

Міністерство освіти і науки України

Криворізький національний університет

Електротехнічний факультет

# Пояснювальна записка

до кваліфікаційної роботи магістра

за спеціальністю 141 - Електроенергетика, електротехніка та  
електромеханіка

## ТЕМА РОБОТИ:

Дослідження методів та заходів поліпшення економічних показників роботи  
системи електропостачання з розподіленою генерацією на базі  
гідроакumuлюючої електростанції для умов головних водовідливних комплексів  
залізорудних шахт

Виконала: студентка групи СЕП-23м

Д.Є. Коломоєць

Керівник випускної роботи \_\_\_\_\_

к.т.н., доц. О.М. Сінчук

Нормо контролер \_\_\_\_\_

к.т.н., доц. О.М. Сінчук

Декан ЕТФ \_\_\_\_\_

к.т.н., доц. В.О. Федотов

Гарант освітньої програми \_\_\_\_\_

к.т.н., доц. О.Ю. Михайленко

Кривий Ріг 2024 р.

Криворізький національний університет

Факультет: електротехнічний

Освітній рівень: магістр

Спеціальність: 141 - Електроенергетика, електротехніка та  
електромеханіка

## ЗАВДАННЯ

### НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ

Коломоєць Дарія Євгенівна

(прізвище, ім'я, по батькові)

Тема роботи: Дослідження методів та заходів поліпшення економічних показників роботи системи електропостачання з розподіленою генерацією на базі гідроакумулюючої електростанції для умов головних водовідливних комплексів залізорудних шахт

1. Термін подання студентом роботи: 09 грудня 2024 р.
2. Мета та завдання кваліфікаційної роботи: *Метою є Підвищення економічної ефективності систем електропостачання водовідливних комплексів із використанням ГАЕС. Завданням є аналіз енергоспоживання, дослідження насосного обладнання, розробка алгоритмів керування, впровадження заходів модернізації.*
3. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які необхідно розробити)\_ *I. Опис електромеханічної системи, вибір електричного обладнання та розрахунок статичних характеристик привода; II. Обґрунтування та розробка системи управління електроприводом; III. Моделювання динамічних режимів роботи привода механізму за допомогою ЕОМ.*
4. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) *I. Опис механізму та технічні характеристики; II. Розрахунок статичних параметрів системи електроприводу; III. Вибір елементної*

бази системи електроприводу; IV. Розробка системи управління електроприводом; V. Моделювання для аналізу динамічних процесів; VI. Аналіз динаміки системи електроприводу.

5. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали консультанта	Дата, підпис	
		Завдання видав	Завдання прийняв
I	Сінчук О.М.		
II	Сінчук О.М.		
III	Сінчук О.М.		

6. Календарний план

№	Етапи роботи	Термін
1	Аналіз літературних джерел та вибір об'єкта дослідження	04.09.24
2	Огляд систем водовідведення та їх енергетичних характеристик	12.09.24
3	Визначення технічних параметрів системи насосного обладнання	17.09.24
4	Моделювання енергоспоживання системи водовідведення	01.10.24
5	Підбір гідроаккумуляційного обладнання та обґрунтування вибору	07.10.24
6	Розробка математичної моделі для оптимізації енергоспоживання	18.10.24
7	Розробка алгоритмів керування енергоспоживанням системи	02.11.24
8	Моделювання роботи системи з урахуванням розроблених алгоритмів	10.11.24
9	Аналіз отриманих результатів та оцінка ефективності системи	15.11.24
10	Аналіз якісних показників розробленої системи	21.11.24

Дата видання завдання **02.09.2024 р.**

Здобувач вищої освіти \_\_\_\_\_  
(підпис)

**Коломоєць Д.Є.**  
(ПІБ)

Керівник роботи \_\_\_\_\_  
(підпис)

**Сінчук О.М.**  
(ПІБ)

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до дипломної роботи магістра на тему: «Дослідження методів та заходів поліпшення економічних показників роботи системи електропостачання з розподіленою генерацією на базі гідроакumuлюючої електростанції для умов головних водовідливних комплексів залізорудних шахт»

67 с., 25 рис., 16 літературних джерела

Об'єкт дослідження – системи шахтного водовідведення.

Мета роботи – дослідження ефективних методів та заходів щодо поліпшення економічних показників роботи системи електропостачання з розподіленою генерацією на базі ГАЕС для задоволення потреб головних водовідливних комплексів залізорудних шахт. Завдання полягають у аналізі сучасних методів та практик, моделюванні роботи системи електропостачання з розподіленою генерацією.

Робота складається з трьох розділів, які комплексно розкривають аспекти енергетичної ефективності водовідливних комплексів шахт, характеристик обладнання та розробки систем керування. У першому розділі висвітлюються основні параметри енергетичної ефективності систем водовідведення в шахтах, а також проведено дослідження споживання електроенергії гірничими підприємствами, що використовують підземний метод видобутку залізної руди.

Другий розділ присвячено аналізу характеристик гідроакumuляційного обладнання залізорудних шахт. У ньому розглянуто особливості та технічні характеристики насосів осушувальних комплексів, а також проведено аналіз

графіків споживання електроенергії електроприводами насосів осушувальних установок.

Третій розділ зосереджений на розробці системи керування електротехнічним комплексом з гідроаккумуляційним обладнанням. Особлива увага приділяється створенню ефективних алгоритмів керування, які забезпечують підвищення економічної ефективності та надійності роботи водовідливних комплексів.

ЕНЕРГЕТИЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ, ВОДОВІДЛИВНІ КОМПЛЕКСИ,  
ГІДРОАКУМУЛЮЮЧІ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ, ЗАЛІЗОРУДНІ ШАХТИ,  
ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ

## ЗМІСТ

РЕФЕРАТ .....	4
ЗМІСТ .....	6
ВСТУП .....	7
Розділ 1. ОСНОВНІ ПАРАМЕТРИ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ СИСТЕМ ВОДОВІДВЕДЕННЯ В ШАХТАХ .....	8
1.1 Дослідження споживання електроенергії гірничими підприємствами, які використовують підземний метод видобутку залізної руди 8	
1.2 Аналіз електроенергетичних та технологічних характеристик під час відведення підземних вод із гірничих виробок залізорудних шахт .....	29
Розділ 2. ХАРАКТЕРИСТКИ ГІДРОАКУМУЛЯЦІЙНОГО ОБЛАДНАННЯ ЗАЛІЗОРУДНИХ ШАХТ .....	41
2.1 Особливості та технічні характеристики насосів осушувальних комплексів залізорудних шахт .....	41
2.2 Аналіз графіків споживання електроенергії електроприводами насосів осушувальних установок.....	47
Розділ 3. СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИМ КОМПЛЕКСОМ З ГІДРОАКУМУЛЯЦІЙНИМ ОБЛАДНАННЯМ ЗАЛІЗОРУДНИХ ШАХТ .....	54
3.1 Розробка системи керування електротехнічним комплексом з гідроаккумуляційним обладнанням залізорудних шахт .....	54
3.2 Дослідження режимів роботи електротехнічного комплексу з гідроаккумуляційним обладнанням залізорудних шахт .....	58
ВИСНОВКИ .....	63
ЛІТЕРАТУРНІ ДЖЕРЕЛА.....	65

## ВСТУП

Енергетична ефективність є одним із ключових факторів сталого розвитку гірничої промисловості, особливо в умовах інтенсивного видобутку залізної руди. Водовідливні комплекси шахт, що забезпечують відкачування підземних вод, є критично важливими для стабільної роботи гірничих підприємств. Разом із цим вони є одними з найбільших споживачів електроенергії, що створює потребу в оптимізації їхньої роботи.

Гідроакумулюючі електростанції (ГАЕС) пропонують перспективне рішення для забезпечення стабільності енергопостачання і раціонального використання енергетичних ресурсів. Їх інтеграція у системи електропостачання дозволяє значно знизити пікові навантаження на мережу, підвищити надійність роботи обладнання та зменшити витрати на електроенергію. Ці аспекти особливо актуальні для шахтних водовідливних комплексів, де є значні можливості для впровадження сучасних енергоефективних технологій.

Дана робота спрямована на дослідження методів та заходів, які дозволяють підвищити економічну ефективність функціонування системи електропостачання водовідливних комплексів шахт. Це включає аналіз основних параметрів енергоефективності, технічних характеристик обладнання та впровадження інноваційних систем керування.

Метою дослідження є створення науково обґрунтованих рішень, які сприятимуть оптимізації роботи водовідливних комплексів із використанням гідроаккумуляційного обладнання. Реалізація таких рішень дозволить зменшити енергетичні витрати та підвищити загальну продуктивність гірничих підприємств, що є важливим кроком до сталого розвитку гірничої галузі.

## **Розділ 1. ОСНОВНІ ПАРАМЕТРИ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ СИСТЕМ ВОДОВІДВЕДЕННЯ В ШАХТАХ**

### **1.1 Дослідження споживання електроенергії гірничими підприємствами, які використовують підземний метод видобутку залізної руди**

Серед найбільших споживачів електричної енергії на сучасному етапі розвитку промисловості чільне місце займають підприємства залізорудної галузі, особливо ті, що здійснюють видобуток сировини методом підземних розробок. Як приклад, варто зазначити, що середній місячний рівень споживання електроенергії шахтами вітчизняних підприємств, що займаються підземним видобутком чорних металів, таких як рудники або шахти, сягає значних показників у діапазоні від 22 до 26 мільйонів кВт/год.

Це зумовлює важливість залізорудних підприємств як основних споживачів електроенергії поряд із іншими енергоємними секторами. Такі підприємства впливають не лише на загальний обсяг споживання електроенергії, але й на формування графіків використання електричної енергії, рівень енергоспоживання, а також якість електроенергії, що постачається через енергомережі.

Особливу увагу необхідно приділити внутрішнім системам енергопостачання (СЕП), які функціонують на гірничодобувних підприємствах (див. рис. 1.1). У цьому контексті одним із пріоритетів є забезпечення максимально високого рівня безперебійного та надійного електропостачання. Це обумовлено тим, що більшість споживачів електроенергії на таких підприємствах належить до категорії 1. Забезпечення їх стабільної роботи є критично важливим для підтримки загальної надійності та безпеки функціонування шахт.



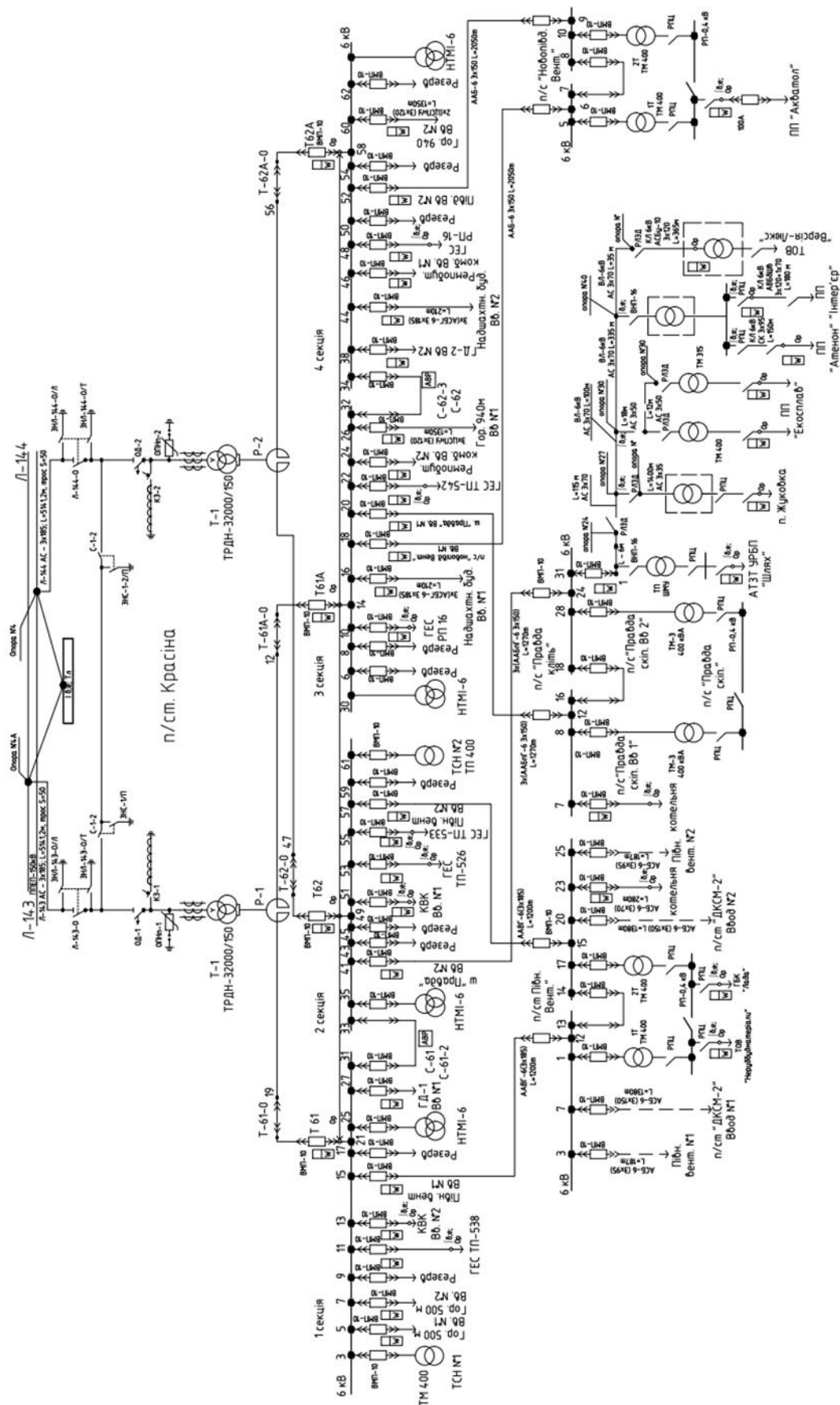


Рисунок 1.1 Внутрішні електричні системи живлення залізородних шахт

До складу основних енергетичних установок першого ступеня, від яких залежить стабільність та безпека гірничих робіт, входять так звані стаціонарні енергетичні комплекси. Ці установки є ключовими об'єктами енергоспоживання через їх високу конструктивну складність та значний рівень енергоємності. Варто зазначити, що саме ці енергетичні приймачі споживають понад 80% загального обсягу електроенергії, який використовується на гірничодобувних підприємствах, що підкреслює їх домінуючу роль у структурі енергоспоживання.

Таке навантаження вимагає не лише якісного технічного обслуговування стаціонарного обладнання, але й постійного моніторингу системи енергопостачання з метою підвищення її ефективності та зменшення втрат. Висока енергоємність таких комплексів зумовлює потребу в запровадженні сучасних технологій оптимізації енергоспоживання та мінімізації впливу на якість енергетичних мереж, що є невід'ємною частиною загального підходу до підвищення енергоефективності в шахтних умовах.

Такий підхід дозволяє не лише зменшити витрати енергії, але й створити передумови для впровадження сталих технологій у гірничодобувному секторі, з урахуванням сучасних викликів енергетичної безпеки.

### **Особливості стаціонарних пристроїв у системах енергопостачання залізорудних шахт**

Стаціонарні пристрої являють собою складні багатофункціональні комплекси, які базуються на використанні розбірних енергомеханічних вузлів. Вони забезпечують виконання різноманітних критично важливих завдань у технологічному процесі видобутку корисних копалин і функціонування шахт. До ключових напрямів їхнього застосування належать:

1. **Транспортування корисних копалин і пустої породи на поверхню.** Це завдання реалізується за допомогою спеціалізованих підйомних механізмів, які отримали назву стрибкових підйомників. Їх робота полягає в ефективному піднятті значних обсягів матеріалів із підземних горизонтів.

2. **Транспортування вантажів, матеріалів та людей.** Для виконання цих завдань використовуються клітьові підйомні пристрої. Вони призначені для підйому та спуску як людей, так і необхідного обладнання чи інших вантажів між рівнями шахти.

3. **Відкачування підземних вод.** Дренажні комплекси відіграють важливу роль у підтримці стабільної роботи шахт, забезпечуючи ефективне видалення води з гірничих виробок.

4. **Системи вентиляції.** Основні вентилятори відповідають за штучне провітрювання шахтних виробок. Це дозволяє створювати безпечні та комфортні умови для роботи шахтарів, підтримуючи необхідний рівень кисню в атмосфері виробок.

5. **Генерація пневматичної енергії.** Компресорні установки є джерелом стисненого повітря, яке широко використовується для роботи бурових і відбійних молотків, гірничих комбайнів, лебідок, а також вентиляторів місцевого провітрювання.

Ці стаціонарні об'єкти формують основу енергетичної інфраструктури шахт і забезпечують виконання ключових процесів видобутку корисних копалин. Зазначені системи демонструють високий рівень енергоємності, що робить їх критичним фактором у загальному обсязі енергоспоживання.

### **Варіативність споживання енергетичних ресурсів**

Аналіз даних, представлених у таблиці 1.1, свідчить про те, що обсяги споживання енергії в різних шахтах значно відрізняються. Основними факторами, які впливають на це, є:

- **Обсяги видобутку корисних копалин.** Чим більше мінеральної сировини видобувається, тим більше енергетичних ресурсів потрібно для її транспортування та обробки.
- **Глибина розробки.** Зі збільшенням глибини шахт зростають витрати на підняття вантажів, забезпечення вентиляції та освітлення.
- **Обсяги підземних вод.** Чим більший приплив води, тим більше енергії витрачається на її відкачування.
- **Протяжність підземних горизонтів.** Більша довжина виробок збільшує потребу в енергоресурсах для їхнього освітлення, вентиляції та обслуговування.

### **Контроль і планування енергоспоживання**

У сучасних умовах функціонування гірничодобувних підприємств, які спрямовані на зниження собівартості виробництва чорних металів, важливу роль відіграє оптимізація споживання енергетичних ресурсів. Для цього застосовуються спеціальні методики, що дозволяють визначати контрольні показники енергоспоживання для кожного структурного підрозділу підприємства як у розрізі добових показників, так і погодинно.

На рисунку 1.2 наведені приклади графіків, які демонструють фактичне та планове енергоспоживання залізорудними шахтами України. Ці дані дозволяють аналізувати відхилення від запланованих показників і впроваджувати корективи для підвищення ефективності роботи.

Таблиця 1.1 – Дані про споживання електроенергії та її вартість на залізорудних шахтах України (грудень 2020 року)

Шахти	Спожи- вання ЕЕ, тис. кВт·год	Питома частка енерго- споживання, %	Обсяги сплати за спожиту ЕЕ, тис. грн.	Питома частка сплати за ЕЕ, %	Питома вартість, грн/ кВт·год
ш. Покровська (м. Кривий Ріг)	3871,095	14,40	3510,437	13,04	0,90683
ш. Криворізька (м. Кривий Ріг)	6014,121	22,38	5541,670	20,59	0,92144
ш. Козацька (м. Кривий Ріг)	3919,249	14,58	4263,806	15,84	1,08791
ш. Тернівська (м. Кривий Ріг)	3522,988	13,11	3291,708	12,23	0,93435
ш. ім. Фрунзе (м. Кривий Ріг)	4104,824	15,27	4620,472	14,81	1,12562
ш. Ювілейна (м. Кривий Ріг)	5073,224	15,12	4793,081	14,62	0,94478
ш. ім. Артема (м. Кривий Ріг)	4576,334	16,78	4510,298	14,95	0,98557
ш. Гігант-Глибока (законсервована) (м. Кривий Ріг)	3376,675	89,23	3844,850	88,45	1,13865
ш. Експлуатаційна (м. Дніпрорудне)	3567,732	14,94	3729,671	13,64	1,04539

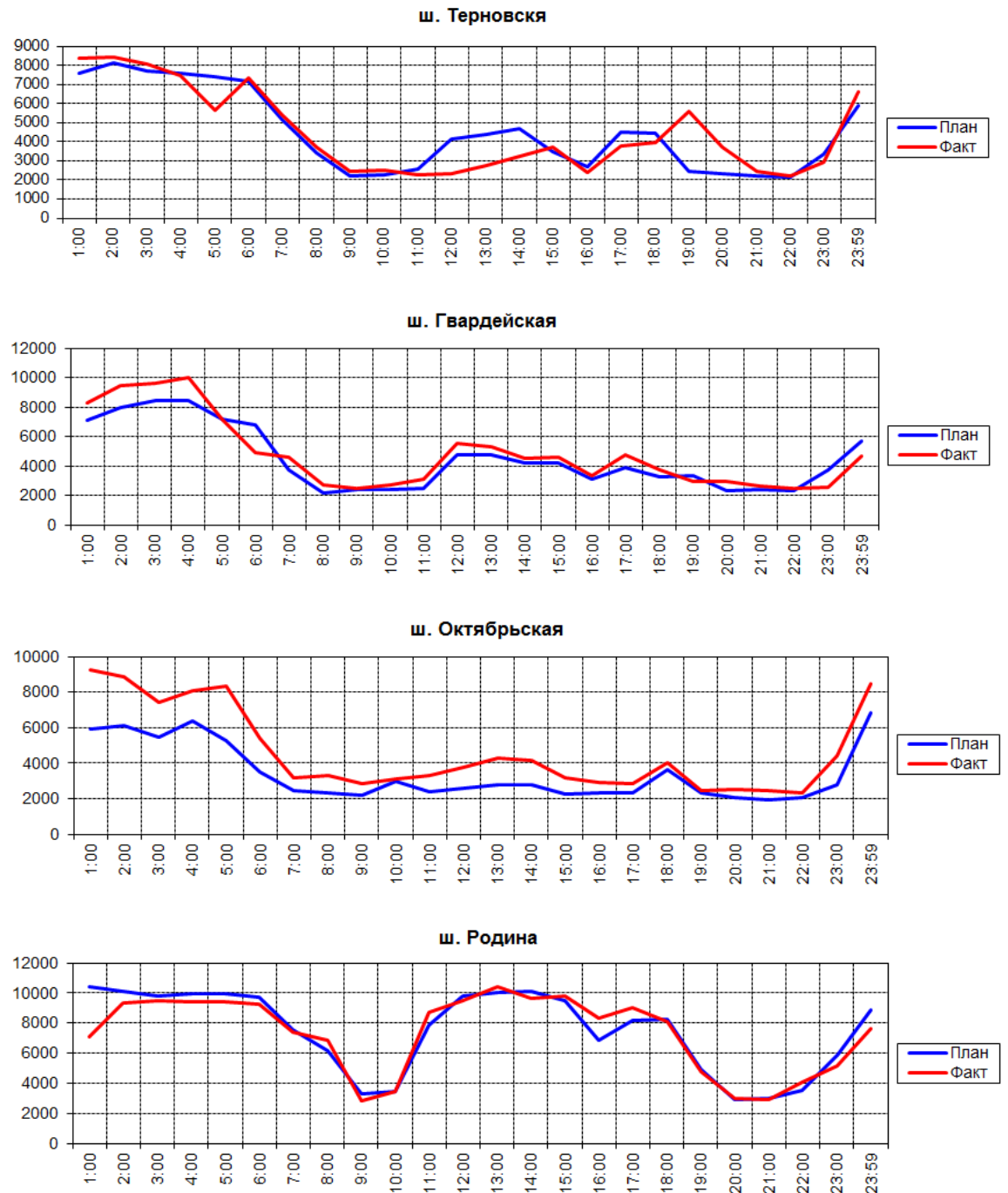


Рисунок 1.2 – Графіки фактичного і планового споживання активної електроенергії залізорудних шахт в Україні (25.09.2020 р.)

Результати такого підходу сприяють зниженню втрат енергії, раціоналізації використання ресурсів і підвищенню конкурентоспроможності залізорудної галузі на енергетичному ринку України.

Результати, представлені на графіках (рис. 1.2), свідчать про те, що характер споживання електроенергії на залізорудних шахтах є динамічним і

може суттєво змінюватися. Однією з важливих особливостей є те, що рівень розбіжностей між плановими та фактичними показниками енергоспоживання має унікальні риси для кожного підприємства. При цьому, незважаючи на індивідуальні особливості, загальна тенденція демонструє стабільний приріст споживання електроенергії як у нічний, так і в денний час.

Цей стабільний приріст, попри певні відхилення, дає змогу зробити висновок про відносну передбачуваність використання енергетичних ресурсів. Такий підхід дозволяє підприємствам краще планувати енергоспоживання та знижувати витрати за рахунок оптимізації роботи основних енергомістких установок.

### **Диференційований підхід до аналізу споживання електроенергії**

Особливої уваги заслуговує розподіл електроенергії між різними типами споживачів на підприємствах. Проведення диференційованої оцінки такого розподілу дозволяє глибше зрозуміти особливості роботи кожної структурної складової шахти. Це також створює базу для подальших досліджень і впровадження більш ефективних енергозберігаючих рішень.

На діаграмі (рис. 1.3) показано непрямий розподіл електроенергії між окремими структурними компонентами старих залізородних шахт. При цьому до аналізу не включено компресорні установки електроцеху, що також може впливати на підсумкові результати.

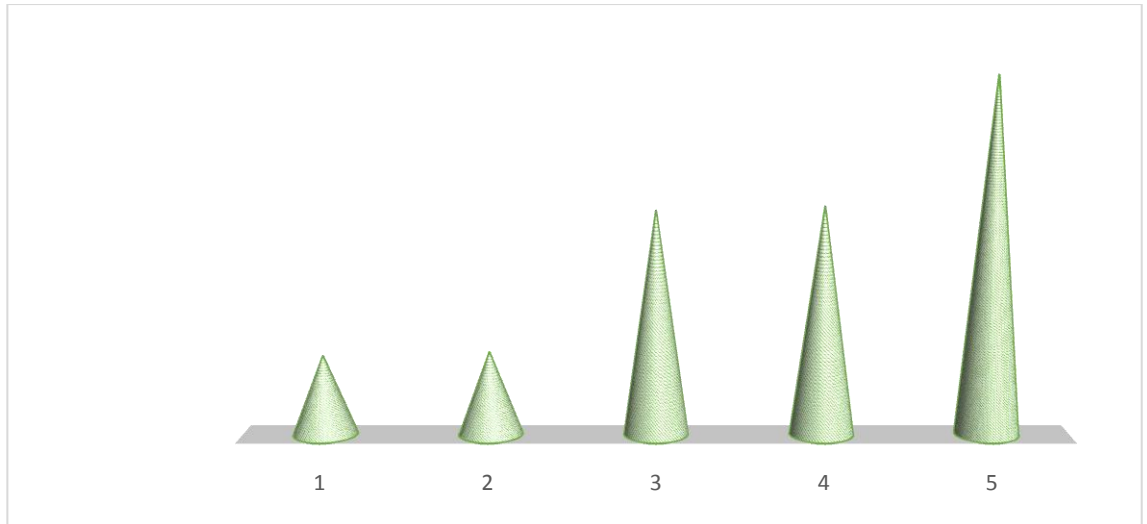


Рисунок 1.3 – Середнє розподілення рівнів електроспоживання енергоємних споживачів при підземному (шахтному) видобутку залізної руди за період 2016–2021 рр.: 1 – інші; 2 – ДСФ; 3 – вентиляція; 4 – скіповий підйом; 5 – водовідлив.

### **Практичне значення представлених даних**

Такий підхід до аналізу дає змогу не лише побачити загальні тенденції у споживанні енергії, але й визначити, які саме структурні частини шахт споживають найбільше ресурсів. Це є важливим інструментом для розробки стратегій підвищення енергоефективності, а також для створення прогнозів щодо подальших витрат на енергопостачання.

У контексті модернізації гірничодобувних підприємств такі дослідження відкривають можливості для впровадження новітніх технологій, що сприяють зменшенню енергетичних витрат без шкоди для продуктивності. Аналіз розподілу електроенергії між різними типами споживачів є ключовим кроком до досягнення цих цілей.

Аналізуючи представлену діаграму, можна зробити висновок, що більша частина електроенергії (понад 90%) припадає на два основних типи енергоспоживачів — вентиляційні установки та скіпові підйомні механізми. Ці установки забезпечують ключові етапи видобутку та транспортування



залізної руди, а також створення безпечних умов для роботи персоналу в підземних виробках.

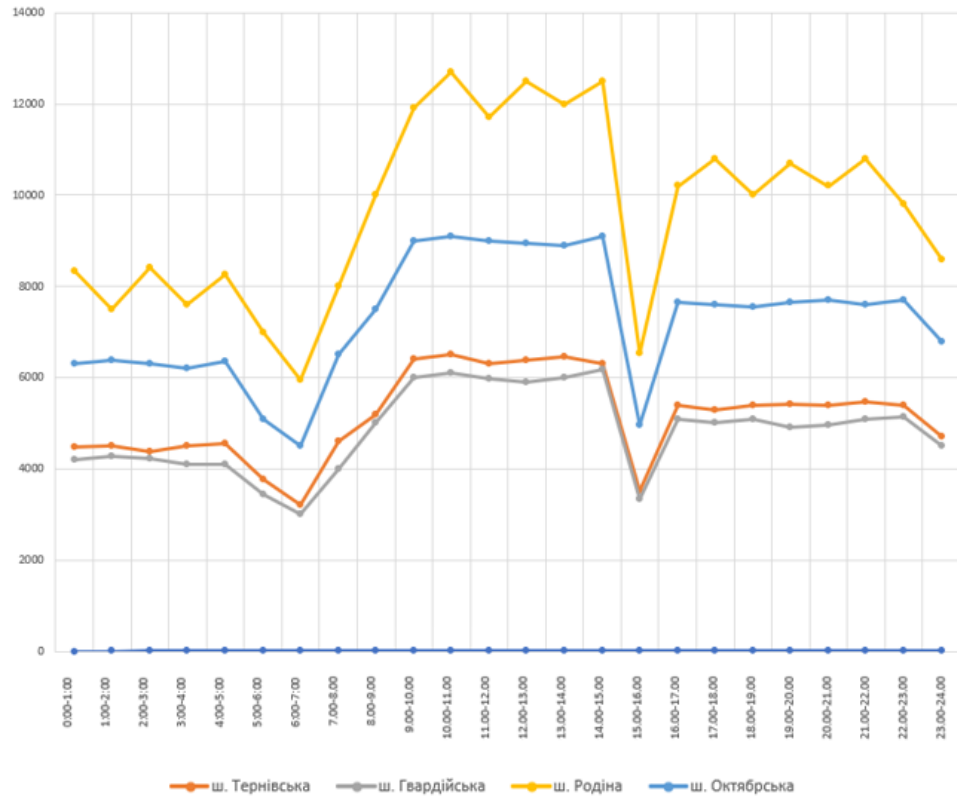
### **Інші джерела споживання енергії**

Інші споживачі енергії представлені як наземним, так і підземним обладнанням, серед якого можна виділити:

- **Ножові установки,** які забезпечують дроблення та підготовку сировини до подальшого транспортування.
- **Компресорні установки,** які генерують стиснене повітря для роботи пневматичних систем.
- **Дозатори та дробарки,** що використовуються для технологічної обробки видобутої сировини.
- **Електропоїзди,** які здійснюють транспортування матеріалів у межах підземних горизонтів.

### **Індивідуальні особливості енергоспоживання шахт**

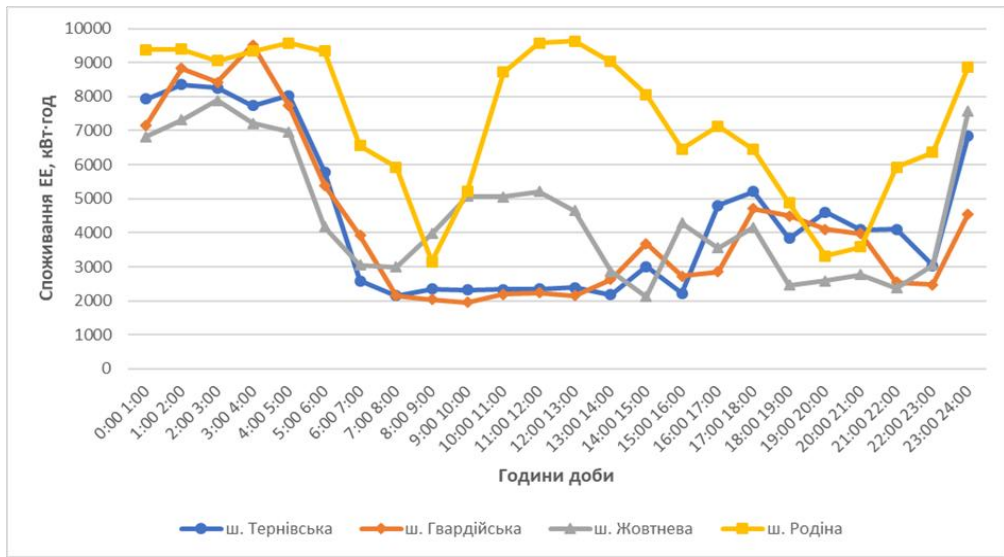
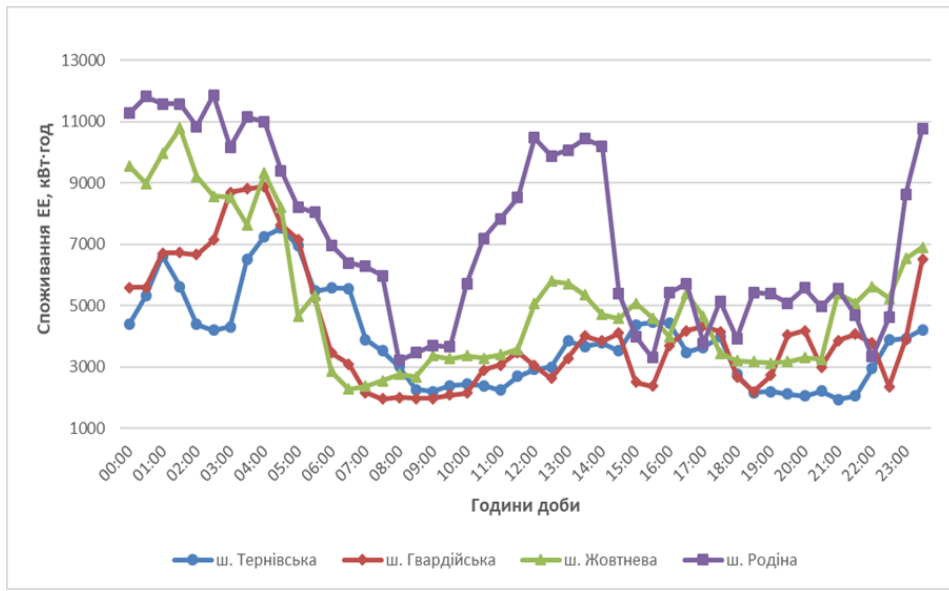
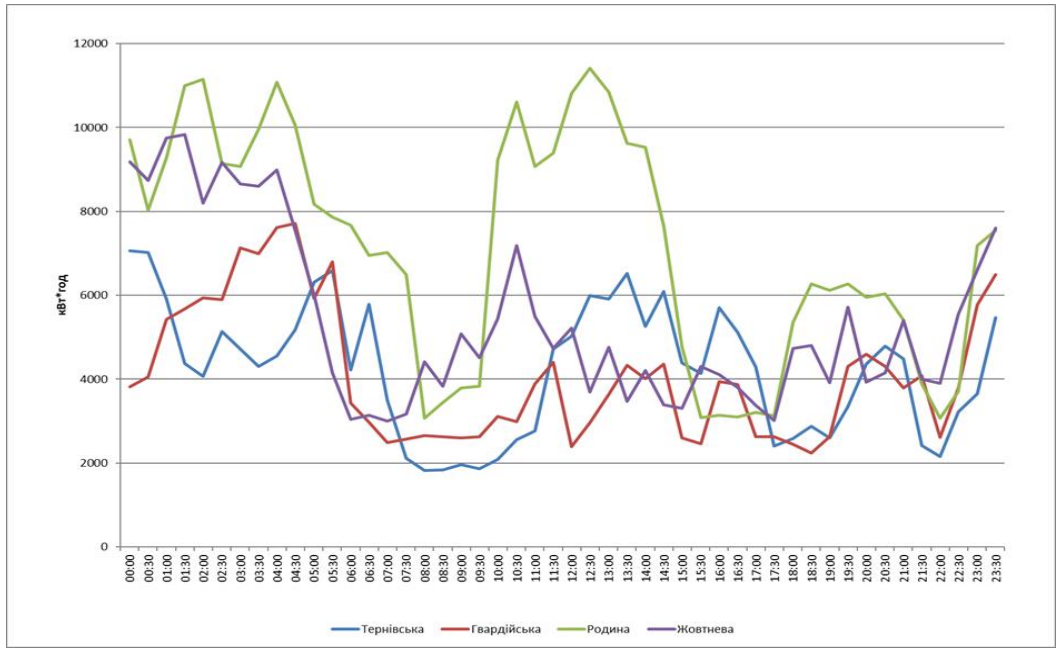
Варто зазначити, що рівні електроспоживання різними енергоємними установками суттєво відрізняються між шахтами, як показано на рисунку 1.4.



A)



B)



На рисунку 1.4 представлено дані щодо споживання електроенергії залізорудними шахтами Криворізького басейну в окремі дати різних років:

- А) 23 квітня 1999 року;
- Б) 23 квітня 2012 року;
- В) 23 квітня 2013 року;
- Г) 23 квітня 2015 року;
- Д) 23 квітня 2020 року.

Ці графіки ілюструють, як змінювалося енергоспоживання залежно від впроваджуваних тарифних політик, технічних умов роботи шахт і загальної модернізації енергетичної системи.

Така варіативність обумовлена технічними особливостями кожної окремої шахти, які впливають на режими роботи обладнання. Зокрема, на енергоспоживання можуть впливати такі фактори:

- Глибина видобувних робіт.
- Протяжність вентиляційних і транспортних систем.
- Кількість підземних вод, що підлягають відкачуванню.
- Тип використовуваного обладнання та його

енергоефективність.

### **Неможливість універсального алгоритму управління**

Через велику кількість індивідуальних технічних характеристик шахт, створення єдиного алгоритму управління режимами енергоспоживання для всіх підприємств є неможливим. Така специфіка стосується навіть шахт, які входять до складу одного технологічного комплексу, наприклад, заводів або концернів.

Розробляючи алгоритми управління енергоспоживанням, необхідно враховувати:

- Унікальність технічного обладнання кожної шахти.
- Інтеграцію шахти в технологічний ланцюг із іншими об'єктами.

- Локальні особливості роботи стаціонарних установок.

Ці аспекти є важливими для забезпечення ефективності роботи енергетичних систем шахти та оптимізації витрат на електроенергію.

### **Вплив тризонного тарифу до 2019 року**

До 2019 року для промислових підприємств, включно із залізорудними шахтами, діяв **тризонний тариф на електроенергію**, що передбачав диференційовані ставки залежно від часу доби:

- **Нічні години** мали найнижчі тарифи, стимулюючи підприємства виконувати максимальний обсяг робіт у цей період.
- **Години пікового навантаження** — ранок і вечір — супроводжувалися найвищими тарифами, що спонукало підприємства знижувати активність у цей час.

Ця модель була вигідною для обох сторін:

1. **Для підприємств.** Шахти могли суттєво скоротити витрати на електроенергію, перенісши основні операції (наприклад, скіпові підйоми, вентиляцію та водовідлив) на нічний час.
2. **Для енергокомпаній.** Завдяки рівномірнішому графіку навантажень зменшувався ризик перевантаження міської електромережі в години пік, а також підвищувалася стабільність роботи всієї енергосистеми.

### **Зміни після впровадження енергетичного ринку**

З 2019 року ситуація змінилася з переходом до ринкових умов і введенням **змінних погодинних тарифів на електроенергію**. Це призвело до суттєвих змін у режимі роботи залізорудних шахт:

- Підприємства почали скорочувати обсяги робіт у нічні години, оскільки економічна вигода від їх виконання зменшилася.
- Зміна тарифів спонукала шахти переглянути свої графіки споживання електроенергії, що сприяло більш рівномірному використанню ресурсів протягом доби.

### **Наслідки для енергетичних компаній**

Новий підхід до тарифікації зменшив незбалансованість у споживанні електроенергії, яка раніше була характерною для промислових споживачів. Енергетичні компанії отримали можливість краще планувати свої ресурси, знизити витрати на компенсацію перевантажень у пікові години та забезпечити більш стабільне енергопостачання.

### Графіки споживання на залізорудних шахтах

На рисунках 1.5 – 1.12 наведено детальні добові графіки споживання електроенергії основними технологічними процесами — такими як скіпові підйоми, ДСФ, вентиляція та водовідведення — на чотирьох залізорудних шахтах. Дані охоплюють періоди до та після запровадження енергетичного ринку.

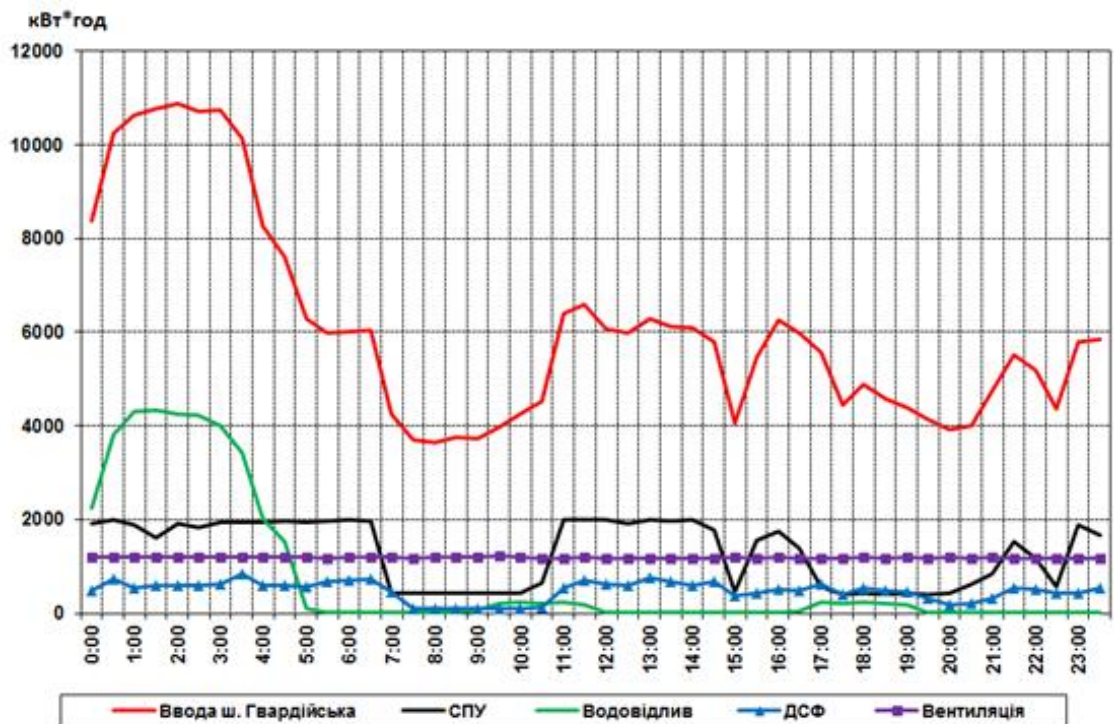


Рисунок 1.5 – Графік добового споживання електроенергії на Козацькій шахті (м. Кривий Ріг) 25.11.2018 (до впровадження енергоринку).

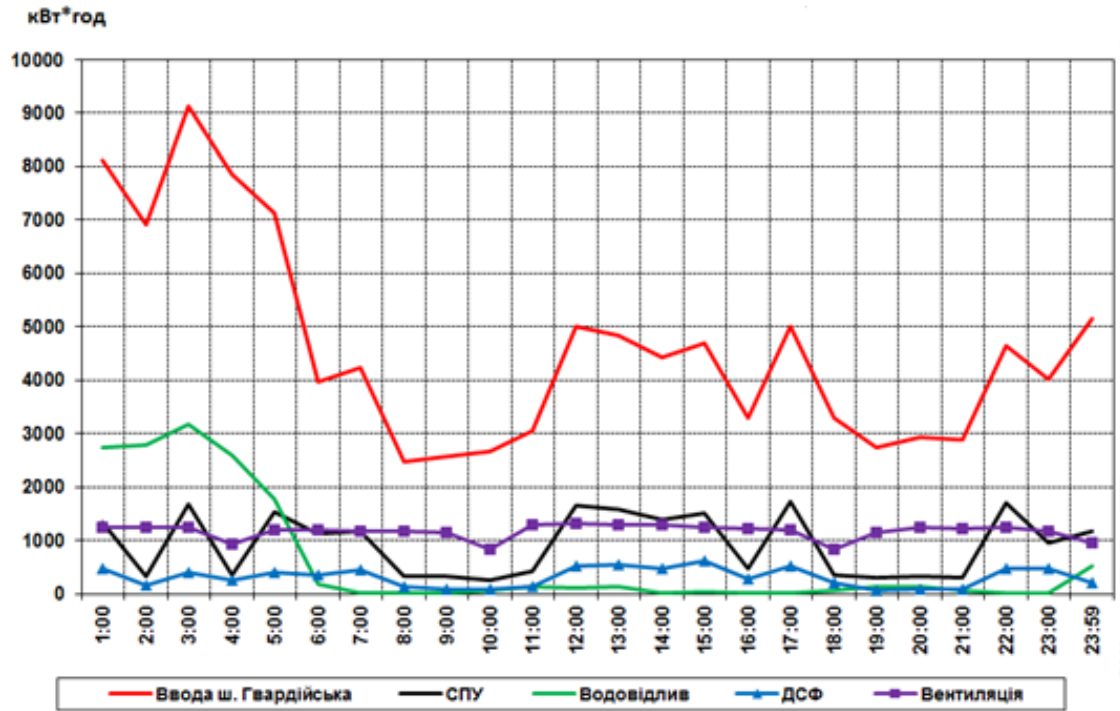


Рисунок 1.6 – Графік добового споживання електроенергії на Козацькій шахті (м. Кривий Ріг) 08.10.2019 (після впровадження енергоринку).

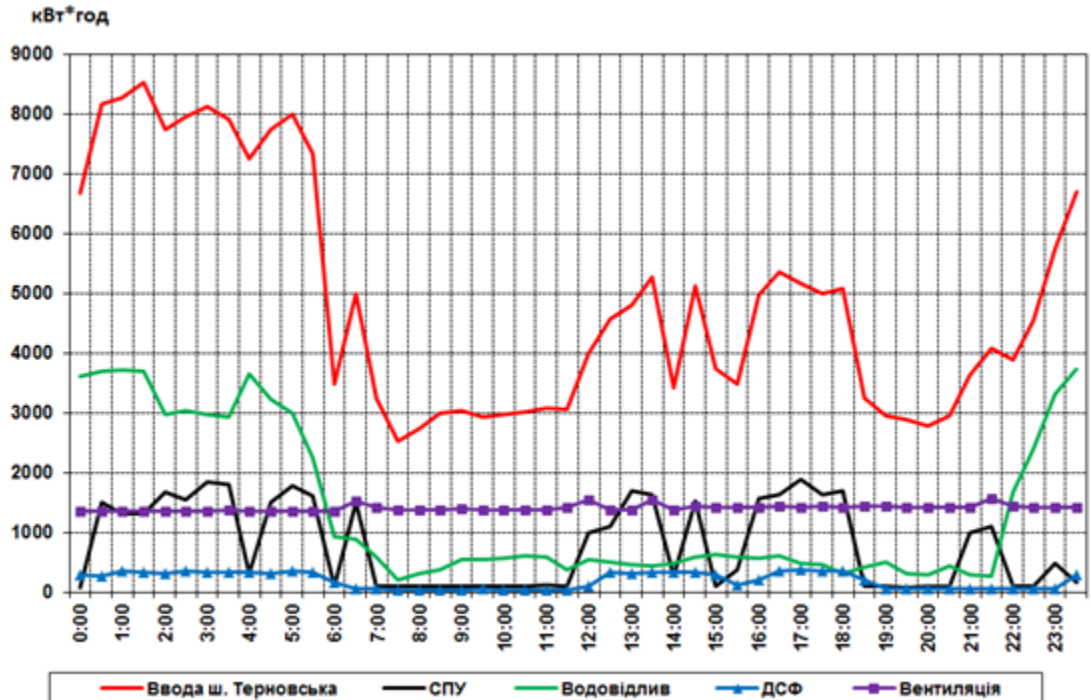


Рисунок 1.7 – Графік добового споживання електроенергії на Тернівській шахті (м. Кривий Ріг) 25.11.2018 (до впровадження енергоринку).

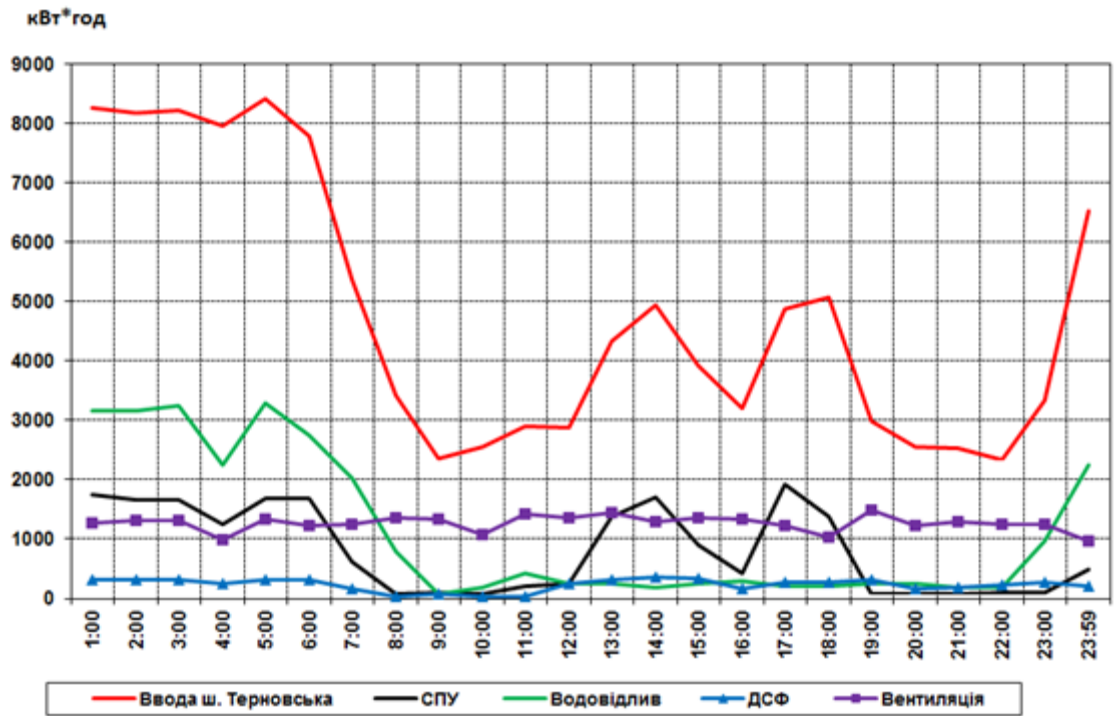


Рисунок 1.8 – Графік добового споживання електроенергії на Тернівській шахті (м. Кривий Ріг) 08.10.2019 (після впровадження енергоринку).

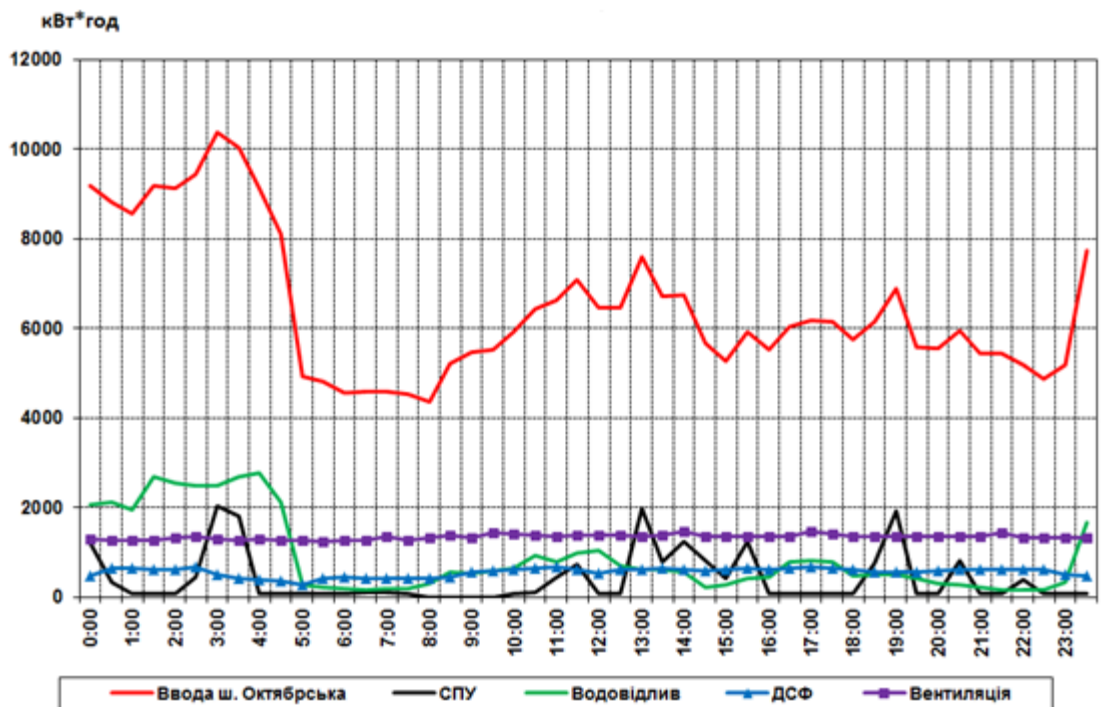


Рисунок 1.9 – Графік добового споживання електроенергії на Покровській шахті (м. Кривий Ріг) 25.11.2018 (до впровадження енергоринку).



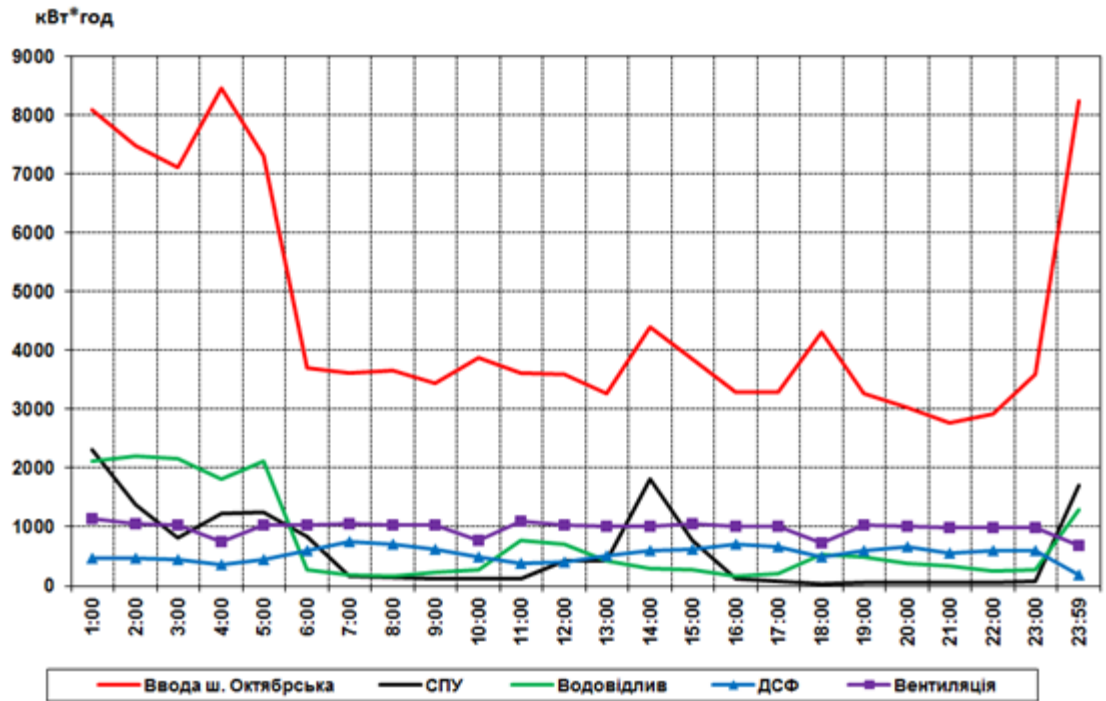


Рисунок 1.10 – Графік добового споживання електроенергії на Покровській шахті (м. Кривий Ріг) 08.10.2019 (після впровадження енергоринку).

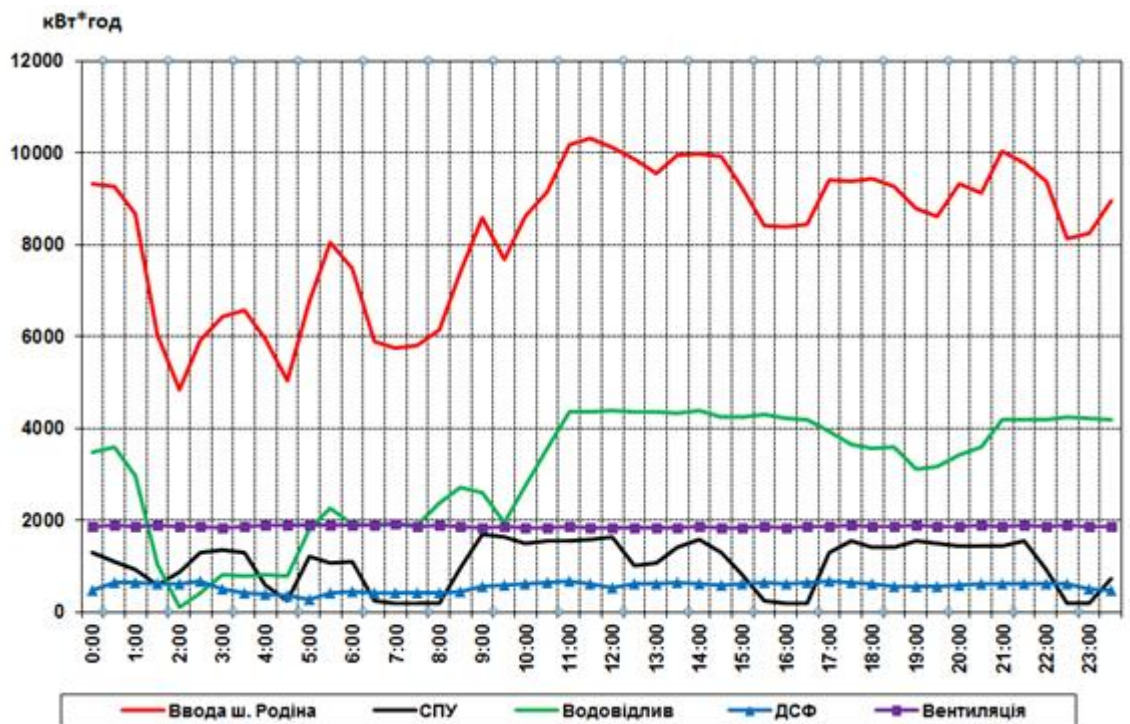


Рисунок 1.11 – Графік добового споживання активної потужності на Криворізькій шахті (м. Кривий Ріг) 25.11.2018 (до впровадження енергоринку).

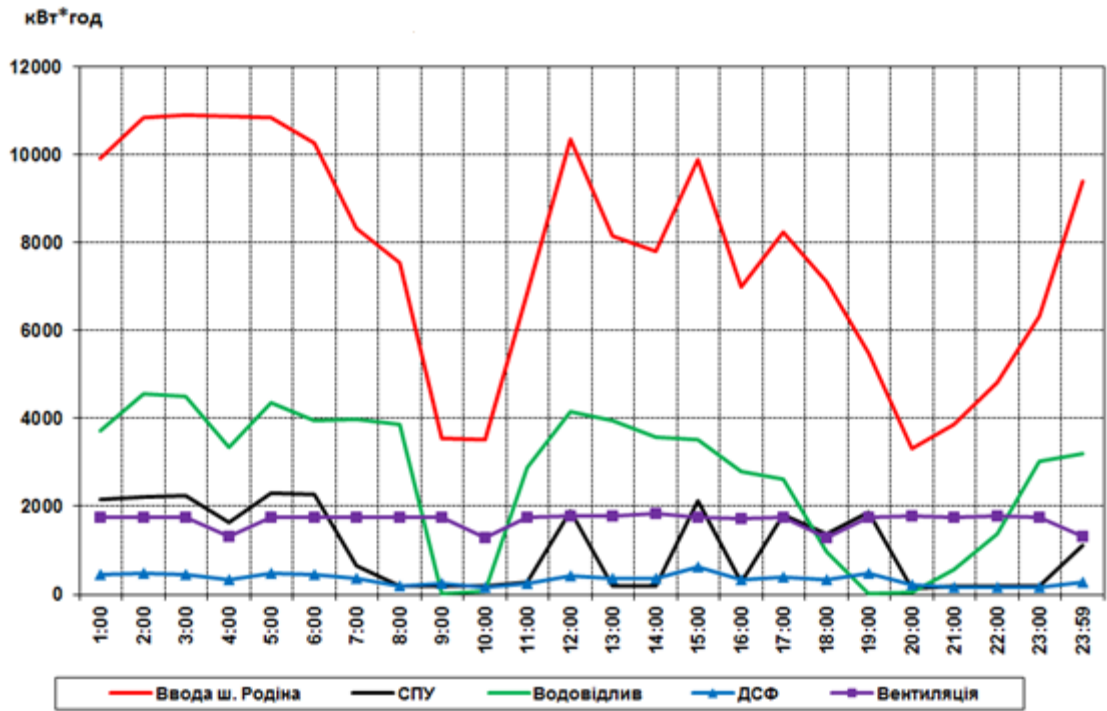


Рисунок 1.12 –Графік доби споживання електроенергії Криворізька ш. (м. Кривий Ріг) 08.10.2019 (після запровадження енергоринку)

Ці графіки дають змогу простежити, як змінилися режими роботи шахт із впровадженням нових правил, і оцінити ефективність заходів, спрямованих на оптимізацію енергоспоживання. Аналіз таких даних є ключовим для прийняття стратегічних рішень щодо подальшого розвитку шахт і забезпечення їх конкурентоспроможності в нових умовах енергетичного ринку.

### **Розширений аналіз графіків споживання електроенергії та факторів впливу на енергоспоживання залізорудних шахт**

#### **Роздільна здатність графіків і їхній вплив на якість аналізу**

Ретельне вивчення графіків споживання електроенергії свідчить про значні відмінності в їхній роздільній здатності для 2018 та 2019 років. Так, графіки за 2018 рік мають часову дискретність у 30 хвилин, що дає можливість детально відстежувати зміни в енергоспоживанні в короткі часові проміжки. Завдяки цьому вони більш точно відображають динаміку енергоспоживання та дозволяють виявляти навіть незначні коливання, які могли б залишитися непомітними при меншій роздільній здатності.

Натомість графіки 2019 року мають дискретність у 1 годину, що знижує рівень деталізації та може приховувати короточасні зміни. Проте вони також надають цінну інформацію, зокрема демонструють загальне зниження рівня енергоспоживання всіма категоріями споживачів на шахті "Козацька".

### **Зниження споживання електроенергії на шахті "Козацька"**

Дані аналізу споживання електроенергії на шахті "Козацька" в м. Кривий Ріг свідчать про суттєве скорочення обсягів енергоспоживання у 2019 році. Це зниження стало результатом цілеспрямованих заходів з оптимізації роботи електрообладнання на стаціонарних установках. Одним із ключових факторів стало вдосконалення режимів роботи водовідведення, яке відіграє важливу роль у забезпеченні безпеки шахтних робіт.

#### **Особливості роботи водоскидних споруд:**

- У 2018 році водовідведення здійснювалося вночі з 00:30 до 04:30.
- У 2019 році період роботи було розширено: водоскидні споруди працювали з 23:00 до 05:30.

Це розширення часу роботи насосів дозволило зменшити пікові навантаження на енергосистему вночі, розподіливши споживання більш рівномірно. Такий підхід знизив максимальну амплітуду споживання електроенергії, що позитивно вплинуло на стабільність напруги в енергетичній мережі шахти.

#### **Динаміка споживання електроенергії: основні фактори**

Загальний рівень споживання електроенергії шахтою та характер змін у часі визначаються передусім роботою двох основних категорій обладнання:

1. **Шахтні тягові агрегати.** Вони забезпечують підйом залізної руди на поверхню, і їхня енергоспоживання залежить від глибини розробки та обсягів видобутку.

2. **Дренажні установки.** Це обладнання, яке відкачує підземні води, споживає значну частку електроенергії, особливо в умовах глибоких шахт із високим рівнем водопритоку.

Суттєвий вплив на загальний рівень енергоспоживання мають природні процеси, пов'язані з поглибленням шахт.

**Причини зростання енергоспоживання:**

- Збільшення відстаней підйому залізної руди та шахтних вод на поверхню.
- Зміна гірничо-геологічних умов, що вимагає більш тривалих транспортних робіт.
- Ускладнення вентиляційних і дренажних систем у міру освоєння глибших горизонтів.

**Необхідність економічно обґрунтованого підходу**

Постійне зростання енергоспоживання залізорудними шахтами підкреслює потребу в детальному аналізі процесів електропостачання та електроспоживання. Оптимізація цих процесів дозволить:

- Скоротити витрати підприємств на енергопостачання.
- Підвищити ефективність роботи ключового обладнання.
- Забезпечити стабільність функціонування енергосистеми шахти.

Таким чином, вивчення динаміки споживання електроенергії та впровадження сучасних методів управління є важливим кроком до підвищення конкурентоспроможності залізорудної галузі та створення умов для сталого розвитку цього сектора промисловості.

## **1.2 Аналіз електроенергетичних та технологічних характеристик під час відведення підземних вод із гірничих виробок залізорудних шахт**

В умовах експлуатації залізорудних шахт для відведення підземних вод із гірничих виробок можуть використовуватися різні схеми організації водовідливу. Однією з таких схем є **ступінчаста конфігурація головного водовипуску**, яка забезпечує послідовне з'єднання насосних агрегатів, розташованих на різних горизонтах шахти.

### **Особливості роботи ступінчастої схеми**

У цій схемі насосний агрегат, що знаходиться на верхньому горизонті, функціонує у зв'язці з насосом, розташованим нижче рівня. Така конфігурація дозволяє оптимізувати енергоспоживання, оскільки кожен насос виконує певну частину роботи, спрямовану на підйом шахтних вод на різні висоти.

- **Розташування насосів у камерах.** Найчастіше насосні агрегати встановлюються вище рівня води в резервуарі, що забезпечує їхній стабільний запуск і експлуатацію. Проте в окремих випадках насоси можуть монтуватися нижче рівня води, залежно від технологічних умов і конструктивних особливостей шахти (див. рис. 1.14).

### **Дані про споживання електроенергії водовідливними установками**

Для оцінки ефективності роботи водовідливних установок важливо враховувати обсяг електроенергії, який вони споживають за добу. У таблиці 1.2 та в Додатку А наведено детальну інформацію про показники добового споживання електроенергії насосними установками, які використовуються на залізорудних шахтах України.

Таблиця 1.2 – Добове споживання електроенергії водовідливними установками на залізорудних шахтах України.

Шахти	Добова електроенергія, кВт·год		
	День	Ніч	Всього
ш. Покровська (м. Кривий Ріг)	41091	34030	75121
ш. Криворізька (м. Кривий Ріг)	13712	14215	27927
ш. Козацька (м. Кривий Ріг)	1458	25537	26995
ш. Тернівська (м. Кривий Ріг)	13446	17322	30768
ш. ім. Фрунзе (м. Кривий Ріг)	2407	15247	17654
ш. Ювілейна (м. Кривий Ріг)	6884	24405	31289
ш. ім. Артема (м. Кривий Ріг)	5832	17496	23328
ш. Гігант-Глибока (законсервована) (м. Кривий Ріг)	15967	29653	45620
ш. Експлуатаційна (м. Дніпрорудне)	7221	37884	45105

- **Таблиця 1.2** містить узагальнені дані щодо витрат енергії, які демонструють залежність між обсягами водовідведення, технічними характеристиками насосів і загальним рівнем енергоспоживання.

- У **Додатку А** надано додаткові показники, які дозволяють зробити глибший аналіз роботи водовідливних систем із урахуванням різних умов експлуатації та типів обладнання.

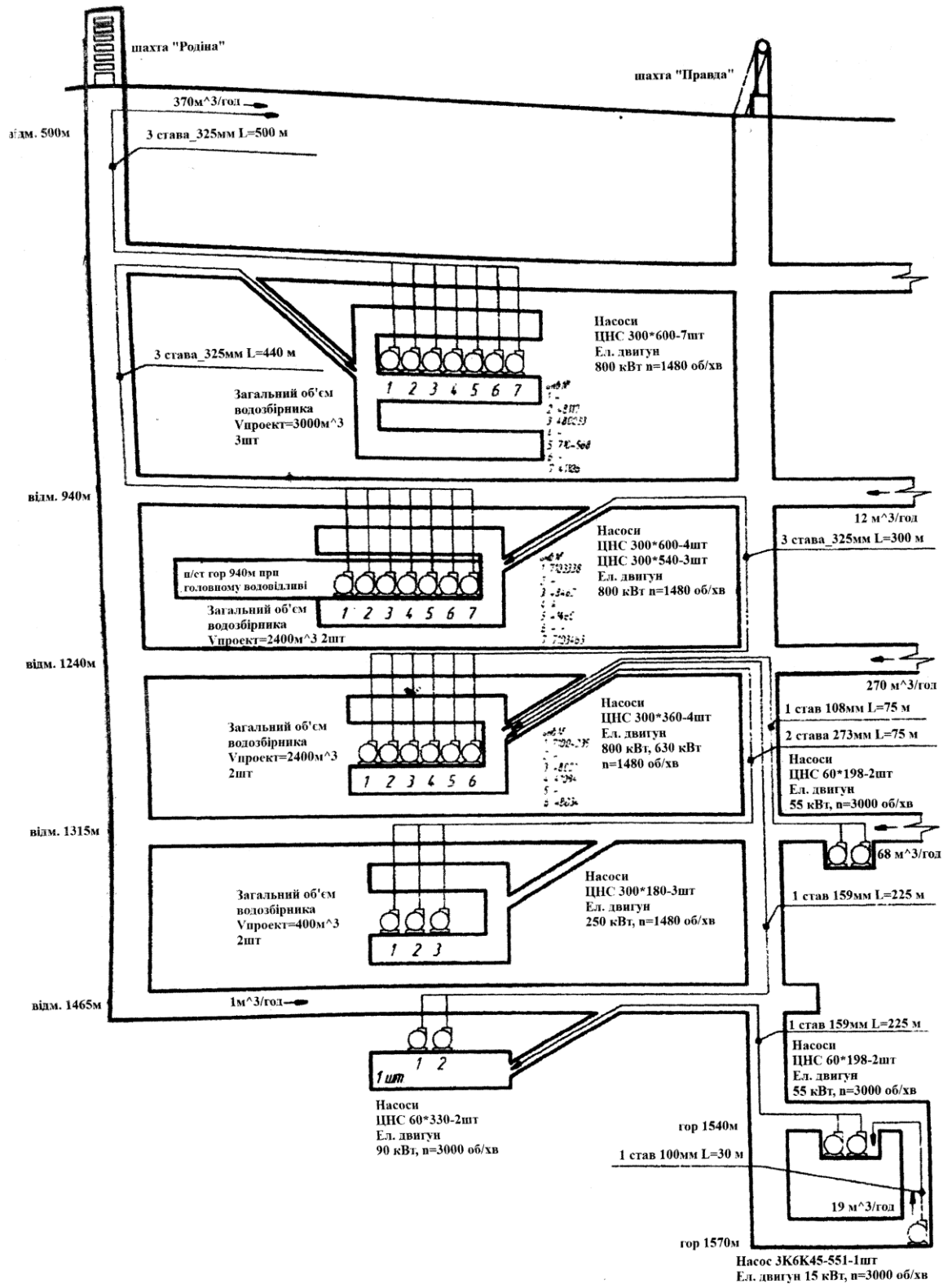


Рисунок 1.13 – Насосна станція з водовідливними установками на об'єднаному водовідливні шахт «Правда» та «Криворізька» (м. Кривий Ріг).

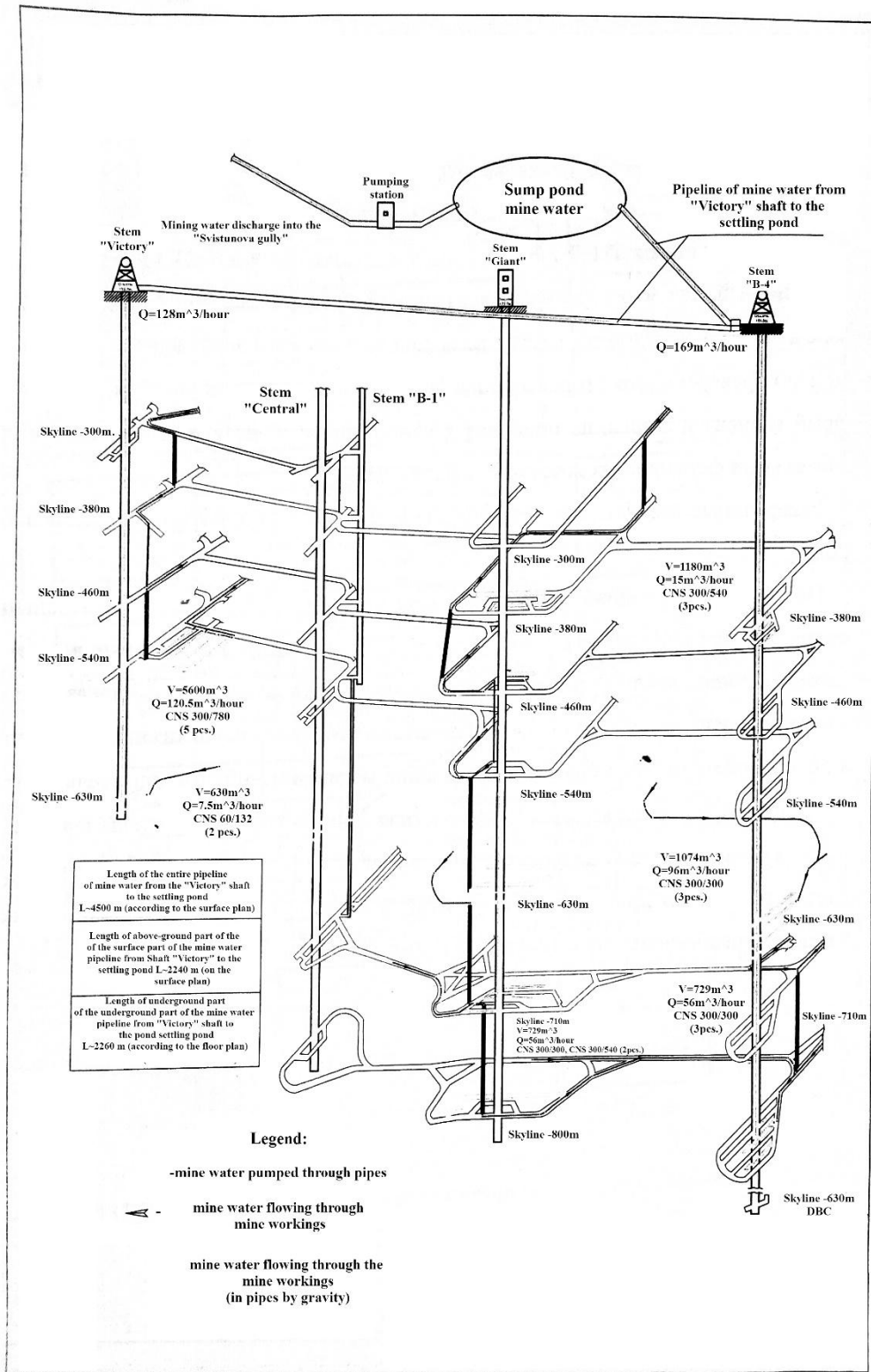


Рисунок 1.14 – Насосна станція з обладнанням для зневоднення на непрацюючій шахті «Гігант-Глибока» (м. Кривий Ріг)



### **Значення технологічного підходу до організації водовідведення**

Ефективна організація процесу відведення шахтних вод є важливою складовою забезпечення стабільності та безпеки роботи шахти. Використання оптимальних схем, таких як ступінчаста, сприяє зниженню енергетичних витрат і збільшенню терміну служби насосного обладнання.

Таким чином, аналіз електроенергетичних та технологічних показників водовідведення дозволяє не лише оцінити поточний стан систем, а й розробити рекомендації для їхньої модернізації, що сприятиме підвищенню загальної ефективності шахтного виробництва.

Ретельний аналіз даних, поданих у таблиці 1.2, дозволяє дійти висновку, що обсяги споживання електроенергії, необхідної для виконання процесу відкачування води, варіюються в діапазоні від 6,2 до 7,2 кВт·год/м. Цей рівень енергоспоживання характерний навіть для тих шахт, які вже припинили свою виробничу діяльність, проте продовжують виконувати водовідливні роботи з метою запобігання підтоплення поверхневих територій.

Одним із прикладів такої шахти в регіоні Кривбасу є недіюча шахта «Гігант-Глибока». На рисунку 1.15 представлені графіки, які демонструють показники споживання електроенергії цією шахтою в період з 2013 по 2020 роки. Згідно з наведеними даними, середньодобовий обсяг електроспоживання становить від 43 200 до 55 000 кВт·год, тоді як обсяги відкачуваної води в добу знаходяться в межах від 6 170 до 7 800 м<sup>3</sup>.

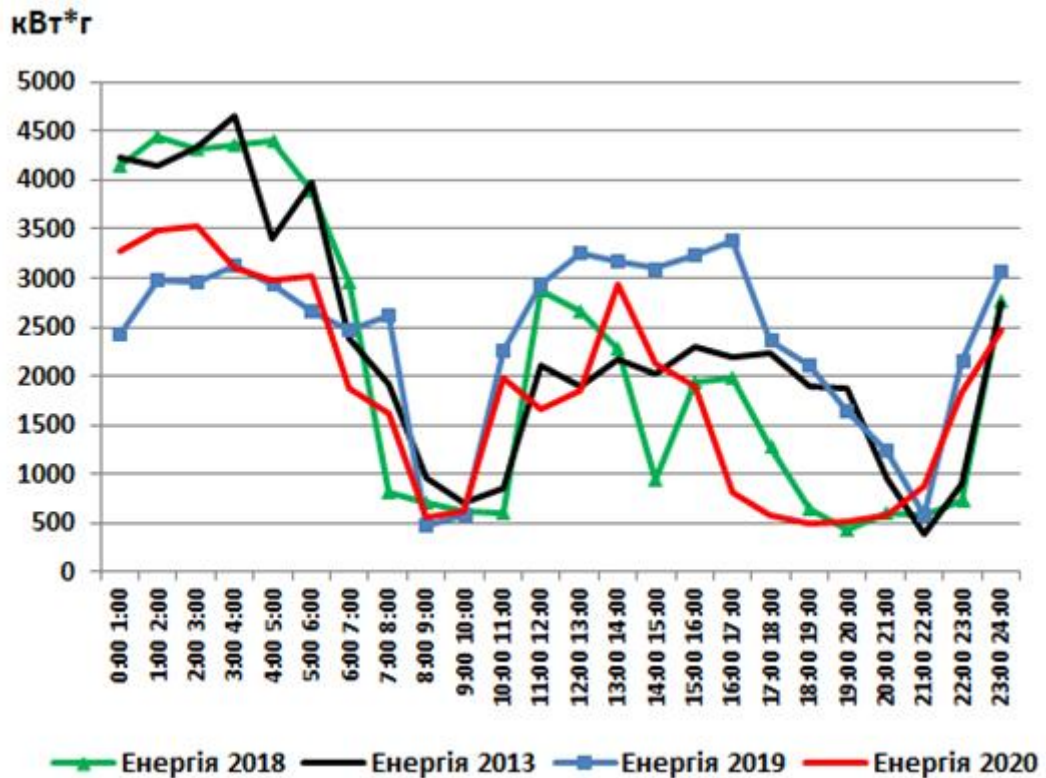


Рисунок 1.15 - Графіки доби споживання електроенергії на непрацюючій шахті «Гігант-Глибока» (м. Кривий Ріг) 2013-2020 рр.

Аналіз графіків показує, що процес відкачування води здійснюється безперервно, як у денний, так і в нічний час. Разом з тим, варіації рівня споживання електроенергії пов'язані з періодичними змінами у роботі обладнання. Зокрема, наявність коливань пояснюється збуреннями, викликаними функціонуванням клітьових підйомників, які використовуються для транспортування обслуговуючого персоналу на різні горизонти шахти під час спуску і підйому.

На основі представлених графіків можна чітко побачити, що динаміка споживання електроенергії протягом доби залишається стабільно синхронною з року в рік. Така повторюваність підтверджує наявність значного потенціалу для оптимізації процесу через ефективне управління взаємодією між споживачами електроенергії та регуляторами.

Що стосується недіючих шахт, проблема енергоефективності насосів для відкачування води здебільшого має одновимірний підхід до вирішення.

Основний фактор, що враховується, — це час доби, без детального аналізу інших технічних чинників, які можуть впливати на функціонування підземних гірничих систем у різні періоди. У той час, як на шахтах, що продовжують виробничу діяльність, дана проблема набуває багатовимірного характеру. Тут доводиться враховувати різноманітні технологічні, енергетичні та організаційні аспекти.

Попри ці відмінності, весь процес розробки та функціонування систем водовідливу для як діючих, так і недіючих шахт об'єднаний у межах єдиної гідроенергетичної структури. Це свідчить про наявність спільних принципів і підходів у проектуванні та експлуатації даних систем.

Для більш детального ознайомлення з особливостями водовідливних установок, у таблиці 1.3 наведено характеристики відповідних систем, що використовуються на кількох залізрудних шахтах України.

Таблиця 1.3 – Характеристика водовідливних систем шахт.

Шахти	Добовий водоприплив, м <sup>3</sup>	Питомий водоприплив, м <sup>3</sup> /год	Обсяг водозбірника, м <sup>3</sup>
ш. Криворізька (м. Кривий Ріг)	11429	476	26600
ш. Покровська (м. Кривий Ріг)	3112	129	20080
ш. Козацька (м. Кривий Ріг)	3410	142	15000
ш. Тернівська (м. Кривий Ріг)	4392	183	15548
ш. ім. Фрунзе (м. Кривий Ріг)	2520	105	12890
ш. Ювілейна (м. Кривий Ріг)	4670	195	16780
ш. ім. Артема (м. Кривий Ріг)	3240	135	15660
ш. Гігант-Глибока (законсервована) (м. Кривий Ріг)	7128	297	21375
ш. Експлуатаційна (м. Дніпрорудне)	6537	272	15784

Аналіз наданих даних свідчить, що найбільший приплив підземних вод спостерігається на шахті «Криворізька», що пояснюється складними

гірничо-геологічними умовами. У таблиці 1.4 представлена детальна інформація про основні підземні горизонти, на яких розташовані водовідливні установки, а також про кількість насосів, що експлуатуються на цих горизонтах.

Таблиця 1.4 - Підземні горизонти та шахтні насоси

Шахти	Горизонти (м) / кількість насосів
ш. Криворізька (м. Кривий Ріг)	500/7; 940/7; 1240/6; 1465/6
ш. Покровська (м. Кривий Ріг)	437/4; 965/4; 1115/4; 1265/4
ш. Козацька (м. Кривий Ріг)	472/5; 792/4; 1190/4; 1350/3
ш. Тернівська (м. Кривий Ріг)	527/5; 1050/4; 1200/4; 1350/4
ш. ім. Фрунзе (м. Кривий Ріг)	410/3; 910/3; 1060/4; 1135/2
ш. Ювілейна (м. Кривий Ріг)	480/5; 940/5; 1340/5
ш. ім. Артема (м. Кривий Ріг)	475/6; 865/8; 1045/5; 1135/9
ш. Гігант-Глибока (законсервована) (м. Кривий Ріг)	380/3; 540/5; 630/2; 710/2; 800/3
ш. Експлуатаційна (м. Дніпрорудне)	400/10; 480/7; 640/8; 840/5; 940/3; 1040/3

Важливо зазначити, що вся відкачана вода в процесі роботи насосних систем не повинна потрапляти назад на глибші рівні шахти. Замість цього вона має зберігатися у спеціальних резервуарах, розташованих на верхніх горизонтах (зокрема, на відмітках 500 м, 437 м, 472 м і 527 м). Такий підхід забезпечує поступовий відтік води протягом дня, знижуючи ризик вторинного затоплення.

Для оцінки ефективності водовідливних систем було введено параметр-коефіцієнт притоку, який визначається як відношення річного обороту притоку води (м<sup>3</sup>) до об'єму самого притоку. Відповідні значення

для залізорудних шахт Криворізького басейну наведені на рисунку 1.16, який ілюструє коефіцієнти водопритоку для різних шахт.

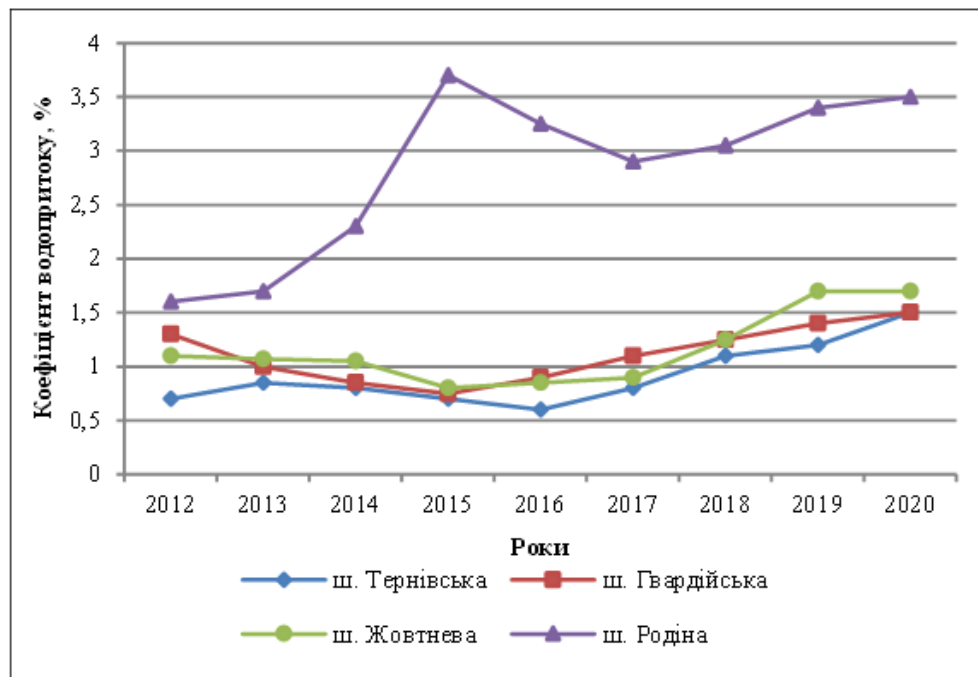


Рисунок 1.16 – Коефіцієнти водопритоку для кількох залізорудних шахт Криворізького залізорудного басейну.

На станціях зневоднення використовуються відцентрові насоси типу ЦНС (детальна інформація наведена в Додатку А). Їхні технічні параметри, зокрема продуктивність, потужність і ефективність, наведені в таблиці 1.5, яка містить характеристики насосів, що експлуатуються для відкачування води з різних підземних водоносних горизонтів.

Таблиця 1.5 – Характеристики насосів, що використовуються для відкачування води з підземних водоносних горизонтів на українських залізорудних шахтах.

Параметри	Типорозмір насоса		
	ЦНС 300-480	ЦНС 300-600	ЦНС 300-800
Подача, м <sup>3</sup> /год	300	300	300
Тиск, м	480	600	800
Тип двигуна	A4-450X-4M	A4-450X-4M	A-13-46-4A
Потужність двигуна, кВт	630	800	800
Частота обертання, об/хв	1475	1475	1450
Номинальна напруга, кВ	6	6	6

Рисунки 1.17–1.20 демонструють графіки споживання електроенергії насосними агрегатами на різних глибинах у кількох шахтах, серед яких «Козацька», «Криворізька» і «Покровська». Наприклад:

- **Рисунок 1.18** показує графік ефективного використання електроенергії для електроприводів водовідливних систем шахти «Козацька».
- **Рисунок 1.19** відображає аналогічні дані для шахти «Криворізька».
- **Рисунок 1.20** демонструє графіки для шахти «Покровська».

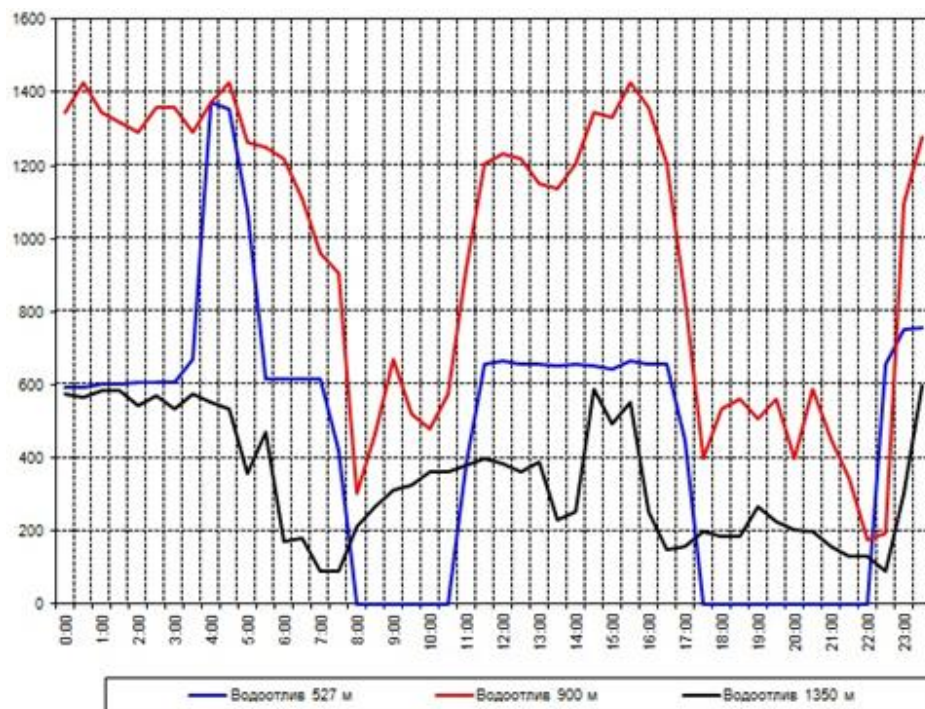


Рисунок 1.17 - Графік ефективного споживання електроенергії електроприводами водовідливних комплексів шахти «Тернівська» (м. Кривий Ріг)

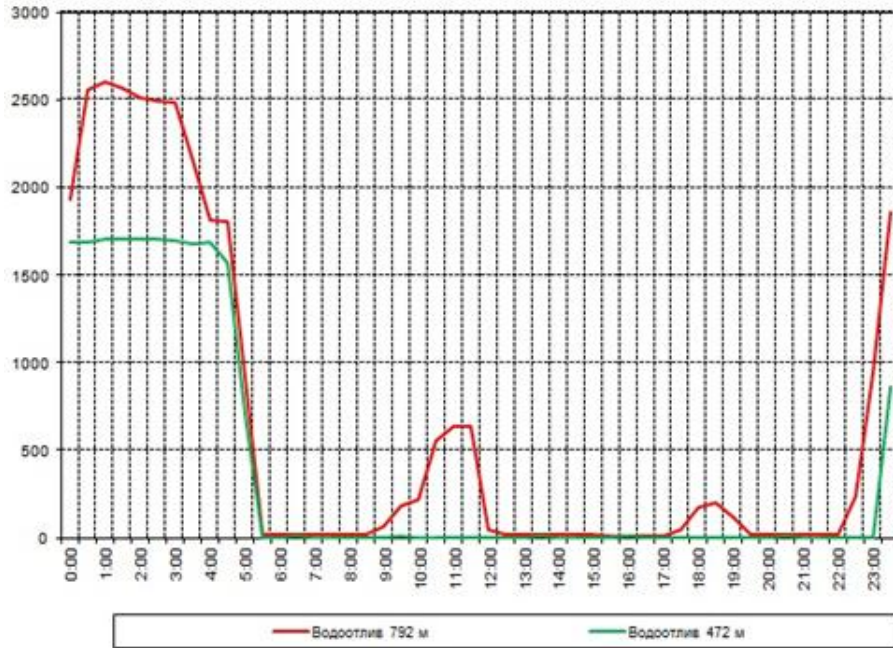


Рисунок 1.18 – Графіки ефективного споживання електроенергії електроприводами водовідливних комплексів шахти «Козацька» (м. Кривий Ріг)

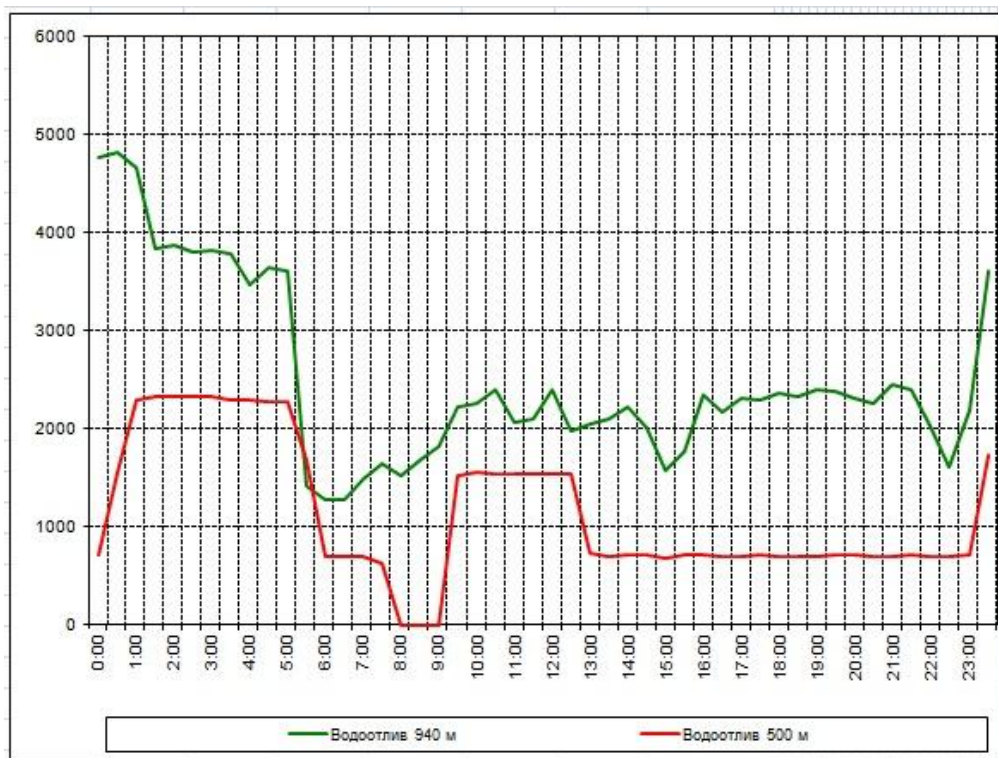


Рисунок 1.19 – Графіки ефективного споживання електроенергії електроприводами водовідливних комплексів шахти «Криворізька» (м. Кривий Ріг)

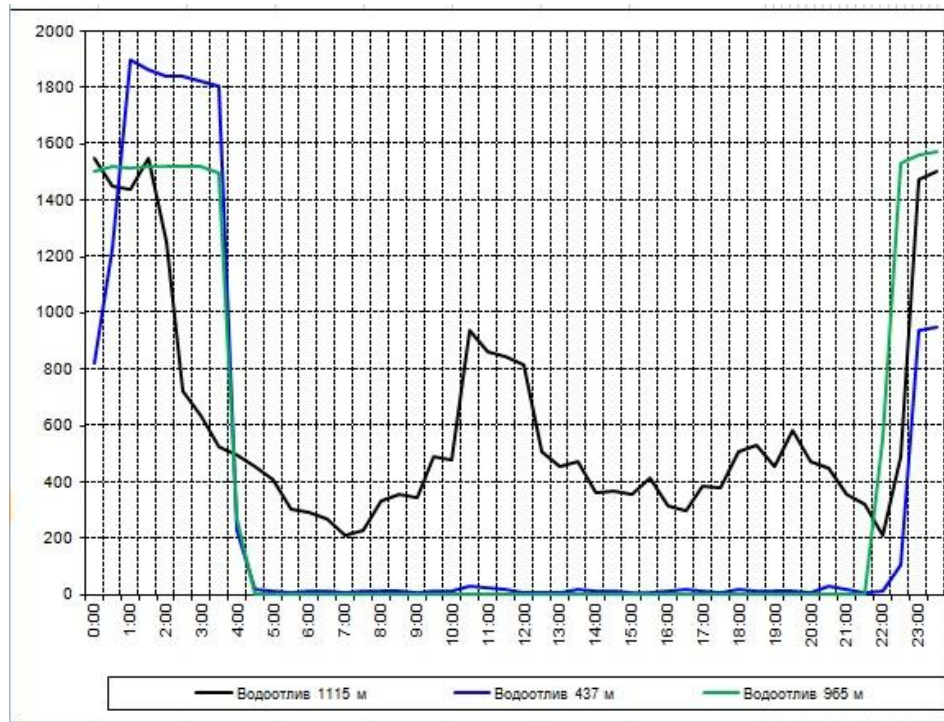


Рисунок 1.20 – Графік ефективного споживання електроенергії електроприводами водовідливних комплексів шахти «Покровська» (м. Кривий Ріг)

З аналізу цих графіків видно, що водовідливні насоси найчастіше працюють у нічний час, коли вартість електроенергії є нижчою. У разі, якщо обсяги притоку води перевищують можливості насосів у нічний період, їх експлуатацію можуть продовжити і вдень.

Водночас на ділянках, що підключені до шин підстанції, паралельно з насосами працюють інші енергоємні споживачі. Це створює додаткове навантаження на систему, що може призводити до порушень у графіку енергоспоживання на відповідних підземних горизонтах.



## **Розділ 2. ХАРАКТЕРИСТКИ ГІДРОАКУМУЛЯЦІЙНОГО ОБЛАДНАННЯ ЗАЛІЗОРУДНИХ ШАХТ**

### **2.1 Особливості та технічні характеристики насосів осушувальних комплексів залізорудних шахт**

Останні десятиліття вітчизняні підприємства активно впроваджують інновації у виробництво насосів типу ЦНСШ 300-140...800. Ці моделі демонструють суттєві покращення в таких аспектах, як натиск, енергоефективність і надійність, що вигідно відрізняє їх від попередників — насосів ЦНС 300-120...600. Вони спеціально розроблені для транспортування води або інших нейтральних рідин із температурою до 70°C, рН у межах 5,5–8,5, концентрацією твердих часток до 1,5% (розміром не більше 1 мм) і вмістом хлоридів та сульфатів, що не перевищує 2 г/л.

Конструктивні переваги насосів ЦНСШ 300-140...800 включають:

1. **Удосконалена геометрія робочих коліс** та направляючих пристроїв, підтверджена численними експериментальними дослідженнями.
2. **Механічна стабільність ротора**, надійно закріпленого на валу, що запобігає проникненню води між маточиною і валом, унеможливаючи їх злипання. Це значно спрощує розбирання та збирання насоса під час ремонтів без ризику пошкодження ключових компонентів.
3. **Ефективна система ущільнення**, яка забезпечує стікання води з нагнітальної камери в порожнину переднього кронштейна, уникаючи попадання повітря через сальникове ущільнення.
4. **Використання високолегованих матеріалів**, що гарантує високий рівень корозійної стійкості та довговічність деталей.

5. **Висока якість лиття і динамічна збалансованість ротора**, що знижує гідравлічні втрати та мінімізує вібрації під час роботи.

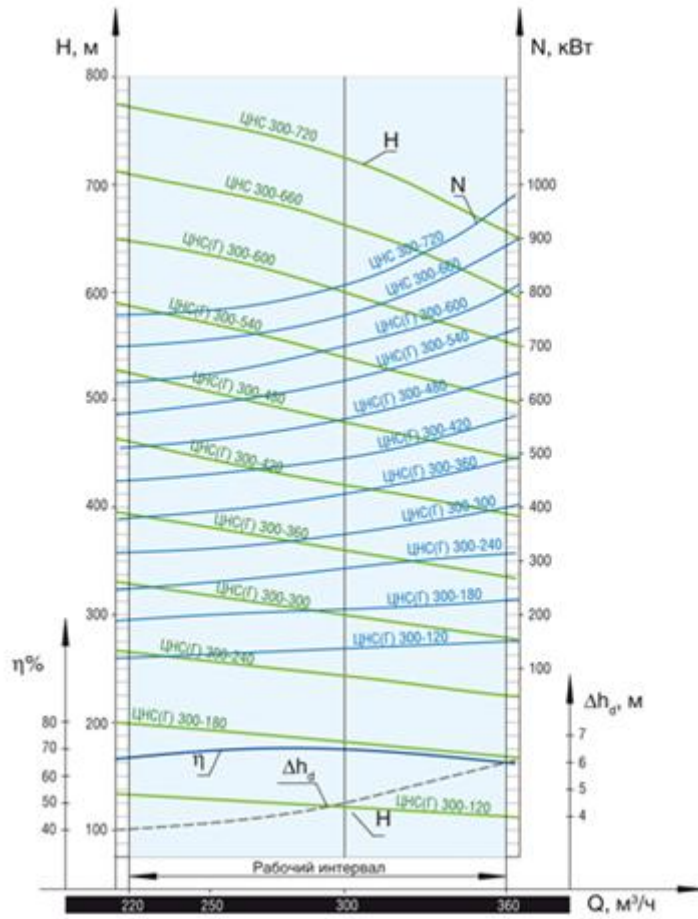
Основні технічні параметри насоса ЦНСШ 300-570 (подача 300 м<sup>3</sup>/год, частота обертання 1480 об/хв) наведені в таблиці 2.1, а їх робочі характеристики відображені на рисунку 2.1. У порівнянні з насосами ЦНС 300, нові моделі забезпечують:

- на 20–25% вищий тиск;
- на 10–15% більший коефіцієнт корисної дії (ККД);
- ресурс до першої відмови, що перевищує попередні моделі в 3–5 разів.

Таблиця 2.1 – Параметри насоса ЦНСШ 300

Найменування показника	Значення показників для насосів ЦНСШ									
	300-140	300-210	300-290	300-360	300-430	300-500	300-570	300-650	300-720	300-800
Напір, м	143	214	286	358	430	500	572	645	715	800
Потужність, споживана насосом, кВт	150	225	300	375	450	525	600	675	750	825
Коефіцієнт корисної дії, %	74	75	75	76	76	77	77	78	78	79

Примітка: Максимально допустимий кавітаційний запас складає 3,5 м при коефіцієнті запасу  $R = 1,2$ .



A)

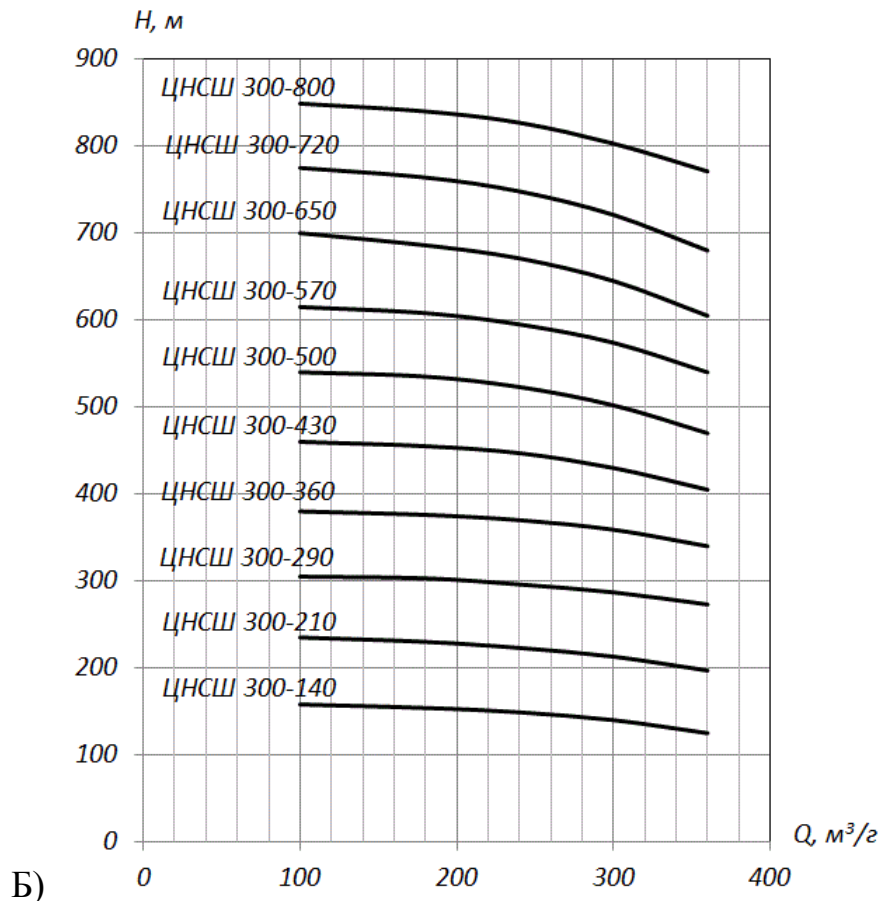


Рисунок 2.1 - Характеристики шахтних насосів:  $Q$  - подача;  $H$  - напір;  $\eta$  - ККД насоса;  $\Delta h_{\text{д}}$  - допустимий кавітаційний запас;  $Z_{\text{ст}}$  - кількість ступенів насоса;  $N_{\text{ст}}$  - споживана потужність на ступінь;

а) -тип ЦНС 300; б) -тип ЦНСШ 300

Зокрема, насос ЦНСШ 300-570 має такі переваги над ЦНС 300-600:

- Тиск вищий на 25%;
- ККД більший на 12%;
- Всмоктувальна здатність значно покращена;
- Середній інтервал між відмовами у 13 разів довший;
- Термін служби до капітального ремонту збільшений у 3–4

рази.

Економічна ефективність також вражає. Наприклад, при експлуатації насоса ЦНСШ 300-570 річна економія електроенергії становить 670 000 кВт·год (за умовами 5500 робочих годин на рік), що еквівалентно зменшенню

витрат на електроенергію на 22,7 тисячі доларів США. Це дозволяє окупити витрати на придбання нового насоса менш ніж за один рік.

Таблиця 2.2 - Параметри та характеристики ЦНСШ300-570 та ЦНС300-600

Найменування показника	Тип насосу	
	ЦНСШ 300-570	ЦНС 300-600
Частота обертання, об/хв	1480	1475
Подача, м <sup>3</sup> /ч	300	300
Напір, м	570	570
Число ступенів	8	10
Напір ступені, м	72	57
Споживана потужність, кВт	600	716
ККД, %	77	65
Допустимий кавітаційний запас, м	3,5	4,5
Маса, кг	2740	2410
Середнє напрацювання на відмову, ч	6500	500
Середній ресурс до капітального ремонту, ч	12500	3800

### **Використання насосів у залізорудних шахтах України**

На шахтах України експлуатуються насоси типу ЦНС 300-240, ЦНС 300-360, ЦНС 300-540 та ЦНС 300-600. Вибір моделі залежить від глибини залягання водоносних пластів і параметрів шахтних проміжних колекторів. Технічні характеристики цих насосів подані в таблиці 2.3.

Таблиця 2.3 – Основні технічні параметри насосів типу ЦНС 300

Модель	Подача, м <sup>3</sup> /год	Потужність, кВт	Напір, м	Частота обертання, об/хв
ЦНС 300–240	300	315	240	1475
ЦНС 300–300	300	400	300	1475
ЦНС 300–360	300	500	360	1475
ЦНС 300–420	300	500	420	1475
ЦНС 300–480	300	630	480	1475
ЦНС 300–540	300	800	540	1475
ЦНС 300–600	300	800	600	1475

Аналіз відповідності фактичної кількості насосів плановим показує, що на багатьох шахтах встановлено на 1,5–2 рази менше обладнання, ніж передбачено проектами. Це можна пояснити такими факторами:

1. **Наявної кількості насосів достатньо** для відкачування води за поточних умов.
2. Планування враховувало можливі аварійні ситуації та різке збільшення водопритоку.
3. Реалізація проектних показників потребує модернізації насосних установок для підвищення їх продуктивності.

Таким чином, модернізація насосного обладнання, представлена новими моделями ЦНСШ, не лише підвищує ефективність водовідливних систем, але й дозволяє значно зменшити витрати на електроенергію та обслуговування.

## 2.2 Аналіз графіків споживання електроенергії електроприводами насосів осушувальних установок

На рисунках 2.2 – 2.5 представлені добові графіки споживання електроенергії електроприводами насосів водовідливних установок для різних шахт, розташованих у Криворізькому басейні.

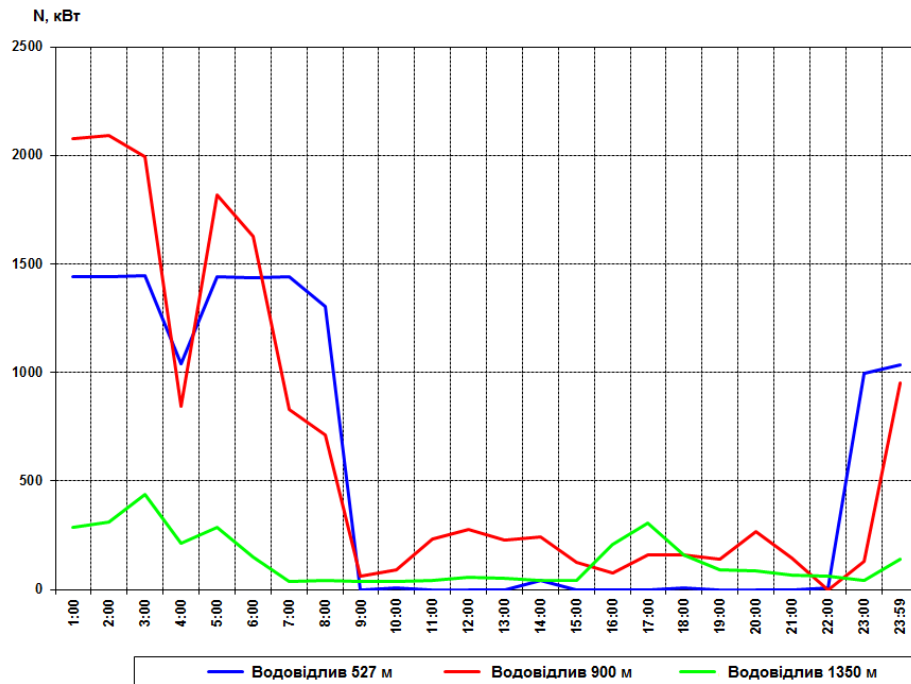


Рисунок 2.2 – Графіки споживання активної електроенергії електроприводами шахтних водовідливних установок шахти Тернівська (м. Кривий Ріг)

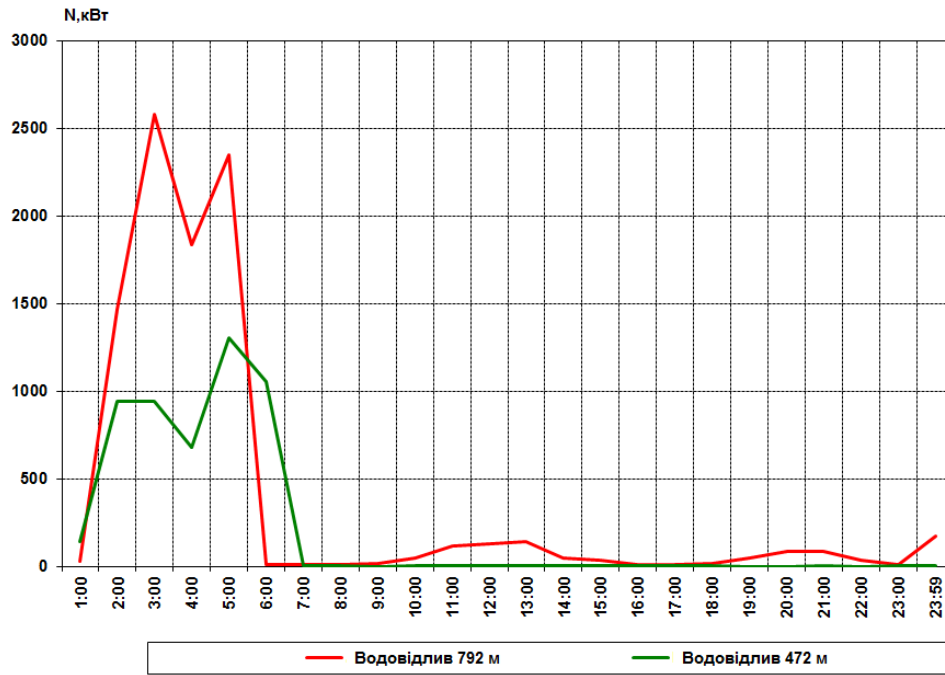


Рисунок 2.3 – Графіки споживання активної електроенергії електроприводами шахтних водовідливних установок шахти Козацька (м. Кривий Ріг)



Рисунок 2.4 – Графіки споживання активної електроенергії електроприводами шахтних водовідливних установок шахти Криворізька (м. Кривий Ріг)



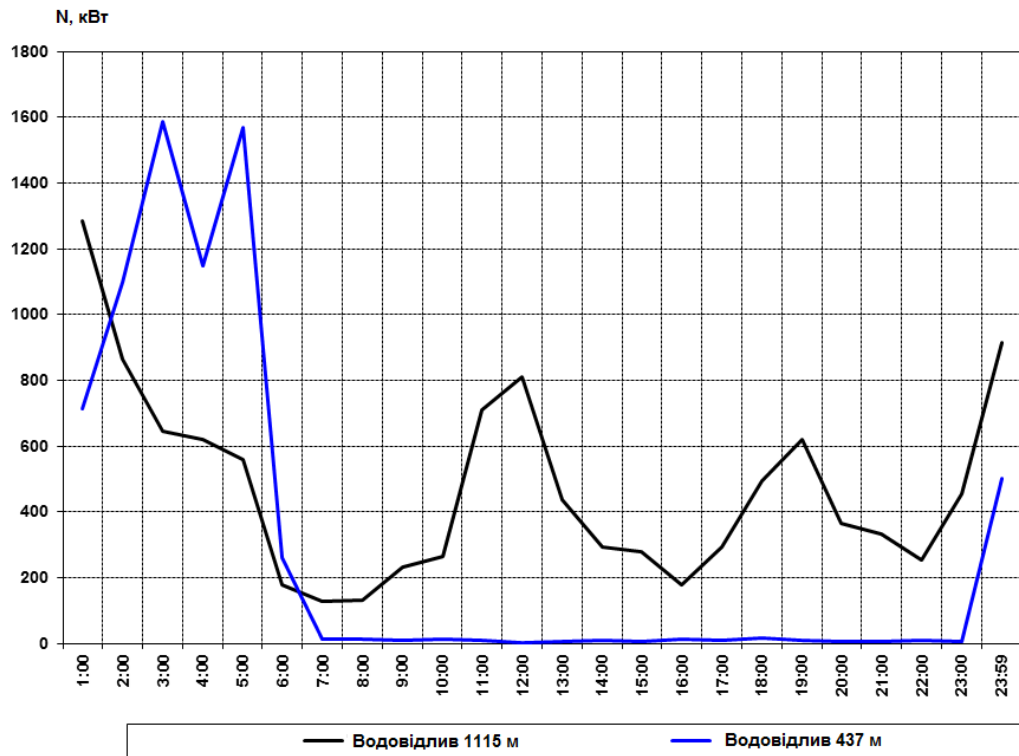


Рисунок 2.5 – Графіки споживання активної електроенергії електроприводами шахтних водовідливних установок шахти Покровська (м. Кривий Ріг)

- **Рисунок 2.2** демонструє графіки активного енергоспоживання насосами шахти "Тернівська".
- **Рисунок 2.3** ілюструє аналогічні показники для шахти "Козацька".
- **Рисунок 2.4** показує енергоспоживання насосів шахти "Криворізька".
- **Рисунок 2.5** відображає дані щодо шахти "Покровська".

### Особливості графіків

У сталому режимі роботи насосного обладнання спостерігається стабільний рівень активного споживання електроенергії. У пускових та вимикальних режимах енергоспоживання змінюється, що зумовлено специфікою запуску та зупинки насосів. Окрім того, на графіки може накладатися споживання електроенергії іншими пристроями, такими як дробарки, компресори, бурові установки та інше обладнання, що працює на тих самих горизонтах шахт.

Технічний облік електроенергії, як правило, здійснюється на підстанціях, розташованих на поверхні, що може ускладнювати розподіл споживання між насосами та іншими споживачами.

### **Основні тенденції роботи насосів**

Рівень активної потужності в межах 2500–3000 кВт свідчить про функціонування кількох насосних агрегатів одночасно. Як правило, насоси вимикаються вранці, приблизно о 7–8 годині, і знову запускаються ввечері, близько 22–23 години.

На шахті "Криворізька", де спостерігається значний приплив води, робочі графіки насосів дещо відрізняються. Вони вимикаються вранці з 8 до 10 години та ввечері з 17 до 20 години, але можуть працювати в інші періоди доби, залежно від потреби у відкачуванні води для запобігання переповненню резервуарів.

### **Проблеми обліку та контролю**

Точне визначення добових або місячних обсягів води, яка надходить у шахти, залишається складним завданням через відсутність відповідного обладнання для вимірювання. Це ускладнює прогнозування потреб у роботі насосів і, відповідно, витрат електроенергії.

### **Визначальні фактори споживаної потужності**

Рівень споживаної електроенергії насосами залежить від таких факторів:

1. **Обсяги води**, які необхідно відкачувати.
2. **Частота включення та виключення насосів**, що визначається специфікою надходження води.
3. **Параметри інших споживачів електроенергії**, які можуть працювати на тих самих горизонтах.
4. **Технічний стан насосів** та ефективність їхньої роботи.

Загалом аналіз графіків споживання електроенергії дозволяє виявити закономірності в роботі насосного обладнання, а також потенційні резерви для оптимізації енергоспоживання.

$$N = \frac{QH}{\eta}$$

де  $Q$  – продуктивність насосу;  $H$  – тиск води;  $\eta$  – ККД насосу та електродвигуна.

Продуктивність відкачування шахтної води визначається при наявності датчика активної електроенергії ( $W$ ) і датчика тиску ( $H$ ):

$$Q = \frac{W \cdot \eta}{t \cdot H}$$

Об'єм відкачуваної води за проміжок часу  $t$  визначиться як:

$$V = Q \cdot t = \frac{W \cdot \eta}{H}$$

Якщо не брати до уваги зміну тиску шахтної води під час запуску чи зупинки насосів, можна стверджувати, що обсяг води, яку відкачують за певний період часу (наприклад, добу або місяць), безпосередньо залежить від кількості спожитої електроенергії. У таблиці 2.4 подано показники добового енергоспоживання дренажним обладнанням шахт.

Таблиця 2.4 – Добове споживання електроенергії насосними установками низки залізорудних шахт у м. Кривий Ріг

Шахти	Добова електроенергія, кВт·год (%)		
	День	Ніч	Всього
Криворізька	28811 (46,7%)	32918 (53,3%)	61729 (100%)
Покровська	5006 (28,2%)	12718 (71,8%)	17724 (100%)
Козацька	983 (7,1%)	12935 (92,9%)	13918 (100%)
Тернівська	2833 (10,3%)	24701 (89,7%)	27534 (100%)
Гігант-Глибока	23464 (42,5%)	31795 (57,5%)	55259 (100%)

Дані з таблиці свідчать, що шахта "Криворізька" демонструє вражаючий показник – до 46% загального споживання електроенергії припадає на роботу насосного обладнання протягом доби. Якби насоси були

відключені на цілу добу, економія на електроенергії становила б від 22 до 25 тисяч гривень, а за місяць ця цифра досягала б 660–750 тисяч гривень.

Щоб зменшити витрати електроенергії на цій шахті, необхідно впровадити заходи, які дозволять максимізувати відкачування води під час нічних годин. Це можна досягти такими методами:

- збільшення об'єму резервуарів для зберігання шахтної води,
- впровадження високопродуктивних насосів,
- розширення прохідності трубопровідних систем,
- використання пристроїв для плавного запуску асинхронних двигунів насосів безпосередньо на підземних горизонтах.

У таблиці 2.5 наведено формат звітів про місячне споживання електроенергії насосним обладнанням шахт у місті Кривий Ріг.

Таблиця 2.5 – Місячні звіти про споживання електроенергії електроприводами насосів осушувальних установок залізородних шахт

Найменування шахти і установки	Од. вим.	Оперативний план (ОП)	План на виконані об'єми (ПнВО)	Факт (Ф)	Відхилення (Ф-ОП)	Відхилення (Ф-ПнВО)	Факт споживання по зонам доби, %	
							день	ніч
<b>Тернівська</b>								
Водовідлив	кВт*год	901587	890292	890292	-11295	0	41,30	58,70
Шахтна вода	м <sup>3</sup>	121968	120440	120440	-1528	0		
Питомі витрати по водовідливу	кВт*год/м <sup>3</sup>	7,392	7,392	7,392	0,000	0,000		
<b>Козацька</b>								
Водовідлив	кВт*год	741247	720001	720001	-21246	0	4,30	95,70
Шахтна вода	м <sup>3</sup>	97200	94414	94414	-2786	0		
Питомі витрати по водовідливу	кВт*год/м <sup>3</sup>	7,626	7,626	7,626	0,000	0,000		
<b>Покровська</b>								
Водовідлив	кВт*год	844557	604273	604273	-240284	0	47,40	52,60
Шахтна вода	м <sup>3</sup>	117072	83764	83764	-33308	0		
Питомі витрати по водовідливу	кВт*год/м <sup>3</sup>	7,214	7,214	7,214	0,000	0,000		
<b>Криворізька</b>								
Водовідлив	кВт*год	2303416	2196641	2196641	-106775	0	59,30	40,70
Шахтна вода	м <sup>3</sup>	395640	377300	377300	-18340	0		
Питомі витрати по водовідливу	кВт*год/м <sup>3</sup>	5,822	5,822	5,822	0,000	0,000		

Аналіз цих даних дозволяє визначити питомі витрати електроенергії на відкачування шахтної води, які знаходяться в межах від 5,8 до 7,2 кВт·год на кубічний метр води.

Виробнича документація для кожного насоса містить визначення зони продуктивності, де досягається максимальний коефіцієнт корисної дії (ККД). Проте при роботі насосного обладнання в груповому режимі, зміна кількості одночасно задіяних насосів може призводити до відхилення режиму роботи кожного з них від оптимального значення ККД. Це, у свою чергу, збільшує втрати електроенергії і знижує її ефективне використання для перекачування води.

Щоб насоси працювали з максимально можливим ККД, необхідно застосовувати сучасні автоматизовані системи управління, що базуються на використанні програмованих логічних контролерів (ПЛК). Такі системи в режимі реального часу аналізують:

- рівень навантаження на електродвигуни насосів,
- рівень води у насосних станціях.

На основі отриманих даних система автоматично приймає рішення про підключення чи відключення насосів. Це дозволяє досягти оптимального енергоспоживання, знижуючи втрати і забезпечуючи енергоефективність роботи електрообладнання для шахтного водовідливу.

### **Розділ 3. СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИМ КОМПЛЕКСОМ З ГІДРОАКУМУЛЯЦІЙНИМ ОБЛАДНАННЯМ ЗАЛІЗОРУДНИХ ШАХТ**

#### **3.1 Розробка системи керування електротехнічним комплексом з гідроаккумуляційним обладнанням залізорудних шахт**

Турбіна, що застосовується в описаній системі, має фіксований крок лопатей і не оснащена можливістю повороту. Це означає, що вона здатна генерувати електричну енергію лише в одному напрямку потоку рідини, що обмежує її ефективність при змінних умовах швидкості потоку. Зокрема, система генерації працює лише протягом половини доби, що призводить до проблем у забезпеченні стабільного та безперервного енергопостачання.

Для вирішення цієї проблеми та підвищення коефіцієнта потужності турбінного електрогенератора (ПЕМ) і забезпечення більшої енергетичної доступності було вирішено використовувати акумулятори для короткочасного зберігання енергії. Батареї акумулюють енергію під час періодів, коли швидкість потоку висока і виробляється надлишкова електрична потужність. Потім ця енергія може бути використана, коли швидкість потоку знижується і генерація стає менш ефективною, що дозволяє турбіні продовжувати роботу навіть при недостатньому потоці рідини.

Основною перевагою інтеграції акумуляторних батарей у систему є значне покращення коефіцієнта потужності, а також забезпечення стабільності та безперервності роботи системи. Без акумуляторів система працювала б з великою кількістю перерв, що залежали б від реального часу та поточної потужності турбіни, що, в свою чергу, призвело б до зниження рівня її використання та ефективності, збільшення часу простою і потенційної неефективності роботи гідрогеологічного комплексу.

Акумулятори дозволяють згладжувати ці коливання, ефективно використовуючи надлишкову енергію в моменти високої швидкості потоку і надаючи її під час низької швидкості потоку. Завдяки цьому система може працювати безперервно, забезпечуючи стабільне енергопостачання без необхідності в більш дорогих та громіздких компонентах.

Ілюстрація 3.1 показує автоматну діаграму режимів роботи системи. Система керування аналізує поточні умови потоку, щоб визначити, чи підходять вони для генерації електроенергії, та обирає режим між генерацією та постачанням енергії. У режимі генерації система визначає, чи потрібно використовувати акумулятори або підключатися до мережі для стабілізації коливань потужності, залежно від рівня отриманої потужності.

Силові електронні пристрої (СЕР) налаштовують вхідну потужність для навантаження, вибраного в системі, відповідно до цільової потужності, що визначена методом керування профілем швидкості потоку (PSF). Коли потужність потоку є достатньо високою, і швидкість ротора відповідає вимогам, система активує електромагнітну муфту, щоб почати роботу генератора.

При зниженні швидкості потоку система автоматично переходить в режим постачання енергії. Вона визначає, чи є достатня ємність акумуляторів, щоб продовжувати роботу турбіни в цих умовах. Таким чином, навіть у періоди, коли потік стає недостатнім для генерації енергії, система продовжує забезпечувати безперервну роботу, максимізуючи ефективність використання турбіни.

Це, в свою чергу, дозволяє знизити капітальні витрати на систему, оскільки не потрібно додаткових дорогих компонентів для підтримки безперервної роботи генератора.

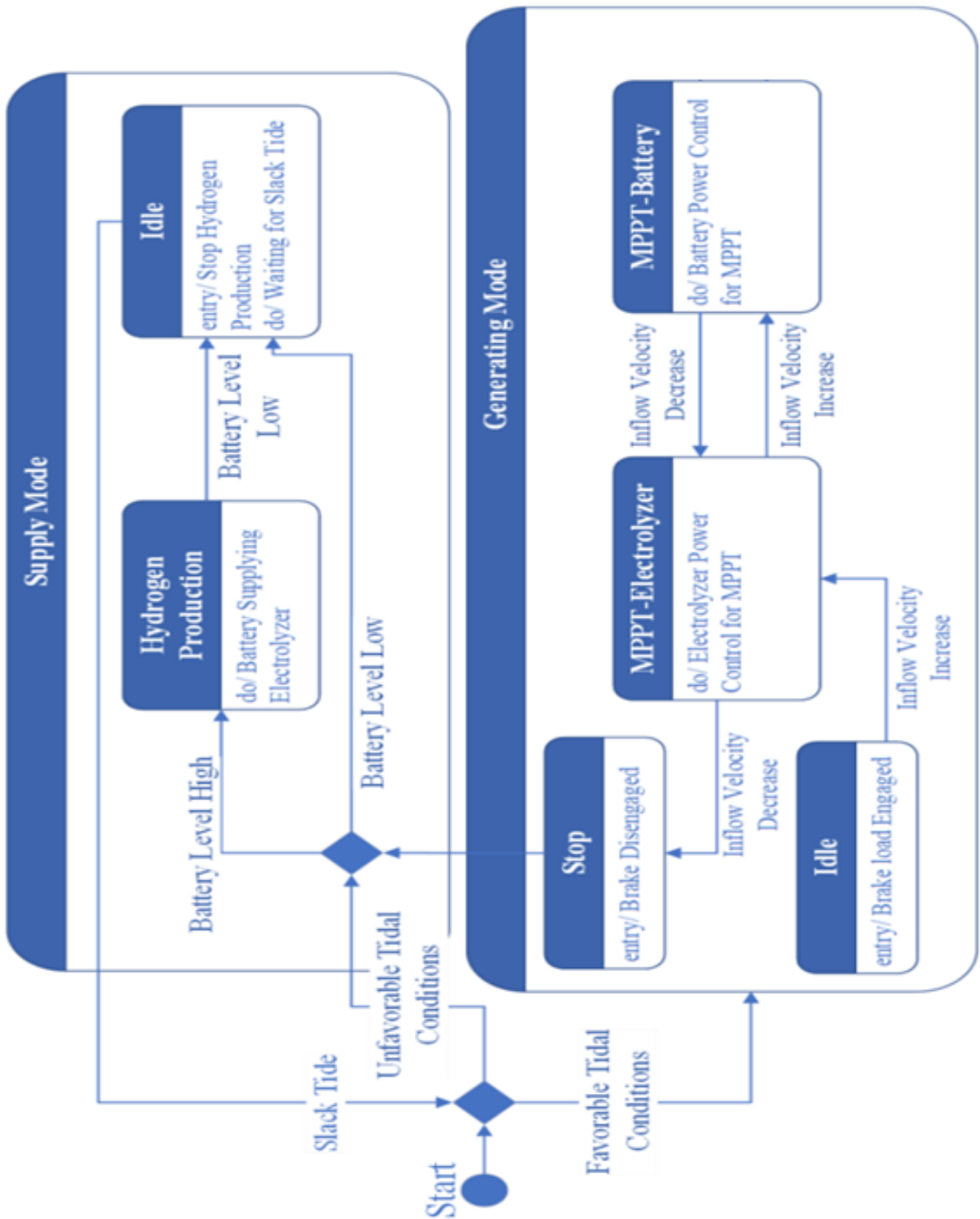


Рисунок 3.1 – Автоматна діаграма роботи системи.



Ілюстрація 3.2 демонструє розподіл потужності системи, який включає потужність, отриману турбіною, що працює в точці максимальної потужності (MPPT), гідравлічну потужність насоса води та втрати потужності на тертя. Аналіз показує, що при швидкості ротора близько 16 об/хв робоче колесо турбіни лише долає втрати на тертя. Ця швидкість визначається як швидкість відключення турбіни, при якій система переходить у режим зупинки.

Швидкість відключення для турбіни становить 35 об/хв, при якій відбуваються значні коливання потужності через взаємодію електромагнітної муфти. Завдяки роботі насоса втрати потужності на тертя збільшуються майже вдвічі, і система генерації працює на цих швидкостях.

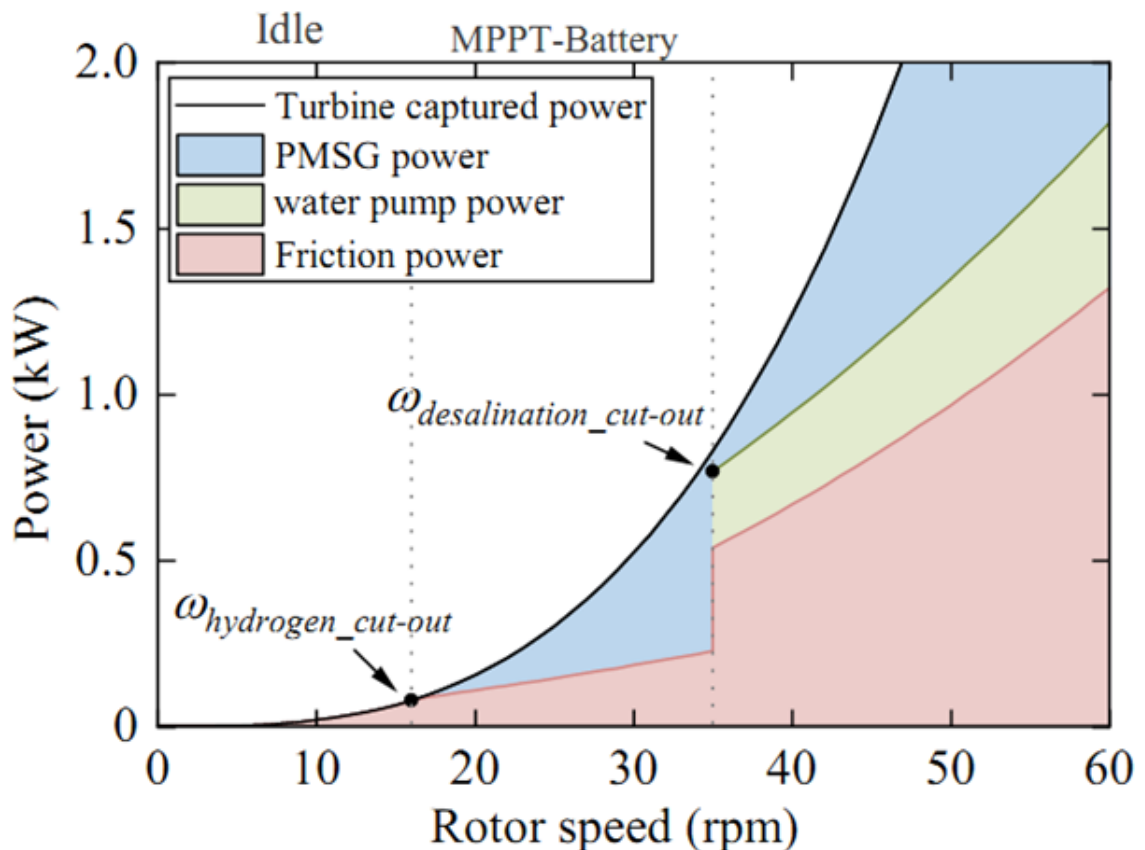


Рисунок 3.2 – Розподіл потужності в режимі генерації.

### 3.2 Дослідження режимів роботи електротехнічного комплексу з гідроаккумуляційним обладнанням залізорудних шахт

Імітаційна модель повної системи була створена в програмному середовищі Matlab/Simulink, як показано на Рисунку 3.3. Моделювання проводилось на основі реальних даних про виміряну швидкість потоку.

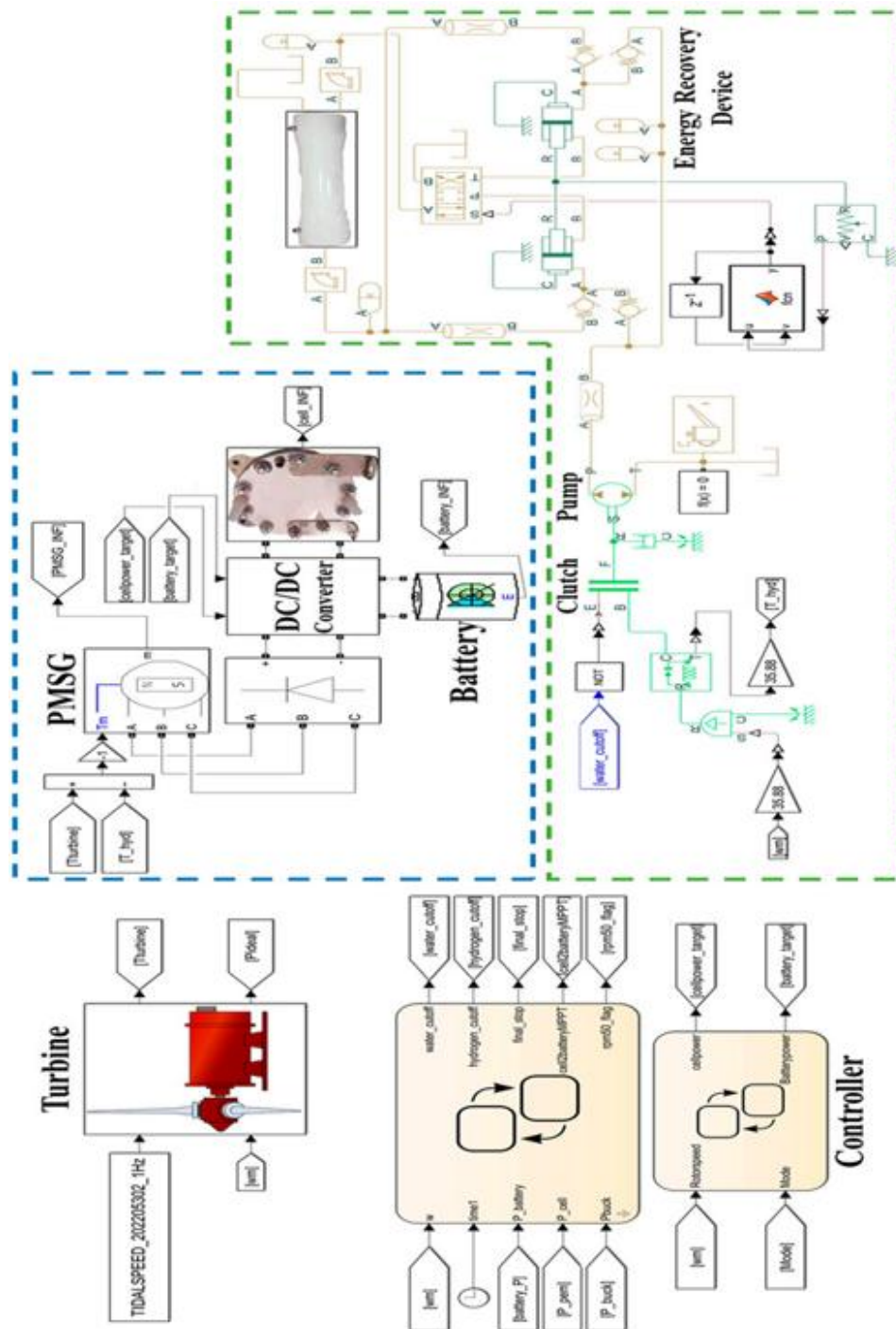


Рисунок 3.3 – Схематична діаграма імітаційної моделі системи.

Зона, в якій працює система, характеризується складним рельєфом та численними перетоками води, що створює унікальне гідродинамічне середовище. У цій зоні є багато вузьких каналів, де швидкість течії зазвичай висока, особливо в місцях з великими топографічними змінами.



Рисунок 3.4 Розташування бази для тестування енергії потоку.

Рисунок 3.4 показує розташування бази для тестування енергії потоку, а Рисунок 3.5 надає дані про швидкість потоку, зібрані за допомогою доплерівського датчика, що вимірював швидкість поверхні води з частотою 1 Гц.

Цикл потоку має періоди відтоку та притоку. Під час відтоку швидкість потоку має більше коливань порівняно з притоком, причому максимальна швидкість притоку може досягати понад 1,5 м/с.

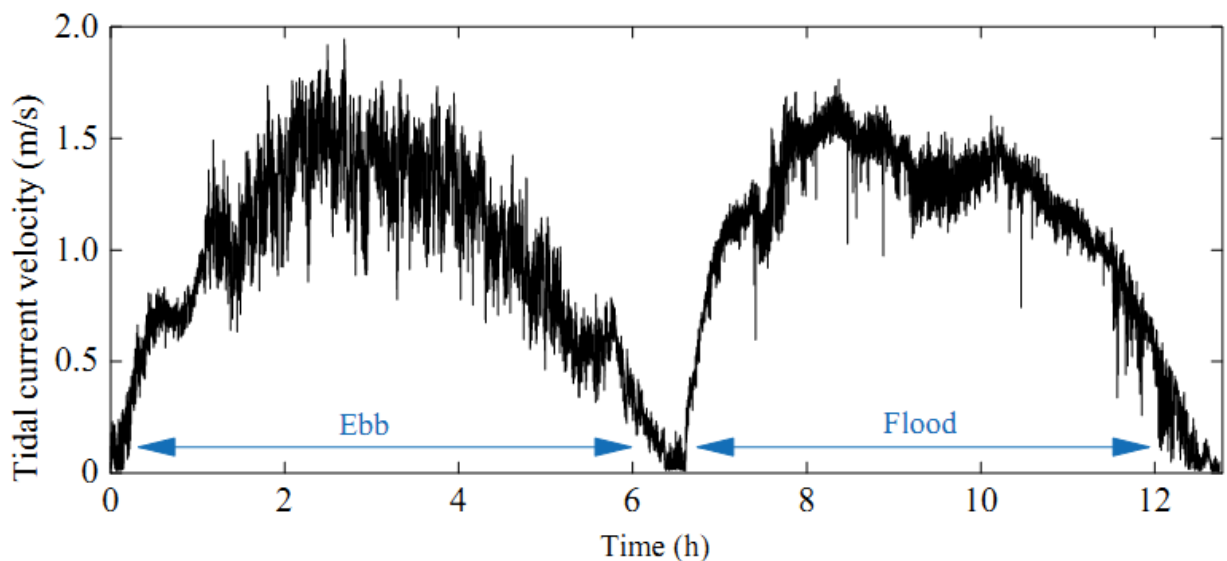


Рисунок 3.5 – Виміряна швидкість потоку.

На Рисунку 3.6 показано результати моделювання швидкості обертання ротора в залежності від швидкості потоку. На початку моделювання, коли швидкість потоку недостатня для подолання тертя, система залишається в режимі очікування. Коли швидкість потоку досягає значення 0,75 м/с, турбіна починає обертатись, і система переходить у генераційний режим, при якому активується PMSG та контролюється MPPT.

Через 1 годину моделювання швидкість притоку досягає 1,1 м/с, а швидкість ротора становить 45 об/хв, що дозволяє включити електромагнітну муфту і почати генерацію електроенергії. Проте через 4,5 години симуляції швидкість притоку падає нижче 1 м/с, що призводить до зупинки системи.

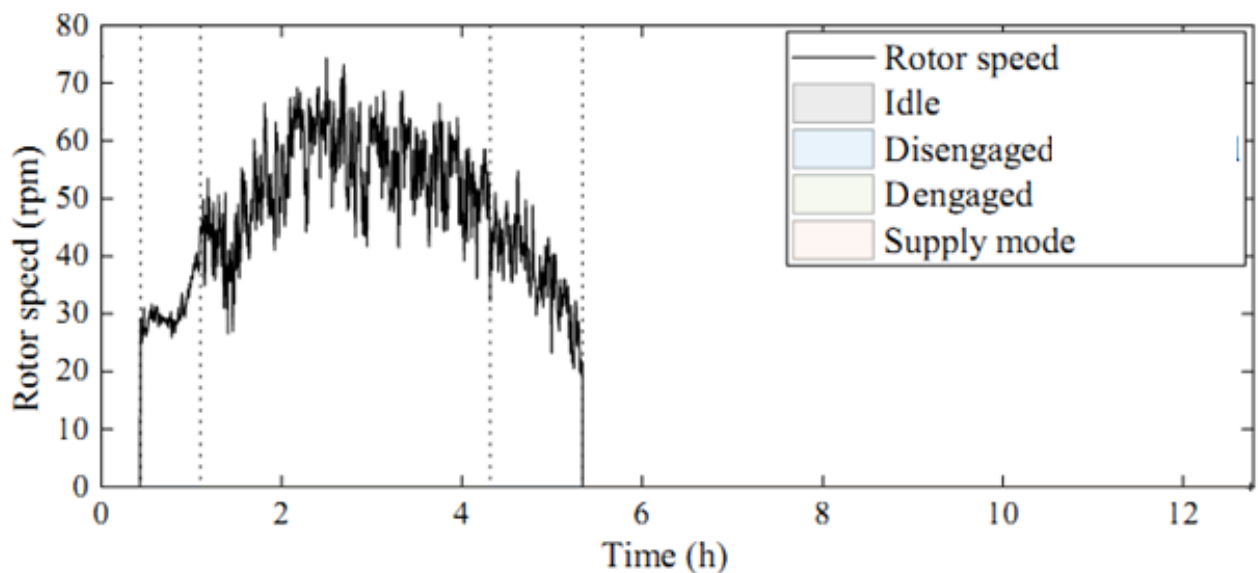


Рисунок 3.6 – Результати моделювання швидкості ротора.

Рисунок 3.7 показує зміну коефіцієнта потужності турбіни в процесі моделювання. У період відтоку коефіцієнт потужності коливається, зменшуючись під час початку та кінця цього періоду. Алгоритм керування PSF дозволяє підтримувати стабільну вихідну потужність, однак коефіцієнт потужності може варіюватися в залежності від зміни умов потоку.

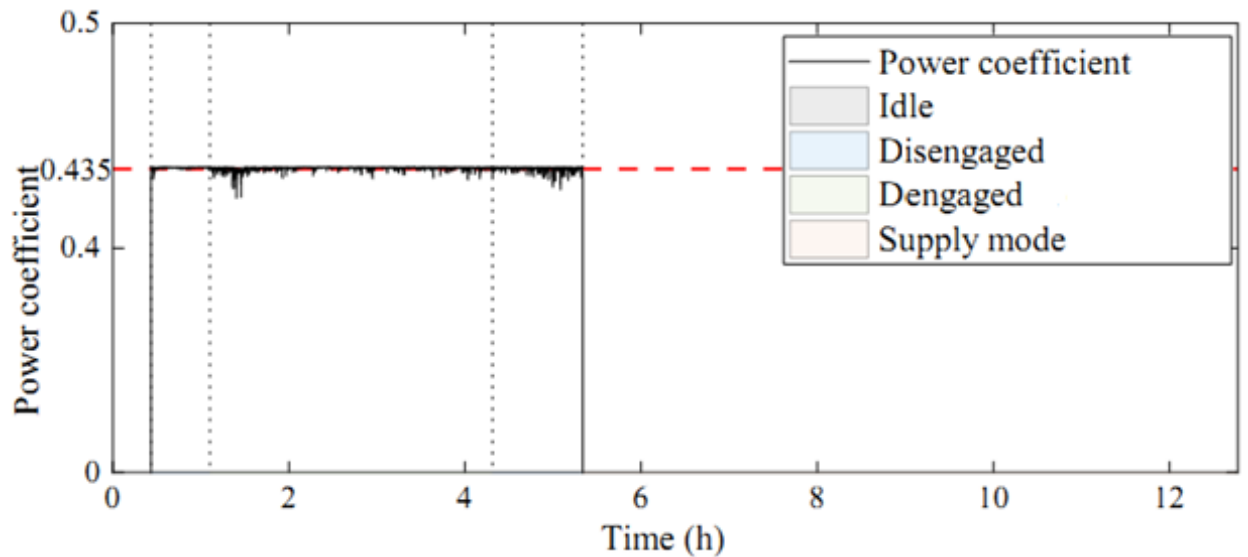


Рисунок 3.7 Зміна коефіцієнта потужності турбіни в процесі моделювання.

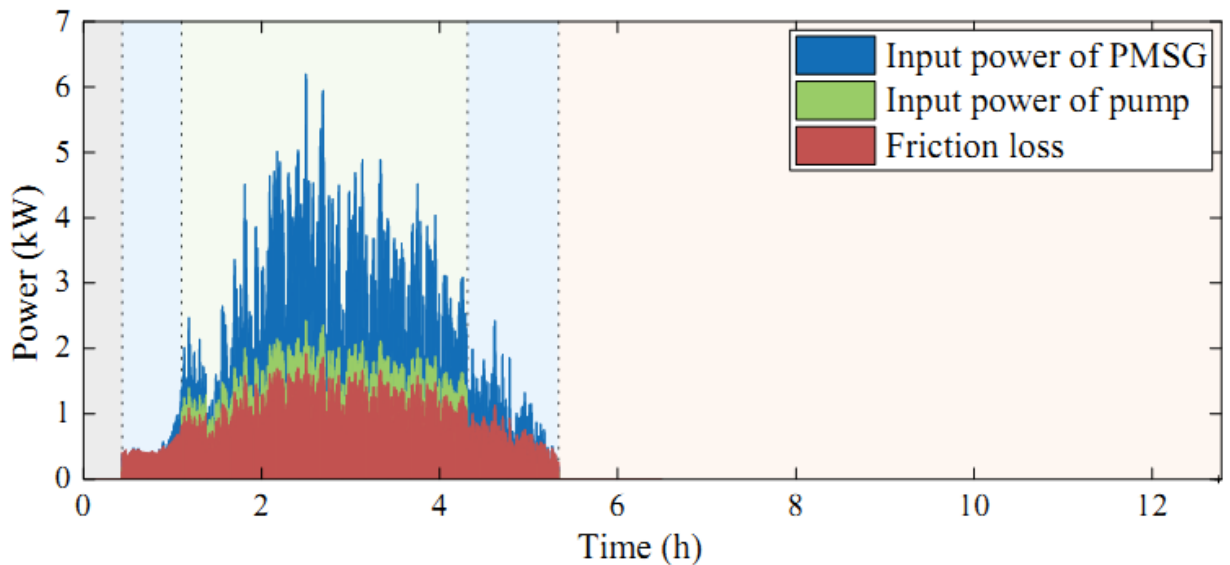


Рисунок 3.8 – Коливання вхідної потужності PMSG при змінних умовах потоку.

Додатково було проведене моделювання роботи акумуляторних батарей. Виявилось, що батареї ефективно накопичують енергію під час пікових навантажень, забезпечуючи її віддачу, коли потік недостатній для стабільної роботи генератора.

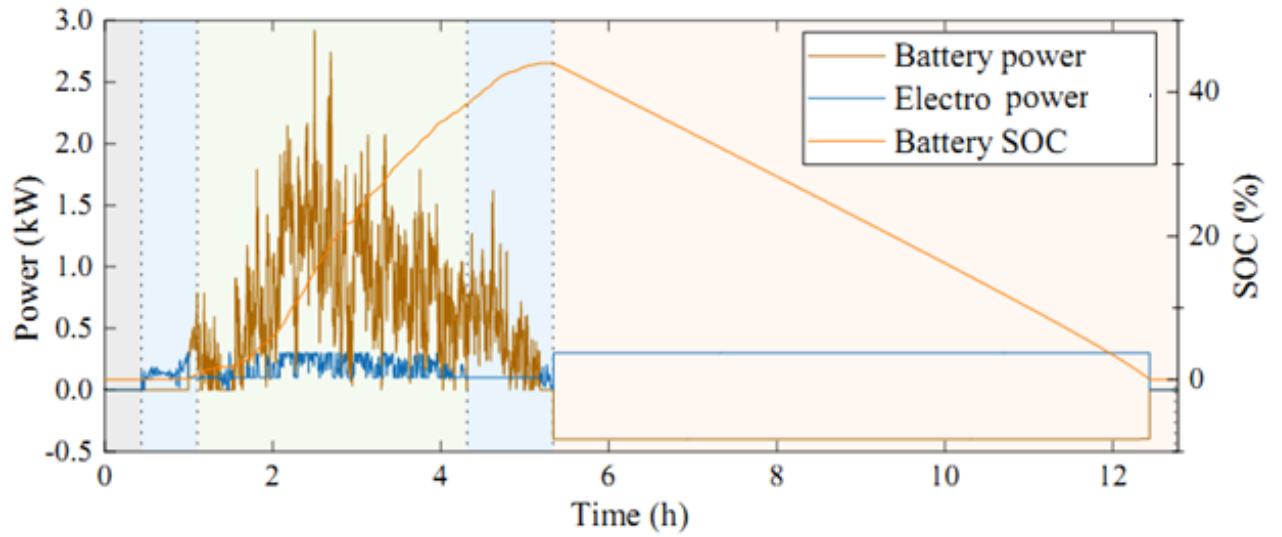


Рисунок 3.9 – Потужність акумуляторів та турбіни.

## ВИСНОВКИ

Система шахтного водовідведення є критично важливим компонентом залізорудних шахт, оскільки забезпечує безпечну експлуатацію підземних виробок. Водночас ці системи належать до енергоємних споживачів, що робить їх ключовим об'єктом для впровадження заходів з енергетичної ефективності. Оптимізація їхньої роботи сприяє зниженню витрат на енергію та підвищенню загальної продуктивності.

Метою роботи було підвищення економічної ефективності функціонування системи електропостачання водовідливних комплексів шахт шляхом впровадження розподіленої генерації на базі гідроакумулюючих електростанцій (ГАЕС). Робота спрямована на оптимізацію енергоспоживання та розробку ефективних підходів до управління енергетичними ресурсами.

Проведено аналіз параметрів енергоспоживання в шахтах із підземним видобутком залізної руди. Виявлено основні фактори, що впливають на енергетичні витрати: обсяги підземних вод, глибина розробки, продуктивність насосів. Запропоновано методи підвищення ефективності роботи насосного обладнання через оптимізацію режимів його експлуатації.

Досліджено технічні характеристики насосів типу ЦНС і ЦНСШ, які використовуються в шахтних водовідливних установках. Встановлено переваги нових моделей насосів, зокрема вищий ККД, збільшений термін служби та знижене споживання енергії. Розроблено рекомендації щодо модернізації насосного обладнання для підвищення його енергоефективності.

Розроблено алгоритми управління системою електропостачання з розподіленою генерацією, які враховують пікові та непікові навантаження. Запропоновано стратегії перенесення енергоємних операцій на нічний період, коли вартість електроенергії є нижчою. Визначено заходи з інтеграції ГАЕС

у систему шахтного енергопостачання для згладжування навантажень і забезпечення стабільності мережі.

Впровадження модернізованих насосів дозволить скоротити витрати електроенергії на 10–15%, що еквівалентно значній економії коштів. Використання розподіленої генерації сприяє зменшенню залежності від зовнішнього енергопостачання та забезпечує гнучкість системи. Зниження пікових навантажень у мережі дозволяє уникнути додаткових витрат на резервну потужність і покращує загальну стабільність роботи енергосистеми.

Розроблені методики та рекомендації можуть бути використані для модернізації енергетичних систем інших шахт. Запропоновані рішення забезпечують не лише економічний ефект, а й підвищують екологічну стійкість підприємств, зменшуючи загальне енергоспоживання. Впровадження системи з ГАЕС забезпечить ефективну підтримку шахт у довгостроковій перспективі. Подальші дослідження можуть бути спрямовані на впровадження інноваційних технологій, таких як цифровізація керування насосними системами та автоматизація аналізу енергоспоживання.



## ЛІТЕРАТУРНІ ДЖЕРЕЛА

[1] Енергетична стратегія України на період до 2030 р. [Електронний ресурс] / Міністерство енергетики та вугільної промисловості України, 2014. – Режим доступа: <https://mpe.kmu.ua./fuel/control/uk/doccatalog/list?currDir=50358>.

[2] С. Денисюк, та В. Таргонський, “Енергоефективність України: проблеми та шляхи її зростання”, *Енергетика: економіка, технології, екологія. Загальні проблеми енергоефективності*, № 4, с. 7-28, 2017.

[3] Енергетична ефективність України. Кращі проектні ідеї [електронне видання]: Проект «Професіоналізація та стабілізація енергетичного менеджменту в Україні» / Уклад.: С. П. Денисюк, О. В. Коцар, Ю. В. Чернецька. – К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2016. – 79с.

[4] С. Денисюк, Г. Стрелкова, К. Пфайфер, М. Стрелков, та О. Іщенко “Європейські тенденції інноваційного розвитку в енергетичному секторі та сферах кінцевого енергоспоживання”, *Енергетика: економіка, технології, екологія*, №2. с.7-19. 2018.

[5] Енергетична стратегія України на період до 2035 року «Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність». Розпорядження Кабінету Міністрів України від 18 серпня 2017 р. № 605-р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/605-2017-p> (дата звернення: 11.12.2019).

[6] О. Синчук, І. Синчук, І. Козакевич, В. Федотов, В. Серебренников, Н. Лохман, Т. Беридзе, С. Бойко, А. Пироженко, та А. Ялова. “Разработка функциональной модели управления уровнями потребления электроэнергии подземными железорудными предприятиями”, *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. № 6(3), с.20-27. 2018.

[7] В. Розен, І. Соколовська, Є. Іншеков, та І. Стоянкова. “Удосконалення механізму впровадження директиви 2012/27/EU про енергоефективність шляхом адаптації міжнародних стандартів з

енергоменеджменту на національному рівні”, *Проблеми загальної енергетики*, вип.4(43), с. 52-57, 2015.

[8] В. Рябець, А. Долгий, та В. Тарасютін. “Підготовка та відпрацювання природно-багатих залізородних покладів в умовах глибоких горизонтів”, *Сталий розвиток промисловості та суспільства: мат. конф. - Кривий Ріг*, Том 1, с. 3, 2012. <http://ds.knu.edu.ua/ispui/handle/123456789/1241>

[9] М. Ступнік, М. Федько, С. Письменний та ін. “Проблеми розкриття та підготовки рудних родовищ на глибоких горизонтах шахт Кривбасу”, *Вісник Криворізького національного університету*, Кривий Ріг, Вип. 47, с. 3-8, 2018. doi: 10.31721 /2306-5451 -2018-1 -47-3-8.

[10] Є. Бабець, І. Мельникова, С. Гребенюк, та С. Лобов. *Дослідження техніко-економічних показників гірничодобувних підприємств України та ефективності їх роботи в умовах змінної кон'юнктури світового ринку залізородної сировини*. НДГРІ ДВНЗ «КНУ», Кривий Ріг, Вид. Р.А. Козлов, 2015.

[11] Ю. Капленко, и Е. Янов. “Влияние глубины горных работ на технико-экономические показатели подземной добычи руды”, *Вісник КТУ*, №5(15), с. 25-28, 2006.

[12] O. Sinchuk, A. Kupin, I. Sinchuk, M. Rohoza, and P. Plieshkov. “Certain aspects concerning the development of a functioning scheme of the automated system to control energy flows of underground iron-ore enterprises”, *Mining of mineral deposits*, Volume 14, Issue 3, p. 101-111, 2020.

[13] А. Дремін. “Стратегия энергосбережения при добыче и переработке железных руд”, *Горный журнал*, № 12, с. 45-47, 2006.

[14] В.І. Волинець. “Аналізування ефективності споживання електроенергії вугільними шахтами”, *Енергетична безпека навколишнього середовища: Матеріали міжнародної науково-практичної конференції*, Луцьк, РВВ ЛНТУ, с. 35 -37, 2012.

[15] S. Boiko, I. Sinchuk, F. Karamanyts, I. Kozakevych, M. Baranovska, and O. Yalova, *Aspects of the problem of applying distributed energy in iron ore*

*enterprises' electricity supply systems*. Warsaw, Poland: «iScience» Sp. z o. o., 2018.

[16] I. Sinchuk. “Harmonization of modeling systems for assessing the electric power consumption levels at mining enterprises”, *Mining of Mineral Deposits*, 12, pp.100-107, 2018.