

## РЕФЕРАТ

складається з 71 сторінок, 40 рисунків, 10 таблиць, 14 літературних джерел

У першому розділі виконано огляд електроспоживання енергоємним обладнанням залізорудних шахт. Розглянуто стенд керування водовідливним комплексом шахти, який створено та який працює на кафедрі електромеханіки. Виконано вибір насосу ЦНС 300-240 горизонту 1115 м (допоміжний водовідлив) та приводного асинхронного двигуна АИР355М4 потужністю 315 кВт.

У другому розділі впроваджено систему ПЧ-АД в роботу допоміжної водовідливної установки (ДВУ) при виборі перетворювача частоти ATV630C31N4 компанії Schneider Electric. З використанням Matlab складено математичні моделі, досліджено статичні та динамічні характеристики електропривода ВУ.

У третьому розділі проведено аналіз електричних навантажень залізорудної шахти, вибрано силові трансформатори, розраховано струми короткого замикання (6 кВ і 0,4 кВ), вибрано кабелі, шини, апаратуру. Встановлено, що завантаження силових трансформаторів складає 30%, тому рекомендовано встановити трансформатори потужністю 250 кВА у рудниковому виконанні.

ШАХТА, ВОДОВІДЛИВНА УСТАНОВКА, НАСОС, ПЕРЕТВОРЮВАЧ ЧАСТОТИ, АСИНХРОННИЙ ДВИГУН, ХАРАКТЕРИСТИКИ ЕЛЕКТРОПРИВОДА, ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ

## ВСТУП

ВВП і валютні запаси України наповнюється шляхом реалізації залізорудної сировини.

Собівартість і вартість залізорудної сировини, яка видобувається на гірничорудних підприємствах України, постійно зростає, що виводить нашу

державу з десятки світових лідерів із видобутку залізної руди. Причиною є зростання енерговитрат на видобуток залізної руди, де енергетична складова біля 30%, а 90% – електроенергетична.

Тому саме вирішення комплексу проблем електроенергоефективності видобутку залізної руди першочергова задача і енергетиків, і гірників-технологів.

Питанням підвищення енергоефективності водовідливних комплексів залізорудних шахт постійно займаються як і на виробництві, так і науковці.

Робота шахтних водовідливних установок відрізняються від умов роботи інших насосних станцій. Це пояснюється значними глибинами залізорудних шахт (більше 1500 м), особливостями гірничо-геологічних родовищ, наявністю змінних у часі припливів шахтних вод.

Дослідженнями на прикладі шахт АТ «Криворізький залізорудний комбінат» доведено, що проведення модернізації водовідливних комплексів дозволить економити щорічно більше 18 млн. грн. (ціни 2020 р.).

Від роботи шахтного водовідливу не тільки залежить надійність і безпечність її роботи в цілому, але й безпечна робота працівників шахти.

Фактично режими роботи насосів впливають на економічну роботу усього водовідливного комплексу. В процесі експлуатації водовідливу режими роботи насосів постійно змінюються, що пов'язано з постійним зносом обладнання (насоси, засувки, приводні двигуни), зміною опора самої трубопровідної мережі (засмічення, заростання, замулення тощо), велике включення твердих часток та хімічний склад шахтних вод.

Провівши аналіз шляхів підвищення енергоефективності водовідливних комплексів можна стверджувати, що всі системи керування ГВК повинні базуватись на енергоефективних видах і режимах функціонування їх електромеханічних систем.

**Мета** - підвищення енергоефективності шахтного водовідливу.

**Об'єкт** - процеси пуску та експлуатації насосного агрегату ЦНС 300-240 шахтного водовідливу.

**Предмет** дослідження – режими роботи (експлуатаційні, пускові) насосного агрегату ЦНС 300-240.

**Завдання.** Вибір двигуна насосного агрегату ЦНС 300-240, розрахунок характеристик приводу насосного агрегату (статичних і динамічних).

## 1.1 ОГЛЯД ЕЛЕКТРОСПОЖИВАННЯ ЕНЕРГОЄМНИМ ОБЛАДНАННЯМ ЗАЛІЗОРУДНИХ ШАХТ

Історія видобутку залізної руди в Україні складає майже 200 років та розпочинається з відкритих копалень, де використовувалася ручна праця гірників, а найбільшою допомогою були коні.

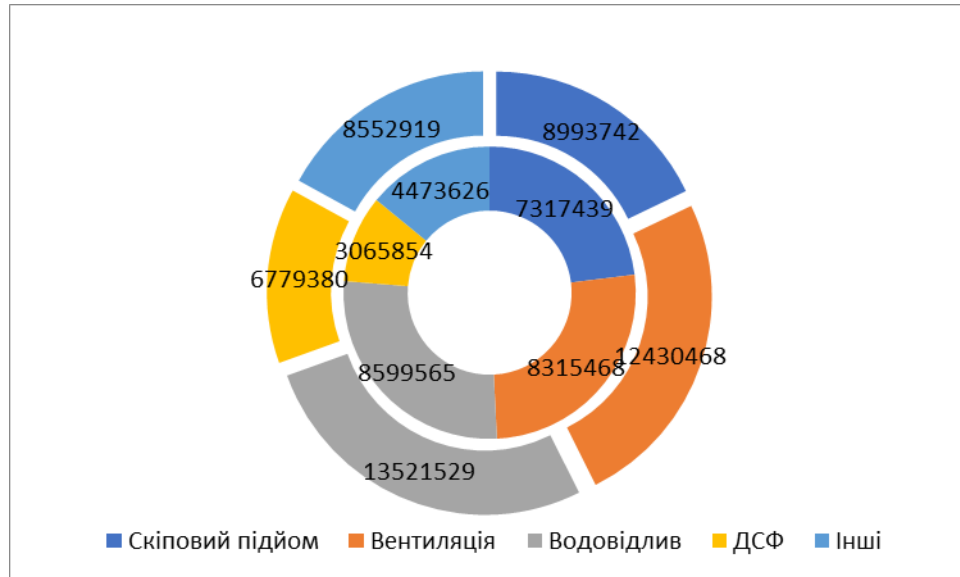
На сьогоднішній день в Україні залізну руду видобувають відкритим способом і підземним способом. У державі є 11-ть підземних підприємств (шахт). У Криворізькому залізорудному басейні працюють.....

Згідно статистики в Україні приблизно 90 % усіх енергоресурсів, що споживаються на гірничорудних підприємствах із підземним способом видобутку залізної руди, складає електрична енергія (рис. 1.1) [1].

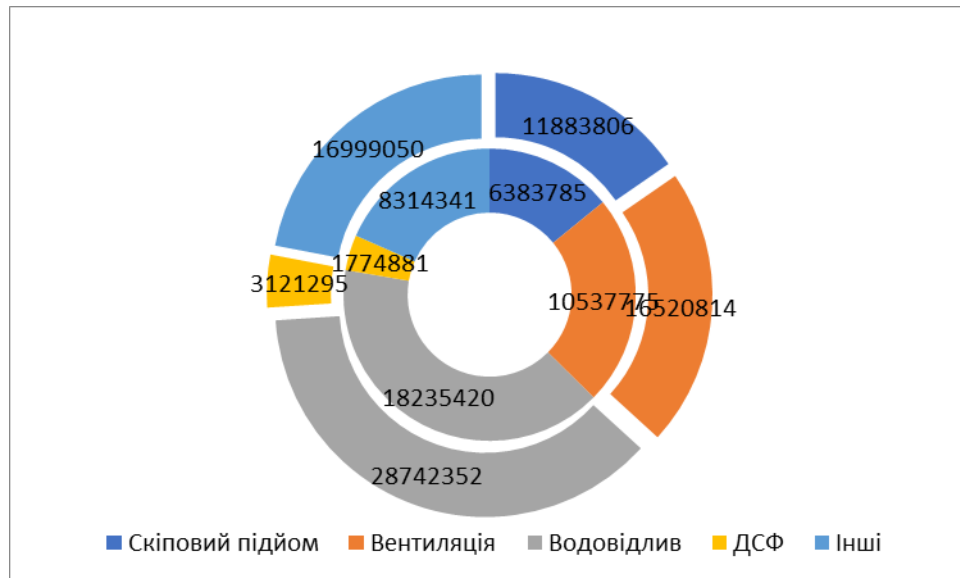


Рисунок 1.1 – Діаграма усереднених енерговитрат у залізорудних шахтах в Україні

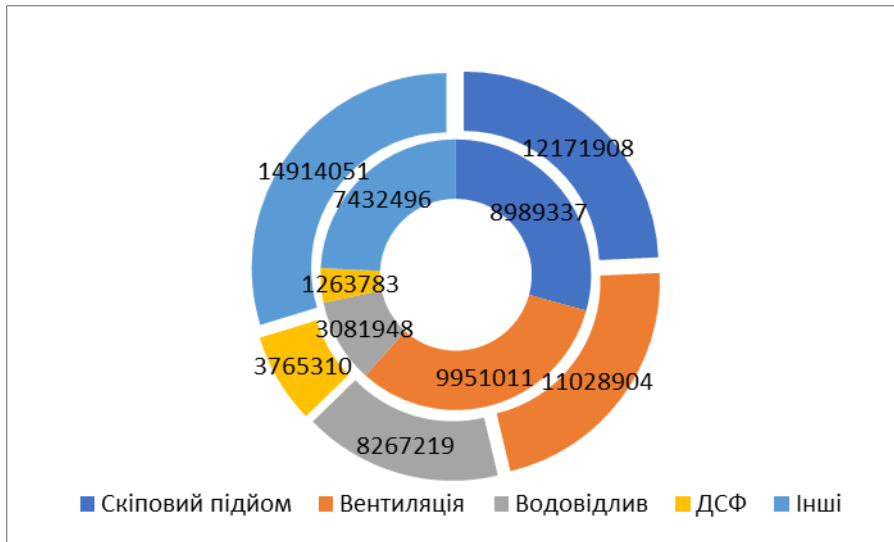
Системи водовідливу залізорудних шахт можуть мати 20 насосних агрегатів загальною потужністю до 10 МВт. Проаналізуємо споживання електричної енергії шахтами (див. рис. 1.2).



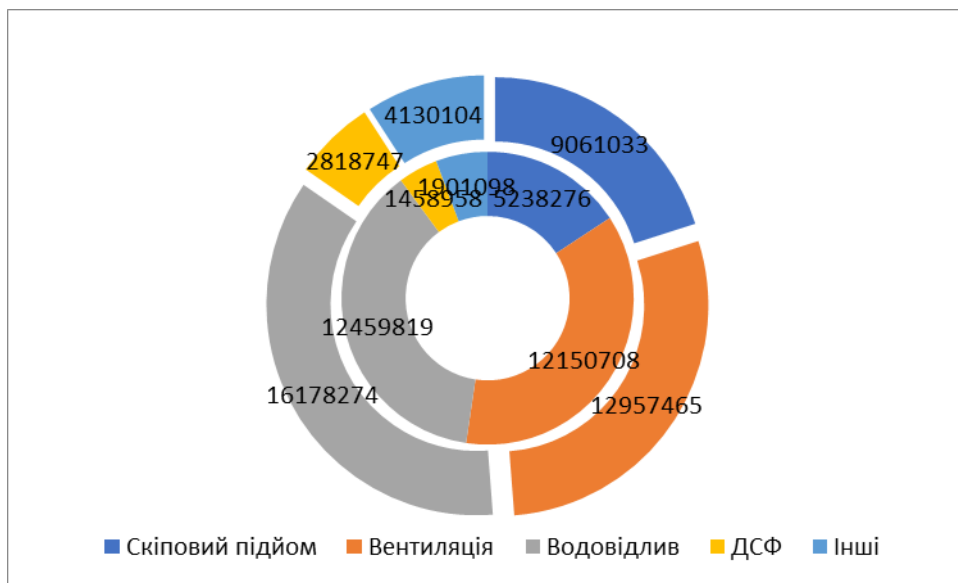
а)



б)



в)

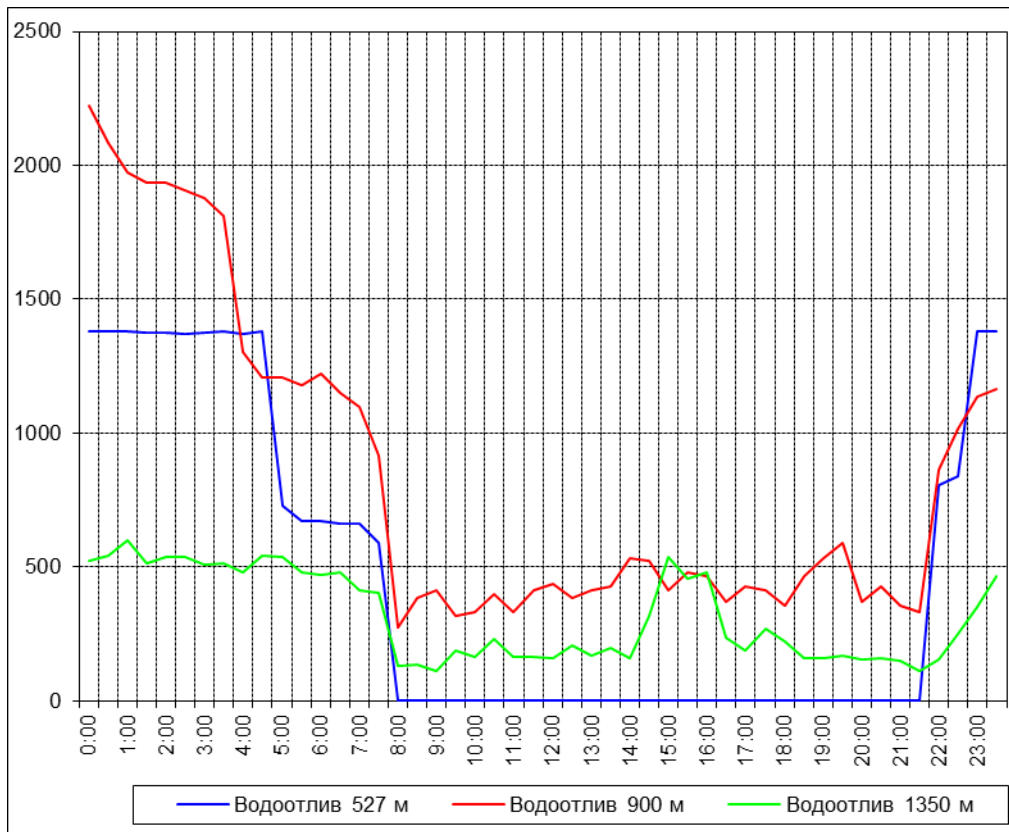


г)

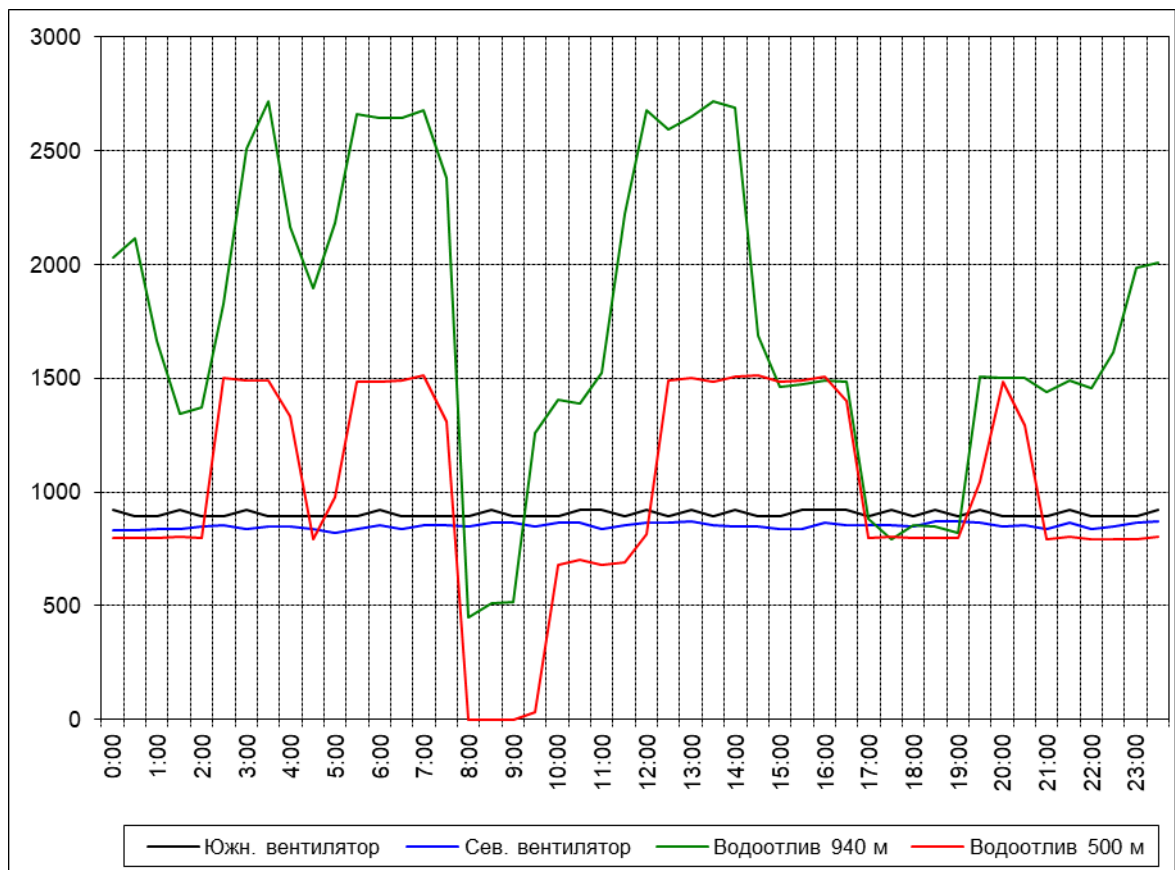
Рисунок 1.2 – Споживання електричної енергії (статистика по шахтам):

а) Покровська, б) Криворізька, в) Козацька, г) Тернівська

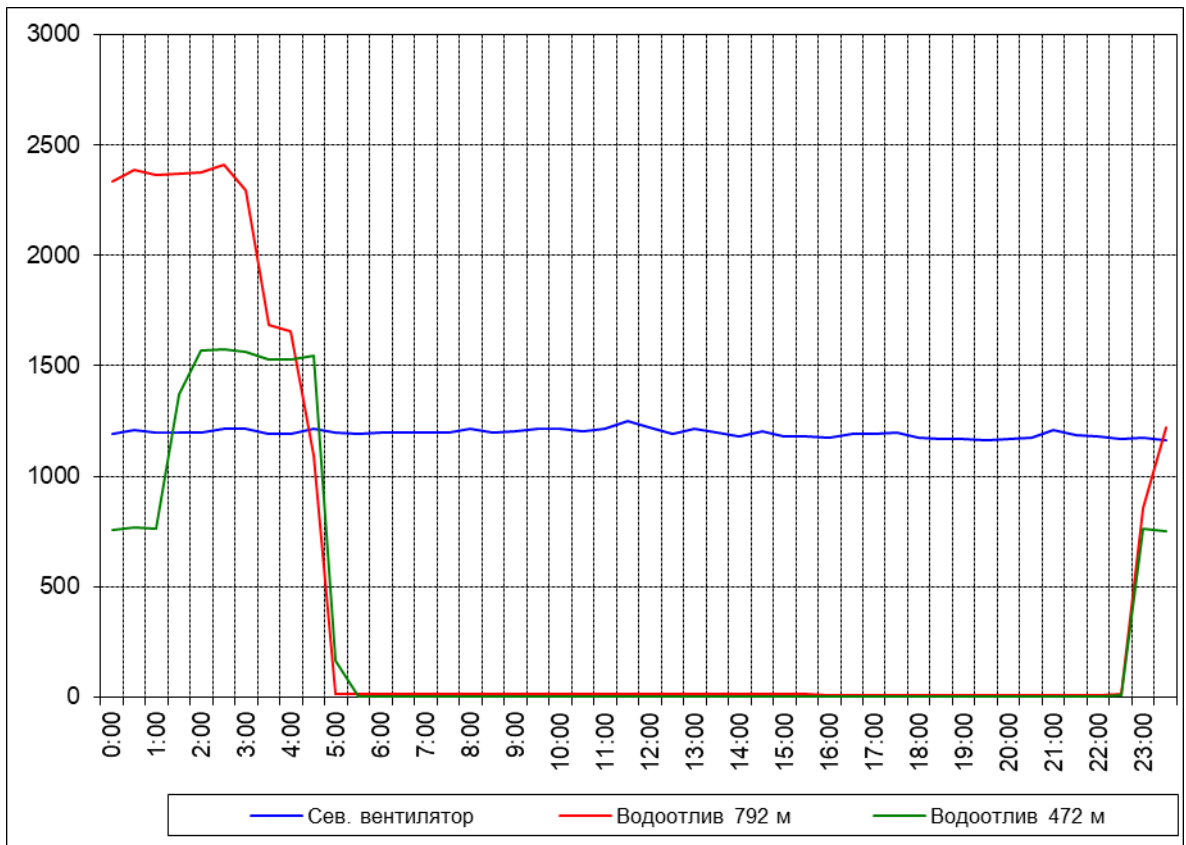
Також розглянемо зміну споживання електричної енергії водовідливними установками АТ Кривбасзалізрудком протягом доби (див. рис. 1.3).



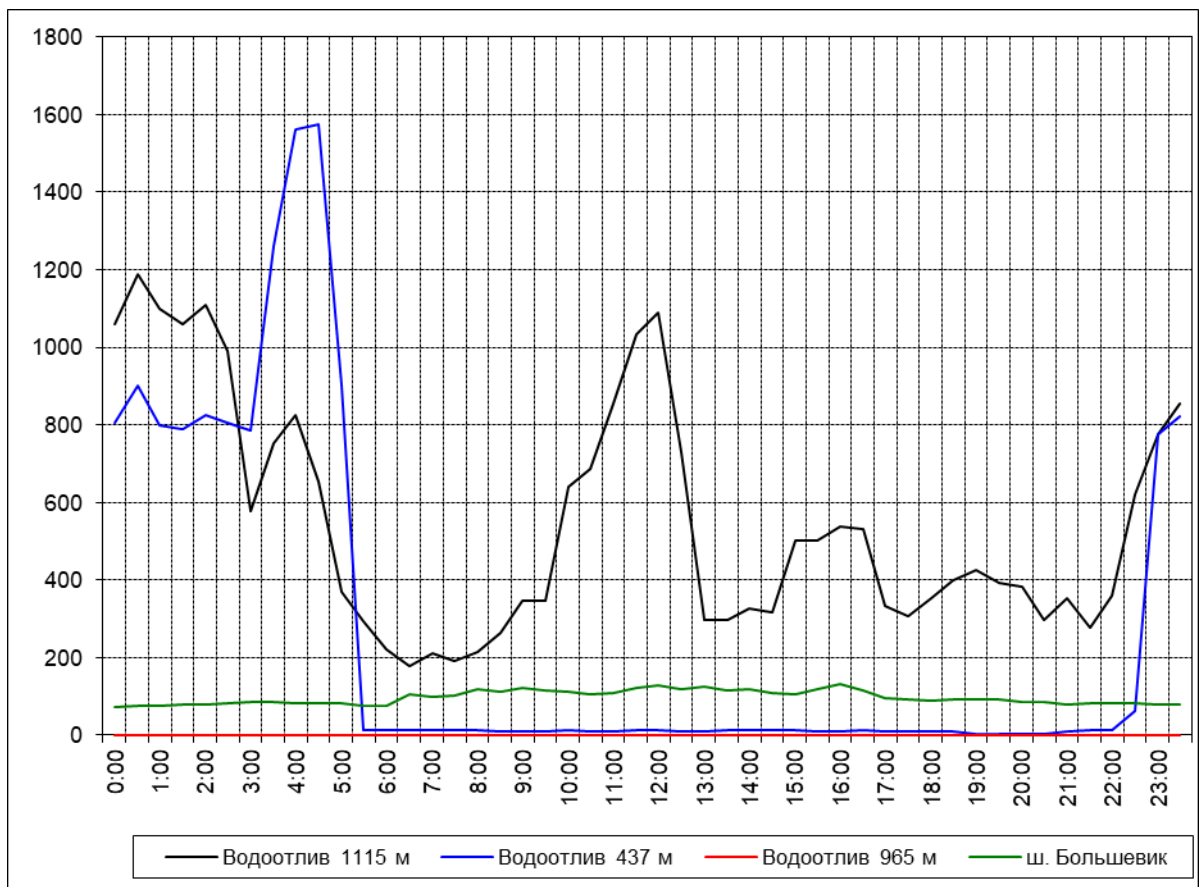
a)



б)



В)



Г)

Рисунок 1.3 – Споживання електричної енергії шахтами протягом доби:

а) Тернівська, б) Криворізька, в) Козацька, г) Покровська

Аналіз осцилограм показав, що насосні агрегати включаються частіше в нічний час. Ці графіки було отримано в той час, коли використовувався нічний тариф, який в 2 рази менший від денного. Тому, мінімальна вартість електроенергії – шлях до зниження собівартості залізної руди.

Загальне підвищення споживання електроенергії можна пояснити значною роботою водовідливних комплексів, шахтних підйомних установок.

За місяць об'єми електроенергії, що споживають шахти АТ «Кривбасзалізрудком» складають приблизно від 22 до 26 млн. кВт·год.

## 1.2 ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО ШАХТНИЙ ВОДОВІДЛИВ

На шахтах середні коефіцієнти притоку води коливаються в межах 0,6-0,7 м<sup>3</sup>/т, наприклад по шахті «Козацька» складає 8000 м<sup>3</sup> (див. рис. 1.4).



Рисунок 1.4 - Середні коефіцієнти притоку води по шахтам



У шахтах Криворіжжя працює ступінчаста схема перекачування шахтної води та подача її на поверхню.

Існують головні водовідливні установки (ГВУ) й допоміжні водовідливи, насосні установки яких призначені для поступового відкачування води з окремих горизонтів. На рис. 1.5 наведені схеми водовідливів різних шахт (рис. 1.5 -1.7). ГВУ - відкачують великий об'єм (сумарний) води з шахти, а допоміжні (дільничні) відкачують воду з певних горизонтів шахти у водозбірник ГВУ. Як правило, залізорудна шахта має дві-три основні дренажні установки, які розташовані на двох-трьох горизонтах.

Режим роботи ГВУ залежить від: притоку шахтної води за добу; ємності водозбірників.

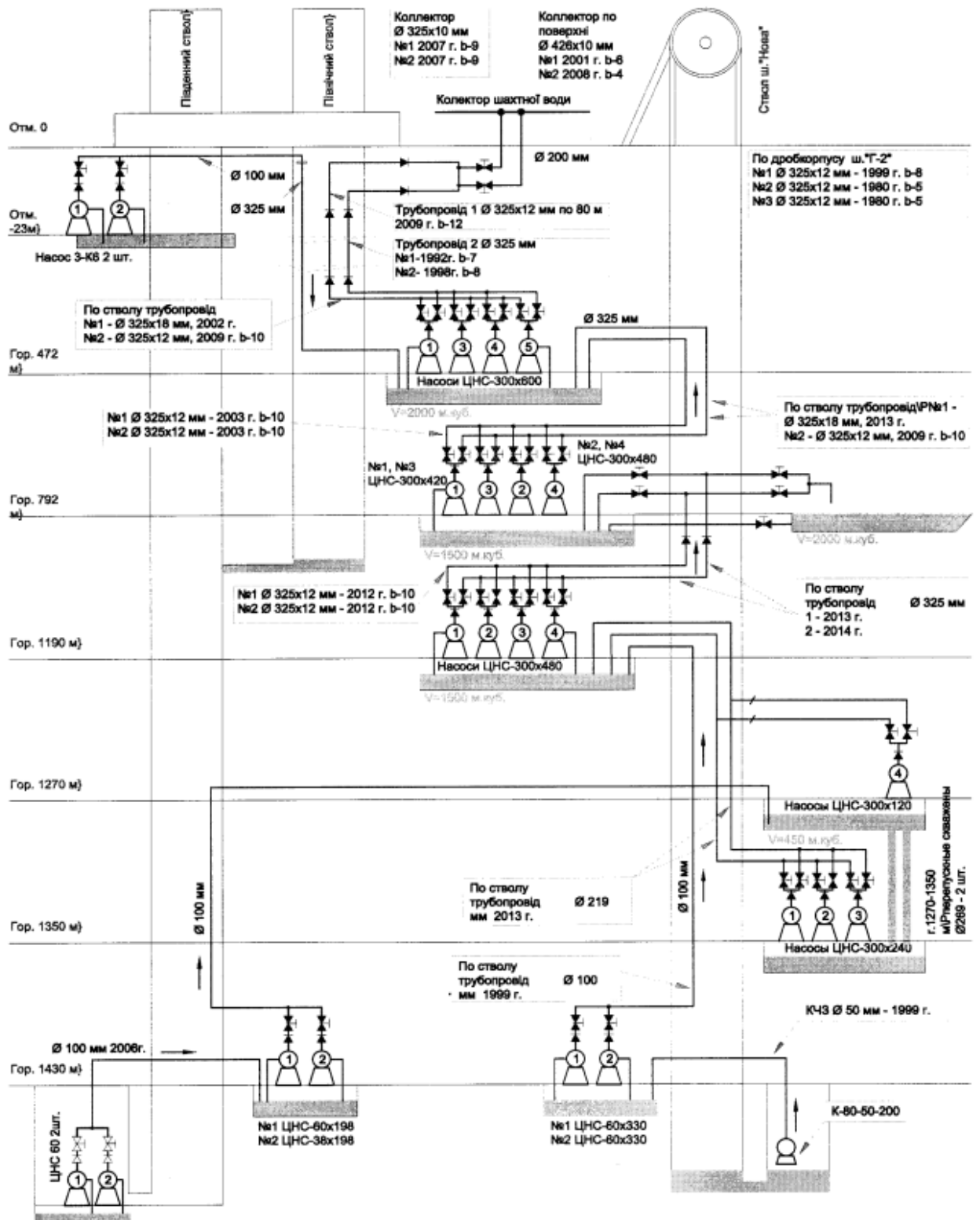


Рисунок 1.5 – Структура водовідливу шахти «Козацька»

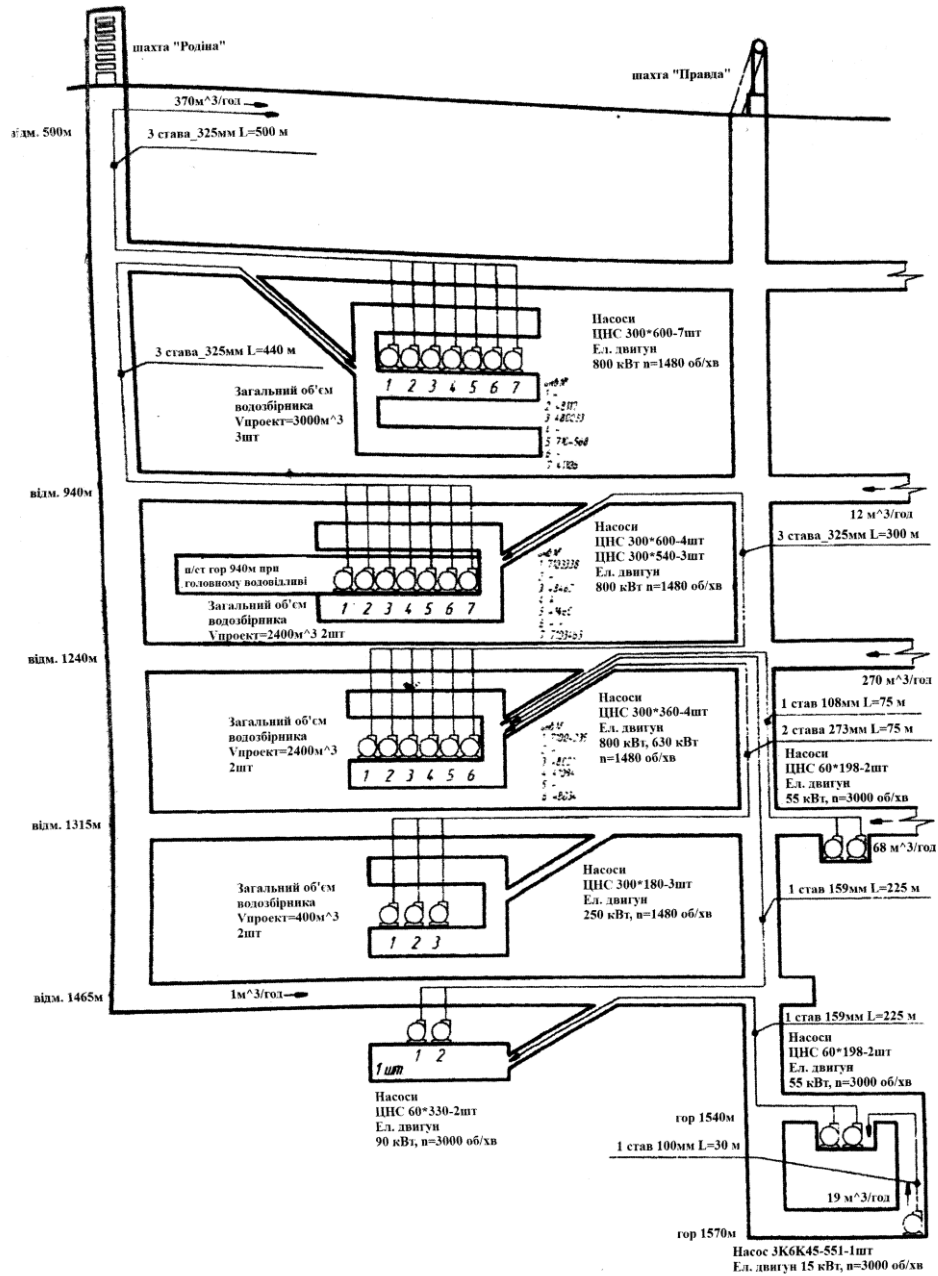


Рисунок 1.6 – Структура водовідливу шахти «Криворізька» і шахти «Нова»

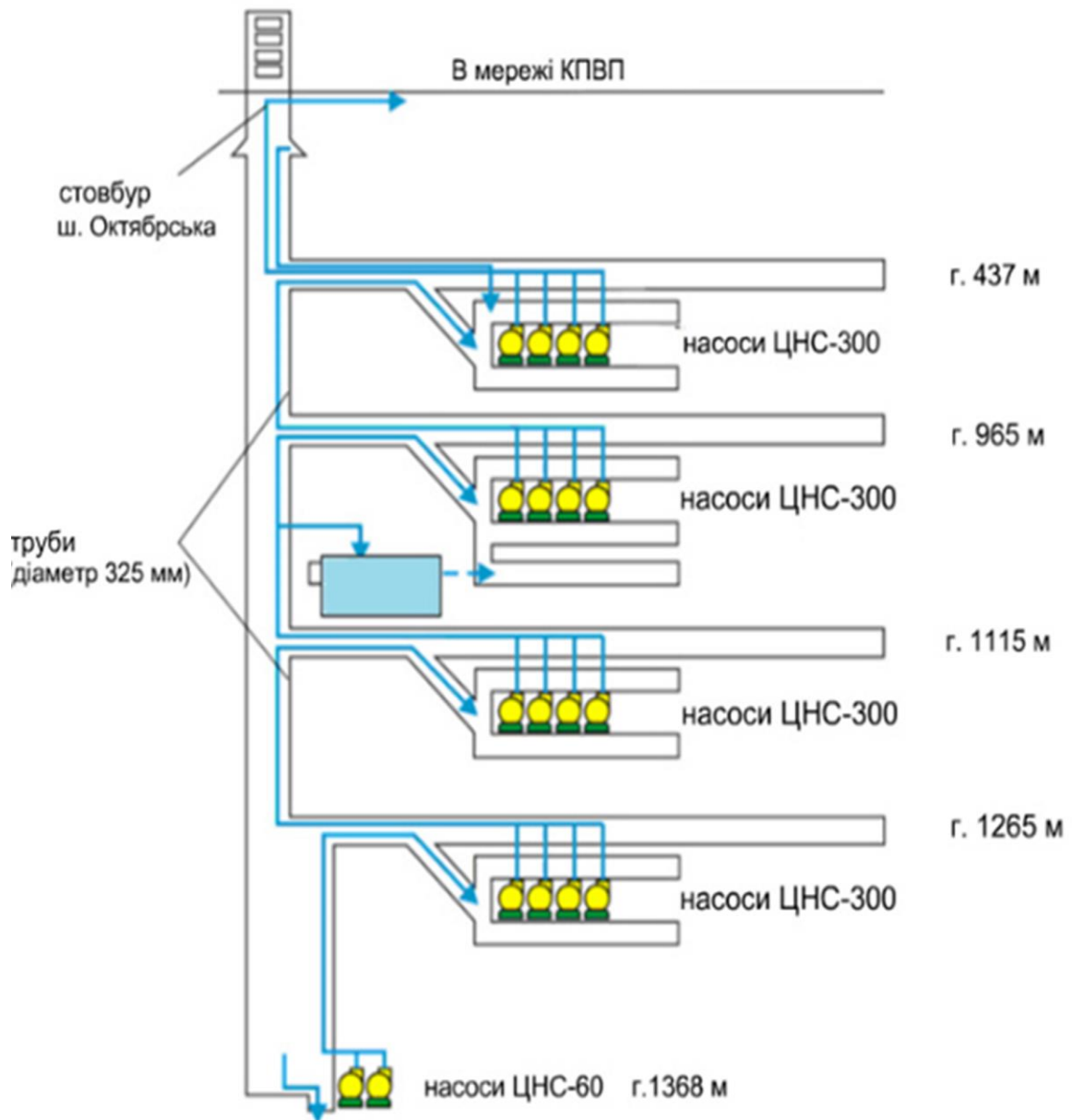


Рисунок 1.7 – Структура водовідливу шахти «Покровська»

ГВУ шахт мають не менше 3-х відцентрових насосів. Продуктивність одного насоса розрахована так, щоб він відкачував добовий притік води у шахті протягом 20 годин.

Проаналізуємо структури водовідливних комплексів шахт, наприклад шахти «Козацька», дані якого зведені в табл. 1.1.

Таблиця 1.1 – Водовідливний комплекс шахти «Козацька»

Структура водовідливу	Розташування	Призначення
Головні водовідливні установки (ГВУ) (472 м, 792 м)		
Водозбірник	1. Знаходяться поблизу насосної камери.	Місткість: розраховується на 8-ми – 10-ти годинний притік води. Площа: 10-12 м <sup>2</sup> , довжина: 70-100 м і більше.
	2. На одному з горизонтів	
	3. Поділений на дві частини за допомогою бетонної стінки	
	4. Кожна з двох частин з'єднана з розподільним колодязем (або з паралельними виробками)	
Насоси	1. Знаходяться в насосній камері.	Відкачування шахтних вод з горизонтів
		ККД: 45 – 46 %
Насосна камера	1. Розташовується в пристовбурному дворі.	Відкачування шахтних вод з горизонтів
	2. З'єднується зі стволом шахти похилим відводом.	
	3. З'єднується з пристовбурним двором відводом, що має герметичні двері.	
	4. З'єднується з водозбірником або зі спеціальними виробками.	
Шахтні трубопроводи	1. Обладнані двома трубопроводами нагнітальними: робочим і запасним.	1. Стальні безшовні гарячекатані труби. 2. Довжина труб: 4 – 12,5 м. 3. Внутрішній діаметр:

		100 - 250 мм.
Допоміжні водовідливні установки (ДВУ) (1350 м, 1430 м)		
Насоси	1. На нижніх горизонтах	2-3 насоси
	2. Насосні установки ЦНС-300х240 – 3 шт.	ККД: 45 – 46 %
	3. Насосні установки ЦНС-60х132 – 2 шт.	2 насоси
Трубопровід	Розташовані в північному стовбурі № 2 ш. «Козацька» та стовбурі ш. «Нова».	

Дані досліджень показують, що насосні установки в процесі експлуатації змінюють свої характеристики у бік їх погіршення:

- 60-70 % - за рахунок інтенсивного кавітаційного зношення;
- 20 % - зменшення подачі насосних агрегатів ЦНС 300 до величин 240 м<sup>3</sup>/год.

Але насосні агрегати мають доволі таки високий потенціал щодо енергозбереження, який оцінюється до 30-40 %.

### 1.3 ХАРАКТЕРИСТИКА ВОДОВІДЛИВНИХ КОМПЛЕКСІВ

На водовідливних комплексах залізорудних шахт використовуються насоси типу ЦНС 300-120..600 і більш сучасні типу ЦНСШ 300-140...800, параметри яких наведено в табл. 1.2, 1.3; робочі характеристики – на рис. 1.8, 1.9.

Таблиця 1.2 – Базові характеристики насосів типу ЦНС 300

Модель	Подача, м <sup>3</sup> /год.	Потужність, кВт	Напір, м	Частота обертів, 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

Таблиця 1.3 – Базові характеристики насосів типу ЦНСШ 300

Характеристики	Моделі									
	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

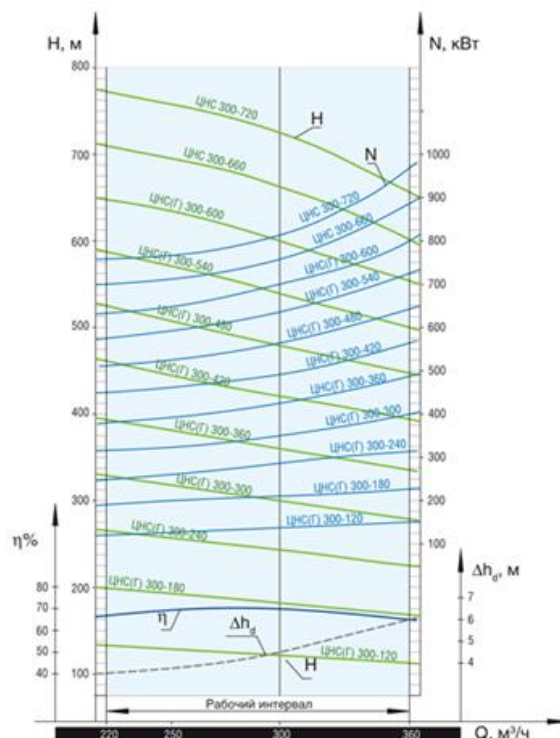


Рисунок 1.8 – Технологічні характеристики функціонування насосів типу ЦНС 300:  $Q$  – подача;  $H$  – напір;  $\eta$  – ККД;  $\Delta h_d$  – допустимий кавітаційний запас;  $Z_{ст}$  – число ступенів насоса;  $N_{ст}$  – споживана потужність

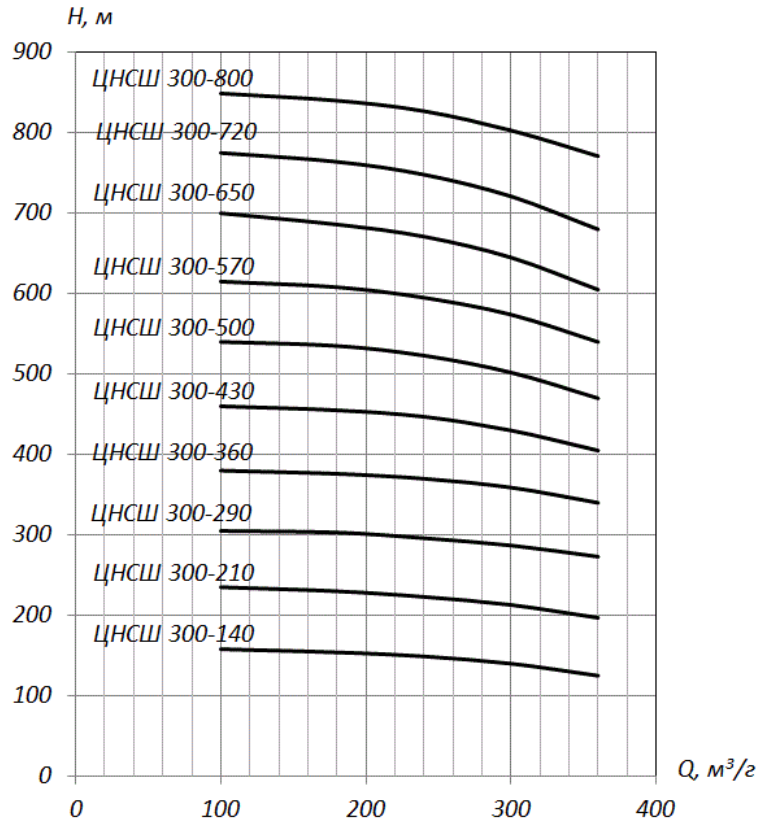


Рисунок 1.9 – Електромеханічні характеристики насосів типу ЦНСШ 300

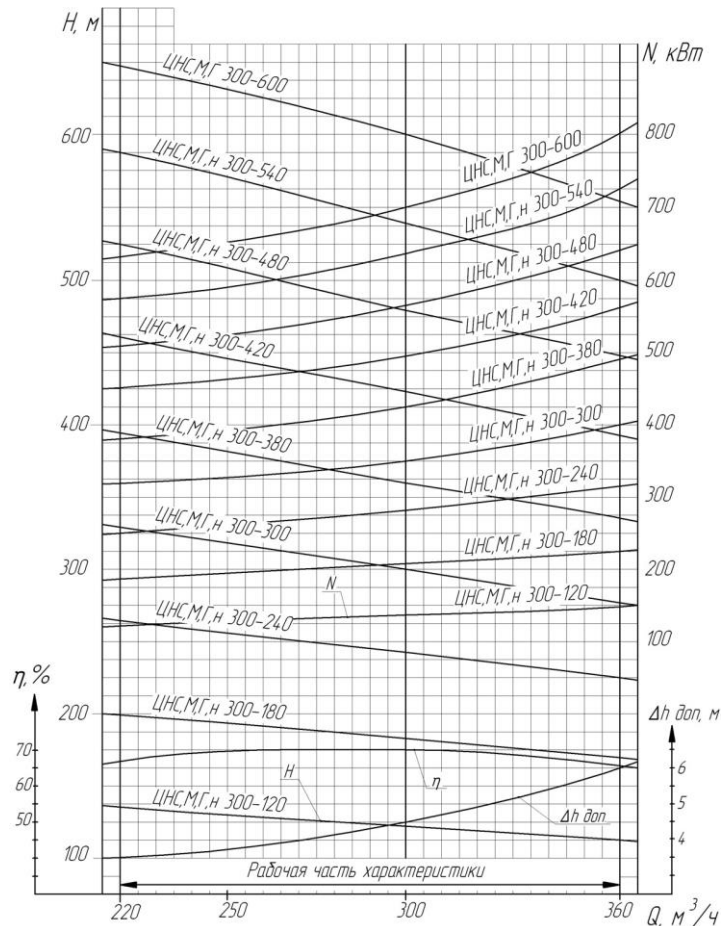


Рисунок 1.10 – Характеристики ЦНС 300-240

Порівняльні характеристики насосів різних типів ЦНСШ 300-570 і ЦНС 300-600 наведено в табл. 1.4.



Таблиця 1.4 – Порівняльні характеристики насосів різних типів ЦНСШ 300-570 і ЦНС 300-600

Характеристики	Тип	
	ЦНСШ 300-570	ЦНС 300-600
Частота обертів, об/хв	1480	1475
Подача, м <sup>3</sup> /год.	300	300
Напір, м	570	570
Число ступенів	8	10
Напір ступеня, 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, год.	6500	500
Середній ресурс до капітального ремонту, год.	12500	3800

Потужність приводного двигуна насоса відцентрового розраховують, використовуючи такі співвідношення:

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{n_1^3}{n_2^3}; \quad (1.1)$$

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{n_1}{n_2}; \quad (1.2)$$

$$\frac{H_1}{H_2} = \frac{n_1^2}{n_2^2}, \quad (1.3)$$

де  $N$  – потужність, кВт;

$n$  – швидкість обертання, об/хв;

$Q$  – продуктивність насоса, м<sup>3</sup>/год.;

$H$  – напір насоса, м.

Наприклад, у табл. 1.5 наведені також деякі паспортні параметри двигунів різних типів насосів.

Таблиця 1.5 – Характеристики насосів і двигунів

Технічні параметри	Тип насоса				
	ЦНС 300-600	ЦНС 300-480	ЦНС 300-420	ЦНС 300-240	ЦНС 60-132
Продуктивність, м <sup>3</sup> /год	300	300	300	300	60
Напір, м	600	480	480	240	132
Тип двигуна	A4-450X-4M	A4-400X-4M	A4-400X-4M	AIP355M4	4AM200L2
Потужність двигуна, кВт	800	630	630	315	45
Частота обертання, об/хв	1475	1475	1475	1490	3000
Номінальна напруга, В	6000	6000	6000	380	380
Коефіцієнт потужності	0,9	0,9	0,9	0,89	0,9

Водовідливне устаткування шахти «Покровська» наведено у табл. 1.6.

Таблиця 1.6 – Водовідливне устаткування

Горизонти, м	437	965	1115	1265
Ємність водозбірника, м <sup>3</sup>	2000	2600	4000	4000
Тип насосів	ЦНС 300-600	ЦНС 300-600	ЦНС 300-240	ЦНС 300-200
Кількість насосів	4 шт.			
Напруга, кВ	6,0		0,4	

Допоміжні водовідливні установки (ДВУ) мають такі характеристики:

- місткість водозбірника розрахована на чотири години притока води;
- вода перекачується з горизонту 1265 м на горизонт 1115 м;
- працюють насоси ЦНС 300-240 (горизонтальні, багатоступінчаті);
- вода відкачується по стовбуру Сліпа-Покровська.

#### 1.4 СТЕНД КЕРУВАННЯ ВОДОВІДЛИВНИМ КОМПЛЕКСОМ ШАХТ

Я проходив переддипломну практику на кафедрі електромеханіки КНУ. Там я ознайомився з макетом системи керування водовідливним комплексом, який розроблений на кафедрі. На даному стенді розроблена та побудована система диспетчерського керування. Керування повністю автоматизоване, виконане на базі сучасної SCSDA системи з програмованим логічним контролером.

##### Макет шахтної водовідливної установки.

Даний макет є гідравлічним об'єктом за допомогою якого можливо провести аналіз роботи насосів (див. рис. 1.11, 1.12).

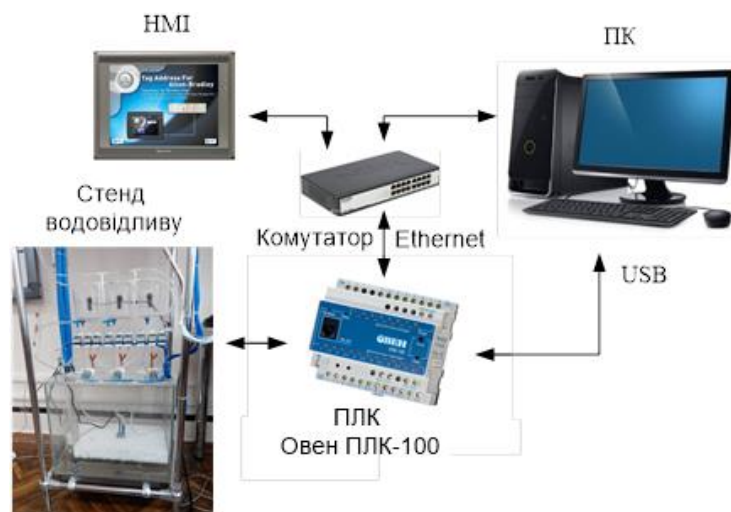


Рисунок 1.11 – Структурна схема водовідливного комплексу з елементами керування

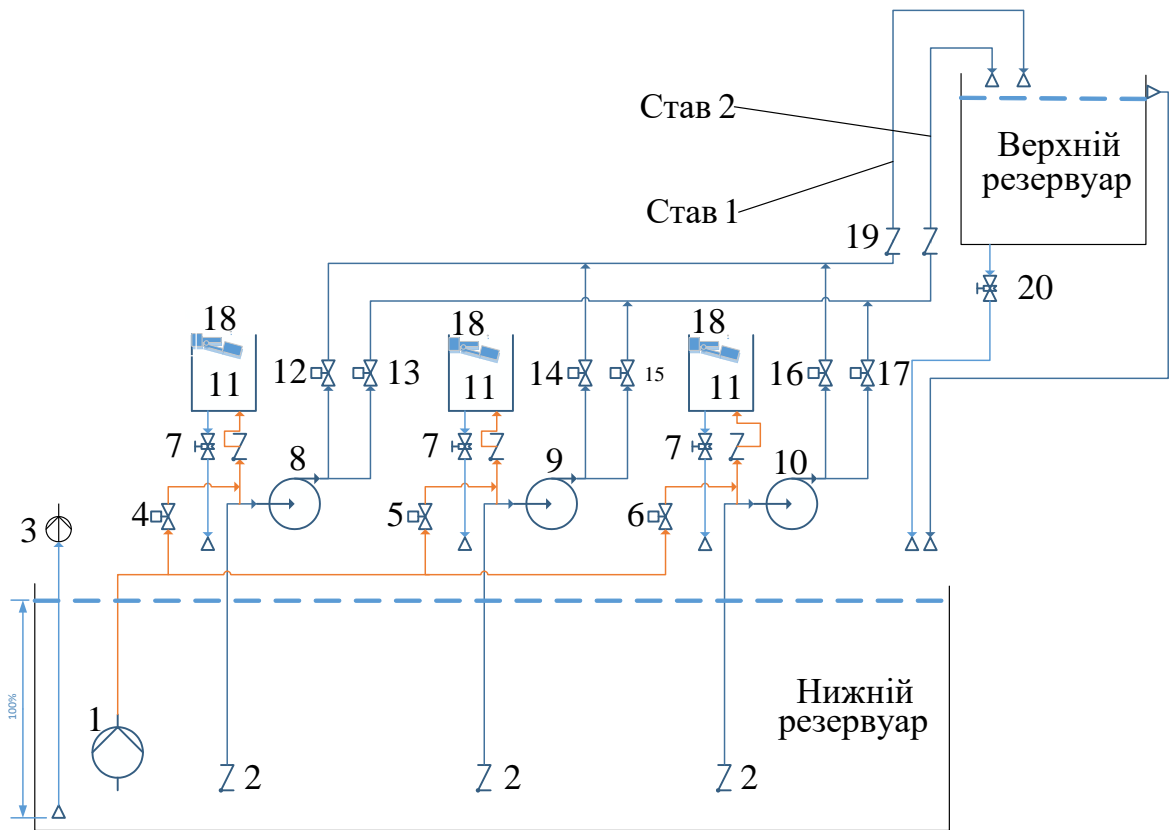


Рисунок 1.12 – Гідравлічна схема макету водовідливного комплексу:

1 – насос занурений, 2 – затворний клапан, 3 – пропорційний безперервний датчик, 4, 5, 6 – засувки, 7 – крани, 8, 9, 10 – насоси, 11 – резервуар, 12-17 – засувки ставів, 18 – датчик рівня, 19 - ..... , 20 – труба з краном

Даний макет шахтного водовідливу має 3 насоси, запірну арматуру, два резервуари води та на ньому можна промоделювати роботу одноступінчастого водовідливу, виключаючи послідовне включення насосів.

Резервуари води (імітують шахтні водозбірники) мають форму паралелепіпедів. Причому нижній резервуар – це модель шахтного зумпфа, верхній резервуар – модель поверхневого водозбірника.

Контролюється рівень шахтної води у верхньому резервуарі та щоб запобігти його переповненню передбачена аварійна труба, яка скидає воду в так званий «зумпф». Притік води (в шахті відбувається з нижніх горизонтів у резервуари верхніх горизонтів) та її швидкість виконується за допомогою труби з краном (позиція 20).

Вода у макеті перекачується за допомогою трьох насосів ( позиції 8-10). Також встановлені клапани зворотні (позиція 2) у кінці забірних труб, що забезпечує перетік води з насосів.

Даний макет має систему заливки водою, т. я. у реальних водовідливних комплексах відцентрові насоси повинні бути залиті водою.

Занурений насос (позиція 1) – основна складова фізичної моделі водовідливної установки.

Встановлені засувки (позиції 4-6) допомагають здійснити заливку насосів, причому кожного окремо. Вода (шахтна) наповнює накопичувальний резервуар (позиція 11) та потрапляє до певного насосу. В головному накопичувальному резервуарі (позиція 11) здійснює необхідний контроль рівня води за допомогою датчика рівня поплавкового типу (позиція 18). Датчик (позиція 18) спрацьовує після заливки одного з насосів до необхідного рівня.

Вода в макеті використовується у замкненому циклі - для її повернення в зумпф розташована зворотня трубка. Після повного наповнення водою установки вода скидається (для повторення циклу). Швидкості витoku води контролюється встановленими кранами (позиція 7).

Коли завершується цикл по заливці води, розпочинається робота насосів макету водовідливу. Включається відповідний насос, який перекачує воду на певний став при відкритих засувках ставів (позиції 12-17). У макеті встановлено два стави, насос працює на свій став, паралельна робота насосів виключається задля запобігання гідравлічних ударів при запуску насосної установки.

У «зумпфі» також встановлений датчик рівня - пропорційний безперервний датчик (позиція 3), що аналізує також швидкість притоку води у макет та тиск стовпа води, який пропорційний висоті води.

#### Обладнання макету шахтної водовідливної установки

Для безпосереднього керування електричними пристроями стенду (насоси, клапани, датчики тощо) передбачено:

- логічний контролер ПЛК (32-х розрядний RISC-процесор 200 МГц на базі ядра ARM9);
- додатковий модуль дискретних виходів МУ110-224.8К і аналогових виходів МВ110-8А;
- локальна мережа (мережевий протокол Modbus).

Побудовані графічні екрани (див. рис. 1.13, 1.14).

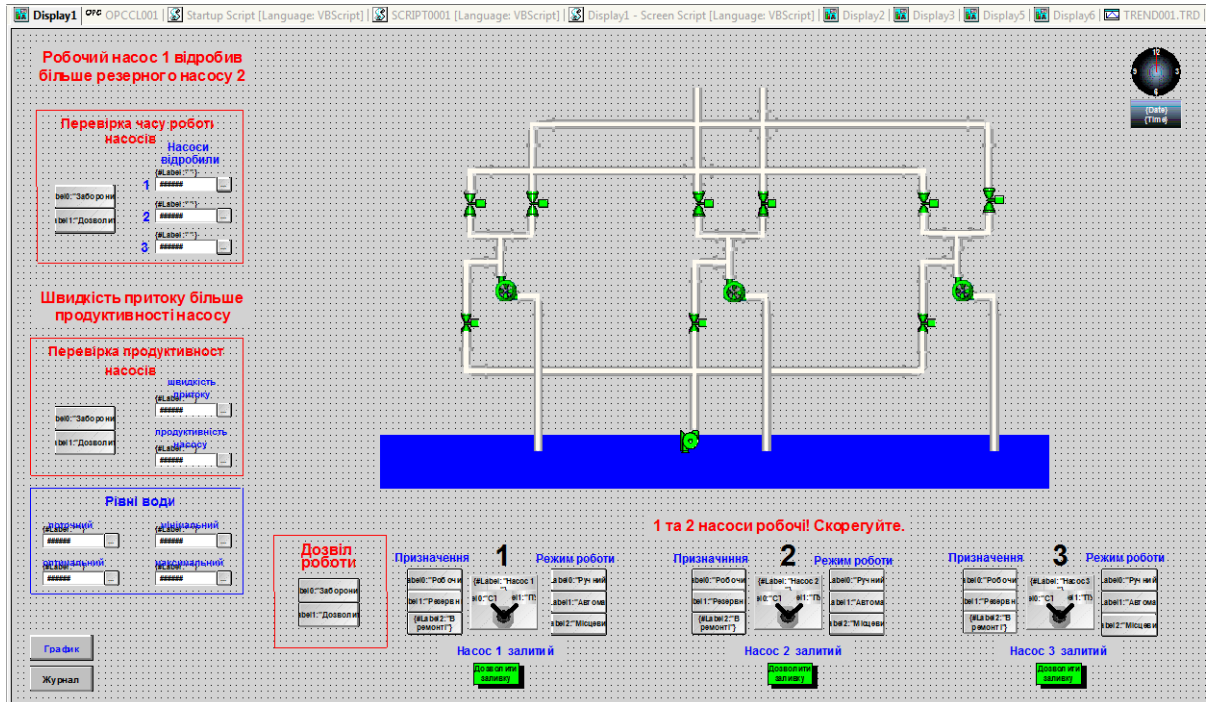


Рисунок 1.13 – Екран мнемосхеми стану водовідливної установки

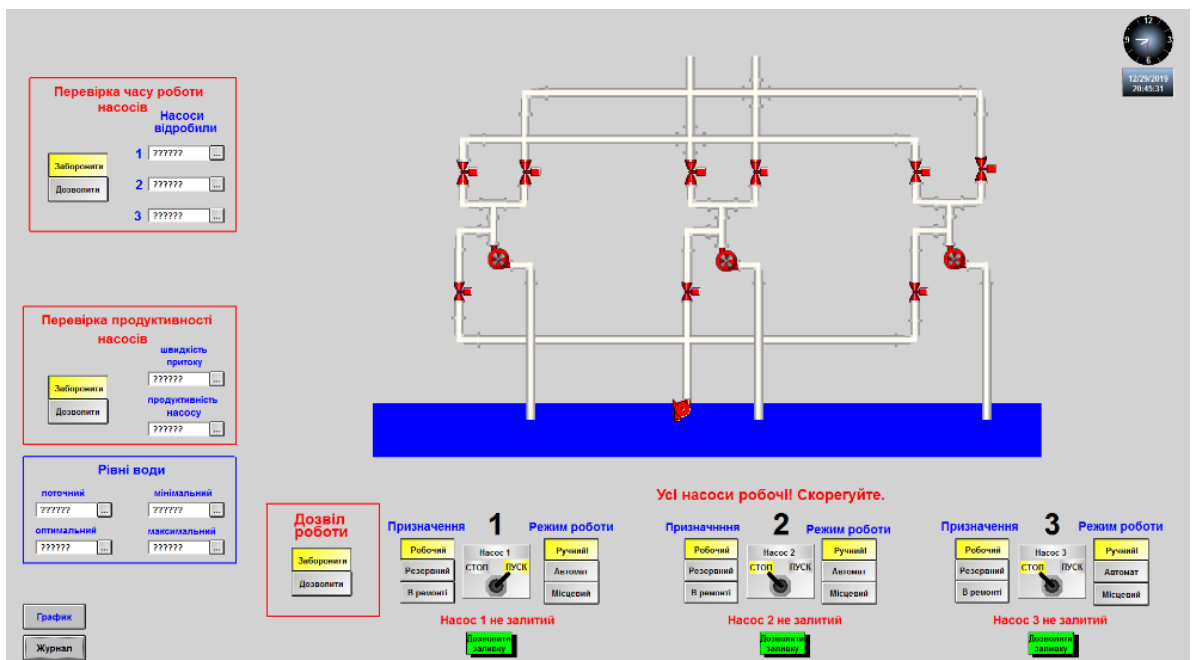


Рисунок 1.14 – Екран мнемосхеми працюючого стану водовідливної установки

#### 1.4 ВИБІР НАСОСІВ І ДВИГУНІВ ДВУ

На ДВУ встановлений насос марки ЦНС 300-240, загальний вид якого на рис. 1.15, а характеристики - в табл. 1.7.

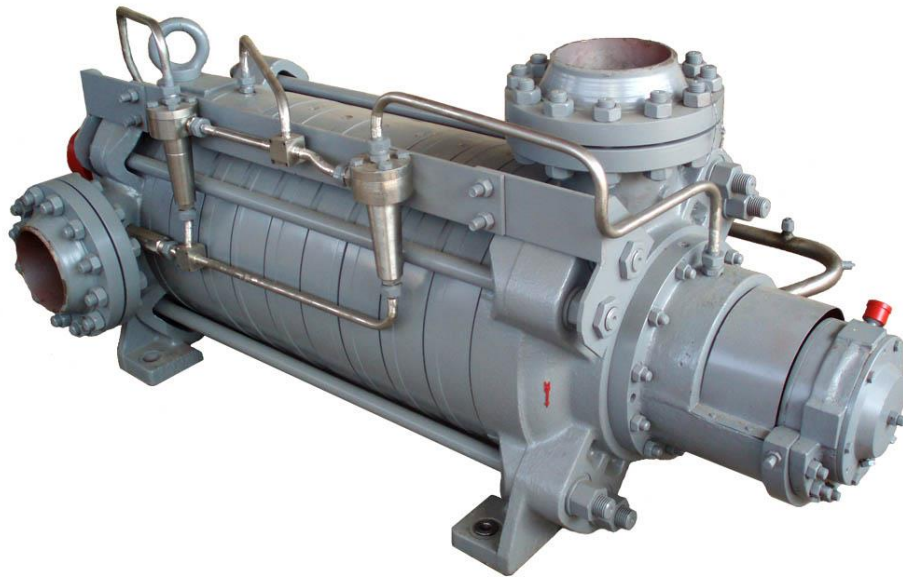


Рисунок 1.15 – Насос допоміжної водовідливної установки типу ЦНС 300-240

Таблиця 1.7 - Технічні характеристики відцентрового насосу ЦНС 300-240

Параметри та одиниці вимірювання	Значення
Напір, м	240
Подача, м <sup>3</sup> /год.	300
Потужність, кВт	315
Частота обертів, об/хв.	1475
Число ступенів	4
Тиск на вході, МПа	0,3
Допустимий кавітаційний запас, м	5,0
Коефіцієнт корисної дії, %	70

Відцентрові насоси здійснюють перекачування води від центру до периферії за рахунок обертання робочих коліс під дією відцентрової сили. Кількість секцій у насосів 2 – 10, подача насосів складає 13 - 850 м<sup>3</sup>/год, напір в межах 44 – 1300 мм.

Зовнішня характеристика системи:

$$H_m(Q) = H_n + H_{вс} + R_t \cdot Q^2 \quad (1.4)$$

де  $R_t$  – питомий опір мережі.

$$R_{IH} = \left( \frac{\lambda l_n \cdot (H_n + L_{n1} + L_{n2} + L_{n3})}{d_n} + n_{задв} \cdot \lambda_{задв} + n_{кн} \cdot \lambda_{кн} + n_{ок} \cdot \lambda_{ок} + n_{кн} \cdot \lambda_{к} + 1 \right) \times \frac{8}{10000000 \cdot \pi^2 \cdot d_g^4 \cdot g} \quad (1.5)$$

$$R_{Iв} = \left( \frac{\lambda l_g \cdot H_{вс}}{d_g} + \lambda_{к} \cdot n_{кв} + 1 \right) \times \frac{8}{10000000 \cdot \pi^2 \cdot d_g^4 \cdot g} \quad (1.6)$$

$$R_t = R_{IH} + R_{Iв} = 0,0000943293 \quad (1.7)$$

Потужність двигуна насоса:

$$P_{дв} = 1,05 \cdot 10^{-3} \cdot \rho \cdot g \cdot \frac{H_{нас} \cdot Q_{нас}}{3600 \cdot \eta_{нас} \cdot z_{пр}} = 1,15 \cdot 10^{-3} \cdot 1025 \cdot 9,81 \cdot \frac{240 \cdot 300}{3600 \cdot 0,7 \cdot 1,0} = 315,0 \quad (1.8)$$

Для даного насоса встановлюється двигун АИР355М4 (див. табл. 1.8).

Таблиця 1.8 - Паспортні дані двигуна АИР355М4

Паспортні дані двигуна та од. вимірювання	Величини даних
Номінальна потужність, кВт	315,0
Напруга, В	380,0
Частота струму, Гц	50,0
Частота обертів, об/хв.	1490
ККД, %	95,7
Коефіцієнт потужності	0,9
Кратність пускового струму до номінального	6,9
Відношення критичного моменту до номінального	2,2
Відношення пускового моменту до номінального	2,1
Момент інерції двигуна, кг·м <sup>2</sup>	8,2



## 2.1 АНАЛІЗ МОЖЛИВОСТІ КЕРУВАННЯ ВОДОВІДЛИВНИМИ УСТАНОВКАМИ ЗАЛІЗОРУДНИХ ШАХТ

### 2.1.1 Огляд існуючих показників та тенденцій

В Україні питаннями ефективної роботи водовідливних установок продовжують активно займатися і науковці, і спеціалісти підприємств, тому що тема продовжує залишатися актуальною і на сьогоднішній день.

Широко проводяться дослідження, які базуються і на теоретичному, і практичному підґрунтях. Це і аналізи експериментів, які вибираються з діючих гірничорудних шахт, і теоретична дослідницька база (фахівці Криворізького національного університету під керівництвом д-ра техн. наук, професора Сінчука О.М.). Ці дослідження проводяться під девізом: підвищення енергоефективності водовідливних установок.

Вирішення цієї проблеми можливо здійснити використанням нових заходів, серед яких є керування процесом роботи насосних агрегатів водовідливної комплексу залізорудних шахт.

Відомо, що процес надходження ґрунтових вод є стохастичним процесом і він впливає на необхідність відкачування шахтних вод з підземних горизонтів на поверхню.

Враховуючи нахил характеристик споживання електроенергії приводними АД насосних агрегатів і нахилу характеристик насосів  $Q = f(H)$ , необхідно встановлення в їх електромеханічні системи перетворювачів частоти (ПЧ). Якраз ПЧ будуть керувати процесом роботи насосних агрегатів привідних двигунів в енергоефективному режимі.

За даними досліджень впровадження ПЧ-АД разом з «плаваючими» добовими тарифами на електроенергію дозволяє на 8-11 % зменшити електроенерговитрати шахти.

Керування роботою насосних агрегатів і ГВУ, і ДВУ забезпечує економію електричної енергії шляхом максимального наближення ККД привідних АД і насосів до їх паспортно-номінальних значень.

Завод-виробник насосів надає інформацію щодо широкого діапазону продуктивності їх роботи, але реально він значно менший і це спрощує використання ПЧ та необхідність регулювання частот у широких межах. Наприклад, для насоса ЦНС 300-600 діапазон зміни продуктивності знаходиться 220-340 м<sup>3</sup>/год, а для насоса ЦНС 300-240 - 220-280 м<sup>3</sup>/год.

Для теоретичної оцінки роботи насоса ЦНС 300-240 вибираємо перетворювач частоти та проведемо розрахунки у *Matlab* для різних частот: від 10 Гц до 50 Гц.

### 2.1.2 Вибір перетворювача частоти

Широку популярність набули перетворювачі частоти фірм АВВ, Schneider Electric та інші.

Свій вибір зупинив на перетворювачі частоти Schneider Electric ATV630 (ATV630C31N4) (рис. 2.1); його характеристики в табл. 2.1.



Рисунок 2.1 – Перетворювач частоти ATV630C31N4

Таблиця 2.1 - Характеристики перетворювача частоти ATV630C31N4

Характеристики перетворювача частоти ATV630C31N4	Значення характеристики
Номер моделі	ATV630C31N4
Потужність навантаження, кВт	315
Номінальна напруга, В	380-480
Номінальний вихідний струм навантаження, А	616
Номінальна частота мережі, Гц	50/60
Вихідна частота навантаження, Гц	0,1-599
Число фаз	3
Тип керування	скалярне
Кількість дискретних входів/виходів	6/3NO
Кількість аналогових входів/виходів	3/2
Перевантажувальна здатність %	150
Вага (стандартна конструкція), кг	203
Габаритні розміри (ш х в х г), мм	598x 1195 x 380
Вартість на 02.06.2024 р., грн.	839366

Сучасні ПЧ мають високу надійність, яка забезпечує:

- електромагнітну сумісність ПЧ із мережею електропостачання;
- електромагнітну сумісність привідного двигуна й автономного інвертора;
- якість електроенергії згідно з ДСТУ EN 50160:2014;
- вдосконалення мікропроцесора та параметрів високовольтних вентилів;
- тест-контроль ПЧ та обладнання.

Також саме цей ПЧ (Schneider Electric ATV630) забезпечує захисти (табл. 2.2).

Таблиця 2.2 – Захисти, що забезпечує перетворювач частоти Schneider Electric ATV630

Захист мережі	Захист двигуна	Захист приводу	Коло керування
Надструм між вихідною фазою та землею	Тепловий	Тепловий	Відключення
Підвищена напруга лінії живлення	Відключення при перевищенні обертового моменту	Перевищення температури	
Перенапруга на шині постійного струму	Зникнення фази		
Значне зменшення напруги лінії живлення	Перевищення швидкості		
Захист від короткого замикання			
Перевантаження за вихідною напругою			

Для роботи системи водовідливу необхідно також вибрати силовий трансформатор - ТСЗП-400/10УЗ/3, дані якого в табл. 2.3.

Таблиця 2.3 - Паспортні дані трансформатора ТСЗП-400/10УЗ/3

Тип	$S_{\text{н}}$ кВА	$U_1$ , В	$U_2$ , В	$I_2$ , А	$U_{2\text{т}}$ , В	$I_{2\text{т}}$ , А	$P_{\text{хх}}$ , Вт	$P_{\text{кз}}$ , Вт	$u_{\text{кз}}$ , %
ТСЗП-400/10УЗ/3	351	6000	310	653	345	800	1600	4700	2,6

## 2.2 РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ВОДОВІДЛИВНОЮ УСТАНОВКОЮ

В роботі будемо використовувати наступні схеми заміщення (рис. 2.2).

Для виконання процесу моделювання необхідно виконати розрахунки багатьох параметрів. Усі вони виконуються за відомими формулами, назви параметрів стандартні для електричних машин та теорії електропривода.

Проведені розрахунки для кращого сприйняття я звів у табл. 2.4.

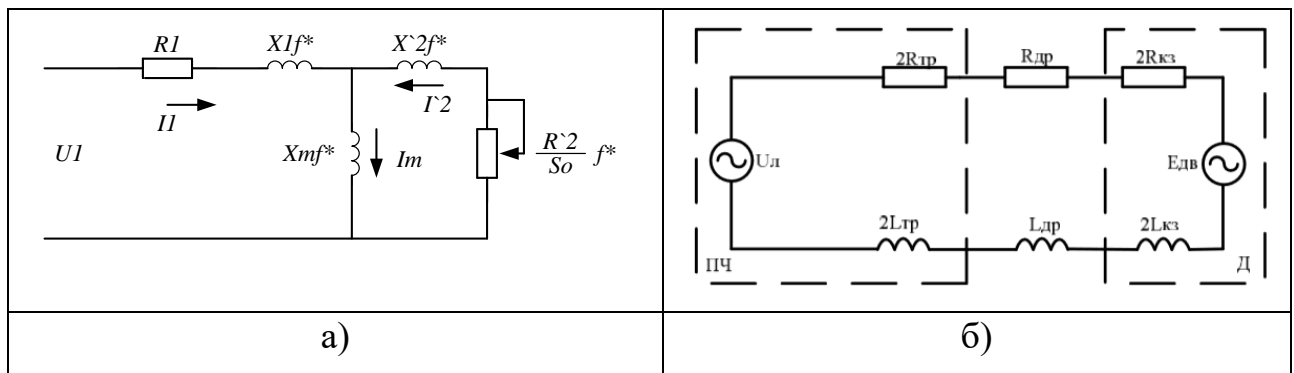


Рисунок 2.2 – Схеми заміщення:

а) Т - подібна двигуна; б) системи керування ПЧ-АД

Таблиця 2.4 - Розрахунки параметрів схем заміщення

Формула	Од. вим.	Назва	Ви-раз
Параметри асинхронного двигуна АИР355М4 (рис. 2.2, а)			
$\omega_H = \frac{\pi \cdot n_H}{30} = \frac{\pi \cdot 1490}{30} = 156.0$	рад/ с	Частота обертання номінальна	2.1
$\omega_0 = \frac{2\pi f_l}{p} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 50}{2} = 157,1$	рад/ с	Частота сизхрона	2.2
$S_H = \frac{\omega_0 - \omega_H}{\omega_0} = \frac{157.1 - 156.0}{157.1} = 0.007002$		Ковзання номінальне	2.3
$S_K = S_H \cdot (\lambda_M + \sqrt{\lambda_M^2 - 1}) = 0.007002 \cdot (2.2 + \sqrt{2.2^2 - 1}) = 0.02913$		Ковзання критичне	2.4

$I_H = \frac{P_H}{\sqrt{3} \cdot U_{1H} \cdot \eta_H \cdot \cos \varphi_H} = \frac{315000}{\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 0.95 \cdot 0.9} = 559.8$	А	Струм статора	2.5
$M_H = \frac{P_H}{\omega_H} = \frac{315000}{156.0} = 2019.0$	Н·м	Момент номінальний	2.6
$M_K = \lambda_M \cdot M_H = 2.2 \cdot 2019.0 = 4442.0$	Н·м	Момент критичний	2.7
$M_n = \lambda_n \cdot M_H = 2.1 \cdot 2019.0 = 4240.0$	Н·м	Момент пусковий	2.8
$Z_{K3} = \frac{U_{1H}}{\sqrt{3} \cdot I_H \cdot k_i} = \frac{380}{\sqrt{3} \cdot 559.8 \cdot 6.9} = 0.0568$	Ом	Опір АД	2.9
$r'_2 = \frac{M_n \cdot Z_{K3}^2}{\frac{m_c \cdot U_{1H}^2}{3 \cdot \omega_0}} = \frac{4240.0 \cdot 0.0568^2}{\frac{3 \cdot 380^2}{3 \cdot 157.1}} = 0.01488$	Ом	Опір ротора	2.10
$\cos \varphi_n = \cos \varphi_H \cdot \left[ \lambda_n \cdot \frac{\eta_H}{(1 - S_H) \cdot k_i} + 0.33 \cdot [(1 - \eta_H) \cdot k_i] \right] =$ $= 0.9 \cdot \left[ 2.1 \cdot \frac{0.95}{(1 - 0.007002) \cdot 6.9} + 0.33 \cdot (1 - 0.95) \cdot 6.9 \right] = 0.3645$		Коеф. пот.	2.11
$r_1 = Z_{K3} \cdot \cos \varphi_n - r'_2 = 0.0568 \cdot 0.3645 - 0.01488 = 0.005824$	Ом	Опір обмотки статора	2.12
$X_{K3} = Z_{K3} \cdot \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_H} = 0.0568 \cdot \sqrt{1 - 0.9^2} = 0.02476$	Ом	Реактивний опір АД	2.13
$R_{K3} = \sqrt{Z_{K3}^2 - X_{K3}^2} = \sqrt{0.0568^2 - 0.02476^2} = 0.05112$	Ом	Активний опір АД	2.14
$X'_2 = \frac{X_{K3}}{\left( 1 + \frac{r_1}{r'_2} \right)} = \frac{0.02476}{1 + \frac{0.005824}{0.01488}} = 0.0178$	Ом	Опір приведений	2.15
$X_1 = X_{K3} - X'_2 = 0.02476 - 0.0178 = 0.00696$	Ом		2.16
$I_{xx} = I_H \cdot \left( \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_H} - \cos \varphi_H \cdot \frac{X'_2}{r_1 + \frac{r'_2}{S_H}} \right) =$	А	Струм хх	2.17

$= 559.8 \cdot \left( \sqrt{1 - 0.9^2} - 0.9 \cdot \frac{0.0178}{0.005824 + \frac{0.01488}{0.007002}} \right) = 239.8$			
$L_1 = \frac{\frac{U_{1H}}{\sqrt{3}}}{2 \cdot p \cdot f_H \cdot I_H \cdot \left( \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_H} - \frac{\cos \varphi_H \cdot S_H}{S_K} \right)} =$ $= \frac{\frac{380}{\sqrt{3}}}{2 \cdot 2 \cdot 0 \cdot 50 \cdot 559.8 \cdot \left( \sqrt{1 - 0.9^2} - \frac{0.9 \cdot 0.007002}{0.02913} \right)} = 0.00892 \text{ Гн}$	Гн	Індуктивність статора	2.18
$L_m = L_1 - \frac{X_1}{(2\pi \cdot 50)} = 0.008925 - \frac{0.00696}{2 \cdot \pi \cdot 50} = 0.008905 \text{ Гн}$	Гн	Взаємодукція	2.19
$L_{кз} = \frac{X_{кз}}{2\pi \cdot 50} = \frac{0.02476}{2 \cdot \pi \cdot 50} = 0.00007881 \text{ Гн}$	Гн	Індуктивність кз	2.20
$L_2 = \frac{X'_2}{(2\pi \cdot 50)} = 5.666 \times 10^{-5} \text{ Гн}$	Гн		2.21
Параметри силового трансформатора ТСЗП-400/10У3/3			
$R_{mp} = \frac{\Delta P_{кз} \cdot U_{2л}^2}{S_{нтр}^2} = \frac{4700 \cdot 365.7^2}{364000^2} = 0.004744 \text{ Ом}$	Ом	Опір активний	2.22
$X_{mp} = \frac{U_{кз} \cdot U_{2л}^2}{S_{нтр}} = \frac{0.026 \cdot 365.7^2}{364000} = 0.009555 \text{ Ом}$	Ом	Опір реактивний	2.23
Параметри дроселя			
$R_{\partial p} = 0.1 \cdot R_{кз} = 0.1 \cdot 0.05112 = 0.005112 \text{ Ом}$	Ом	Опір	2.24
$L_{\partial p} = 0.1 \cdot \frac{X_{кз}}{2 \cdot \pi \cdot f_H} = 0.1 \cdot \frac{0.02476}{2 \cdot \pi \cdot 50} = 0.000007881 \text{ Гн}$	Гн	Індуктивність	2.25
Параметри ПЧ-АД			
$R_{\partial} = 2 \cdot (R_{кз} + R_{mp}) + R_{\partial p} + \frac{X_{кз} + X_{mp}}{\pi} = . \text{ Ом}$	Ом	Опір екв. ПЧ-АД	2.26

$= 2 \cdot (0.05112 + 0.004744) + 0.005112 + \frac{0.02476 + 0.009553}{\pi} = 0.1278$			
$L_{\Sigma} = \frac{2(X_{кз} + X_{мп})}{2 \cdot \pi \cdot f_H} + L_{\Delta p} = \frac{2 \cdot (0.02476 + 0.009553)}{2 \cdot \pi \cdot 50} + 0.000007881 = 0.0002263$	Гн	Індуктивність екв.	2.27
$T_{\Sigma} = \frac{L_{\Sigma}}{R_{\Sigma}} = \frac{0.0002263}{0.1278} = 0.001771$	с	Постійна часу електромагнітна	2.28
$L_{\mu} = \frac{U_{1H}}{\sqrt{3} \cdot I_{xx} \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_H} = \frac{380}{\sqrt{3} \cdot 239.8 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 50} = 0.002912$	Гн	індуктивність контуру намагнічування	2.29
$K_2 = \frac{L_{\mu}}{X'_2} = \frac{0.002912}{\frac{0.0178}{2 \cdot \pi \cdot 50}} = 51.4$		Коеф. ротора	2.30
$\psi_{2H} = \frac{U_{1H} - I_H \cdot r_1}{\frac{\pi \cdot n_0}{30}} = \frac{380 - 559.8 \cdot 0.005824}{\frac{\pi \cdot 1500}{30}} = 2.398$		потокозчеплення	2.31
$k\Phi = \frac{U_{1H} \cdot \frac{3\sqrt{2}}{\pi}}{\omega_0} = \frac{380 \cdot \frac{3\sqrt{2}}{\pi}}{157.1} = 3.267$		коефіцієнт е.р.с.	2.32
$T_M = \frac{J \cdot 5 \cdot R_{\Sigma}}{k\Phi^2} = \frac{8.2 \cdot 5 \cdot 0.1278}{3.267^2} = 0.4909$	с	постійна часу електромеханічна	2.33
$K_{dc} = \frac{10}{2I_H} = \frac{10}{2 \cdot 559.8} = 0.008932$		Коефіцієнт РС	2.34
$K_{ds} = \frac{10}{n_H \cdot \frac{3.14}{30}} = \frac{10}{1490 \cdot \frac{3.14}{30}} = 0.06412$		Коефіцієнт РШ	2.35
$W_{pc}(s) = \frac{R_{\Sigma} \cdot (T_{\Sigma} \cdot s + 1)}{2 \cdot T_{\mu c} \cdot s \cdot K_{dc}} = \frac{8009}{s} + 14.18.$		Передатна функція РС	2.36
$W_{ps}(s) = \frac{K_{dc} \cdot J \cdot 5}{3 \cdot s T_{\mu s} \cdot K_{ds} \cdot \frac{1}{R_{\Sigma}}} = \frac{37.8}{s} + 0.1$		Передатна функція РШ	2.37



## 2.3 ПОБУДОВА СТАТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК

Як було зазначено у п.п. 2.1.1 ми оцінемо роботу насоса ЦНС 300-240 у для частот від 10 Гц до 50 Гц, використовуючи *Matlab*. Задаємо також закон регулювання і отримуємо:

$$f = \begin{pmatrix} 0.2 \cdot f_H \\ 0.4 \cdot f_H \\ 0.6 \cdot f_H \\ 0.8 \cdot f_H \\ f_H \end{pmatrix} U = \left( \frac{f}{f_H} \right)^2 \cdot \frac{U_{1H}}{\sqrt{3}}. \quad (2.38)$$

Для приведенного струму ротора побудуємо швидкісні характеристики:

$$I'_2(\omega, f, U) = \frac{U}{\sqrt{\left( r_1 + \frac{r'_2}{S(\omega, f)} \right)^2 + \left( X_{кз} \cdot \frac{f}{f_H} \right)^2}}. \quad (2.39)$$

Швидкісні характеристики струму ротора системи ПЧ-АД насоса ЦНС 300-240 наводяться на рис. 2.3.

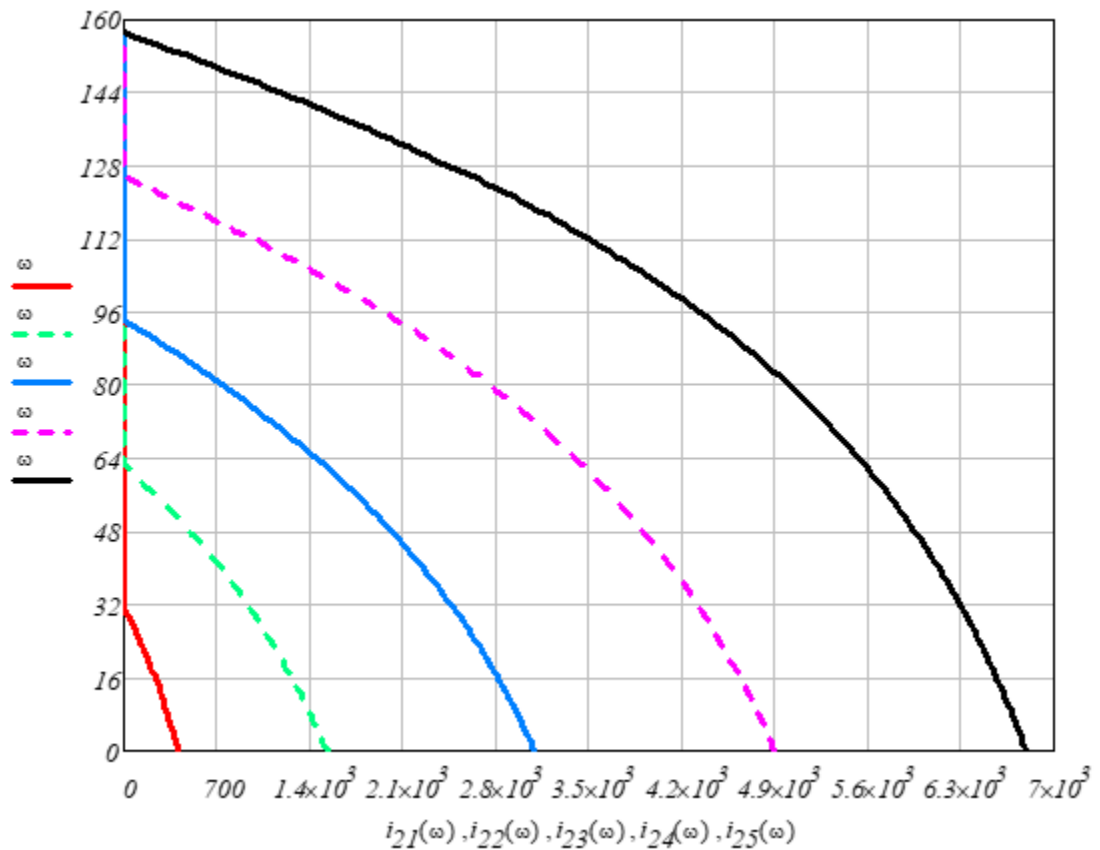


Рисунок 2.3 – Швидкісні характеристики струму ротора системи ПЧ-АД насоса ЦНС 300-240

Струм статора:

$$I_{1H}(\omega, f, U) = \sqrt{I_{xx}^2 + I_2'(\omega, f, U)^2 + 2 \cdot I_{xx} \cdot I_2'(\omega, f, U) \cdot \sin \varphi_2(\omega, f, U)} \quad (2.40)$$

$$\sin \varphi_2(\omega, f, U) = \frac{\left( X_{кз} \cdot \frac{f}{f_H} \right)^2}{\sqrt{\left( r_1 + \frac{r_2'}{S(\omega, f)} \right)^2 + \left( X_{кз} \cdot \frac{f}{f_H} \right)^2}} \quad (2.41)$$

Швидкісні характеристики струму статора системи ПЧ-АД насоса ЦНС 300-240 наводяться на рис. 2.4.

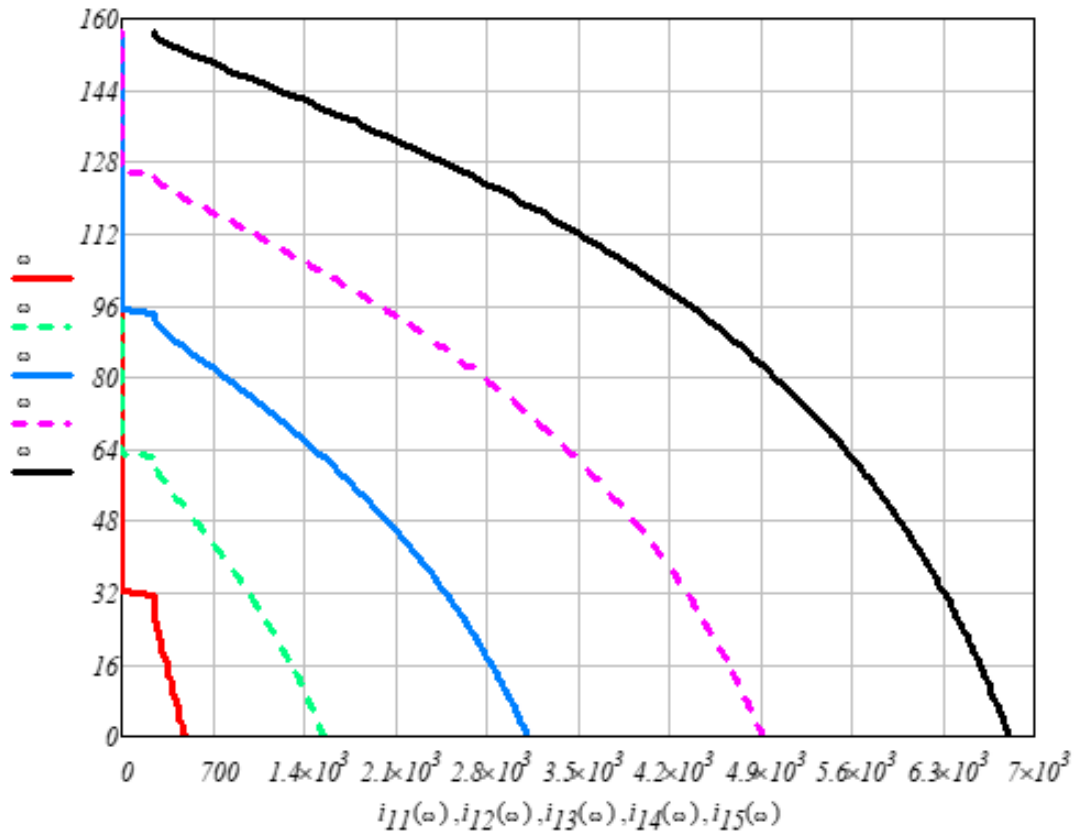


Рисунок 2.4 – Швидкісні характеристики струму статора системи ПЧ-АД насоса ЦНС 300-240

Електромагнітний момент:

$$M(\omega, f, U) = \frac{3 \cdot (U)^2 \cdot \frac{r'2 \cdot \omega \theta(f)}{\omega \theta(f) - \omega}}{(\omega \theta(f)) \cdot \left[ \left( r1 + \frac{r'2 \cdot \omega \theta(f)}{\omega \theta(f) - \omega} \right)^2 + \left( X_{кз} \cdot \frac{f}{f_H} \right)^2 \right]} \quad (2.42)$$

Механічні характеристики системи ПЧ-АД насоса ЦНС 300-240 наводяться на рис. 2.5.

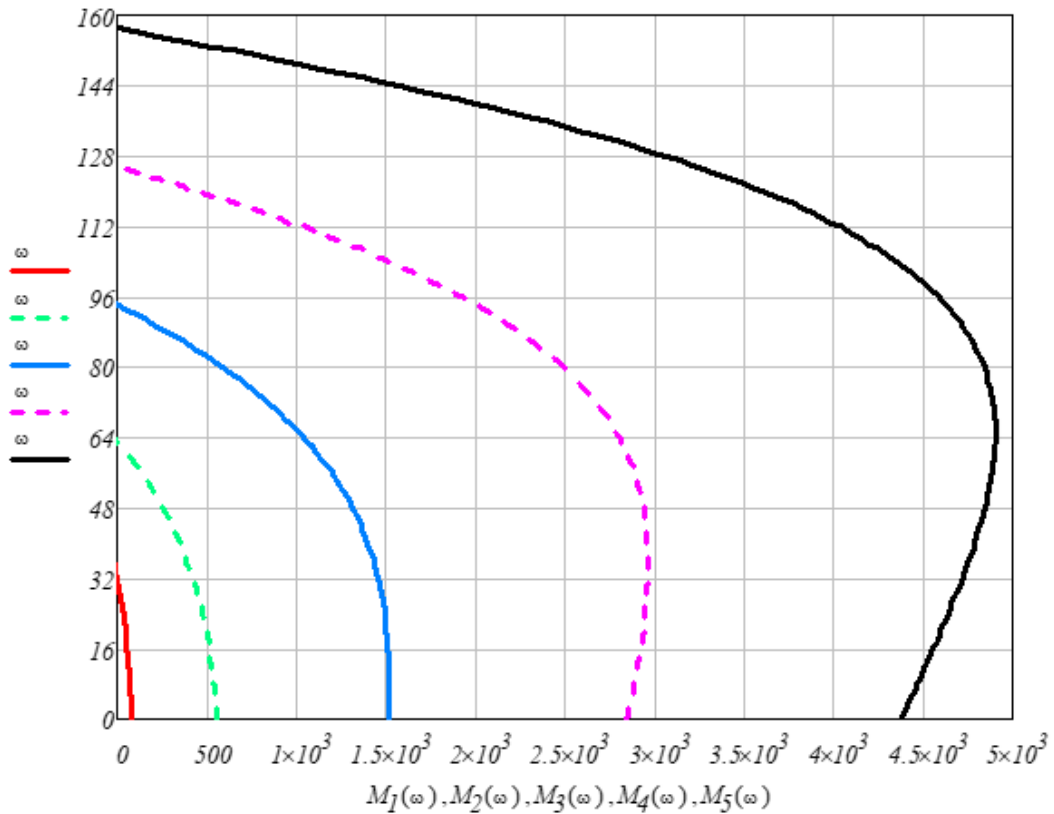


Рисунок 2.5 – Механічні характеристики системи ПЧ-АД насоса ЦНС 300-240

## 2.4. ПОБУДОВА ЕНЕРГЕТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК

Коефіцієнт корисної дії (ККД):

$$\Delta P_{\text{пост}}(\omega, f) = k_{\text{мех}} \cdot P_{\text{н}} \cdot \left( \frac{\omega}{\omega_0(f)} \right)^2; \quad (2.43)$$

$$\Delta P_{\text{змін}}(\omega, f) = M_{\text{н}} \cdot \frac{\omega_0(f) - \omega}{\omega_0(f)} \cdot \left( 1 + \frac{r_1}{r'_2} \right) + 3I_{\text{н}}^2 \cdot r_1; \quad (2.44)$$

$k_{\text{мех}} = 0.015$  коефіцієнт механічних втрат.

$$\eta_{\text{мех}}(\omega, f, U) = \frac{M(\omega, f, U) \cdot \omega}{M(\omega, f, U) \cdot \omega + (\Delta P_{\text{пост}}(\omega, f) + \Delta P_{\text{змін}}(\omega, f))}. \quad (2.45)$$

Енергетичні характеристики системи ПЧ-АД насоса ЦНС 300-240

$\omega = f(\eta)$  наводяться на рис. 2.6.

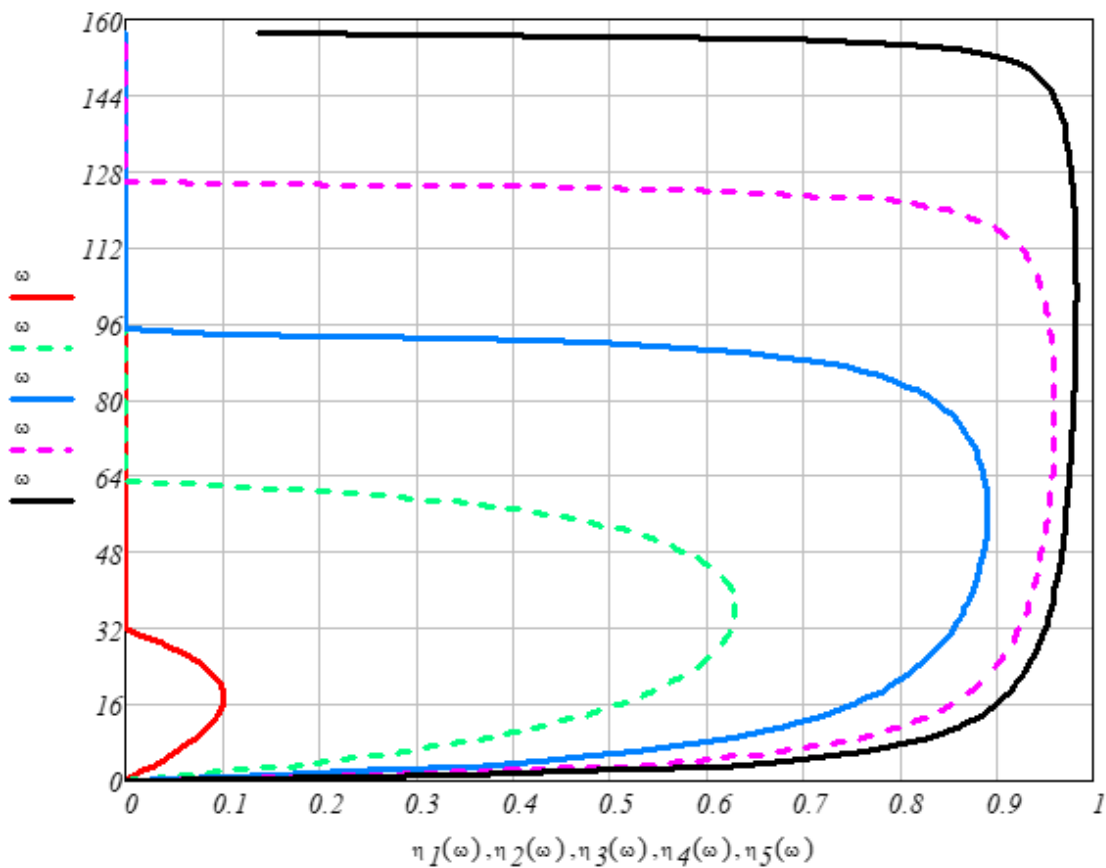


Рисунок 2.6 – Система ПЧ-АД насоса ЦНС 300-240 -  $\omega = f(\eta)$

Коефіцієнт потужності:

$$\cos \varphi (\omega, f, U) = \frac{M(\omega, f, U) \cdot \omega}{3U \cdot I_{IH}(\omega, f, U) \cdot \frac{f_H}{f}} \quad (2.56)$$

Енергетичні характеристики системи ПЧ-АД насоса ЦНС 300-240  $\omega = f(\cos \varphi)$  наводяться на рис. 2.7.

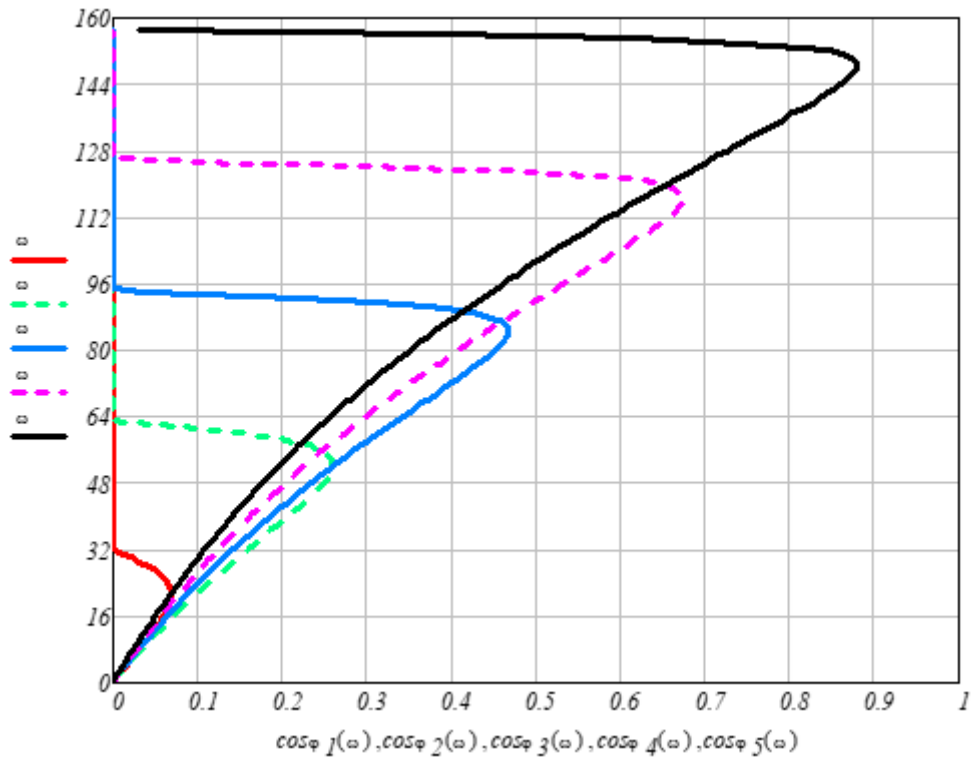


Рисунок 2.7 – Система ПЧ-АД насоса ЦНС 300-240 -  $\omega = f(\cos \varphi)$

## 2.5 ПОБУДОВА ДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК

### 2.5.1 Розімкнена система ПЧ-АД насоса ЦНС 300-240

В *Matlab* мною розроблена та реалізована схема розімкненої системи (рис. 2.8).

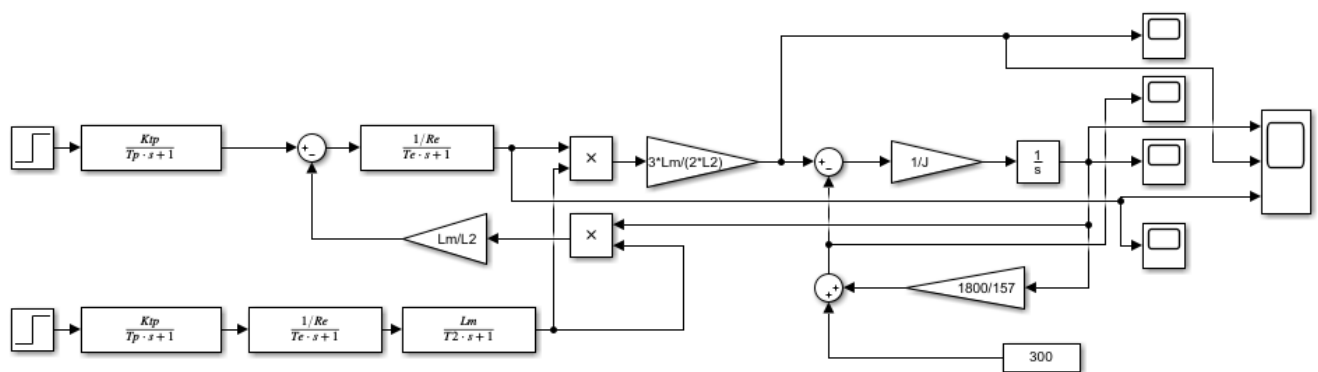
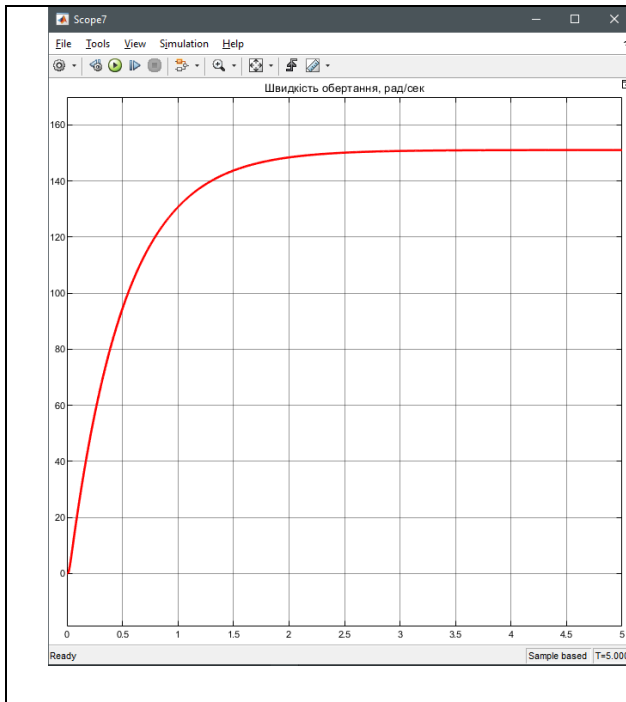
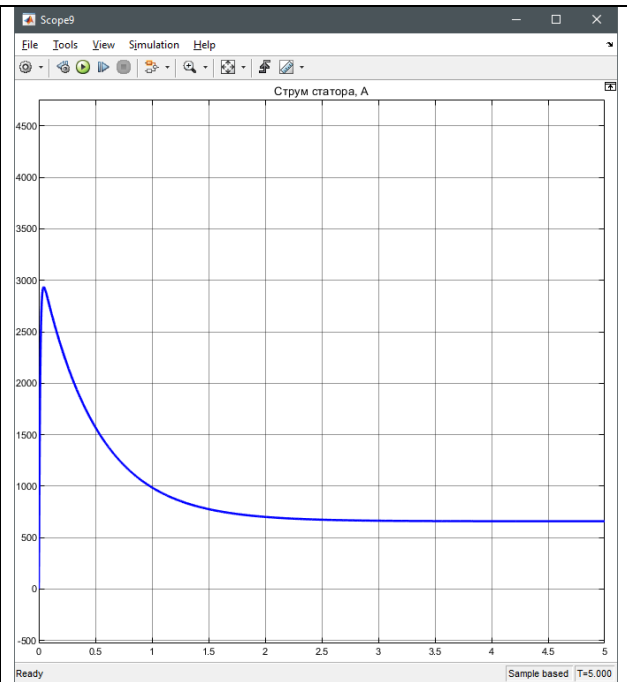


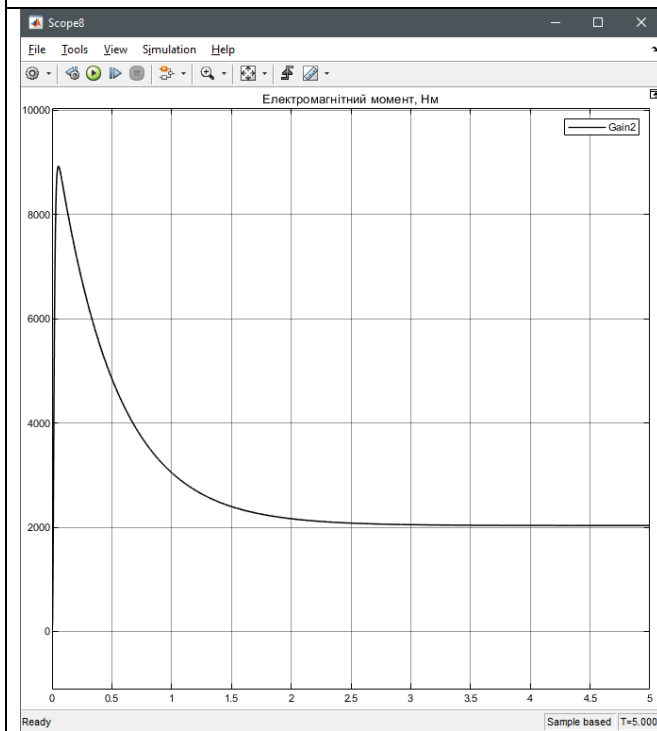
Рисунок 2.8 – Модель без регуляторів  
Результати реалізованого моделювання наводяться на рис. 2.9.



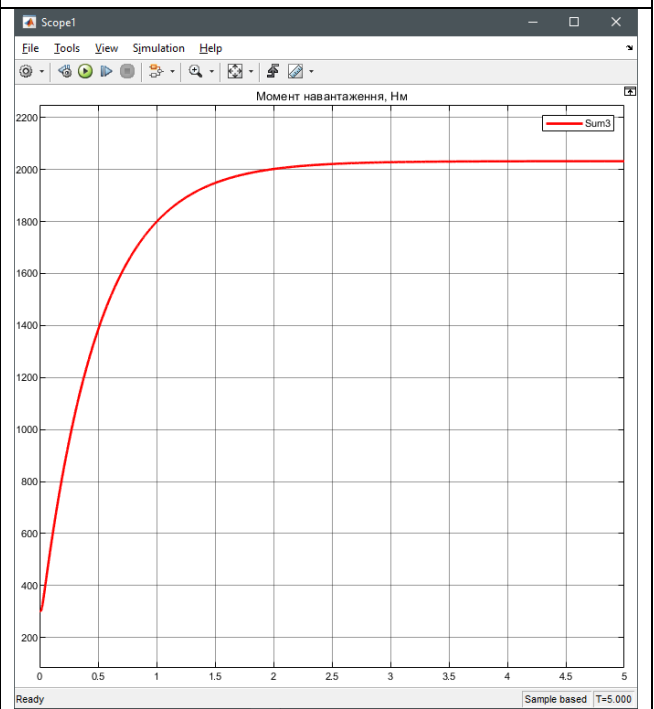
а)



б)



в)



г)

Рисунок 2.9 – Результати моделювання розімкненої системи: а) швидкість обертання; б) струм статора; в) електромагнітний момент; г) момент навантаження

## 2.5.2 Замкнена система ПЧ-АД насоса ЦНС 300-240

Також в *Matlab* мною розроблена та реалізована схема з раніше розрахованими у табл. 2.4 регуляторами струму (РС) і регуляторами швидкості (РШ) (рис. 2.10).

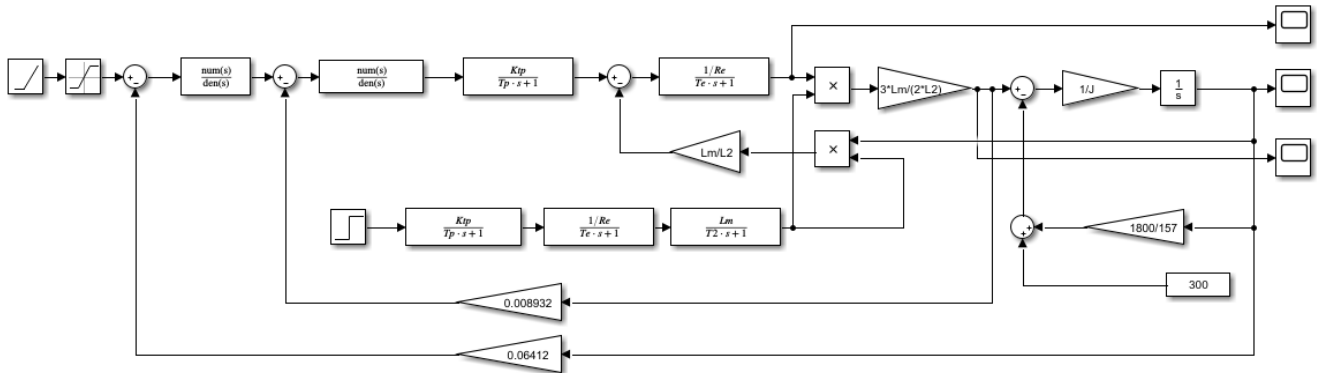
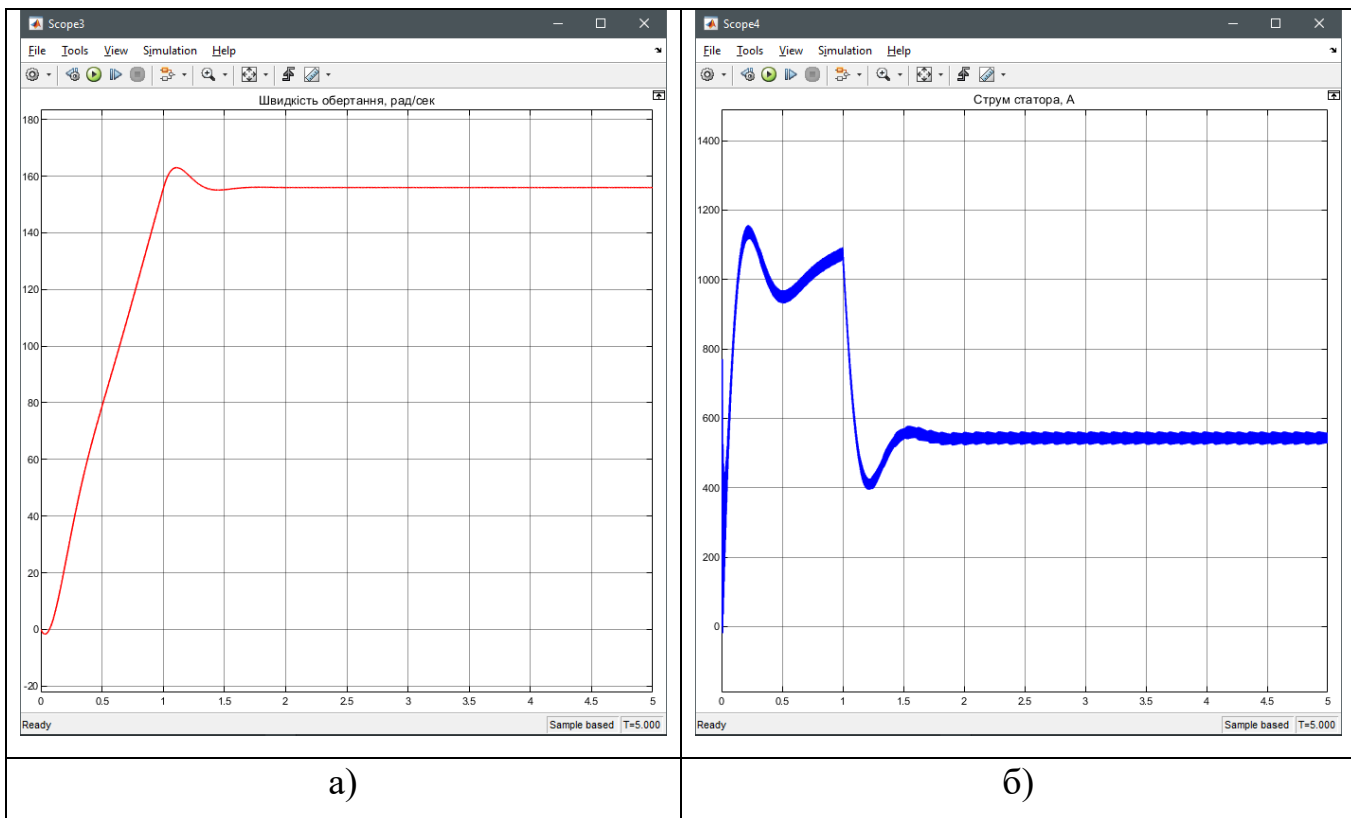
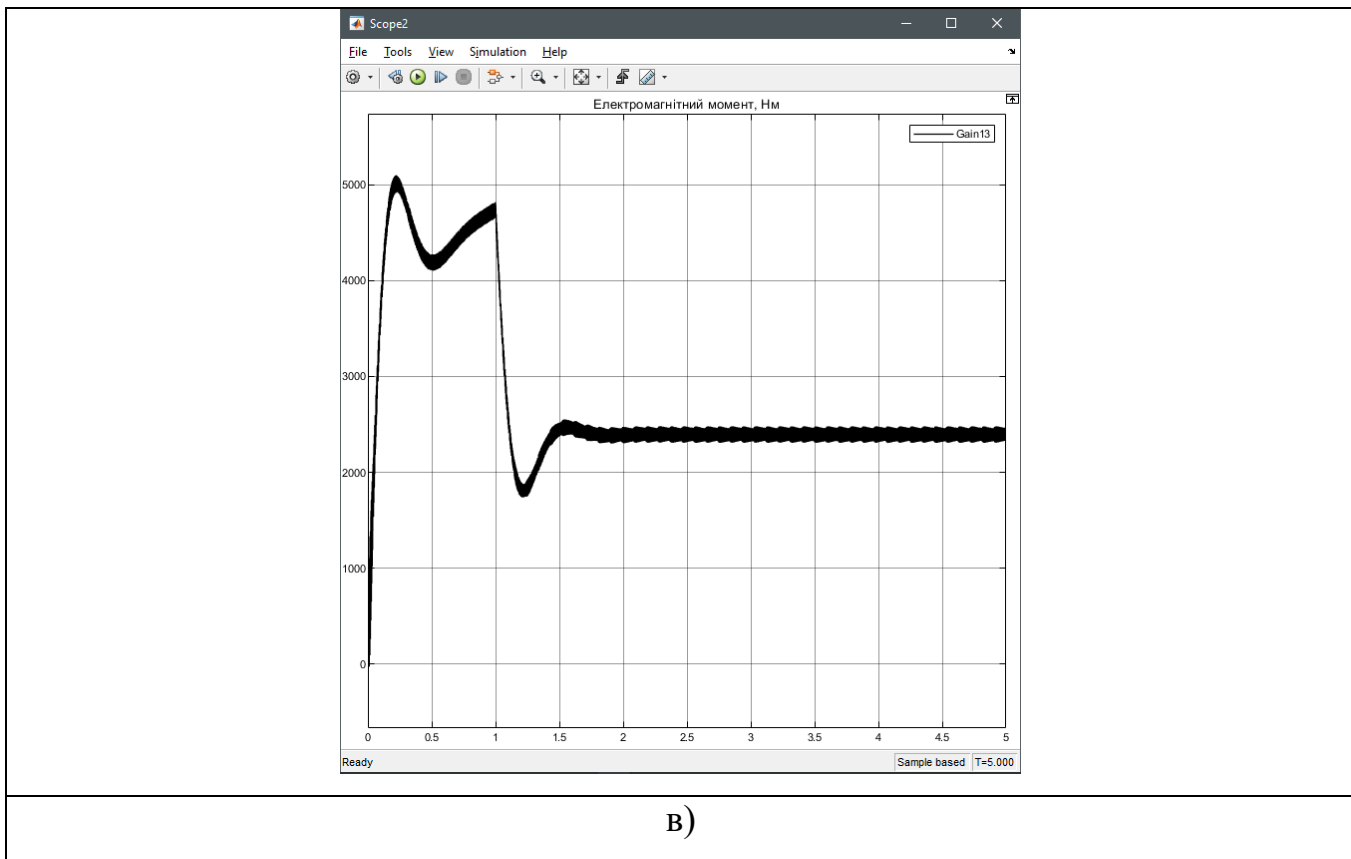


Рисунок 2.13 – Модель з РС і РШ

Результати реалізованого моделювання наводяться на рис. 2.10.







в)

Рисунок 2.10 – Результати моделювання системи з регуляторами (РС і РШ):

а) швидкість обертання; б) струм статора; в) електромагнітний момент

Головний висновок щодо проведеного дослідження по впровадженню регуляторів наступний: застосування регуляторів струму (РС) і регулятора швидкості (РШ) знижує кратність пускового струму зі значення 3 до значення 2 від номінального.

### 3.1 СХЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ЗАЛІЗОРУДНИХ ШАХТ

Схеми електропостачання залізорудних шахт розглянемо на прикладі шахт АТ Крибасзалізрудком (рис. 3.1–3.4). На структуру схем електропостачання впливає технологія видобутку залізної руди, глибина видобутку, використане обладнання. Електричні приймачі (навантаження) шахт становлять величини 24780 кВт – 50655 кВт.

По годинам доби насосні установки найбільше споживають електричної енергії вночі, що складає приблизно 90 % від усієї спожитої

шахтою енергії. Інші енергоємні споживачі шахт, такі як підйомні установки (скіпові й клітьові) та установки головного провітрювання (вентилятори), споживають більше електричної енергії в денні години.

Як зазначалося в розділі 1 відкачування шахтних вод із підземних горизонтів здійснюється електромеханічним комплексним обладнанням, яке працює в складних умовах з постійною зміною режимів роботи і значить зі змінним навантаженням. Тому, як показано на осцилограмах, споживання електричної енергії дуже різниться у години доби та залежить від припливів води в шахтах. Ми знаємо, що навіть законсервовані шахти споживають великий обсяг електроенергії, який споживається якраз водовідливними установками.

На головних знижувальних підстанціях (ГЗП) усіх залізорудних шахт встановлені силові трансформатори з потужністю  $S=32000 - 63000$  кВА, а встановлені потужності електроприймачів залізорудної шахти приблизно сягають 24780 кВт – 50655 кВт.

Шахтне електрообладнання (наземне) живиться трифазним змінним струмом 50 Гц; підземні електроприймачі – напругою 127 В, 380 В, 1140 В та 6000 В; освітлення виробок – 36 В. Приводні двигуни насосів водовідливних установок та підземні пристрої живляться від мережі 6 кВ (ГВУ) та 0,4 кВ (ДВУ).

Шахтні електровози використовують постійний струм напругою 250 В, випрямляюча установка АТП напругу 500/275 В, кола керування - напругу 24 В, споживачі підстанції - напругу 0,4 кВ.

Однoliniйна схема електропостачання промайданчика ш. «Гвардійська»

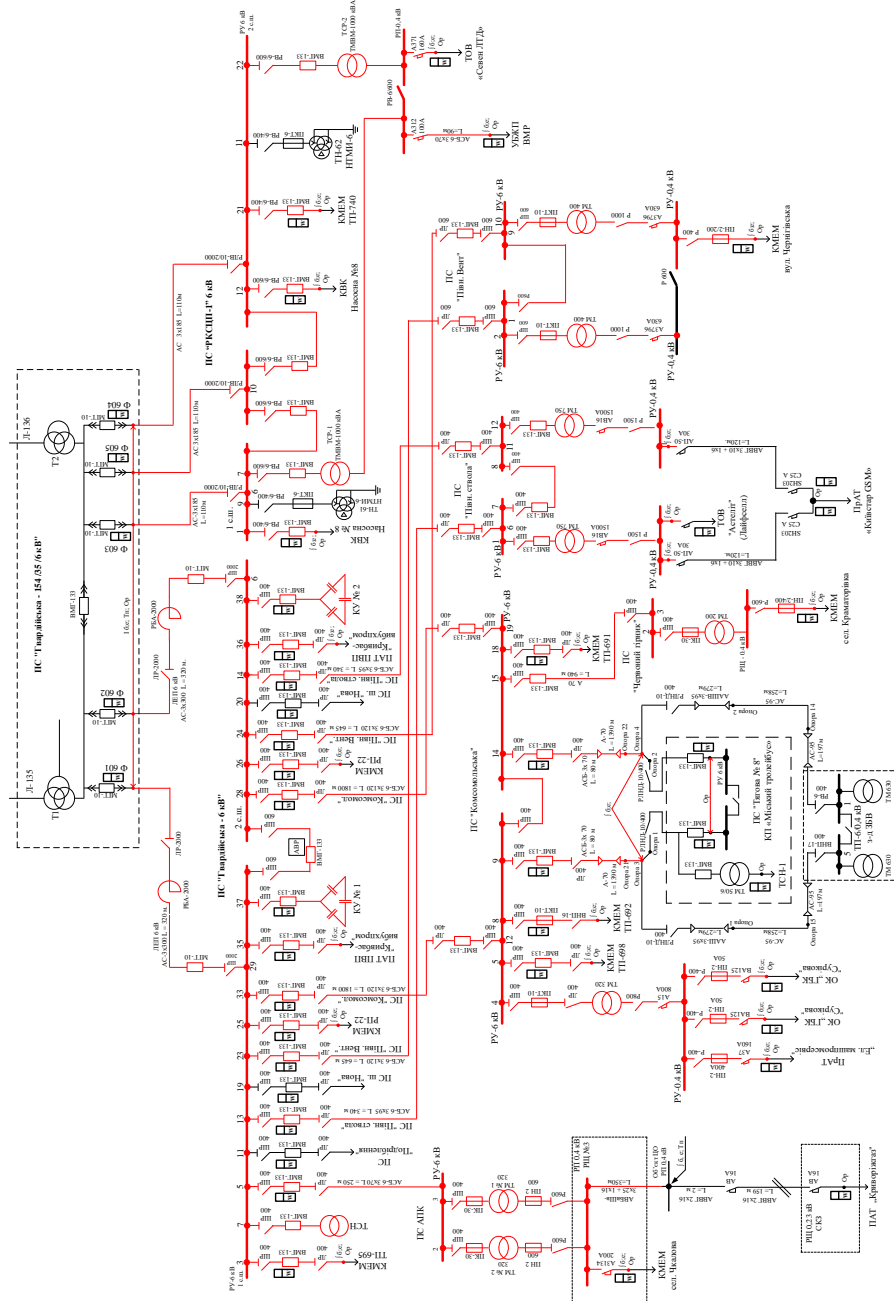


Рисунок 3.1 — Схема електропостачання (однoliniйна) ш. «Козацька»

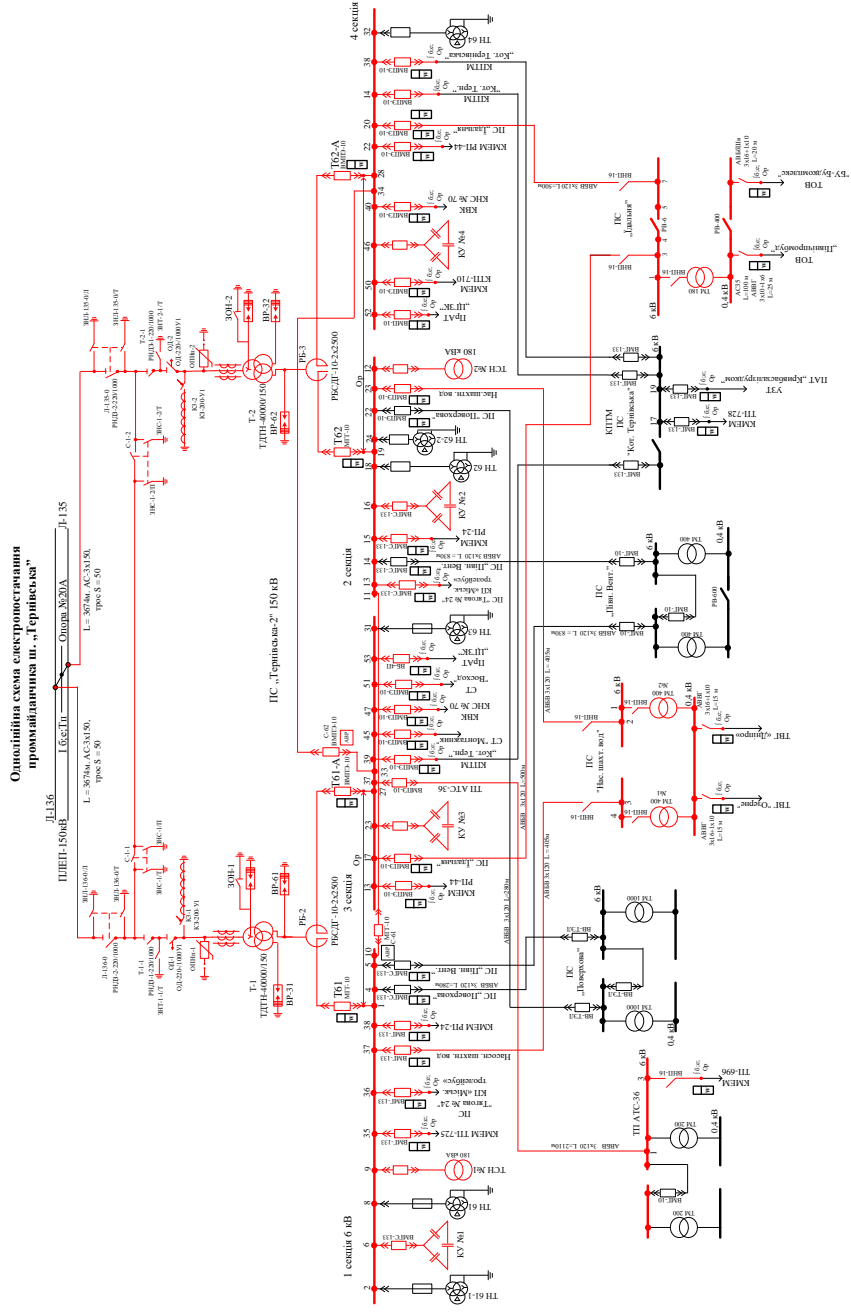
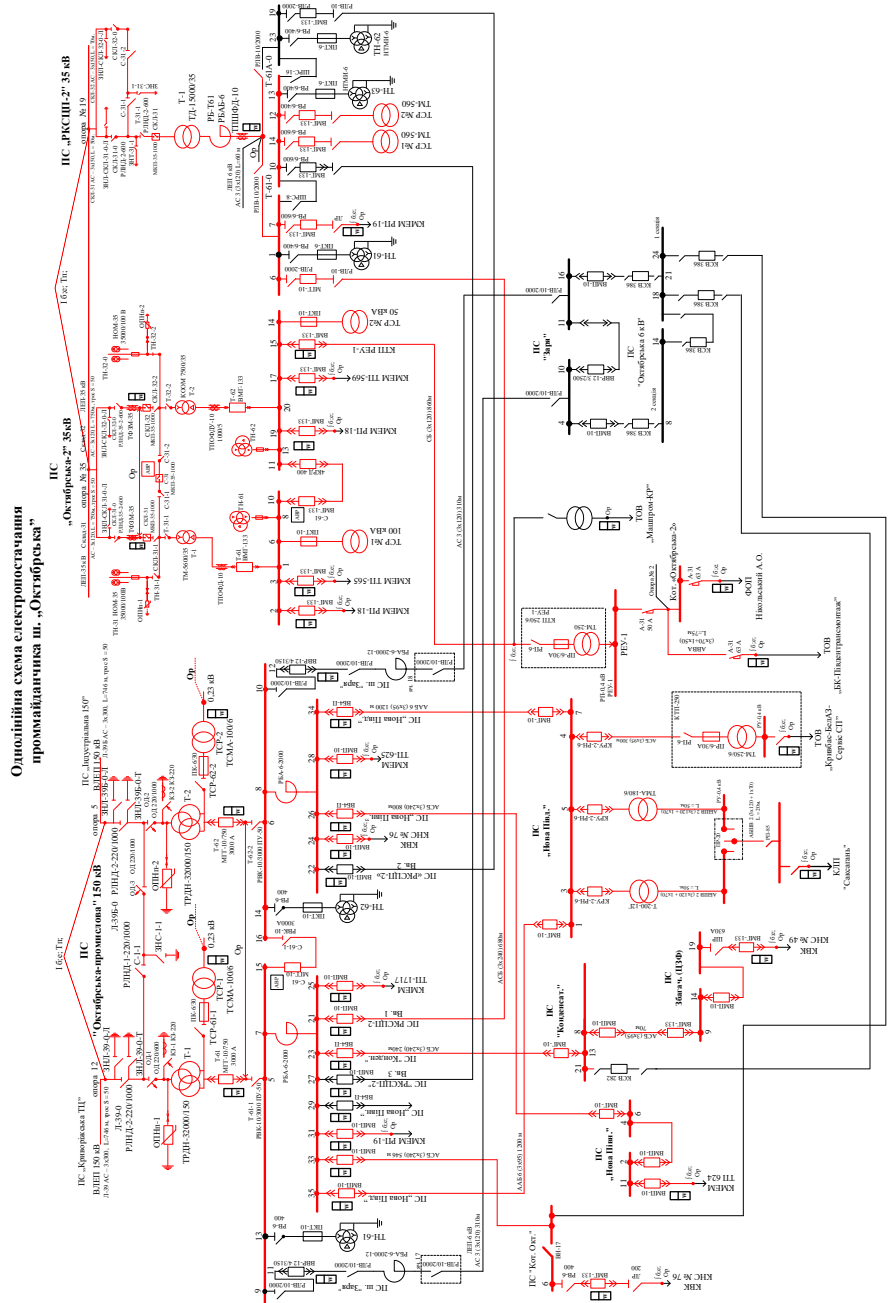


Рисунок 3.2 – Схема електропостачання (однолінійна) ш. «Тернівська»



Однoliniйна схема електропостачання промайданчика ш. «Октябрьск»

Рисунок 3.3 — Схема електропостачання (однoliniйна) ш. «Покровська»

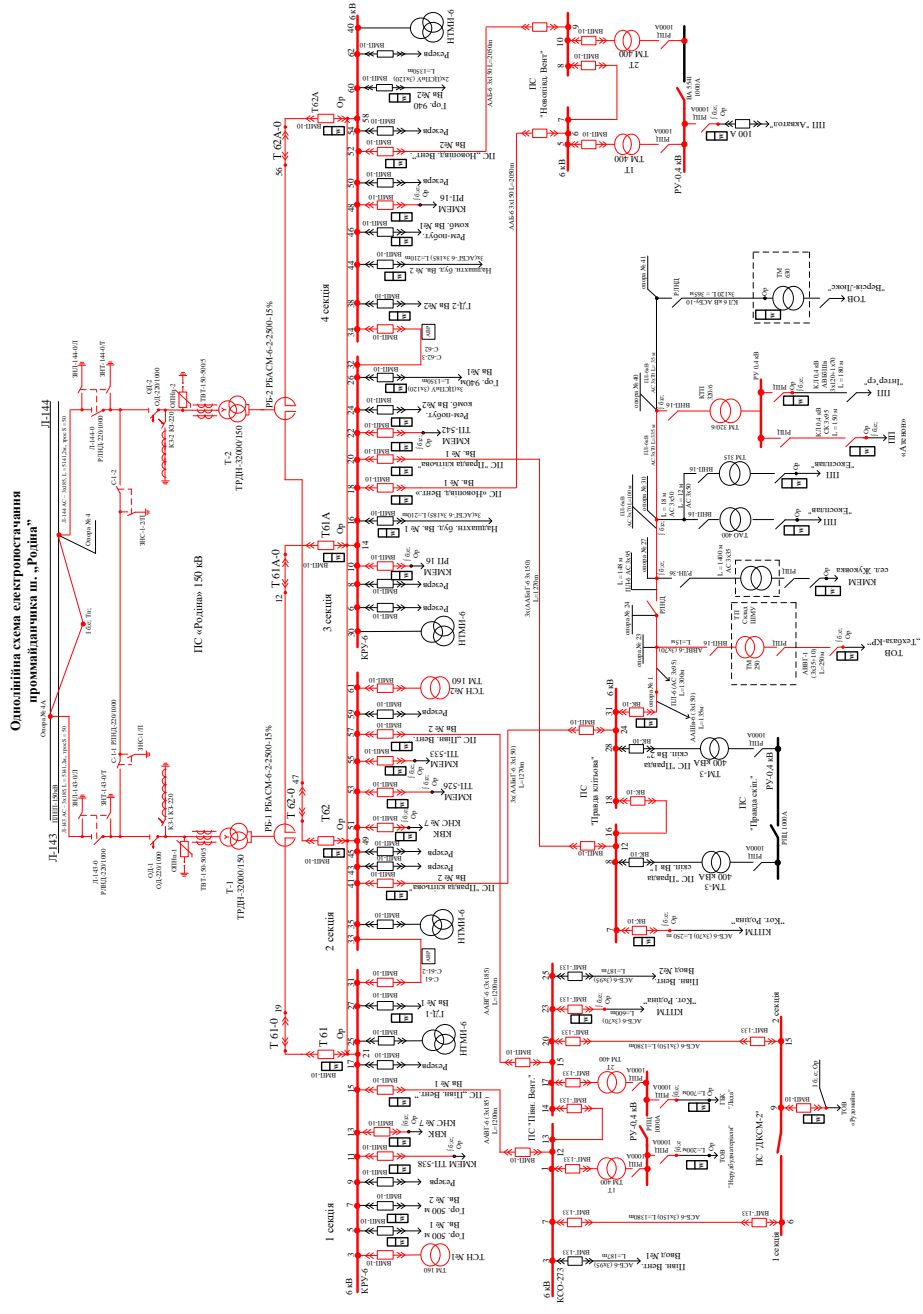


Рисунок 3.4 — Схема електропостачання (однолінійна) п. «Криворізька»

## 3.2 ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ТА ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ ШАХТИ

На залізорудних шахтах електрична енергія передається у підземні виробки (горизонти) двома способами: електроприймачі горизонтів та білястовбурного двору живляться по кабелям стовбуру та усі інші - по кабелям, які прокладені у свердловинах або у вентиляційних шурфах.

Аналіз електропостачання шахт можна показати за допомогою таблиці (див. табл. 3.1).

Таблиця 3.1 - Аналіз електроспоживачів шахт та особливості їх електропостачання

Поверхнє електропостачання	Підземне електропостачання	Категорії споживачів
Підйомні установки	Підстанція: 6 кВ	<b>I категорія:</b> водовідливні установки, підземні пристрої, вентиляція, СЦБ
Вентиляторні установки	Електроприводи видобувних механізмів: 0,4 кВ	<b>II категорія:</b> підземний електротранспорт, калориферні пристрої
ДСФ	Групові розподільні пункти (ГРП), які обладнані рудничними автоматами	<b>III категорія:</b> всі інші споживачі
Поверхнева підстанція 6 кВ: 3 вводи	Розподільні щити 0,4 кВ дільничних і тягових підстанцій	
Трансформатори: $S=63$ МВА, $U=154/6$ кВ	Розподільні пункти (РП): для живлення споживачів 0,4 кВ	

	навколостовбурних дворів	
--	-----------------------------	--

Вибір силових трансформаторів виконуємо за сумарною розрахунковою потужністю основних споживачів електроенергії, що зведені в табл. 3.2.

Таблиця 3.2 – Електроспоживачі шахт та їх характеристики

Назва характеристик	ЦНС 300-600	ЦНС 300-240	ТС3-10/0,66
Тип двигуна	A4-450X-4УЗ	AIP355M4	-
Потужність, кВт	800	315	10
Швидкість обертання, об/хв	1490	1490	-
Номинальний струм, А	91	560	25,25
ККД, %	95,2	95,7	60
$\cos\varphi$	0,88	0,9	0,4
Коефіцієнт попиту	0,8	0,8	
$\operatorname{tg}\varphi$	0,75	0,75	

Попередньо було зазначено, що вимірювання спожитої підприємством потужності, поділяються на добові, місячні та річні графіки  $P=f(t)$ .

Розглянемо показники для визначення характеристик графіків електричних навантажень:

- середня потужність, кВт:

$$P = \frac{\sum P}{n}, \quad (3.1)$$

де  $P$  – середня потужність;

$n$  – кількість інтервалів;

- максимальна потужність  $P_m$ , кВт;
- середньоквадратична потужність, кВт:

$$P_{\text{ср.кв.}} = \sqrt{\frac{\sum P^2}{n}} \quad (3.2)$$



– коефіцієнт заповнення графіка:

$$K_{зан} = \frac{P_{ср}}{P_M}; \quad (3.3)$$

– коефіцієнт максимуму:

$$K_M = \frac{P_M}{P_{ср}} = \frac{1}{K_{зан}}; \quad (3.4)$$

– коефіцієнт форми:

$$K_\phi = \frac{P_{ср.кв.}}{P_{ср}}. \quad (3.5)$$

Проведений науковцями аналіз графіків навантаження показав, що трансформатори використовують тільки 30 % своєї потужності. Коефіцієнт форми графіків електричних навантажень становить 1,12-1,5, що характеризує їх як нерівномірними. Коефіцієнт заповнення добового графіка електричних навантажень змінюється в межах 0,27-0,56, а тривалість максимального навантаження становить 4-8 годин.

В табл. 3.3 наведені споживачі електричної енергії шахти.

Таблиця 3.3 – Споживачі УПП №10 ш. Ювілейна

№ лінії	Для живить	Найменування споживачів	Потужність, кВт	Кількість, шт.	Сумарна потужність, кВт
<b>Секція № 2</b>					
6	Орт 213	Віброживильник ВІР	14	1	14
		Трансформатор ТОР – 1,5	1,5	1	1,5
7	Орт 217	Віброживильник ВІР	14	1	14
		Лебідка скреперна ЛС – 30	30	2	60
		Трансформатор ТСШ	4,5	1	4,5
		Трансформатор ТОР – 1,5	1,5	1	1,5
Всього по секції № 2					95,5
<b>Секція № 3</b>					
10	Орт 209	Лебідка скреперна ЛС – 30	30	8	240

		Віброживильник ВІР	14	1	14
		Трансформатор ТОР – 1,5	1,5	4	6
		Трансформатор ТС – 300	20	1	20
Всього			280		
11	Орт 205	Лебідка скреперна ЛС – 30	30	10	300
		Віброживильник ВІР	14	1	14
		Трансформатор ТОР – 1,5	1,5	3	4,5
		Трансформатор ТС – 300	20	1	20
		Кип'ятильник	3	1	3
Всього			341,5		
12	Освіт- <u>лення</u>	Трансформатор ТСШ	4,5	2	9
Всього по секції №3					630

За потужністю, наведеною у табл. 3.3 вибрані трансформатори. Дані трансформаторів покажемо у табл. 3.4.

Таблиця 3.4 – Параметри силових трансформаторів

Назва характеристик	ТМ – 630/10	ТДНГ-2500/150
$S_n$ , кВА	630	2500
$U_{вн}$ , кВ	6,0	150
$U_{нн}$ , кВ	0,4	6,6
$\Delta P_{xx}$ , Вт	1310	9000
$\Delta P_{кз}$ , Вт	7600	16000
$u_k$ , %	5,5	12,0

Середній коефіцієнт завантаження силових трансформаторів на ГПП шахт є біля 0,3.

Наведемо схеми електропостачання самого комбінату та одного з підземних горизонтів (див. рис. 3.5, 3.6).

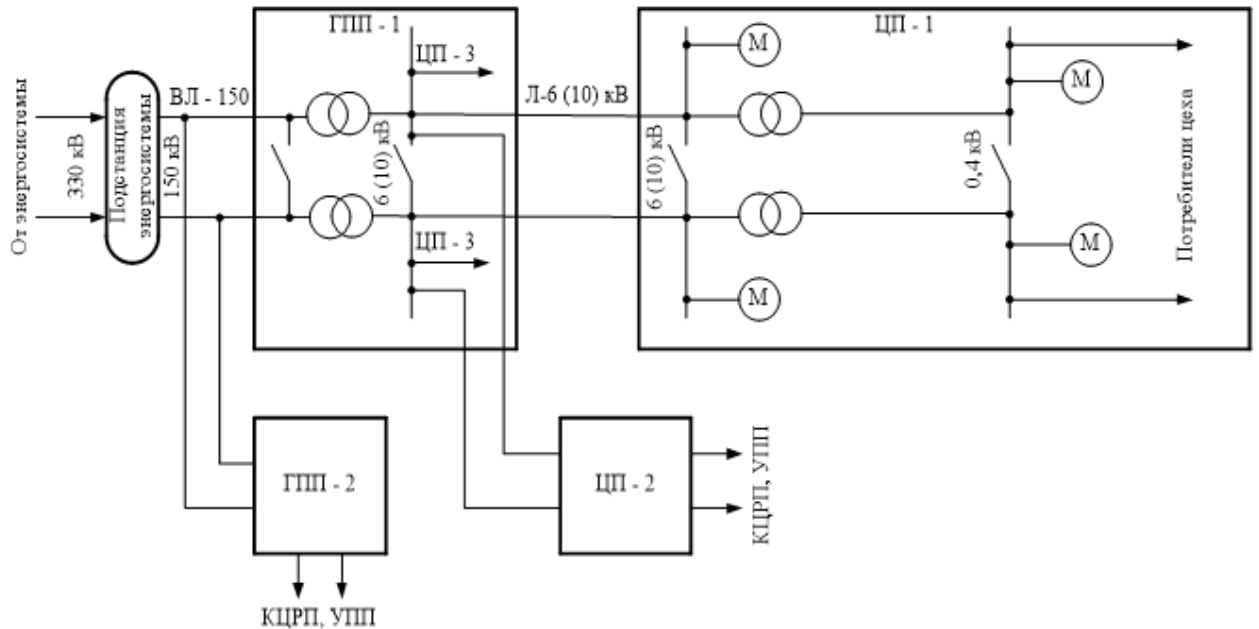


Рисунок 3.5 - Типова схема електропостачання залізорудного комбінату

На рис. 3.7 наведена схема «гарячого» резерву трансформатора Т1, який вмикається вимикачем QF. Зазвичай у схемах ГПП застосовується відокремлювач ОД (на прикладі включення Т2).

Якщо трансформатор Т1 знаходиться в резерві, то вимикачі QF і В1 знаходяться у відключеному положенні, всі інші комутаційні апарати включені (і секційний вимикач ВС).

При відключенні трансформатора Т2 при спрацьовуванні захисту спрацьовує система автоматичного вмикання резервного живлення (АВР) та вмикаються вимикачі QF і В1, які підключають у роботу резервний трансформатор Т1. Вимикач В2 відключений, щоб виключити зворотню подачу напруги до місця можливого ушкодження.

При такому спрацьовуванні автоматично відновлюється живлення електроспоживачів.

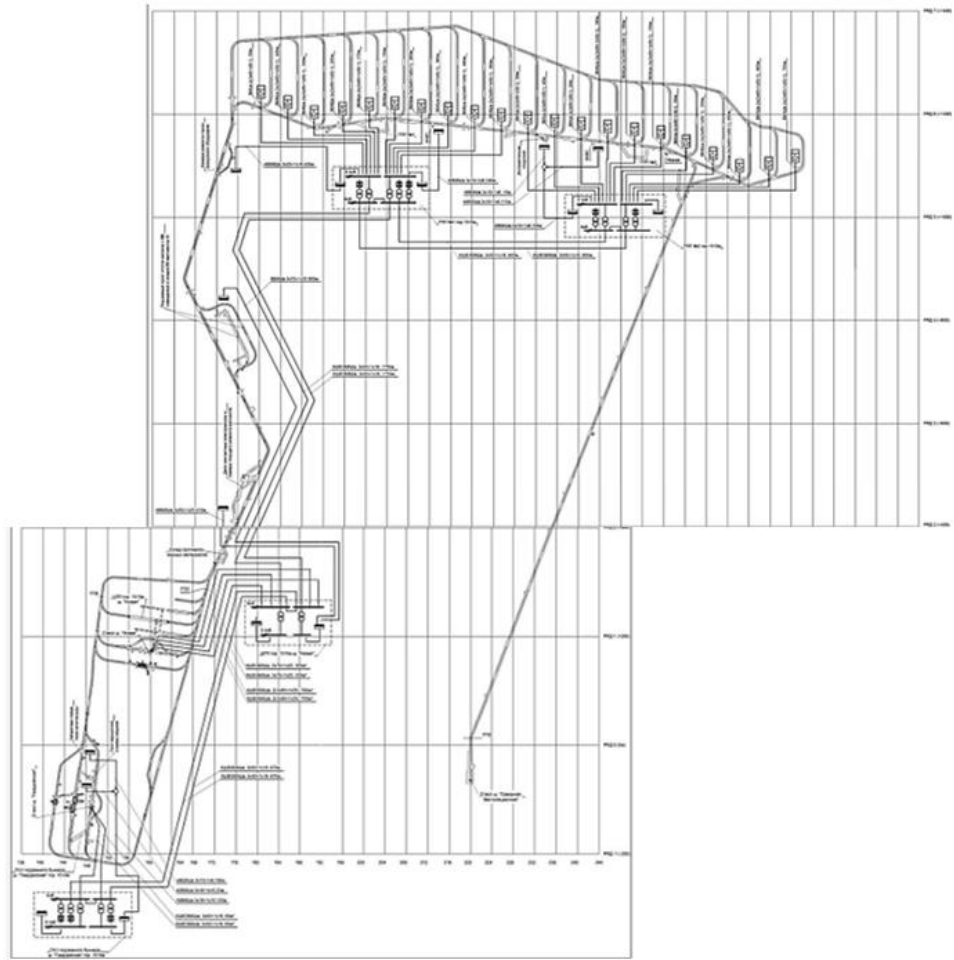


Рисунок 3.6 - Схема електропостачання підземного горизонту

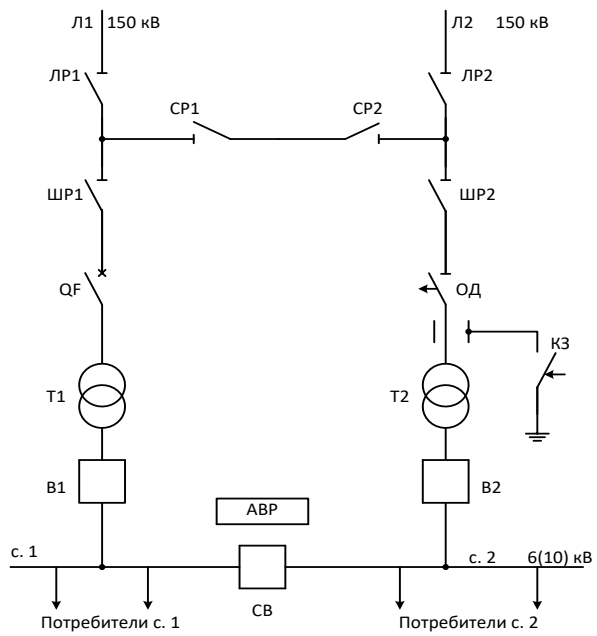


Рисунок 3.7 – Схема «гарячого» резерву трансформатора

### 3.3 РОЗРАХУНОК СТРУМІВ КОРОТКОГО ЗАМИКАННЯ

На рис. 3.8 наведемо схему заміщення для розрахунку струмів короткого замикання системи електропостачання шахти.

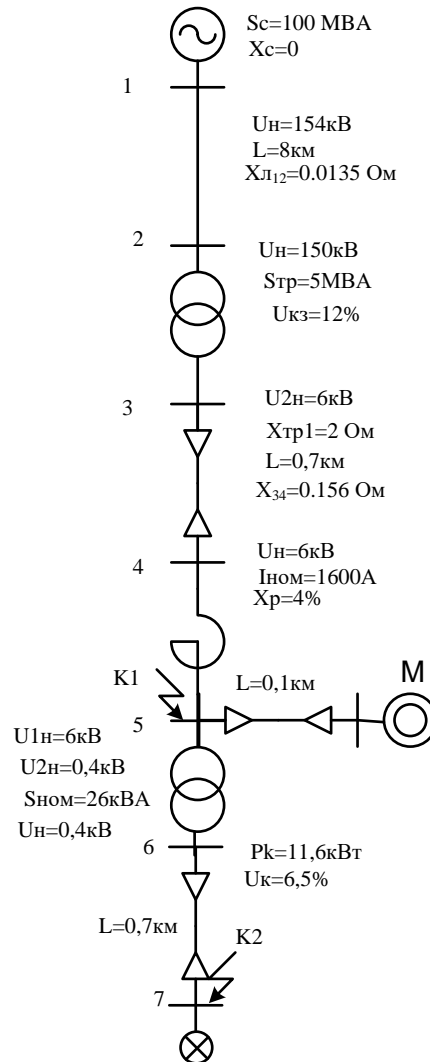


Рисунок 3.8 – Схема заміщення системи електропостачання шахти з точками короткого замикання

Приймаємо:

величину базисної потужності  $S_б=100 \text{ MVA}$ ;

базисні напруги  $U_б=6,0 \text{ кВ}$  і  $U_б=0,4 \text{ кВ}$ .

Визначаємо опори елементів електричної мережі до точки короткого замикання за відомими формулами та зводимо розрахунки до табл. 3.5.

Таблиця 3.5 - Опори елементів електричної мережі до точки короткого замикання

Формула	Од. вим.	Назва	Ви- раз
До точки короткого замикання К1			
$X_{\delta c} = \frac{S_{\delta}}{S_k} = \frac{100}{1450} = 0,069$		індуктивний опір системи	3.6
$X_{\text{БЛ12}} = X_0 \cdot l \cdot \frac{S_{\delta}}{U_H^2} = 0,4 \cdot 8 \cdot \frac{100}{154^2} = 0,0135$  $X_0 = 0,4 \text{ Ом/км}$ – питомий реактивний опір лінії електропередач; $l = 8 \text{ км}$ – довжина лінії		опір лінії електропередач	3.7
$X_{\delta \text{тп1}} = \frac{U_k \%}{100} \cdot \frac{S_{\delta}}{S_{\text{ТПР}}} = \frac{10}{100} \cdot \frac{100}{5} = 2$		індуктивний опір трансформатора	3.8
$X_{\delta \text{р}} = \frac{X_p \%}{100} \cdot \frac{I_{\delta}}{I_{\text{НР}}} \cdot \frac{U_{\text{НР}}}{U_{\delta}} =$ $= \frac{16}{100} \cdot \frac{9,2}{0,8} \cdot \frac{6}{6,3} = 0,657$		індуктивний опір реактора	3.9
$I_{\delta} = \frac{S_{\delta}}{\sqrt{3}U_{\delta}} = \frac{100}{\sqrt{3} \cdot 36,3} = 9,2$	кА	базисний струм	3.10
$X_{\delta 3-4} = X_0 \cdot l \cdot \frac{S_{\delta}}{U_H^2} = 0,08 \cdot 0,7 \cdot \frac{100}{6^2} = 0,156$		індуктивний опір кабелю на ділянці 3-4	3.11
$X_{\Sigma} = X_c + X_{12} + X_{\text{ТП1}} + X_p + X_{\text{Л12}} =$ $= 0,069 + 0,0135 + 2 + 0,057 + 0,156 = 2,8265$		сумарний індуктивний опір лінії	3.12
$I_{\text{К1}} = \frac{S_{\delta}}{\sqrt{3}U_{\delta} \cdot x_{\Sigma}} = \frac{100}{\sqrt{3} \cdot 6,3 \cdot 2,8265} = 3,24$	кА	струм КЗ у точці К1	3.13
$I_{\text{ПД}} = \frac{4,5 \cdot P_H}{\sqrt{3}U_{\delta} \cdot \eta_H \cdot \cos \varphi_H} =$ $= \frac{4,5 \cdot 315}{\sqrt{3} \cdot 6300 \cdot 0,952 \cdot 0,88} = 0,272$	кА	струм КЗ з урахуванням підживлення АД насоса	3.14

$I_{K3} = I_{K1} + I_{III} = 5,131 + 0,272 = 5,4$	кА	повний струм КЗ	3.15
$I_Y = \sqrt{2}K_Y \cdot I_{K1} = \sqrt{2} \cdot 1,3 \cdot 5,4 = 9,97$	кА	ударний струм КЗ	3.16
До точки короткого замикання К2			
$U_a \% = \frac{\Delta P_K}{S_{TPH}} \cdot 100 = \frac{280}{10000} \cdot 100 = 2,8\%$	%	активна складова напруги КЗ тр-ра ТСН- 2,6/6	3.17
$R_{HTP2} = \frac{U_a, \%}{100}; R_{HTP2} = \frac{2,8}{100} = 0,028$		активний опір трансформатора	3.18
$U_p = \sqrt{U_K^2 - U_a^2} = \sqrt{4,5^2 - 2,8^2} = 3,52 \%$	%	реактивна складова напруги КЗ тр-ра	3.19
$X_{HTP2} = \frac{U_p, \%}{100}; X_{HTP2} = \frac{3,52}{100} = 0,0352$		індуктивний опір трансформатора	3.20
$R_{TP2} = \frac{R_{HTP2} \cdot U_H^2}{S_H} = \frac{0,028 \cdot 0,38^2}{10} = 4,04 \cdot 10^{-4}$	Ом	активний опір трансформатора	3.21
$X_{TP2} = \frac{X_{HTP2} \cdot U_H^2}{S_H} = \frac{0,0352 \cdot 0,38^2}{10} = 5,1 \cdot 10^{-4}$	Ом	індуктивний опір трансформатора	3.22
$R_{67} = R_0 \cdot l = 0,62 \cdot 7 = 4,34$	Ом	активний опір кабелю АВГ 3×6	3.23
$X_{67} = X_0 \cdot l = 0,083 \cdot 7 = 0,581$	Ом	реактивний опір кабелю АВГ 3×6	3.24
$R_{\Sigma} = R_{TP2} + R_{67} = 0,000404 + 4,34 = 4,34$	Ом	сумарний активний опір	3.25
$X_{\Sigma} = X_{TP2} + X_{67} = 0,00051 + 0,581 = 0,5815$	Ом	сумарний реактивний опір	3.26
$I_{K2} = \frac{U_{HH}}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{R_{\Sigma}^2 + X_{\Sigma}^2}} =$ $= \frac{400}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{4,3404^2 + 0,5815^2}} = 52,7$	кА	струм КЗ у точці К2	3.27
$I_Y = \sqrt{2}K_Y \cdot I_{K2} = \sqrt{2} \cdot 1,05 \cdot 52,7 = 78,256$	кА	ударний струм КЗ	3.28

$S_{KЗ} = \sqrt{3}U_b \cdot I_{K2} = \sqrt{3} \cdot 0,4 \cdot 52,7 = 36,512$	потужність КЗ	3.29
--	---------------	------

### 3.4 ВИБІР ВИМИКАЧА НАПРУГОЮ 150 кВ

Промисловість виробляє для електричних мереж напругою 150 кВ вимикачі з елегазовим заповненням (наприклад компанії АВВ) (див. рис. 3.9). Компанія АВВ впровадила нову технологію управління вимикачами – електропривод Motor Drive™.

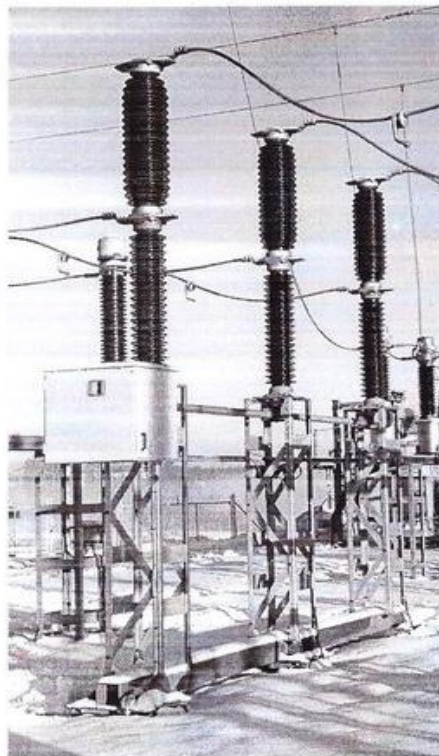


Рисунок 3.9 – Вимикач елегазовий ЛТВ

Вимикач елегазовий ЛТВ має високу надійність за рахунок зменшення енергії спрацьовування та механічних навантажень.

Вимикачі типу ЛТВ мають найбільші робочі (номінальні) напруги: 72,5, 145, 170, 245, 420, 550, 800 кВ; мають одну дугогасильною камерою на фазу при напругах до 245 кВ та дві камерами - при більш високих напругах. Робочі характеристики показані у табл. 3.6.

Таблиця 3.6 – Характеристики вимикачів ЛТВ компанії АВВ



Тип обладнання	Використання зовнішнє / у приміщенні	LTV 170D1/B зовнішнє
Конструкція	(SF <sub>6</sub> ) автокомпресійний (Auto-Puffer™) вимикач	Елегазовий автокомпресійний (Auto-Puffer™) вимикач, колонковий
Привод	Пружинний або електропривод Motor Drive	Пружинний
Ізоляція	SF <sub>6</sub> – елегаз	Елегаз
Номінальна напруга	до 800 кВ	170 кВ
Номінальний струм	до 4000 А	150 А
Комутаційний струм (максимальний струм відключення)	до 50 кА	40 кА
Максимальний наскрізний струм	до 50 кА/3 с	до 50 кА/3 с
Ізолятори	Композиційні або фарфорові	Композитні або фарфорові
Довжина шляху витоку	25 мм/кВ	25 мм/кВ
Умови експлуатації: Температурний діапазон	-30 до +400 °С	-30 до +400 °С
Розрахункова висота установки	1000 м над рівнем моря	1000 м над рівнем моря
Режим керування	Одно - або триполюсне керування	триполюсне керування

### 3.5 ВИБІР ЕЛЕМЕНТІВ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ТА ЗАХИСТУ

#### 3.5.1 Мережа 6,0 кВ

1) Комплектні розподільні пристрої серії УКР-РН-6В-УХЛ5

Дані розподільні пристрої встановлюються на головному шахтному водовідливі. Пристрої за конструкцією є вводні та відгалужувальні. Встановлюються по одному на кожний насос та одна вводна на шину 6 кВ.

Пристрої призначені для:

- розподілу електричної енергії в мережах з ізольованою нейтраллю напругою 6 кВ;
- захисту електроустановок і керування струмоприймачами шахт (рис. 3.10).



Рисунок 3.10 – Комплектні розподільні пристрої серії УКР-РН-6В-УХЛ5

Пристрої працюють при коливаннях напруги  $(85-115\%) \cdot U_{ном}$ . Для комутації силових кіл в шафі застосовується комутаційний вакуумний вимикач серії ВВ-6/10-12, 5/630 УХЛ2 (рис. 3.11). Технічні характеристики пристрою УКР-РН-6В-УХЛ5 надаємо у табл. 3.7.

Таблиця 3.7 - Технічні характеристики пристрою УКР-РН-6В-УХЛ5

Технічні дані	Одиниця вимірювання	Величина
Номинальна напруга	кВ	6,0
Найбільша робоча напруга	кВ	7,2
Номинальний струм головних кіл шафи: вхідний і секційних шафи шаф відхідний	А	315; 400; 630 50; 100; 160; 200; 315; 400
Частота	Гц	50
Механічний ресурс, циклів «вкл/викл»		50000
Комутаційний ресурс, циклів «вкл/викл» при номінальному струмі 630 А, не менше		50000
Номинальний струм відключення: шафи вимикача	кА	10 20
Нормовані параметри струму включення: найбільший пік початкове діюче значення періодичної складової	кА	25 10
Струм електродинамічної стійкості	кА	25
Струм термічної стійкості	кА	10
Час протікання струму термічної стійкості	с	1
Показник термічної стійкості	кА <sup>2</sup> ·с	300
Потужність відключення шафи	МВА	100
Найбільше припустиме без огляду число операцій відключення номінального струму відключення пристроїв		100



Рисунок 3.11 – Вимикач вакуумний серії ВВ-6/10-12, 5/630 УХЛ2

## 2) Шини на ГВУ

Вибір перерізу шин проводиться за розрахунковим струмом навантаження:

$$I_{\text{розр}} = \frac{S_p}{\sqrt{3} \cdot U_H} = \frac{2400}{\sqrt{3} \cdot 6,3} = 220 \text{ А}, \quad (3.30)$$

де  $S_p$  – повна потужність насосів ГВУ.

Необхідно встановити алюмінієві шини 60 x 6 (мм),  $I_{\text{доп}} = 870 \text{ А}$  та провести їх перевірку до впливу електродинамічних сил.

Момент опору шин:

$$W = 0,167 \cdot b \cdot h^2 = 0,167 \cdot 0,6 \cdot 6^2 = 3,607 \text{ см}^3, \quad (3.31)$$

де  $b = 0,6 \text{ см}$  – товщина шини;

$h = 6 \text{ см}$  – ширина шини.

Максимальне напруження у шині:

$$G_{\text{розр}} = \frac{1,76 \cdot 10^{-3} \cdot l^2 \cdot i_y^2}{a \cdot W} = \frac{1,76 \cdot 10^{-3} \cdot 120^2 \cdot 9,97^2}{30 \cdot 3,607} = 23,28 \text{ МПа} \quad (3.32)$$

де  $l = 120 \text{ мм}$  – відстань між опорними ізоляторами;

$i_y$  – ударний струм КЗ у точці К1, кА;

$a = 30 \text{ см}$  – відстань між фазами.

$G_{\text{доп}} = 40 \text{ МПа} > G_{\text{розр}} = 23,28 \text{ МПа}$ , значить шини динамічно стійкі.

### 3.5.2 Мережа 0,4 кВ

1) Вибір силового кабелю, що живить двигун насоса ЦНС 300-240

Розрахунковий струм статора приводного двигуна насоса ЦНС 300-240 згідно з розділом 2 дорівнює 560 А.

Перетин жили кабелю виконуємо згідно умови:  $I_{\text{доп}} \gg I_p$ .

Обираємо мідний кабель ВВГ 1х630 на тривало допустиме струмове навантаження при прокладці в повітрі – 910 А, при прокладці в ґрунті – 774 А.

Проведемо перевірку кабелю за допустимою втратою напруги.

Втрати напруги:

$$\begin{aligned} \Delta U &= \frac{\sqrt{3} \cdot I_{\text{нас}} \cdot \cos \varphi \cdot l_1 \cdot Z_0}{U_n} \cdot 100\% = & (3.33) \\ &= \frac{\sqrt{3} \cdot 560 \cdot 0,9 \cdot 0,005 \cdot 2,2}{400} \cdot 100\% = 2,4\% & ) \\ &2,4\% < 5,0\% \end{aligned}$$

2) Автоматичний вимикач

Умови вибору автоматичного вимикача:

- номінальний струм розчеплювача:

$$I_{\text{ел}} \geq I_p; \quad (3.34)$$

- струм відсічки розчеплювача:

$$I_{\text{сн}} \geq K \cdot I_{\text{П.леб}}, \quad (3.35)$$

де  $K=1,25$ .

Пусковий струм двигуна насоса:

$$I_{\text{П.леб}} = \alpha \cdot I_{\text{леб}} = 6,9 \cdot 560 = 3864 \text{ А}. \quad (3.36)$$

Для двигуна відцентрового насосу ЦНС 300-240 вибираємо автоматичний вимикач ETIBREAK NBS-TMD 630/3L 600A 3P (рис. 3.12).

Він має наступні характеристики:

- кількість полюсів 3;
- номінальний струм 600 А;

- розчеплювач тепловий та електромагнітний.



Рисунок 3.12 – Автоматичний вимикач ETIBREAK NBS-TMD 630/3L

## ВИСНОВКИ

Висновки за результатами роботи:

1. Виконано огляд електроспоживання енергоємним обладнанням залізорудних шахт та за допомогою осцилограм залізорудних підприємств доведено, що водовідливні установки є енергоємними споживачами.

2. Ознайомився зі стендом керування водовідливним комплексом шахти, який створено та який працює на кафедрі електромеханіки (аудиторія № 214). Даний макет дозволяє повністю проводити керування роботою насосних установок. Зауважимо, що стенд та запропонована система керування базується на устаткуванні та елементах вітчизняного виробника.

3. Виконано вибір насосу ЦНС 300-240 горизонту 1115 м (допоміжний водовідлив) та приводного асинхронного двигуна АИР355М4 потужністю 315 кВт.

4. Проведено аналіз систем керування водовідливними установками, виконано огляд сучасних розробок та літератури і зроблено висновок про впровадження системи ПЧ-АД в роботу допоміжної водовідливної

установки (ДВУ). Вибрано перетворювач частоти ATV630C31N4 компанії Schneider Electric.

5. З використанням Matlab складено моделі: електропривода насоса в розімкненій системі та з регуляторами струму і швидкості, досліджено статичні та динамічні характеристики електропривода ВУ. Використання регуляторів зменшило кратність пускового струму двигуна насоса АИР355М4.

6. Проведено розрахунок електричних навантажень (коефіцієнт попиту) на прикладі шахти Покровська, вибрано силові трансформатори, розраховано струми короткого замикання (6 кВ і 0,4 кВ), вибрано кабелі, шини, апаратура (комутаційна й захисна) електричних мереж.

7. Завантаження силових трансформаторів дільничних підстанцій складає 30%, тому загальну потужність трансформаторів можна зменшити в 1,5-2 рази. Значить, потужність трансформаторів буде дорівнювати 250 кВА. На підземних підстанціях залізрудних шахт необхідно встановити комплектні трансформаторні підстанції у рудниковому виконанні.