і призначений для привентивної оцінки.

Таблиця 2.18 – Орієнтовний кошторис обладнання вітрозарядної станції

№	Найменування обладнання / матеріалу	Кількість	Орієнтовна ціна за одиницю, грн	Загальна вартість, грн
1	Вертикально-осьова ВЕУ RX-HV4K, 4 кВт, 96 В	1 шт.	202378	202378
2	Допоміжна АКБ LiFePO ₄ 24 В, 30 А·год із BMS	1 шт.	13800	13800
3	Трифазний випрямляч VD, 100 А, 1600 В або аналог	1 шт.	4500	4500

					КНУ.РБ.141.26.247с-11.02	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		58

4	Вітровий контролер КВЗ для ВЕУ 4 кВт, 96 В	1 шт.	7000	7000
5	Баластне навантаження BR, 96 В, 4–5 кВт	1 компл.	8000	8000
6	Зарядний пристрій / контролер заряду BD1, 96 В / 20 А	1 шт.	18000	18000
7	Інвертор / перетворювач ШОМ, 96 В DC → 230 В AC, 1,5 кВт	1 шт.	6000	6000
8	DC/DC-перетворювач власних потреб, 96/110 В DC → 24 В DC, 10 А	1 шт.	8018	8018
9	Автомат QF1 генераторного кола, 3P C32	1 шт.	1500	1500
10	Автомат QF2 DC-шини, 2P DC C63	1 шт.	1731	1731
11	DC-запобіжники / тримачі для гілок АКБ, ШОМ, власних потреб	3 компл.	1500	4500
12	DC-контактор KM1 для кола тягової АКБ	1 шт.	7500	7500
13	Реле контролю ізоляції DC-мережі	1 шт.	10000	10000
14	Шафа керування та силова шафа IP54 / рудничного виконання	1 компл.	15000	15000
15	Кабель NSSHÖEU / PROTOMONT 4×16 мм ² , генератор – випрямляч	15 м	350	5250
16	Кабель NSSHÖEU / PROTOMONT 3×25 мм ² , головна DC-шина	20 м	550	11000
17	Кабель 3×10 мм ² , DC-шина – зарядний пристрій АКБ	20 м	260	5200
18	Кабель 3×10 мм ² , DC-шина – інвертор ШОМ	10 м	260	2600
19	Кабель 3×4 мм ² , інвертор – ШОМ 230 В	30 м	100	3000
20	Кабель 2×4 мм ² , кола власних потреб 24 В	15 м	65	975
21	Екранований контрольний кабель 0,75–1,5 мм ²	30 м	45	1350
22	Кабельні вводи, наконечники, кріплення, РЕ-шина, заземлення	1 компл.	12000	12000
23	Металоконструкції, кронштейни, монтажна рама ВЕУ	1 компл.	25000	25000
24	Монтажні та пусконаладжувальні роботи	1 компл.	60000	60000
	Разом без резерву			446302
	Резерв на непередбачені витрати, транспортування та дрібні матеріали, 10 %			44630
	Загальні капітальні витрати			490932

Запропонована вітрозарядна станція не передбачає придбання нової тягової АКБ для електровоза. Вона призначена для підзаряду штатних тягових АКБ, які вже використовуються у складі рудничного акумуляторного електровоза. Вибір батареї 40×3 PzS 180 виконано як вибір типового розрахункового об'єкта заряду, необхідного для визначення параметрів зарядного пристрою, кабельних ліній, комутації, захистів та алгоритму роботи станції.

					КНУ.РВ.141.26.247с-11.02	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		59

У підрозділі 2.2 було прийнято ВЕУ номінальною потужністю $P_{\text{ном}} = 4$ кВт.

Оскільки фактична потужність ВЕУ залежить від швидкості вентиляційного потоку, для економічної оцінки доцільно використовувати не номінальну потужність, а середню корисну потужність. Для попереднього розрахунку приймаємо коефіцієнт використання встановленої потужності $k_{\text{вик}} = 0,7$.

Тоді середня електрична потужність, яка може бути корисно використана для заряду АКБ, живлення ШОМ або власних потреб, становить:

$$P_{\text{сер}} = P_{\text{ном}} \cdot k_{\text{вик}} = 4 \cdot 0,7 = 2,8 \text{ кВт.}$$

Вентиляційна система підземного рудника працює тривалий час, однак для урахування простоїв, технічного обслуговування, зниження швидкості потоку та обмежень системи керування приймаємо коефіцієнт готовності $k_{\text{Г}} = 0,8$. Кількість годин у році $T_{\text{р}} = 8760$ год.

Тоді річна кількість корисно використаної ЕЕ:

$$W_{\text{р}} = P_{\text{сер}} \cdot T_{\text{р}} \cdot k_{\text{Г}} = 2,8 \cdot 8760 \cdot 0,8 = 19622,2 \text{ кВт}\cdot\text{год.}$$

З урахуванням втрат у зарядному пристрої, інверторі, DC/DC-перетворювачах і допоміжних колах приймаємо коефіцієнт корисного використання згенерованої енергії $\eta_{\text{вик}} = 0,9$.

Тоді корисна річна енергія:

$$W_{\text{кор}} = W_{\text{р}} \cdot \eta_{\text{вик}} = 19622,2 \cdot 0,9 = 17659,98 \text{ кВт}\cdot\text{год.}$$

Приймаємо $W_{\text{кор}} \approx 17500$ кВт·год.

Економічний ефект від роботи вітрозарядної станції визначається економією ЕЕ, яку не потрібно отримувати від зовнішньої мережі для заряду тягової АКБ, живлення ШОМ та власних потреб. Для промислових споживачів фактична ціна ЕЕ складається з ціни ЕЕ на ринку, тарифу на передачу, тарифу на розподіл, послуг постачальника та ПДВ. Для орієнтовної оцінки приймаємо середню вартість ЕЕ для промислового споживача: $C_{\text{е}} = 8,5$ грн/кВт·год. Таке значення є обережним узагальненням.

Річна економія вартості ЕЕ [22]:

					КНУ.РБ.141.26.247с-11.02	Арк.
						60
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$E_{\text{ел}} = W_{\text{кор}} \cdot C_e = 17500 \cdot 8,5 = 148750 \text{ грн/рік.}$$

До експлуатаційних витрат належать періодичний огляд ВЕУ, перевірка кріплень, очищення обладнання, контроль контактних з'єднань, перевірка АКБ, контроль кабельних ввідів, тестування захистів, обслуговування перетворювачів і системи керування [22]. Для попередньої оцінки приймаємо річні експлуатаційні витрати на рівні:

$$C_{\text{експ}} = 0,03 \cdot K_{\Sigma} = 0,03 \cdot 490932 = 14728 \text{ грн/рік.}$$

Приймаємо $C_{\text{експ}} \approx 14750$ грн/рік.

Тоді чистий річний економічний ефект:

$$E_{\text{ч}} = E_{\text{ел}} - C_{\text{експ}} = 148750 - 14750 = 134000 \text{ грн/рік.}$$

Строк окупності визначається як відношення капітальних витрат до чистого річного економічного ефекту:

$$T_{\text{ок}} = \frac{490932}{134000} = 3,66 \approx 3,7 \text{ року.}$$

Як прийнятний для електроенергетичних рішень орієнтир можна використовувати строк окупності до 7 років [22]. Отримане у даній роботі значення 3,7 року знаходиться в межах цього орієнтовного критерію рентабельності технічних рішень.

					КНУ.РБ.141.26.247с-11.02	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		61

ВИСНОВКИ

У роботі виконано розрахунок та вибір електротехнічного обладнання вітрозарядної станції для умов підземних рудників. Запропоноване рішення орієнтоване на використання вентиляційного потоку підземної виробки як локального джерела механічної енергії з подальшим перетворенням її в ЕЕ для часткового заряду тягової АКБ рудничного електровоза та живлення шахтної освітлювальної мережі.

У першому розділі розглянуто теоретичні основи побудови вітрозарядної станції. Обґрунтовано актуальність використання локальних ВДЕ в системах електропостачання підземних рудників, оскільки такі об'єкти мають значну енергоємність, підвищені вимоги до надійності живлення та потребу в забезпеченні роботи допоміжних і аварійних споживачів. Показано, що вентиляційні потоки підземних виробок можуть розглядатися як додаткове техногенне джерело механічної енергії, оскільки вони створюються примусово, мають тривалий час дії та відносно сталий напрям руху.

Проаналізовано особливості вентиляційного потоку як джерела енергії для ВЕУ. Встановлено, що його енергетичний потенціал визначається швидкістю повітря, густиною рудничного повітря та площею взаємодії потоку з ротором. Обґрунтовано вибір вертикально-осьової ВЕУ, оскільки вона краще пристосована до підземних умов, не потребує складної системи орієнтації на напрям потоку, має компактніше компонування та є зручнішою для обслуговування в обмеженому просторі виробки.

У другому розділі сформовано вихідні дані для проектування вітрозарядної станції з урахуванням режимів роботи рудничного електровоза. Для подальших розрахунків прийнято вертикально-осьову ВЕУ RX-HV4K номінальною потужністю 4 кВт. Виконано оцінку енергетичних параметрів установки та

					КНУ.РБ.141.26.247с-11.В			
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>	Висновки	<i>Літ.</i>	<i>Арк.</i>	<i>Акрушів</i>
<i>Розробив</i>		<i>Совенко В.В.</i>						
<i>Перевірів</i>		<i>Гльченко О.В.</i>					62	2
<i>Н. Контр.</i>		<i>Гльченко О.В.</i>				КНУ		
<i>Затвердж.</i>		<i>Пересунько І.І.</i>				гр. ЕЕМ-22-1		

визначено, що фактична корисна потужність залежить від швидкості вентиляційного потоку, втрат у перетворювальному обладнанні та режиму використання згенерованої ЕЕ.

Розроблено структурну та функціональну електричну схему вітрозарядної станції. У схемі передбачено два основні напрями використання енергії: заряд тягової АКБ через DC/DC зарядний пристрій та живлення шахтної освітлювальної мережі через окремий перетворювач від DC-шини. Як типовий об'єкт заряду прийнято тягову АКБ 40×3 PzS 180 номінальною напругою 80 В і ємністю 180 А·год. Окремо для власних потреб станції прийнято допоміжну АКБ LiFePO₄ 24 В, 30 А·год.

Виконано вибір генераторно-перетворювального обладнання, зарядного пристрою, кабельних ліній, комутаційної та захисної апаратури. Для головної DC-шини 96 В прийнято кабель 3×25 мм², а для інших кіл – кабелі відповідного перерізу з урахуванням робочого струму, втрати напруги, умов прокладання та вимог підземної експлуатації. Сформовано алгоритм роботи станції, який передбачає запуск, заряд АКБ, живлення ШОМ, підключення баластного навантаження та аварійне відключення.

Попередня техніко-економічна оцінка показала, що капітальні витрати на створення вітрозарядної станції без урахування вартості штатної тягової АКБ становлять близько 491 тис. грн. Розрахункова корисна річна генерація становить близько 17500 кВт·год, чистий річний економічний ефект – близько 134 тис. грн/рік, а орієнтовний строк окупності – близько 3,7 року.

Отже, запропонована вітрозарядна станція може бути технічно та економічно доцільним допоміжним джерелом енергії для підзаряду штатних тягових АКБ, живлення ШОМ і підвищення енергетичної стійкості окремої ділянки підземного рудника.

					КНУ.РБ.141.26.247с-11.В	Арк.
						63
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

[1] Півняк Г. Г., Білий М. М., Бажін Г. М. Електропостачання гірничих підприємств: Довідковий посібник. – Д.: Національний гірничий університет, 2008. – 550 с.

[2] Електрифікація гірничих робіт: Підручник. - Вид. 2-е, допрац. та доп. / Г. Г. Півняк, М. М. Бєлий, Л. П. Ворохов, В. Т. Заїка, Ю. М. Зражевський, Ю. Т. Разумний, А. Я. Рибалко, В. І. Тесленко, Ф. П. Шкрабець ; За ред. академіка НАН України Г. Г. Півняка. – Дніпропетровськ: Національний гірничий університет, 2005. 615 с.

[3] Бойко С. М. Теоретичні засади формування електроенергетичних систем з джерелами розосередженої генерації гірничорудних підприємств : монографія / С. М. Бойко ; за ред. О. М. Сінчука. – Кременчук : Щербатих О. В., 2020. – 260 с.

[4] І. О. Сінчук., Э. С. Гузов, В. А. Кольсун, В. С. Козлов, С. М. Бойко, та О. Є. Мельник. Енергозбереження на підприємствах гірничовидобувної промисловості. Проблеми, шляхи реалізації: Монографія. Кременчук, Україна: ПП Щербатих О. В., 2016. – 340 с.

[5] Відновлювані джерела електричної енергії в структурах систем електропостачання залізорудних підприємств. (Аналіз, перспективи, проекти): Монографія / Сінчук О.М., Сінчук І.О., Бойко С.М., Караманиць Ф. І., Ялова О.М., Пархоменко Р.О.; Кривий Ріг: Видавництво ПП Щербатих О.В., 2017. 152 с.

[6] Енергетична стратегія України на період до 2050 р. / сайт Міністерства енергетики та вугільної промисловості України. URL: <https://mpe.kmu.gov.ua>.

[7] Денисюк С.П., Дерев'янюк Д.Г., Горенко Д.С. Особливості оцінювання режимів функціонування локальних систем з джерелами розосередженої

					КНУ.РВ.141.26.247с-11.Л			
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>				
<i>Розробив</i>		<i>Совенко В.В.</i>			Список використаних джерел	<i>Літ.</i>	<i>Арк.</i>	<i>Акрушіє</i>
<i>Перевірів</i>		<i>Льченко О.В.</i>					64	3
<i>Н. Контр.</i>		<i>Льченко О.В.</i>				КНУ		
<i>Затвердж.</i>		<i>Пересунько І.І.</i>				гр. ЕЕМ-22-1		

генерації та накопичувачами. *Енергетика: економіка, технологія, екологія*. №1, 2020. С.7-20. DOI: <https://doi.org/10.20535/1813-5420.1.2020.217558>.

[8] І. О. Сінчук, С. М. Бойко, І. В. Касаткіна, О. В. Дозоренко. Аспекти розвитку вітроенергетики в умовах залізорудних підприємств // *Вісник Криворізького національного університету : зб. наук. праць*. – Кривий Ріг, 2021. – Вип. 52. – С. 70–76. <https://doi.org/10.31721/2306-5451-2021-1-52-70-77>.

[9] Сінчук О.М. Аналіз факторів впливу на основні енергетичні характеристики вітроенергетичних станцій, що експлуатуються в умовах гірничорудних підприємств / О.М. Сінчук, С.М. Бойко, А.В. Некрасов, М.О. Ножнова, А.О. Онищенко // *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. – 2020 – Том 31 (70) № 2. – С. 256-262.

[10] Основи вітроенергетики: підручник / Г. Півняк, Ф. Шкрабець, Нойбергер, Д. Циленков ; М-во освіти і науки України, Нац. гірн. ун-т. – Д.: НГУ, 2015. – 335 с. ISBN 978-966-350-526-8.

[11] Відновлювані джерела енергії / За заг. ред. С.О. Кудрі. – Київ: Інститут відновлюваної енергетики НАНУ, 2020. – 392 с. ISBN 978-966-999-077-8.

[12] Деклараційний патент на корисну модель № 80828, Україна, F03D 9/00. Спосіб розташування вітроустановки в діючих виробках шахт / О. М. Сінчук, С. М. Якимець, Д. А. Шокар'єв, С. М. Бойко, М. А. Щербак; заявл. №u201215007 від 27.12.2012, опубл. 10.06.2013. Бюл. №11, 2013 р.

[13] Бойко, С. М. Особливості електропостачання залізорудних підприємств при впровадженні розосередженої генерації / С.М. Бойко, Борисенко, Некрасов, Городній, Касянов // *Технічні науки та технології : науковий журнал / Черніг. нац. технол. ун-т*. – Чернігів : ЧНТУ, 2019. – № 2 (16). – С. 118-128.

[14] Бойко С.М., Сінчук І.О., Жуков О.А., Савицький О.І. Комплексне використання відновлювальних джерел енергії: Підручник. За редакцією доктора технічних наук, професора О.М. Сінчука – Кривий Ріг: ПП Щербатих О.В. – 2021. 204 с.

					КНУ.РБ.141.26.247с-11.Л	Арк.
						65
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

[15] ДСТУ EN 60254-1:2019. Батареї акумуляторні свинцево-кислотні тягові. Частина 1. Основні вимоги та методи випробування (EN 60254-1:2005, IDT; IEC 60254-1:2005, IDT). Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2019.

[16] Pavlov D. Lead-Acid Batteries: Science and Technology: A Handbook of Lead-Acid Battery Technology and Its Influence on the Product. 2nd ed. Amsterdam : Elsevier, 2017. 722 p.

[17] Правила безпеки під час розробки родовищ рудних та нерудних корисних копалин підземним способом : НПАОП 0.00-1.77-16 : затв. наказом Міністерства соціальної політики України від 23.12.2016 р. № 1592. Київ, 2016.

[18] Правила улаштування електроустановок. 5-те вид., перероб. і допов. Харків : Форт, 2017. 760 с.

[19] Шкрабець Ф. П., Остапчук О. В. Електропостачання глибоких і енергоємних рудних та вугільних шахт : монографія. Дніпропетровськ : Національний гірничий університет, 2014. 160 с. ISBN 978-966-350-509-1.

[20] Сінчук О. М., Гузов Е. С., Дебелий В. Л., Ялова О. М., Сінчук І. О. Електротранспорт рудникових підприємств : навч. посіб. Кривий Ріг : Видавничий центр ДВНЗ «Криворізький національний університет», 2015. 428 с.

[21] Марчук М. М., Корецький С. С., Серілко Д. Л., Стрілець В. М. Транспортні системи гірничих підприємств : навч. посіб. Рівне : НУВГП, 2018. 191 с.

[22] Рубаненко О. О. Підвищення енергоефективності відновлюваних джерел енергії : монографія / О. О. Рубаненко. Вінниця : ВНТУ, 2024. 204 с.

					КНУ.РБ.141.26.247с-11.Л	Арк.
						66
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		