

Центральноукраїнський національний технічний університет
Факультет будівництва, транспорту та енергетики
Кафедра «Електротехнічні системи та енергетичний менеджмент»

“Допущено до захисту”
Зав. кафедрою ЕТС та ЕМ
к.т.н., професор
_____Петро ПЛЄШКОВ
“ ____ ” _____ 2026 р.

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
ЗА ПЕРШИМ (БАКАЛАВРСЬКИМ) РІВНЕМ
ВИЩОЇ ОСВІТИ**

на тему:

**Проектування системи електропостачання
гранітного кар'єру
Design of a power supply system for a granite quarry**

Виконав здобувач вищої освіти
IV курсу, групи ЕЕ-22,
ОПП «Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка»
спеціальності 141 «Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка»
_____ Дмитро ТОКАР
« ____ » _____ 2026 р.

Керівник роботи
старший викладач
_____Тетяна ВЕЛИЧКО
« ____ » _____ 2026 р.

Рецензент _____

Центральноукраїнський національний технічний університет

Факультет будівництва, транспорту та енергетики

Кафедра електротехнічних систем та енергетичного менеджменту

Рівень вищої освіти перший (бакалаврський)

Галузь знань 14 «Електрична інженерія»

Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Освітньо-професійна програма «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Завідувач кафедри ЕТС та ЕМ

_____ Петро ПЛІШКОВ

«_____» _____ 2026 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗА ПЕРШИМ (БАКАЛАВРСЬКИМ) РІВНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ

Токаря Дмитра Олеговича

(прізвище, ім'я, по-батькові)

1. Тема роботи Проектування системи електропостачання гранітного кар'єру
Design of a power supply system for a granite quarry

2. Керівник роботи Величко Тетяна Володимирівна, старший викладач
(прізвище, ім'я, по-батькові, науковий ступінь, вчене звання)

3. Строк подання роботи до захисту 08.06.2026 р.

4. Мета та завдання кваліфікаційної роботи розрахунок електричних навантажень;
побудова графіків та картограми електричних навантажень; вибір напруги
і електричних схем зовнішнього електропостачання; розрахунок режимів
реактивної потужності; вибір трансформаторів; розрахунок струмів КЗ, вибір
обладнання та силових мереж; автоматизація та оптимізація енергоспоживання
електроприводних комплексів

5. Консультанти по роботі, із зазначенням розділів роботи

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
<i>Спеціальний розділ</i>	<i>доцент Н.Ю. Гарасьова</i>		

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	<i>Вступ</i>	<i>13.04-16.04</i>	
2	<i>Розрахунок електричних навантажень</i>	<i>17.04-26.04</i>	
3	<i>Побудова графіків електричних навантажень</i>	<i>26.04-29.04</i>	
4	<i>Побудова картограми електричних навантажень</i>	<i>30.04-03.05</i>	
5	<i>Вибір напруги і електричних схем</i>	<i>04.05-08.05</i>	
6	<i>Режими реактивної потужності</i>	<i>09.05-14.05</i>	
7	<i>Вибір трансформаторів</i>	<i>15.05-19.05</i>	
8	<i>Розрахунок струмів КЗ, вибір обладнання та силових мереж системи електропостачання</i>	<i>20.05-25.05</i>	
9	<i>Автоматизація та оптимізація енергоспоживання електроприводних комплексів</i>	<i>26.05-01.06</i>	
10	<i>Оформлення презентаційної частини КР</i>	<i>02.06-05.06</i>	
11	<i>Оформлення пояснювальної записки КР</i>	<i>06.06-08.06</i>	

Дата видачі завдання

«___» _____ 2026 р.

Підпис керівника

Тетяна ВЕЛИЧКО

Завдання прийнято до виконання

«___» _____ 2026 р.

Підпис здобувача

Дмитро ТОКАР

АНОТАЦІЯ

Кваліфікаційна робота: 75 с.; 13 рис.; 12 табл.; 9 джерел

Токар Д.О. Проектування системи електропостачання гранітного кар'єру. – Рукопис.

Кваліфікаційна робота за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», ОПП «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка». – Центральноукраїнський національний технічний університет, Кропивницький, 2026 рік.

Метою кваліфікаційної роботи є розробка комплексної, надійної та економічно обґрунтованої системи електропостачання та автоматизації технологічних комплексів гранітного кар'єру з вибором сучасного енергоефективного обладнання.

Об'єктом дослідження є технологічний комплекс компресорної станції, до складу якого входять чотири синхронні двигуни потужністю 1250 кВт кожен. Сумарна встановлена потужність об'єкта у 5 МВт зумовлює високу відповідальність систем автоматизації та вимагає впровадження інтелектуальних алгоритмів керування для мінімізації втрат. Розробка та обґрунтування комплексного рішення щодо автоматизації згаданого електроприводного парку шляхом впровадження сучасних частотних перетворювачів на базі IGBT-транзисторів та цифрових систем збудження серії VTE-320.

Ключові слова: електропостачання, гранітний кар'єр, трансформатор, коротке замикання, компенсація реактивної потужності, вакуумний вимикач, частотно-регульований електропривід, автоматизація.

ABSTRACT

Qualification work: 75 p.; 13 Fig.; 12 tables; 9 sources

Tokar D. Design of a power supply system for a granite quarry. – Manuscript.

Qualification work thesis on specialty 141 "Electric power engineering, electrical engineering and electromechanics", OPP "Electric power engineering, electrical engineering and electromechanics". – Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, 2026.

The purpose of the qualification work is to develop a comprehensive, reliable and economically justified power supply and automation system for technological complexes of a granite quarry with a selection of modern energy-efficient equipment.

The object of the study is a technological complex of a compressor station, which includes four synchronous motors with a capacity of 1250 kW each. The total installed capacity of the facility of 5 MW determines the high responsibility of automation systems and requires the implementation of intelligent control algorithms to minimize losses. Development and justification of a comprehensive solution for the automation of the aforementioned electric drive fleet by implementing modern frequency converters based on IGBT transistors and digital excitation systems of the VTE-320 series.

Key words: power supply, granite quarry, transformer, short circuit, reactive power compensation, vacuum circuit breaker, variable frequency drive, automation.

З М І С Т

	Перелік скорочень	7
1.	ВСТУП	8
2.	РОЗРАХУНОК ЕЛЕКТРИЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ ОБ'ЄКТА	9
2.1.	Визначення силових електричних навантажень у мережах напругою до 1000 В	9
2.2.	Розрахунок освітлювальних електричних навантажень	10
2.3.	Розрахунок електричних навантажень у мережах вище 1000В	10
2.4.	Аналіз та моделювання графіків електричних навантажень	16
3.	РОЗРОБКА КАРТОГРАМИ НАВАНТАЖЕНЬ ТА ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНОГО ЦЕНТРУ ЖИВЛЕННЯ	20
4.	ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ НАПРУГИ ТА СХЕМИ ЗОВНІШНЬОГО ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ГРАНІТНОГО КАР'ЄРУ	22
5.	РЕЖИМИ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ ТА ЇЇ КОМПЕНСАЦІЯ В СИСТЕМІ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ	28
5.1.	Розрахунок балансу реактивної потужності та аналіз варіантів компенсації	28
5.2.	Вибір параметрів та місць розташування конденсаторних установок	30
6.	ВИБІР КІЛЬКОСТІ ТА ПОТУЖНОСТІ СИЛОВИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ ГРАНІТНОГО КАР'ЄРУ	33
7.	РОЗРАХУНОК СТРУМІВ КОРОТКОГО ЗАМИКАННЯ ТА ВИБІР ВИСОКОВОЛЬТНОГО ОБЛАДНАННЯ	37
7.1.	Розрахунок струмів короткого замикання (КЗ)	37
7.2.	Вибір високовольтних кабельних ліній 10 кВ	41
7.3.	Вибір високовольтного апаратного обладнання	42
8.	АВТОМАТИЗАЦІЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДНИХ КОМПЛЕКСІВ	45
8.1.	Енергозберігаючі режими функціонування електроприводів	45
8.2.	Стратегії керування та оптимізація збудження синхронних машин	46
8.3.	Математичне моделювання динамічних процесів	47

					КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА			
Зм	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розробив	Токар				Проектування системи електропостачання гранітного кар'єру Design of a power supply system for a granite quarry	Літ.	Аркуш	Аркушів
Перевірів	Величко						5	75
Н.контр.	Величко					ЦНТУ, гр.ЕЕ-22		
Затв.	Плешков							

8.4.	Схемотехнічна реалізація силових інверторних комірок	50
8.5.	Комплексні алгоритми захисту та апаратна діагностика у системах ВТЕ-320	55
8.6.	Комплексні режими енергозбереження компресорних установок	57
9.	ВИСНОВКИ	59
10.	ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	61
	Додатки	62
	Додаток А	63
	Додаток Б	67
	Додаток В	72
	Додаток Г	73

Перелік скорочень

АД – асинхронний двигун;
БК – батарея конденсаторів;
ВРП – відкритий розподільчий пристрій;
ГЗП – головна знижувальна підстанція;
ККД – коефіцієнт корисної дії;
КЗ – коротке замикання;
КЛ – кабельна лінія;
КП – компенсувальний пристрій;
КРП – комплектний розподільчий пристрій;
КТП – комплектна трансформаторна підстанція;
ПЛ – повітряна лінія;
СД – синхронний двигун;
ТН – трансформатор напруги;
ТП – трансформаторна підстанція;
ТС – трансформатор струму;
ЧРП – частотно-регульований електропривід.

						Арх.
						7
Змн.	Арх.	№ докум.	Підпис	Дата		

1. ВСТУП

Гірничодобувна промисловість, зокрема розробка гранітних родовищ, належить до найбільш енергоємних галузей виробництва. Видобуток корисних копалин ведеться переважно відкритим способом, що диктує специфічні та складні умови експлуатації електрообладнання: підвищений рівень запиленості, вплив атмосферних опадів, вібраційні навантаження від вибухових робіт, а також значну віддаленість окремих споживачів від джерел живлення. Безперерйна робота потужних екскаваторів, бурових станків та дробильно-сортувальних ліній потребує створення максимально надійної та безпечної системи електропостачання.

Об'єктом проектування у даній роботі є гранітний кар'єр — сучасне підприємство з виробництва гранітного щебеню. Процес виробництва здійснюється на високотехнологічному обладнанні, що забезпечує випуск продукції згідно з європейськими стандартами якості. Підприємство має розвинену виробничу базу, яка постійно модернізується для підвищення обсягів випуску продукції. Зовнішнє живлення об'єкта передбачається від підстанції 35/10 кВ, яка розташована на відстані 6,5 км. Перелік основних підрозділів кар'єру та розрахункові навантаження обладнання представлені в таблиці 2.1.

Головною задачею даної роботи є проектування ефективної системи електропостачання гранітного кар'єру. При розробці схеми живлення промислового підприємства необхідно забезпечити максимально раціональне використання електричної енергії, що визначається насамперед техніко-економічними показниками обраного варіанта. Особлива увага приділяється питанням надійності електропостачання споживачів, мінімізації втрат при передачі енергії, а також безпеці та зручності обслуговування електроустановок.

Важливою вимогою до системи є її гнучкість — можливість майбутнього розширення та розвитку потужностей підприємства без докорінної перебудови чи значного подорожчання існуючих мереж. Також у роботі передбачається використання сучасного комплектного обладнання, що дозволяє значно пришвидшити терміни монтажних робіт та введення енергооб'єктів у промислову експлуатацію.

						Арх.
						8
Змн.	Арх.	№ докум.	Підпис	Дата		

2. РОЗРАХУНОК ЕЛЕКТРИЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ ОБ'ЄКТА

2.1. Визначення силових електричних навантажень у мережах напругою до 1000 В

Розрахунок силових навантажень низьковольтних споживачів (до 1000 В) гранітного кар'єру виконується методом впорядкованих діаграм (за коефіцієнтом максимуму).

Як типовий приклад, розглянемо детальне обчислення для підрозділу «Блок теплозабезпечення». Вихідні дані для розрахунку наступні: кількість електроприймачів $n_{\text{ел}} = 38$; максимальна потужність приймача $P_{\text{н.мах}} = 95$ кВт; мінімальна потужність $P_{\text{н.мін}} = 10$ кВт; сумарна встановлена потужність $P_{\text{сум}} = 765$ кВт. Енергетичні показники групи: коефіцієнт використання $K_{\text{в}} = 0,55$; $\cos\varphi = 0,75$; $\text{tg}\varphi = 0,882$.

Визначаємо середньозмінне активне та реактивне навантаження групи електроприймачів:

$$P_{\text{см}} = K_{\text{в}} \cdot P_{\text{сум}} = 0,55 \cdot 765 = 420,75 \text{ кВт}$$

$$Q_{\text{см}} = P_{\text{см}} \cdot \text{tg}\varphi = 420,75 \cdot 0,882 = 371,07 \text{ квар}$$

Обчислюємо ефективну кількість електроприймачів $n_{\text{еф}}$, яка необхідна для визначення коефіцієнта максимуму: $n_{\text{еф}} = 2 \cdot P_{\text{сум}} / P_{\text{н.мах}} = 2 \cdot 765 / 90 = 16$.

За довідковими таблицями, для заданих $n_{\text{еф}}$ та $K_{\text{в}}$, знаходимо коефіцієнт максимуму $K_{\text{м}} = 1,25$.

Знаходимо розрахункову активну та реактивну потужності вузла:

$P_{\text{р}} = P_{\text{см}} \cdot K_{\text{м}} = 420,75 \cdot 1,25 = 524,3$ кВт; $Q_{\text{р}} = Q_{\text{см}} = 371,07$ квар (для мереж з кількістю приймачів більше 10 реактивне навантаження приймається рівним середньозмінному).

За аналогічним алгоритмом, із застосуванням математичного пакета Microsoft Excel, виконано розрахунок силового навантаження для всіх підрозділів гранітного кар'єру, результати якого зведено у таблицю 2.1. В

						Арх.
						9
Змн.	Арх.	№ докум.	Підпис	Дата		

цілому, сумарне розрахункове активне навантаження кар'єру по мережі 0,4 кВ становить 6926,6 кВт, а реактивне — 5123,0 квар.

2.2. Розрахунок освітлювальних електричних навантажень

Визначення потужності, що споживається установками штучного освітлення, виконується методом питомої потужності на одиницю площі.

Приклад розрахунку наведено для підрозділу «Каменерізний комплекс». Вихідні параметри: площа приміщень $F = 14500 \text{ м}^2$; питома потужність освітлення $P_o = 10 \text{ Вт/м}^2$; коефіцієнт попиту для освітлювальної мережі $K_c = 0,85$. Визначаємо загальну встановлену потужність освітлювальних установок:

$$P_y = P_o \cdot F \cdot 10^{-3} = 10 \cdot 14500 \cdot 10^{-3} = 145 \text{ кВт.}$$

Розрахункове активне та реактивне навантаження освітлювальної установки (з урахуванням коефіцієнта втрат у пускорегулювальній апаратурі 1,12): $P_{p.o.y} = 1,12 \cdot P_y \cdot K_c = 1,12 \cdot 145 \cdot 0,85 = 138,04 \text{ кВт}$

$$Q_{p.o.y} = P_{p.o.y} \cdot \operatorname{tg} \varphi = 138,04 \cdot 0,48 = 66,26 \text{ квар}$$

Повні результати розрахунку освітлювальних навантажень по всіх підрозділах підприємства систематизовано у таблиці 2.2.

2.3. Розрахунок електричних навантажень у мережах вище 1000 В

Зведення навантажень на стороні вищої напруги розглянемо на прикладі трансформаторної підстанції КТП1-КТП2, яка забезпечує живлення дільниці гірничо-видобувних робіт.

Базові розрахункові навантаження дільниці складають:

- силове навантаження: $P_p = 1689 \text{ кВт}$; $Q_p = 1236,62 \text{ квар}$;
- освітлювальне навантаження: $P_{p.o.y} = 276,64 \text{ кВт}$; $Q_{p.o.y} = 132,79 \text{ квар}$.

Сумарне навантаження, що підключається до підстанції:

$$P_{\text{сум}} = P_p + P_{p.o.y} = 1689 + 276,64 = 1965,64 \text{ кВт}$$

$$Q_{\text{сум}} = Q_p + Q_{p.o.y} = 1236,62 + 132,79 = 1369,41 \text{ квар}$$

						Арх.
						10
Змн.	Арх.	№ доум.	Підпис	Дата		

Орієнтуючись на забезпечення повної компенсації реактивної потужності та враховуючи категорію надійності, для даної підстанції приймаємо до встановлення три силові трансформатори типу ТМЗ-1000/10. Коефіцієнт їх завантаження в нормальному режимі роботи складе:

$$K_3 = 1965,64 / 3 \cdot 1000 = 0,66$$

Паспортні технічні характеристики обраного трансформатора ТМЗ-1000/10: напруга короткого замикання $U_k = 5,5\%$; втрати короткого замикання $\Delta P_k = 11$ кВт; втрати холостого ходу $\Delta P_x = 2,1$ кВт; струм холостого ходу $I_x = 1,4\%$.

Визначаємо активні та реактивні втрати потужності в силових трансформаторах: $\Delta P_T = 20,47$ кВт, $\Delta Q_T = 112,84$ квар.

З урахуванням внутрішніх втрат, повне розрахункове навантаження на стороні вище 1000 В для підстанції КТП1-КТП2 дорівнюватиме:

$$P_{p.тп} = P_{сум} + \Delta P_T = 1965,64 + 20,47 = 1986,11 \text{ кВт}$$

$$Q_{p.тп} = Q_{сум} + \Delta Q_T = 1369,41 + 112,84 = 1482,25 \text{ квар.}$$

Результати аналогічних розрахунків для інших підстанцій гранітного кар'єру наведено у таблиці 2.3.

Загалом по підприємству, з урахуванням високовольтного електричного навантаження (високовольтні асинхронні двигуни 3x315 кВт та синхронні двигуни 4x1250 кВт), сумарне розрахункове навантаження гранітного кар'єру становить: $P_p = 12009,62$ кВт, $Q_p = 4742,39$ квар.

						Арх.
						11
Змн.	Арх.	№ док.м.	Підпис	Дата		

Таблиця 2.1. Розрахунок силового навантаження гранітного кар'єру до 1000 В

№	Назва вузлів навантаження	Кіл-сть	Встановлена потужність, кВт				m	Кв	cosφ	tgφ	Середнє навантаження, кВт, квар		пє	Км	Розрахункова потужність, кВт, квар, кВА		
			Одного		Сумарна						Рср	Qср			Рр	Qр	Sp
1	2	3	4			5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	Дільниця гірничо-видобувних робіт	36	10,0		250	2460		0,57	0,75	0,882	1402,20	1236,62	20	1,20	1689,0	1236,62	2093,31
2	Каменерізний комплекс	44	7,5		200	2112		0,55	0,73	0,936	1161,60	1087,52	21	1,21	1405,7	1087,52	1777,30
3	Дробильно-сортувальний комплекс	42	7,5		200	2423		0,71	0,79	0,776	1720,33	1335,12	24	1,11	1911,6	1335,12	2331,68
4	Вузол гідравлічних систем	15	10	-	50	530		0,64	0,81	0,724	339,20	245,58	15	1,19	405,2	245,58	473,84
5	Сервісно-відновлювальний комплекс	235	0,7	-	28	1980		0,41	0,82	0,698	811,80	566,64	141	1,10	895,0	566,64	1059,27
6	Блок теплозабезпечення	38	10	-	95	765		0,55	0,75	0,882	420,75	371,07	16	1,25	524,3	371,07	642,36
7	Відділення харчування персоналу	36	0,8	-	30	540		0,5	0,9	0,484	270,00	130,77	36	1,18	317,5	130,77	343,41
8	Адміністративно-побутовий корпус	22	2,5	-	28	345		0,7	0,85	0,62	241,50	149,67	22	1,12	271,1	149,67	309,69
	Всього по гранітному кар'єру	468	0,7	-	250	11155,0		0,571	0,779	0,805	6367,4	5123,0	89	1,09	6926,6	5123,0	8615,3

Таблиця 2.2. Розрахунок освітлення гранітного кар'єру

№	Найменування	F,м²	ρ₀, Вт/м²	Рв,кВт	К₁	Кс	tgφ	Рр,кВт	Qр,квар	Sp,кВА
1	Дільниця гірничо-видобувних робіт	26000	10	260,00	1,12	0,95	0,48	276,64	132,79	306,86
2	Каменерізний комплекс	14500	10	145,00	1,12	0,85	0,48	138,04	66,26	153,12
3	Дробильно-сортувальний комплекс	12000	12	144,00	1,12	0,85	0,48	137,09	65,80	152,06
4	Вузол гідравлічних систем	3130	6	18,78	1,12	0,85	0,48	17,88	8,58	19,83
5	Сервісно-відновлювальний комплекс	5600	15	84,00	1,12	0,95	0,48	89,38	42,90	99,14
6	Блок теплозабезпечення	1875	8	15,00	1,12	0,85	0,48	14,28	6,85	15,84
7	Відділення харчування персоналу	2530	20	50,60	1,12	0,9	0,48	51,00	24,48	56,58
8	Адміністративно-побутовий корпус	3700	20	74,00	1,12	0,9	0,48	74,59	35,80	82,74
9	Компресорна	2450	6	14,70	1,12	0,85	0,48	13,99	6,72	15,52
10	Територія заводу	180345	0,1	18,03	1,2	1	1,73	21,64	37,44	43,24
	Всього по гранітному кар'єру							834,54	427,63	937,72

Таблиця 2.3. Розрахунок електричних навантажень в мережі вище 1000 В гранітного кар'єру

Назва групи споживачів		Кіль- ть ЕС	Родного, кВт		Рсум, кВт	m	Ки	cosφ	tgφ	Середнє навантаження		п _{еф}	К _м	Розрахункове навантаження			
			min							max	Р _{см} , кВт			Q _{см} , квар	Р _р , кВт	Q _р , квар	S _р , кВА
1		2	3			4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
ТП№1-2																	
Дільниця гірничо-видобувних робіт																	

продовження таблиці 2.3.

[illegible]

продовження таблиці 2.3.

1		2	3			4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Компресорна																	
силова																	
освітлювальна															35,64	44,16	
Всього															35,64	44,16	
Всього по ТП7																	
силова		96	0,8		95	1650		0,6	0,8	0,7	932,3	651,50	35	1,15	1073,26	651,50	1255,53
освітлювальна															175,51	111,30	
Всього на шинах 0,4 кВ ТП7															1248,78	762,80	1463,32
Втрати в трансформаторах															12,78	70,88	
Кількість трансформаторів:	2																
Номінальна потужність, кВА:	1000																
Коефіцієнт завантаження $K_3=$	0,62																
Всього на шинах 10 кВ ТП7															1261,55	833,68	1512,13
Всього кар'єру																	
силова		468	0,7	-	250	11155,0		0,57	0,78	0,80	6367,4	5123,0	89	1,09	6926,6	5123,0	8615,3
освітлювальна															834,54	427,63	
Всього															7761,13	5550,62	9541,73
Втрати в трансформаторах															86,99	476,94	
Всього по гранкар'єру															7848,12	6027,56	9895,68
Високовольтне навантаження																	
Компресорна (10 кВ)		4,0	1250	-	1250	5000,0		0,70	0,90	0,48	3500,0	1695,1			3500,0	-1695,1	3888,9
АД зони відкритих робіт		3,0	315	-	315	945,0		0,70	0,85	0,62	661,5	410,0			661,5	410,0	778,2
Всього на шинах 10 кВ гранкар'єру													tgφ=	0,395	12009,62	4742,39	12912,06
																-2940,95	
													tgφ=	0,15	12009,62	1801,44	12143,98

2.4. Аналіз та моделювання графіків електричних навантажень

Для забезпечення надійної та економічної роботи системи електропостачання гранітного кар'єру необхідно ретельно проаналізувати режими споживання електроенергії. Базою для цього слугують добові графіки навантажень, які будуються на основі реальних вимірювань на підприємстві. При їх формуванні обов'язково враховується специфіка роботи кар'єру в зимовий та літній періоди, а також розподіл на робочі та вихідні дні. Для моделювання використовуються типові графіки, характерні для підприємств видобувної промисловості.

Календарний фонд часу для розрахунків розподілено наступним чином: зимовий період включає 147 робочих та 65 вихідних днів, тоді як літній — 105 робочих та 48 вихідних діб.

У даній роботі всі трудомісткі обчислення параметрів навантаження гранітного кар'єру були автоматизовані. Вони виконувалися за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення «Grafik.exe», розробленого на кафедрі. Детальні результати машинних розрахунків додаються у вигляді окремих роздруків, що приведені нижче та у додатку А. Графіки відображені на рис.2.1-2.5.

						Арх.
						16
Змн.	Арх.	№ докум.	Підпис	Дата		

Розрахункові величини графіка електричних навантажень

S_p	=	12912,06	МВА
$W_{з.р.}$	=	37939083	кВт год.
$V_{з.р.}$	=	10456551	кВар год.
$W_{з.в.}$	=	5386030	кВт год.
$V_{з.в.}$	=	1324830	кВар год.
$W_{л.р.}$	=	23034165	кВт год.
$V_{л.р.}$	=	6349140	кВар год.
$W_{л.в.}$	=	3381216	кВт год.
$V_{л.в.}$	=	832032	кВар год.
W_p	=	69740494	кВт год.
V_p	=	18962553	кВар год.
T_{max}	=	5597,288	год.

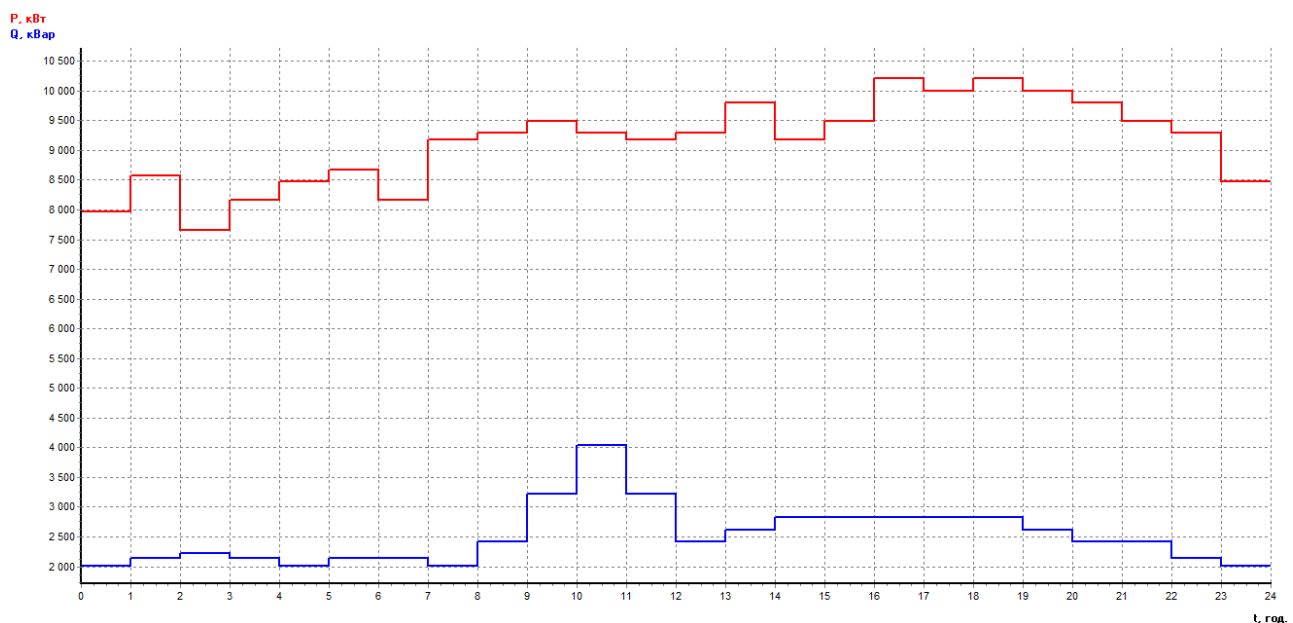


Рис.2.1. Літні робочі дні добового графіку навантаження

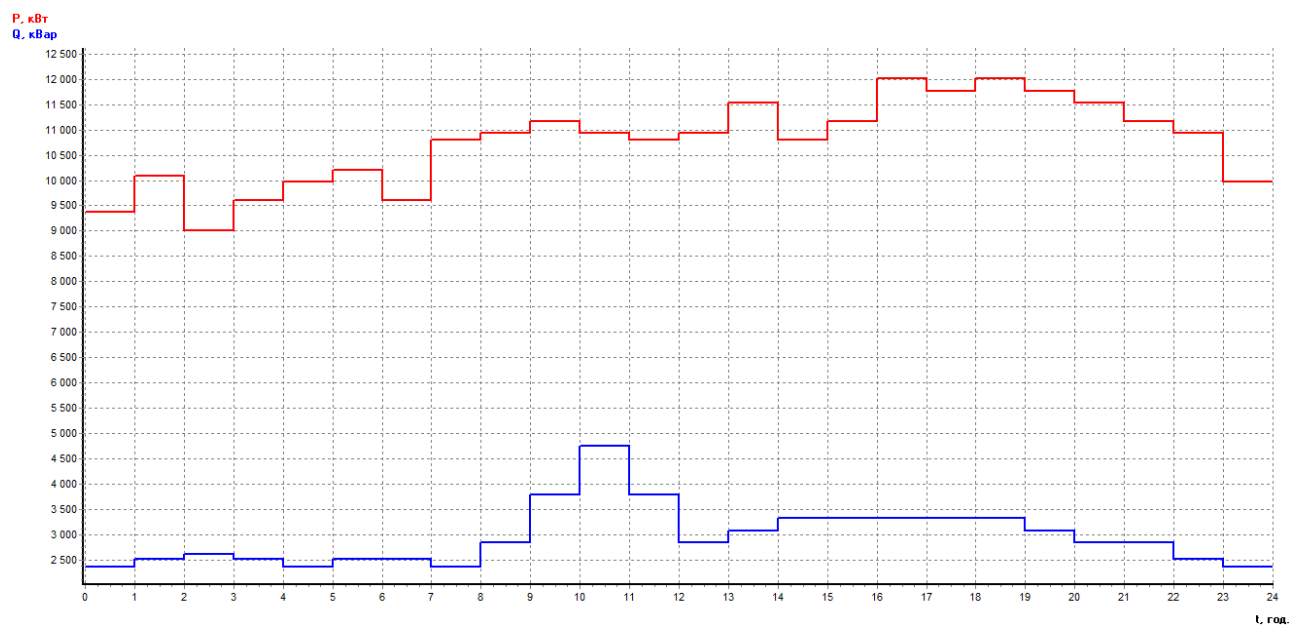


Рис.2.2. Зимові робочі дні добового графіку навантаження

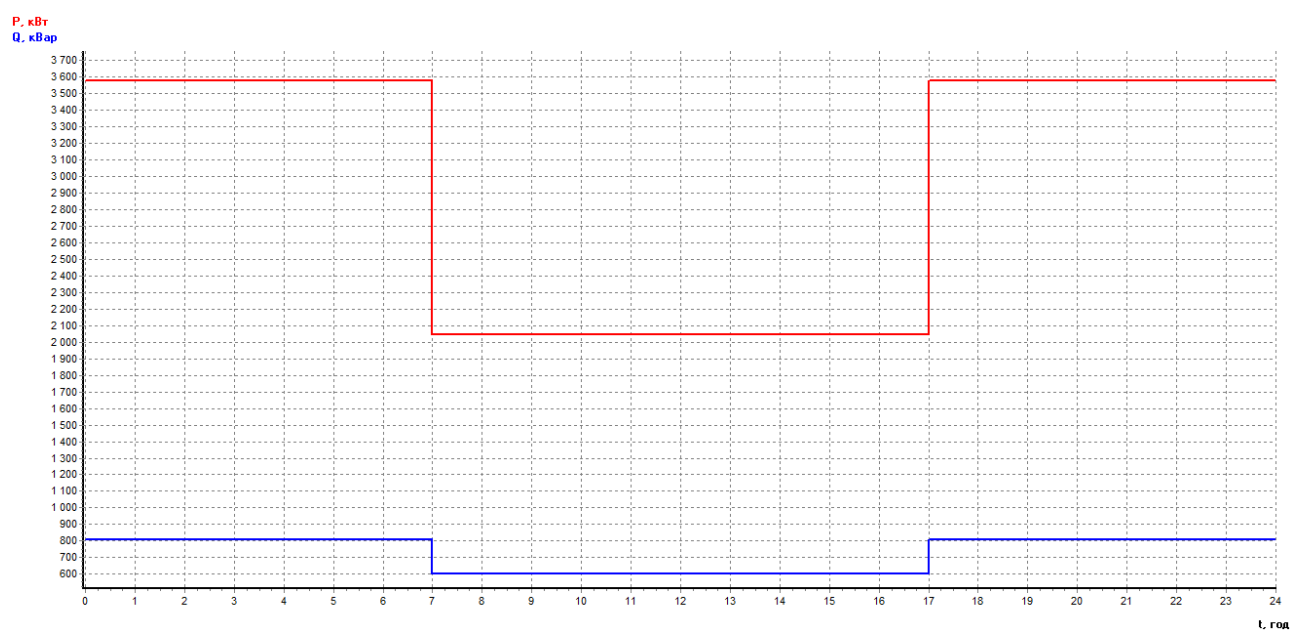


Рис.2.3. Літні вихідні дні добового графіку навантаження

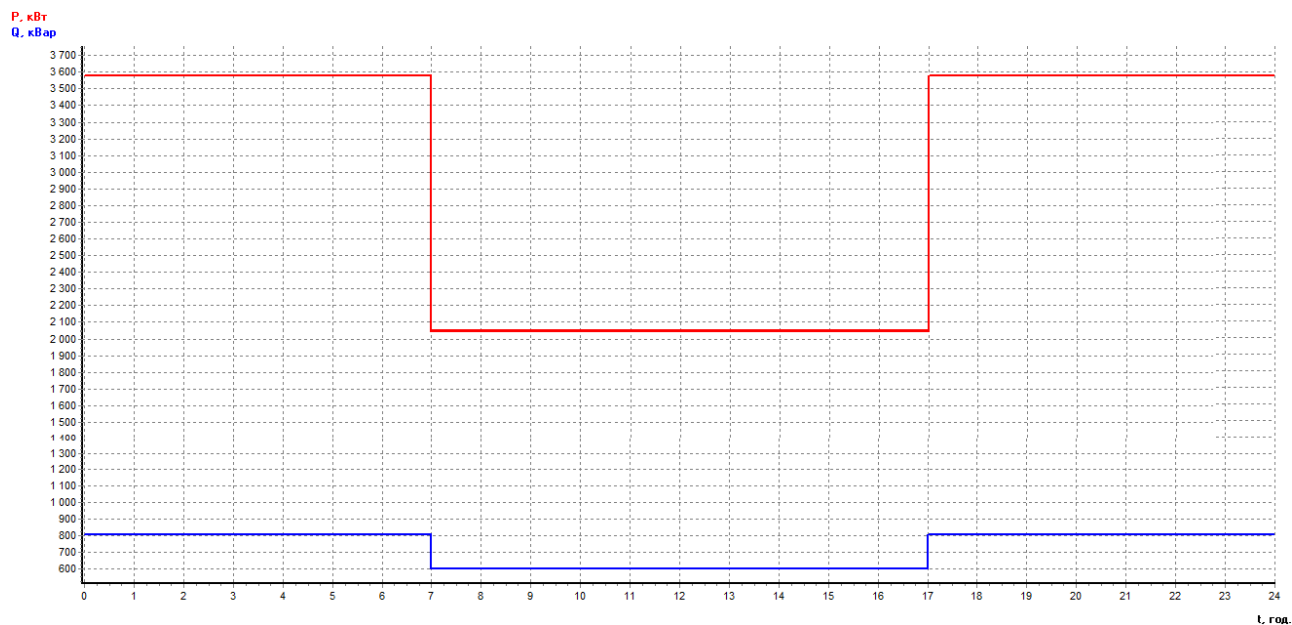


Рис.2.4. Зимові вихідні дні добового графіку навантаження

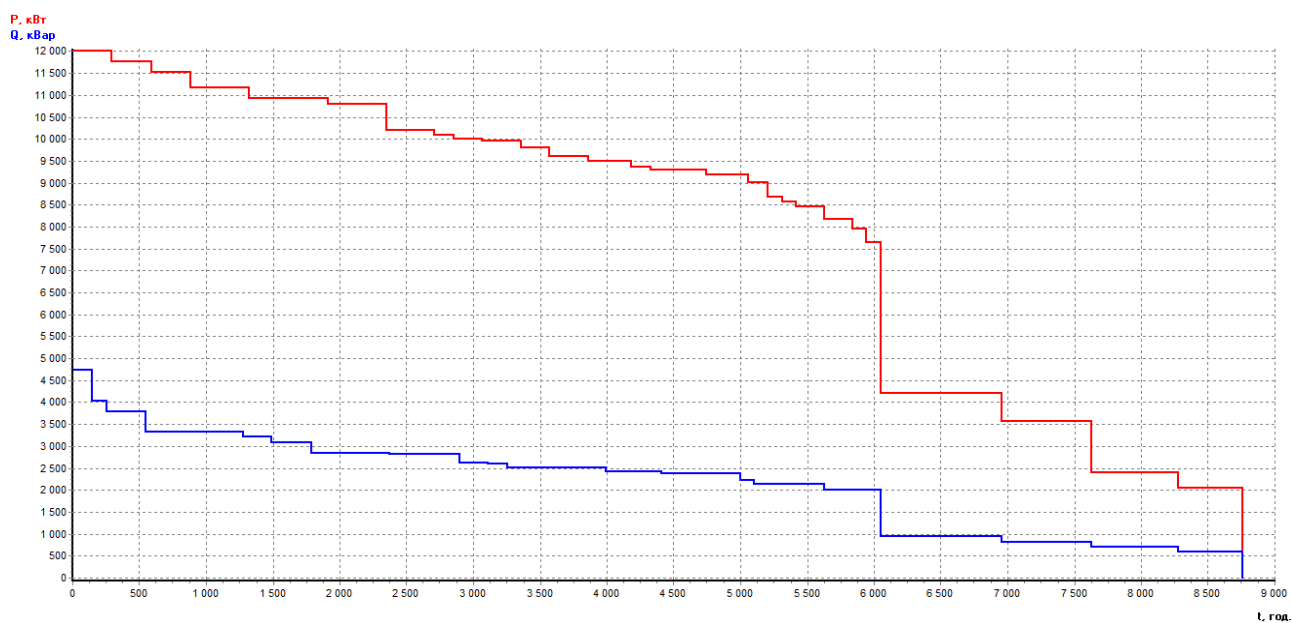


Рис.2.5. Річний графік

3. РОЗРОБКА КАРТОГРАМИ НАВАНТАЖЕНЬ ТА ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНОГО ЦЕНТРУ ЖИВЛЕННЯ

Одним із найважливіших завдань при проектуванні генерального плану підприємства є правильне розташування головної знижувальної підстанції (ГЗП). Для візуалізації та просторового аналізу електроспоживання використовується картограма електричних навантажень.

Картограма наноситься безпосередньо на креслення генерального плану. Вона являє собою систему кіл, кожне з яких відповідає певному цеху чи підрозділу. Площа кожного кола в заданому масштабі пропорційна повній розрахунковій потужності відповідного об'єкта. Крім загального силового навантаження, на картограмі також відображається частка освітлювальної потужності. Вона зображується у вигляді окремого сектора кола, кут якого відповідає пропорції освітлення у загальному балансі цеху (наприклад, для дробильно-сортувального комплексу використовувався масштаб навантаження $0,2 \text{ кВт/мм}^2$).

Щоб знайти ідеальне місце для підстанції, необхідно визначити теоретичний центр електричних навантажень (ЦЕН) підприємства. Для цього застосовується аналітичний метод, заснований на законах теоретичної механіки. Суть методу полягає в тому, що електричні навантаження цехів умовно прирівнюються до фізичних мас, які рівномірно розподілені по їхній площі. Визначаючи «центр тяжіння» цієї умовної системи, ми знаходимо оптимальні координати для джерела живлення.

За результатами розрахунків для даного об'єкту, теоретичний центр навантажень знаходиться в точці з координатами $X = 10,66 \text{ см}$ та $Y = 8,317 \text{ см}$ на плані. Однак, ідеальне теоретичне розміщення не завжди можливе на практиці через особливості забудови. Тому, враховуючи конструктивні обмеження генерального плану та необхідність оптимізації перетоків потужності, фактичне місце розташування ГЗП було зміщено до координат $X = 14 \text{ см}$, $Y = 8 \text{ см}$. Повні дані з розрахунками радіусів кіл та секторів освітлення для всіх інших підрозділів кар'єру систематизовані та зведені у таблицю 3.1. .

						Арх.
						20
Змн.	Арх.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 3.1. Розрахунок радіусу кіл та секторів освітлення, визначення центру електричних навантажень

№ по плану	Найменування підрозділу	$P^{0,4}_{\text{сил}}$, кВт	$P_{\text{осв}}$, кВт	P_p , кВт	m	R, мм	a	x, м	y, м	$P \cdot x$, кВт·м	$P \cdot y$, кВт·м
1	Дільниця гірничо-видобувних робіт	1689,00	276,64	1965,64	0,2	55,93	50,67	195,00	210,00	383299,52	412784,10
2	Каменерізний комплекс	1405,74	138,04	1543,78	0,2	49,57	32,19	240,00	330,00	370506,65	509446,64
3	Дробильно-сортувальний комплекс	1911,59	137,09	2048,67	0,2	57,10	24,09	405,00	330,00	829713,10	676062,53
4	Вузол гідравлічних систем	405,24	17,88	423,12	0,2	25,95	15,21	510,00	300,00	215789,38	126934,93
5	Сервісно-відновлювальний комплекс	894,97	89,38	984,35	0,2	39,58	32,69	465,00	150,00	457722,69	147652,48
6	Блок теплозабезпечення	524,34	14,28	538,62	0,2	29,28	9,54	102,00	150,00	54939,26	80793,03
7	Відділення харчування персоналу	317,54	51,00	368,55	0,2	24,22	49,82	186,00	120,00	68549,51	44225,49
8	Адміністративно-побутовий корпус	271,12	74,59	345,71	0,2	23,46	77,67	300,00	150,00	103714,34	51857,17
9	Компресорна	0,00	13,99	13,99	0,2	4,72	360,00	120,00	300,00	1679,33	4198,32
	Всього по кар'єру	7419,54	812,89	8232,43						2485913,78	2053954,69
	Високовольтне навантаження										
	Компресорна (10 кВ)	5000,00		5000,00	0,2	89,21					
	АД зони відкритих робіт	945,00		945,00	0,2	38,78					

$X_0=$
301,97
10,66
см

$Y_0=$
249,50
8,317
см

4. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ НАПРУГИ ТА СХЕМИ ЗОВНІШНЬОГО ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ГРАНІТНОГО КАР'ЄРУ

Рациональна побудова системи зовнішнього електропостачання промислового підприємства багато в чому визначається правильним вибором класу напруги та конфігурації схеми живлення. Оскільки гранітний кар'єр є енергоємним об'єктом із розрахунковою потужністю понад 12 МВА, джерелом його електропостачання визначено системну підстанцію напругою 150/35/10 кВ.

Відстань від системної підстанції до території гранкар'єру становить 6,5 км. Враховуючи цю віддаленість та величину навантаження, для техніко-економічного порівняння були намічені два альтернативні варіанти зовнішнього електропостачання: напругою 35 кВ та 10 кВ (рис.4.1). Кінцеве проектне рішення приймається на основі аналізу капітальних і експлуатаційних витрат.

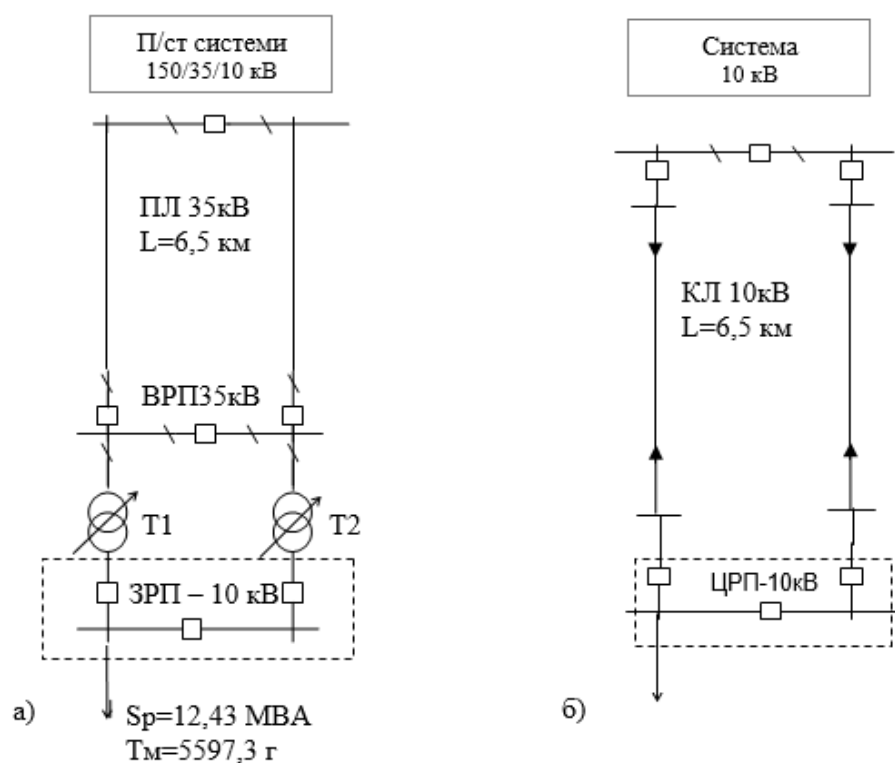


Рис.4.1. Схеми зовнішнього електропостачання гранітного кар'єру

						Арх.
Змн.	Арх.	№ докум.	Підпис	Дата		22

Варіант I (напруга 35 кВ): електропостачання здійснюється дволанцюговою повітряною лінією (ПЛ) напругою 35 кВ. Безпосередньо на території підприємства передбачається спорудження головної знижувальної підстанції (ГЗП) 35/10 кВ.

Розрахунковий струм в лінії, А:

$$I_{\max} = \frac{S_p}{\sqrt{3} \cdot n \cdot U_{\text{ном}}} = \frac{12144}{\sqrt{3} \cdot 2 \cdot 35} = 100,16$$

Розрахункове струмове навантаження лінії, А:

$$I_p = \alpha_i \alpha_T I_5 = 1,05 \cdot 1 \cdot 100,16 = 105,17$$

Лінія монтується проводом марки АС 120/19 на залізобетонних опорах.

Паспортні дані проводу АС 120/19:

$$I_{\text{доп}} = 380 \text{ А}$$

$$\Delta P_{1\text{км}} = 140 \text{ кВт/км}$$

$$K = 316,725 \text{ тис.грн.}$$

Перевірка проводів за умовою перегріву в аварійному режимі:

$$I_{\text{ав}} = 2I_p = 2 \cdot 105,17 = 210,34 < I_{\text{доп}} = 380 \text{ А}$$

Провід АС 120/19 буде задовольняти умовам перевірки.

Коефіцієнт навантаження лінії в нормальному режимі:

$$K_3 = \frac{I_p}{I_{\text{доп}}} = \frac{105,2}{380} = 0,28$$

Розрахункова потужність трансформатора, МВА:

$$S_{p.T.} = \frac{S_{\max} \cdot K_{1.2}}{1,4(n-1)} = \frac{12,14398 \cdot 0,8}{1,4 \cdot (2-1)} = 6,9$$

Для забезпечення необхідного резервування потужності (враховуючи, що частка споживачів I та II категорії становить 80%), на підстанції встановлюються два силові трансформатори типу ТДНС-10000/35/10.

						Арх.
						23
Змн.	Арх.	№ докум.	Підпис	Дата		

Коефіцієнт завантаження трансформаторів:

$$K_3 = \frac{S_{\max}}{n \cdot S_{\text{ном}}} = \frac{12,14}{2 \cdot 10} = 0,61$$

Технічні дані трансформатора:

$$S_{\text{ном}} = 10000 \text{ кВА} \quad \Delta P_{\text{х.х.}} = 12,5 \text{ кВт}$$

$$U_{\text{вн}} = 35 \text{ кВ} \quad \Delta P_{\text{к.з.}} = 60 \text{ кВт}$$

$$U_{\text{нн}} = 11 \text{ кВ} \quad U_{\text{к, \%}} = 8 \%$$

Розрахунок втрат електроенергії.

Втрати: - потужності в лінії

$$\Delta P_{\text{л}} = \Delta P_{1\text{км}} l_{\Sigma} K_3^2 = 140 \cdot 13 \cdot 0,0784 = 142,69 \text{ кВт}$$

- електричної енергії в лінії

$$\Delta W_{\text{л}} = \Delta P_{\text{л}} \tau = 142,69 \cdot 4095,18 = 584341,23 \text{ кВт·год.}$$

Втрати електроенергії в трансформаторах:

$$\begin{aligned} \Delta W &= n(\Delta P_{\text{х}} t + \Delta P_{\text{к}} K_3^2 \tau) = 2(12,5 \cdot 8760 + 60 \cdot 0,37 \cdot 4095,18) = \\ &= 400182,54 \text{ кВт·год.} \end{aligned}$$

Сумарні втрати електроенергії:

$$\Delta W_{\Sigma} = \Delta W_{\text{л}} + \Delta W_{\text{т}} = 584341,23 + 400182,54 = 984523,77 \text{ кВт·год.}$$

Вартість втрат електроенергії:

$$C_{\text{втр}} = \Delta W_{\Sigma} C_0 = 984523,77 \cdot 8,65 \cdot 0,001 = 8516,13 \text{ тис.грн.}$$

В таблицю 4.1 вносимо розрахунок капітальних вкладень.

Таблиця 4.1. Капітальні вкладення по варіанту І.

№ вар.	Назва елемента схеми	Оди- ниця	Кількість	Вартість	Всього
1	ЛЕП 35 кВ на з/б опорах	км	6,5	316,725	2058,713
	ВРП 35 кВ	шт.	1	340	340
	2 х ТМН-10000/35	шт.	2	3000	6000
Всього					8398,713

Розраховуємо поточні витрати (таблиця 4.2).

						Арх.
						24
Змн.	Арх.	№ док.м.	Підпис	Дата		

Таблиця 4.2. Поточні витрати по варіанту I.

№ вар	Назва елемента схеми	K _j , тис.грн.	P _{aj} , %	C _{aj} , тис.грн.	P _{эj} , %	C _{aj} , тис.грн.	C _j , тис.грн.
1	ЛЕП 35 кВ на з/б опорах	2058,71	5	102,936	5	102,936	205,871
	ВРП 35 кВ	340	15	51	5	17	68
	2 x ТМН-10000/35	6000	15	900	5	300	1200
Всього							1473,87

Очікуваний збиток від аварійного недоотпуску електроенергії, тис.грн.:

$$U = U_0 P_{cp} T_a = 420 \cdot 7,67 \cdot 0,03883 = 125,09$$

Зведені витрати по варіанту I, тис.грн./рік:

$$Z_i = E_n K_i + C_i + C_{emp.i} + U_i = 0,12 \cdot 8398,7125 + 1473,87125 + 8516,13 + 125,09 = 11122,9$$

Варіант II (напруга 10 кВ): електропостачання заводу здійснюється кабельними лініями (КЛ) напругою 10 кВ, які прокладаються у земляній траншеї на всю довжину траси у 6,5 км. Замість ГЗП, на території заводу споруджується центральний розподільний пункт (ЦРП) напругою 10 кВ.

Вибір перерізу кабельної лінії. Розрахунковий струм, А:

$$I_{max} = \frac{S_P}{\sqrt{3} \cdot U_{ном}} = \frac{12144}{\sqrt{3} \cdot 10} = 701,13$$

Площа перерізу КЛ визначається за економічною щільністю струму, при $T_m = 5597,3$ год $j_{ек} = 1,2$ А/мм², мм²

$$F_{ек} = \frac{I_P}{j_{ек}} = \frac{701,13}{1,2} = 584,28$$

Приймаємо до встановлення 4хАСБУ (3х240)

Паспортні дані КЛ АСБ (3 х 240):

$$I_{доп} = 355 \text{ А}$$

$$\Delta P_{1км} = 58 \text{ кВт/км}$$

$$K = 429 \text{ тис.грн.}$$

Перевірка вибраної КЛ за умовою нагріву в нормальному режимі:

$$I_P = 175,28 \text{ А} \leq K_n I_{доп} = 0,84 \cdot 355 = 298,2 \text{ А}$$

						Арх.
Змн.	Арх.	№ доум.	Підпис	Дата		25

Перевірка вибраної КЛ за умовою нагріву в аварійному режимі:

$$I_{p.ав} = 2I_p = 2 \cdot 175,28 = 350,56 \text{ А} \leq K_{ан} K_n' I_{дон} = 1,25 \cdot 1 \cdot 355 = 443,75 \text{ А}$$

Кабельна лінія марки АСБУ (3х240) задовольняє умовам перевірки.

Коефіцієнт завантаження лінії в нормальному режимі:

$$K_3 = \frac{I_p}{I_{дон}} = \frac{175,3}{355} = 0,49$$

Розрахунок втрат: - втрати потужності:

$$\Delta P_{кл} = \Delta P_{1км} l_{\Sigma} K_3^2 = 58 \cdot 26 \cdot 0,2401 = 362,07 \text{ кВт}$$

- втрати електричної енергії:

$$\Delta W_{л} = \Delta P_{л} \tau = 181,04 \cdot 4095,18 = 741391,39 \text{ кВт} \cdot \text{год.}$$

Вартість втрат електроенергії:

$$C_{стр} = \Delta W_{\Sigma} C_0 = 741391,39 \cdot 10,23 \cdot 0,001 = 7584,43 \text{ тис.грн.}$$

По варіанту II розраховуємо капітальні вкладення і зводимо в таблицю 4.3.

Таблиця 4.3. Капітальні вкладення по варіанту II.

№ вар.	Назва елемента схеми	Оди- ниця	Кількість	Вартість	Всього
2	КЛ 10 кВ	км	26	429	11154
	Траншея	км.	6,5	180,16	1171,04
	Шафи КРП серії КУ-10	шт.	2	197	394
Всього					12719,04

По варіанту II розраховуємо поточні витрати, які приводимо в таблицю 4.4.

Таблиця 4.4. Поточні витрати по варіанту II.

№ вар	Назва елемента схеми	K _j , тис.грн.	P _{aj} , %	C _{aj} , тис.грн.	P _{эj} , %	C _{aj} , тис.грн.	C _j , тис.грн.
2	КЛ 10 кВ	11154	5	557,7	5	557,7	1115,4
	Траншея	1171,04	5	58,552	5	58,552	117,104
	Шафи КРП серії КУ-10	394	15	59,1	5	19,7	78,8
Всього							1311,3

Очікуваний збиток від аварійного недоотпуску електроенергії, тис.грн.:

$$U = U_0 P_{cp} T_a = 420 \cdot 7,67 \cdot 0,06055 = 195,06$$

						Арх.
						26
Змн.	Арх.	№ доум.	Підпис	Дата		

Зведені витрати по варіанту II, тис.грн./рік:

$$Z_i = E_n K_i + C_i + C_{\text{смп.і}} + Y_i = 0.12 \cdot 12719,04 + 1311,304 + 7584,43 + 195,06 = 10617,0788$$

Приводимо в таблиці 4.5 основні техніко-економічні показники двох варіантів, які порівнювалися.

Таблиця 4.5. Техніко-економічні показники варіантів

№ пп	Назва	Одиниця виміру	Варіанти	
			I (35кВ)	II (10 кВ)
1	Капітальні вкладення	т.грн.	8398,71	12719,04
2	Амортизаційні відрахування	т.грн.	1473,87	1311,304
3	Вартість втрат електроенергії	т.грн.	8516,13	7584,43
4	Збиток		125,09	195,06
5	Приведенні витрати	т.грн.	11122,93	10617,07

Як показав аналіз результатів розрахунків, кращим і технічно грамотнішим варіантом електропостачання гранітного кар'єру є варіант I на номінальну напругу 35 кВ. Цей вибір обґрунтовується наступними інженерними факторами:

1) пропускна здатність та втрати: передача потужності понад 12 МВА на відстань 6,5 км на рівні напруги 10 кВ зумовила б появу величезних робочих струмів (понад 700 А). Це призвело б до значних втрат активної потужності та глибокого падіння напруги в кінці лінії, що критично для двигунів кар'єру. Перехід на 35 кВ пропорційно знижує струми в мережі;

2) вартість будівництва: спорудження 6,5 км дволанцюгової повітряної лінії 35 кВ на залізобетонних опорах обходиться дешевше, ніж прокладання потужних багатожильних кабелів 10 кВ у траншеї (що вимагає масштабних земляних робіт, захисту траси та спеціальних кабельних муфт на такій довжині);

3) перспективи розвитку: варіант 35 кВ має величезний резерв пропускної здатності (лінія завантажена лише на 28%), це робить дану схему оптимальною для подальшого розширення та розвитку підприємства без необхідності реконструкції живильних ліній у майбутньому.

5. РЕЖИМИ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ ТА ЇЇ КОМПЕНСАЦІЯ В СИСТЕМІ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ

Специфіка роботи гранітного кар'єру полягає у використанні великої кількості асинхронних двигунів, зварювальних трансформаторів та електромагнітних механізмів, які часто працюють у режимах недовантаження (наприклад, конвеєри або дробарки на холостому ході). Через це значна частина промислових електроприймачів у процесі роботи споживає з мережі, окрім активної, ще й велику кількість реактивної потужності.

Транспортування цієї реактивної енергії від джерела живлення через усі лінії та трансформатори до споживача є вкрай неефективним. Воно призводить до ряду негативних наслідків:

- суттєвого збільшення втрат активної потужності в елементах мережі за рахунок нагріву провідників реактивними струмами;
- штучного зниження пропускної здатності ліній та трансформаторів;
- значного відхилення та зниження рівнів напруги на затискачах віддалених споживачів.

Саме тому необхідне встановлення пристроїв локальної компенсації реактивної потужності (КРП) безпосередньо на території підприємства.

5.1. Розрахунок балансу реактивної потужності та аналіз варіантів компенсації

Для правильного вибору компенсувальних пристроїв складається загальний баланс активної та реактивної потужності кар'єру. При цьому враховуються сумарні низьковольтні навантаження (0,4 кВ), високовольтні навантаження та втрати потужності в цехових трансформаторах.

$$P_n = \sum P_{ТП} = 7761,13 \text{ кВт} \quad Q_n = \sum Q_{ТП} = 5550,62 \text{ кВАр}$$

$$\Delta P_m = \sum \Delta P_{ТП} = 86,99 \text{ кВт} \quad \Delta Q_m = \sum \Delta Q_{ТП} = 476,94 \text{ кВАр}$$

						Арх.
Змн.	Арх.	№ докум.	Підпис	Дата		28

$$P_{\varepsilon} = \sum P_{BH} = 661,5 \text{ кВт} \quad Q_{\varepsilon} = \sum Q_{BH} = 410 \text{ кВАр}$$

Значною перевагою даного підприємства є наявність у схемі потужних високовольтних синхронних двигунів (СД 4х1250 кВт), які здатні працювати в режимі перезбудження. Завдяки цьому вони генерують реактивну потужність безпосередньо в мережу 10 кВ кар'єру, виконуючи роль природних компенсаторів.

$$Q_{ном} = P_{ном} \cdot \operatorname{tg} \varphi_{СД} = 1250 \cdot 0,484 = 605 \text{ кВАр}$$

$$P_{СД} = N_{СД} P_{ном} K_{вик} = 4 \cdot 1250 \cdot 0,7 = 3500 \text{ кВт}$$

$$Q_{сд} = P_{СД} \operatorname{tg} \varphi_n = 3500 \cdot 0,484 = 1694 \text{ кВА}$$

Максимальна реактивна потужність, що генерується СД:

$$Q_{\max сд} = \frac{\alpha_M P_{ном} \operatorname{tg} \varphi_n}{\eta} = \frac{1,27 \cdot 5000 \cdot 0,484}{0,96} = 3201,46 \text{ кВАр}$$

Сумарне споживання потужностей P_p активної та Q_p реактивної:

$$P_p = P_n + \Delta P_m + P_{\varepsilon} + P_{сд} = 7761,13 + 86,99 + 661,5 + 3500 = 12009,62 \text{ кВт}$$

$$Q_p = Q_n + \Delta Q_m + Q_{\varepsilon} = 5550,62 + 476,94 + 410 = 6437,56 \text{ кВАр}$$

Споживання від системи:

$$Q_e = P_p \cdot \operatorname{tg} \varphi_c = 12009,62 \cdot 0,15 = 1801,44 \text{ кВАр}$$

Потужність пристроїв компенсації:

$$Q_{КП} = Q_p - Q_e - Q_{СД} = 6437,56 - 1801,44 - 1694 = 2942,12 \text{ кВАр}$$

Вибір потужності додаткових конденсаторних установок тісно пов'язаний з кількістю та завантаженням цехових трансформаторів. Чим більше трансформаторів, тим більше реактивної потужності вони можуть пропустити з мережі 10 кВ у мережу 0,4 кВ. За допомогою спеціалізованого програмного забезпечення (на базі *Microsoft Excel*) було проведено багатоваріантний розрахунок компенсації для різної кількості трансформаторів (N). Результати техніко-економічного порівняння наведено у таблиці 5.1.

						Арх.
						29
Змн.	Арх.	№ докум.	Підпис	Дата		

Мінімальна кількість трансформаторів:

$$N_0 = \frac{P_n}{\beta \cdot S_{ном}} = \frac{7761,13}{0,7 \cdot 1000} = 11,09 \approx 12 \text{ шт.}$$

Варіант №1. $N = N_0 = 12 \text{ шт.}$

$$Q_1 = \sqrt{(N \cdot \beta \cdot S_{ном})^2 - (P_n + \Delta P_m)^2} = \sqrt{(12 \cdot 0,7 \cdot 1000)^2 - 7848,12^2} = 2994,5 \text{ кВАр}$$

$$Q_{KH} = (Q_n + \Delta Q_m) - Q_1 = 5550,62 + 476,94 - 2994,5 = 3033,06 \text{ кВАр}$$

Потужність КП, що встановлюється в мережі 10 кВ Q_{KB} :

$$Q_{KB} = Q_{KP} - Q_{KH} = 2942,12 - 3033,06 = -90,94 \text{ кВАр} < 0$$

Таблиця 5.1. Розподіл потужності компенсувальних пристроїв (КП) за варіантами

№ варіанту	Кількість трансфор- маторів	Q_1 , квар	Q_{KH} , квар	Q_{KB} , квар
1	N = 12	2994,5	3033,06	0
2	N = 13	4606,19	1421,37	13,29
3	N = 14	5869,16	0	1434,66

Як видно з таблиці, для базового варіанта (12 трансформаторів) генерації від синхронних двигунів на стороні 10 кВ повністю достатньо. Встановлення додаткових високовольтних батарей не потрібне, уся необхідна компенсація здійснюється на низькій напрузі.

5.2. Вибір параметрів та місць розташування конденсаторних установок

Потужність низьковольтних конденсаторних батарей визначається як різниця між загальним реактивним навантаженням вузла та тією часткою реактивної потужності, яку економічно доцільно передати через понижувальний трансформатор (Q_1).

Розглянемо приклад вибору компенсувального пристрою для підстанції ТП 1-2. Вихідні дані вузла: розрахункова активна потужність на стороні нижчої напруги $P_{нн} = 1965,64 \text{ кВт}$; розрахункова реактивна потужність $Q_{нн} = 1369,41$

						Арх.
						30
Змн.	Арх.	№ докум.	Підпис	Дата		

квар. Підстанція комплектується трьома трансформаторами номінальною потужністю $S_{ном} = 1000$ кВА із коефіцієнтом завантаження $K_3 = 0,7$.

Оптимальна величина реактивної потужності, що передається через трансформатори з мережі 10 кВ, розрахована на рівні $Q_1 = 739,09$ квар. Дефіцит реактивної потужності, який необхідно скомпенсувати локально на шинах 0,4 кВ, становить:

$$Q_{кп} = Q_{нн} - Q_1 = 1369,41 - 739,09 = 630,32 \text{ квар}$$

Для покриття цього дефіциту до встановлення на підстанції ТП 1-2 приймаються сучасні автоматизовані конденсаторні установки типу КРМ-0,4-200 у кількості 3 штук (сумарна встановлена потужність батарей — 600 квар). Незначна залишкова реактивна потужність (близько 30 квар) передаватиметься через трансформатори, що не порушує загального балансу та є економічно прийнятним.

Розрахункові витрати по варіант 1. N = 12 шт.

$$\Delta P_{кн} = P_{пит}^{кн} \cdot Q_{кн} = 0,0045 \cdot 3000 = 13,5 \text{ кВт}$$

$$\Delta P_{кв} = P_{пит}^{кв} \cdot Q_{кв} = 0,003 \cdot 0 = 0 \text{ кВт}$$

$$\Delta P_{тп} = \frac{P_{нн}^2 + Q_1^2}{U_H^2} R_T \cdot 10^{-3} = \frac{7761,13^2 + 2994,5^2}{10^2} \cdot 0,09 \cdot 0,001 = 62,28 \text{ кВт}$$

де

$$R_{екв} = \frac{\Delta P_K \cdot U_{ном}^2}{N \cdot S_{ном}^2} \cdot 10^3 = \frac{11 \cdot 10^2}{12 \cdot 1000^2} \cdot 1000 = 0,09 \text{ Ом}$$

$$\Delta P_{сд} = Q_{сд} \left(\frac{D_1}{Q_{ном}} + \frac{2D_2 Q_{сд}}{Q_{ном}^2 N_{сд}} \right) + Q_{сд}^2 \frac{D_2}{Q_{ном}^2 N_{сд}} =$$

$$= 1,69 \cdot \left(\frac{2,07}{0,61} + \frac{2 \cdot 3,44 \cdot 1,69}{0,61^2 \cdot 4} \right) + 1,69^2 \cdot \frac{3,44}{0,61^2 \cdot 4} = 20,74 \text{ кВт}$$

						Арх.
						31
Змн.	Арх.	№ докум.	Підпис	Дата		

0,4 кВ - вартість КП:

$$K_{KH} = \sum_{i=1}^n N_{KH i} \cdot K_{KH i} =$$

$$= 3 \cdot 92 + 3 \cdot 112 + 6 \cdot 125 = 1362 \text{ тис.грн.}$$

Вартість КТП:

$$K_{KTP} = N_{KTP(2)} \cdot K_{KTP(2)} + N_{KTP(1)} \cdot K_{KTP(1)} =$$

$$= 5 \cdot 680 + 2 \cdot 490 = 4380 \text{ тис.грн.}$$

Розрахункові витрати на компенсацію:

$$З = E_H (K_{KH} + K_{KB} + K_{KTP}) + C_0 \tau (\Delta P_{KH} + \Delta P_{KB} + \Delta P_{ТП} + \Delta P_{СД}) =$$

$$= 0,12 \cdot (1362 + 0 + 4380) + 8,65 \cdot 4095,17 \cdot (13,5 + 0 + 62,28 + 20,74) \cdot 10^{-3} =$$

$$= 4108,09 \text{ тис.грн.}$$

Аналогічний алгоритм застосовано для всіх інших підстанцій 0,4 кВ гранітного кар'єру (таблиця 5.2. та додаток Б). Таким чином, встановлення розрахованих комплектних конденсаторних установок гарантує дотримання балансу реактивної потужності, розвантажує живильні лінії та підвищує загальну енергоефективність системи електропостачання кар'єру.

Таблиця 5.2. Розрахункові витрати на компенсацію РП по варіантам

№ вар.	Q _{кн} , кВАр	ΔP _{кн} , кВт	Q _{кв} , кВАр	ΔP _{кв} , кВт	N _{тр} , шт.	R _{екв} , Ом	S _{пр} , кВА	ΔP _{тп} , кВт	K _{кн} , тис. грн.	K _{кв} , тис. грн.	K _{кtp} , тис. грн.	З, тис. грн.
1	3000	13,5	0	0	12	0,09	8318,78	62,28	1362	0	4380	4108
2	2350	10,6	0	0	13	0,08	9025,08	65,16	1070	0	4570	4094
3	1650	7,43	0	0	14	0,08	9730,48	75,75	750	0	4760	4342

6. ВИБІР КІЛЬКОСТІ ТА ПОТУЖНОСТІ СИЛОВИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ ГРАНІТНОГО КАР'ЄРУ

Надійність електропостачання є ключовим критерієм для промислових підприємств. Оскільки у складі навантаження гранітного кар'єру частка споживачів I та II категорій надійності становить 80% , на головній знижувальній підстанції (ГЗП) передбачається встановлення двох силових трансформаторів однакової потужності.

Вибір номінальної потужності цих апаратів базується на розрахунковому максимальному навантаженні підприємства, яке складає $S_{max} = 12148,19$ кВА. Відповідно до чинних норм (ДЕСТ), масляні трансформатори допускають аварійне перевантаження на 40% (в 1,4 рази) протягом не більше 5 діб за умови, що коефіцієнт їхнього початкового завантаження не перевищував 0,93, а тривалість максимального перевантаження становить не більше 6 годин на добу.

$$S_{TP_P} = \frac{S_{MAX} \cdot K_{I,II}}{1,4} = \frac{12148,19 \cdot 0,8}{1,4} = 6941,822 \text{ кВА}$$

Виходячи з цих умов, для ГЗП обрано два трансформатори типу ТДНС-10000/35 з номінальною потужністю 10000 кВА кожен. Їхні паспортні технічні характеристики: напруга ВН — 37 кВ, напруга НН — 10,5 кВ, втрати короткого замикання — 60 кВт, напруга короткого замикання — 8%, втрати холостого ходу — 12,5 кВт, струм холостого ходу — 0,6%.

У нормальному режимі роботи обидва трансформатори будуть працювати паралельно та рівномірно з оптимальним коефіцієнтом завантаження

$$K_3 = \frac{S_{MAX}}{n \cdot S_{H.T}} = \frac{12148,19}{2 \cdot 10000} = 0,607$$

У разі аварійного відключення одного з них, усе навантаження кар'єру ляже на трансформатор, що залишився. Його коефіцієнт завантаження в такому аварійному режимі становитиме $K_{3_AB} = \frac{S_{MAX}}{S_{H.T}} = \frac{12148,19}{10000} = 1,214$. Оскільки це значення є меншим за максимально допустиме аварійне перевантаження (1,4),

						Арх.
Змн.	Арх.	№ док.	Підпис	Дата		33

підприємство зможе продовжувати повноцінну роботу без примусового відключення від живлення навіть споживачів III категорії.

Проектування та оптимізація мережі цехових трансформаторних підстанцій є складною техніко-економічною задачею. Кількість і потужність цехових трансформаторів визначаються не лише сумарною величиною навантаження, а й категорійністю споживачів за надійністю електропостачання, густиною навантаження та характером технологічного процесу.

У сучасній інженерній практиці вибір кількості трансформаторів на одній ТП підпорядковується наступним теоретичним принципам:

- однотрансформаторні підстанції застосовуються для живлення споживачів переважно III категорії надійності, а також для споживачів II категорії, якщо є можливість організації аварійного резервування по зв'язках низької напруги (0,4 кВ) від сусідніх ТП або за наявності складського резерву трансформаторів;
- дво- та багатотрансформаторні підстанції є обов'язковими за наявності великої частки споживачів I та II категорій. Вони забезпечують безперервність технологічного процесу у разі виходу з ладу одного з агрегатів або під час планового технічного обслуговування.

Вибір одиничної потужності трансформаторів цехових ТП базується на пошуку економічного компромісу. Зі збільшенням потужності одного трансформатора знижується питома вартість одного кіловольт-ампера (кВА) встановленої потужності підстанції та спрощується схема високовольтного розподілу (10 кВ). Проте, надмірне укрупнення трансформаторів призводить до:

- подовження низьковольтних мереж (0,4 кВ) і, як наслідок, до різкого зростання втрат потужності та падіння напруги в кабелях;
- значного збільшення струмів короткого замикання на шинах 0,4 кВ, що вимагає встановлення значно дорожчої, масивної та складної комутаційної апаратури (автоматичних вимикачів із високою вимикальною здатністю).

Для промислових підприємств із середньою та високою густиною навантаження теоретично оптимальними є трансформатори потужністю 630, 1000 або 1600 кВА.

						Арх.
						34
Змн.	Арх.	№ докум.	Підпис	Дата		

Важливим просторовим критерієм є принцип наближення до центру електричних навантажень (ЦЕН). Цехові ТП повинні розміщуватися якомога ближче до теоретичного центру тяжіння епюри навантажень споживачів. Це мінімізує довжину вторинних розподільчих мереж, дозволяє знизити витрати кольорового металу на кабелі та гарантує стабільний рівень напруги на затискачах найвіддаленіших електроприймачів під час їх пуску та роботи під навантаженням.

Окрім електричних параметрів, на вибір конструктивного виконання ТП суттєво впливають фактори навколишнього середовища. Специфіка відкритої розробки гранітних родовищ пов'язана з екстремальними умовами експлуатації: високою концентрацією абразивного дрібнодисперсного пилу, вібраціями від буровибухових робіт та впливом атмосферних опадів. Гранітний пил, осідаючи на відкритих струмопровідних частинах та ізоляторах, погіршує тепловіддачу обладнання і може спровокувати перекриття ізоляції. Тому в умовах кар'єрів використання відкритих підстанцій є неприпустимим. Теоретично обґрунтованим є застосування комплектних трансформаторних підстанцій (КТП) закритого або внутрішнього виконання з високим ступенем захисту оболонки (IP).

З урахуванням вищезазначеного, для живлення виробничих підрозділів гранітного кар'єру прийнято рішення про розгортання мережі закритих комплектних трансформаторних підстанцій (КТП) напругою 10/0,4 кВ. З метою захисту від пилу та вологи, всі трансформатори цехових ТП приймаються герметичного масляного виконання із захисною азотною подушкою (серія ТМЗ), що виключає контакт масла з навколишнім повітрям і подовжує термін його служби. При розрахунках прийнято умову, що навантаження між фазами та окремими трансформаторами розподіляється рівномірно.

Розглянемо практичний розрахунок параметрів обладнання на прикладі підстанції ТП №1,2, яка забезпечує живлення найвідповідальнішого підрозділу — дільниці гірничо-видобувних робіт. Розрахункове навантаження цього вузла становить $S_p = 2110,86$ кВА. Через високу концентрацію споживачів I та II

						Арх.
Змн.	Арх.	№ докум.	Підпис	Дата		35

категорій надійності, схема підстанції проектується багатотрансформаторною — до встановлення приймається $n = 3$ трансформатори.

Згідно з методикою розрахунку, потужність одного трансформатора вибирається з такої умови, щоб у разі виходу з ладу одного агрегату ($n - 1$), решта трансформаторів змогли забезпечити живлення критичних споживачів із урахуванням допустимого аварійного перевантаження в 1,4 рази (40%):

$$S_{\text{тр.р}} = \frac{S_p}{(n - 1) \cdot 1,4} = \frac{2110,86}{(3 - 1) \cdot 1,4} = 753,87 \text{ кВА}$$

Орієнтуючись на шкалу стандартних потужностей, обираємо найближчий більший номінал — 1000 кВА. Таким чином, для ТП №1,2 остаточно приймаються три герметичні трансформатори типу ТМЗ-1000/10.

Коефіцієнт завантаження обладнання в нормальному (симетричному) режимі експлуатації становитиме:

$$K_3 = \frac{S_p}{n \cdot S_{\text{ном}}} = \frac{2110,86}{3 \cdot 1000} = 0,7$$

Таке значення коефіцієнта завантаження ($K_3 = 0,7$) є оптимальним з економічного погляду, оскільки саме в цьому діапазоні забезпечується максимальний ККД силового трансформатора та мінімізуються втрати на нагрів його обмоток.

За аналогічним теоретичним алгоритмом та методикою було виконано розрахунки кількості, потужності та режимів роботи обладнання для всіх інших цехових підстанцій гранітного кар'єру. Підсумкові інженерні результати цих обчислень занесені та систематизовані у Додатку В.

						Арх.
						36
Змн.	Арх.	№ докум.	Підпис	Дата		

7. РОЗРАХУНОК СТРУМІВ КОРОТКОГО ЗАМИКАННЯ ТА ВИБІР ВИСОКОВОЛЬТНОГО ОБЛАДНАННЯ

7.1. Розрахунок струмів короткого замикання (КЗ)

Надійне функціонування системи електропостачання гранітного кар'єру неможливе без правильного вибору захисного обладнання та провідників. Для цього необхідно знати величини струмів, які виникатимуть у мережі під час аварійних режимів, зокрема при трифазних коротких замиканнях.

Розрахунок струмів КЗ починається зі складання однолінійної розрахункової схеми (рис.7.1), на якій позначаються всі джерела живлення та елементи мережі (лінії, трансформатори) аж до точок передбачуваного замикання. Відповідно до розрахункової схеми формується еквівалентна схема заміщення (рис.7.2), де реальні фізичні параметри обладнання замінюються їхніми електричними опорами, приведеними до єдиних базисних умов.

Особливістю даного підприємства є наявність потужних високовольтних синхронних двигунів (4 шт. по 1250 кВт). У момент виникнення короткого замикання вони переходять у генераторний режим за рахунок накопиченої електромагнітної та механічної енергії, створюючи додатковий струм підживлення точки КЗ, що обов'язково враховується в розрахунках.

Вихідними даними для моделювання є потужність короткого замикання на шинах 35 кВ системної підстанції ($S''_c = 830 \text{ МВА}$). Розрахунок виконано для двох основних високовольтних вузлів головної знижувальної підстанції (ГЗП): точка K_0 (шини ВН 35 кВ) та точка $K1$ (шини НН 10 кВ).

						Арх.
						37
Змн.	Арх.	№ док.м.	Підпис	Дата		

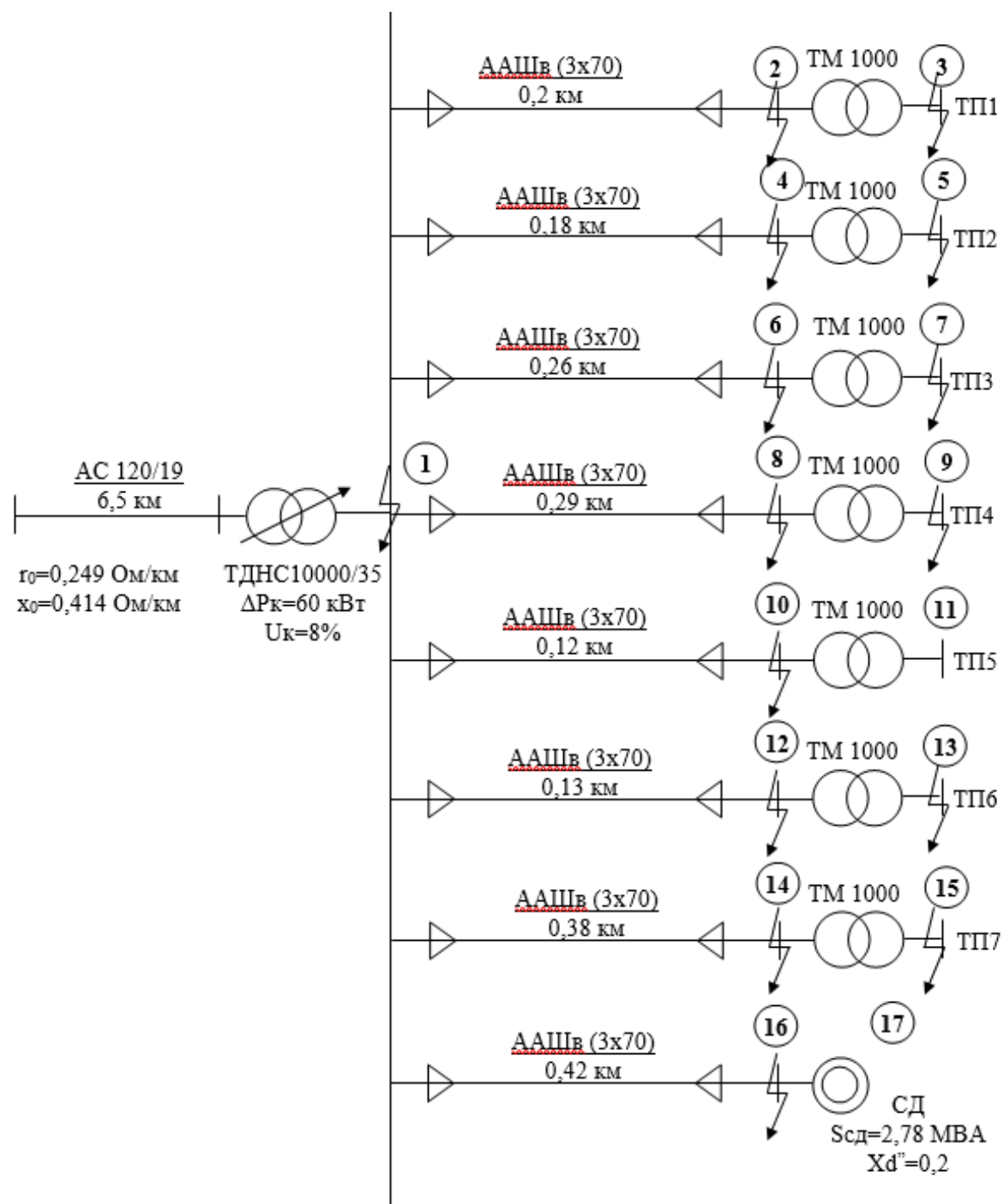


Рис.7.1. Розрахункова схема

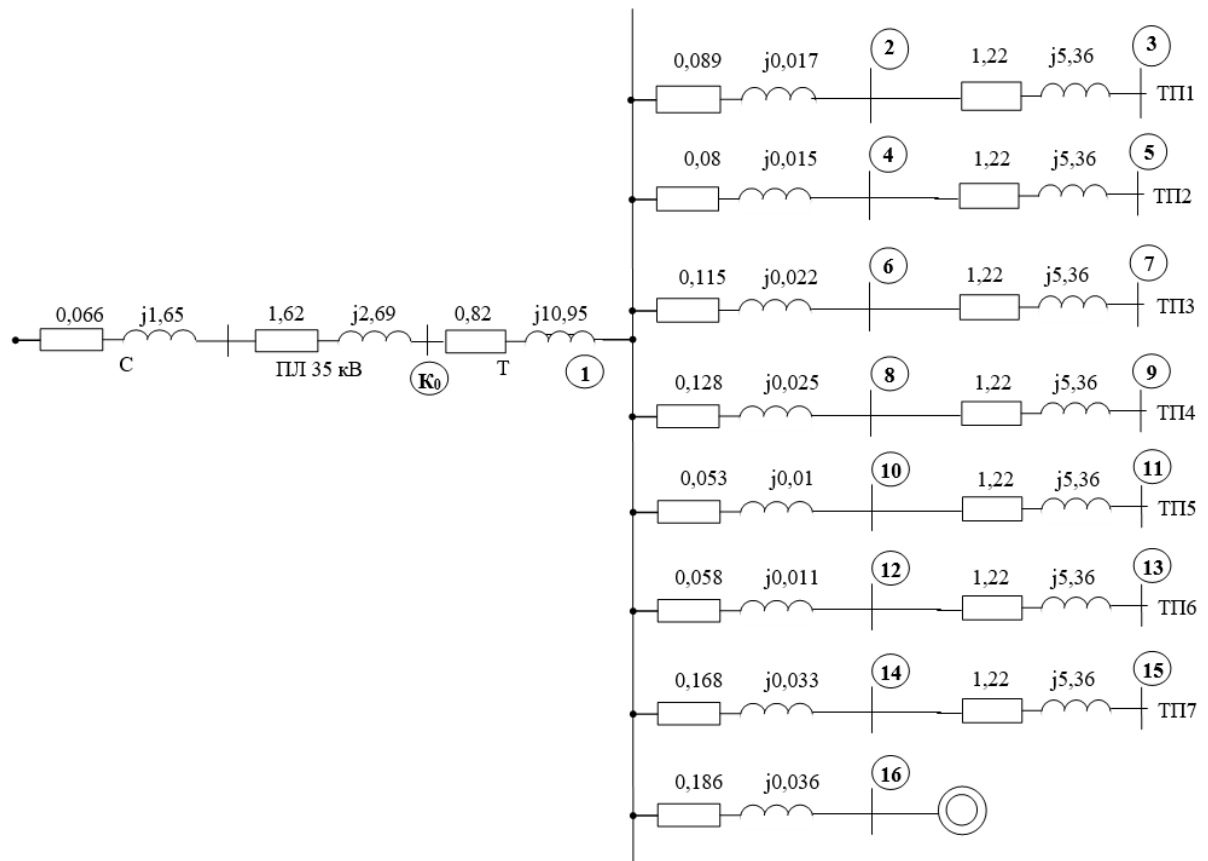


Рис.7.2. Схема заміщення

Розрахунок опорів елементів схеми.

$$X_C = \frac{U_{CP1}^2}{S_C''} = \frac{37^2}{830} = 1,65 \text{ Ом}$$

$$R_C = \frac{X_C}{25} = \frac{1,65}{25} = 0,066 \text{ Ом}$$

Лінія ЛІ 35 кВ з проводом АС120/19 ($r_0=0,249$ Ом/км, $x_0=0,414$ Ом/км)

$$R_l = 0,249 \cdot 6,5 = 1,62 \text{ Ом}$$

$$X_l = 0,414 \cdot 6,5 = 2,69 \text{ Ом}$$

п/ст, ТДНС10000/35/10, $S_{\text{ном}}=10000$ кВА ($\Delta P_k=60$ кВт, $U_k=8\%$)

						Арх.
						39
Змн.	Арх.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$R_T = \frac{60 \cdot 37^2 \cdot 10^3}{10000^2} = 0,82 \text{ Ом}$$

$$X_T = \frac{8 \cdot 37^2 \cdot 10}{10000} = 10,95 \text{ Ом}$$

точка K_0

$$R_{K0} = R_c + R_{\pi} = 0,066 + 1,62 = 1,68 \text{ Ом}$$

$$X_{K0} = X_c + X_{\pi} = 1,65 + 2,69 = 4,34 \text{ Ом}$$

$$I''_{KO} = \frac{U_{CP1}}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{R_{K0}^2 + X_{K0}^2}} = \frac{37}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{1,68^2 + 4,34^2}} = 4,587 \text{ кА}$$

$$T_a = \frac{X_{K0}}{\omega \cdot R_{K0}} = \frac{4,34}{314 \cdot 1,68} = 0,008 \text{ с}$$

$$i_y = \sqrt{2} \cdot 4,587 \cdot (1 + e^{-0,01/0,008}) = 8,406 \text{ кА}$$

точка K_1

$$R_{K1} = R_{K0} + R_T = 1,68 + 0,82 = 2,5 \text{ Ом}$$

$$X_{K1} = X_{K0} + X_T = 4,34 + 10,95 = 15,29 \text{ Ом}$$

$$I''_{K1} = \frac{U_{CP1}}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{R_{K1}^2 + X_{K1}^2}} = \frac{37}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{2,5^2 + 15,29^2}} = 1,378$$

$$I''_{K1(\partial)} = I''_{K1} \cdot \frac{35}{11} = 1,378 \cdot \frac{37}{11} = 4,636 \text{ кА}$$

$$T_a = \frac{15,29}{314 \cdot 2,5} = 0,0194 \text{ с}$$

$$i_y = \sqrt{2} \cdot 4,636 \cdot (1 + e^{-0,01/0,0194}) = 10,477 \text{ кА}$$

						Арх.
						40
Змн.	Арх.	№ докум.	Підпис	Дата		

Струм підживлення від 2хСД РН=1250 кВт ($X''_{d*}=0,2$)

$$S_H = \frac{2 \cdot 1,25}{0,9} = 2,78$$

$$X_{CD} = X_d'' \cdot \frac{U_{cp2}^2}{S_H} = 0,2 \cdot \frac{10,5^2}{2,78} = 7,93 \text{ Ом}$$

$$I_{CD}'' = \frac{U_{cp2}}{\sqrt{3} \cdot X_{CD}} = \frac{1,1 \cdot 10,5}{\sqrt{3} \cdot 7,93} = 0,841 \text{ кА}$$

КЗ К_{Σ1}

$$I_{\Sigma K1}'' = I_{K1c}'' + I_{CD}'' = 4,636 + 0,841 = 5,477 \text{ кА}$$

$$i_y = \sqrt{2} \cdot 5,477 \cdot (1 + e^{-0,01/0,0194}) = 12,37 \text{ кА}$$

7.2. Вибір високовольтних кабельних ліній 10 кВ

Кабельні лінії, що відходять від розподільного пристрою 10 кВ до цехових підстанцій (КТП), вибираються не лише за робочим струмом, але й обов'язково перевіряються на термічну стійкість до струмів КЗ.

Розглянемо цей алгоритм на прикладі кабелю до КТП-6. Розрахунковий робочий струм становить близько 90 А. За економічною густиною струму мінімально необхідний переріз складає 37,73 мм², що дозволяє обрати стандартний кабель марки ААШв (3х50). Однак, перевірка на термічну стійкість показала, що при струмі КЗ у 5,477 кА та розрахунковому часі відключення (з урахуванням дії релейного захисту та власного часу вимикача) тепловий імпульс становить

$$T_{\text{відкл}} = t_{p.з} + t_{o.в} + \Delta t = 0,1 + 0,065 + 1,2 = 1,365 \text{ с}$$

$$W_k = 5,477^2 \cdot (1,365 + 0,0194) = 41,52 \text{ кА}^2\text{с}$$

$$F_{\text{MIN}} = \frac{\sqrt{41,52 \cdot 10^3}}{94} = 68,55 \text{ мм}^2$$

						Дрк.
Змн.	Дрк.	На докум.	Підпис	Дата		41

Щоб ізоляція кабелю не розплавилася під час аварії, його мінімальний переріз за умовами термічної стійкості має бути не меншим за 70 мм². Тому кінцевим проектним рішенням є вибір кабелю з більшим перерізом: ААШв (3х70). Аналогічна перевірка виконана для всіх відхідних ліній 10 кВ кар'єру (додаток Г).

7.3. Вибір високовольтного апаратного обладнання

Вибір високовольтного обладнання здійснюється за параметрами нормального режиму (номінальна напруга, максимальний робочий струм) із подальшою перевіркою на здатність витримувати екстремальні умови КЗ (електродинамічна та термічна стійкість, комутаційна здатність відключення).

Основне обране обладнання (додаток Г):

1. Розподільний пристрій 35 кВ. На вводі встановлюються високовольтні вакуумні вимикачі типу ВР35НС-20/1600. Здатність відключення цих апаратів ($I_{\text{відкл.ном}} = 20$ кА) з величезним запасом перекидає розрахунковий струм КЗ (4,587 кА). Для забезпечення видимого розриву кола при ремонтних роботах обрано роз'єднувачі РНДЗ-35 із ручним приводом ПРН-11ОМ.

2. Розподільний пристрій 10 кВ. Для ввідних комірок та секційного вимикача обрано потужні апарати ВР1-20/1000. Для захисту ліній, що відходять до цехових підстанцій (наприклад, КТП-6), встановлюються вимикачі ВР1-20/630 із вбудованими електромагнітними приводами.

3. Вибір трансформаторів власних потреб (ВП). Система власних потреб підстанції — це критично важливий вузол, від якого залежить життєздатність усього об'єкта. Вона забезпечує живлення ланцюгів оперативного струму, релейного захисту, систем охолодження силових трансформаторів (обдув), освітлення та обігріву приміщень і шаф вимикачів. Сумарна розрахункова повна потужність електроприймачів ВП становить 33,13 кВА. Враховуючи коефіцієнт попиту ($K_c = 0,7$) та необхідність стовідсоткового резервування, на підстанції

						Арх.
Змн.	Арх.	№ док.	Підпис	Дата		42

передбачено встановлення двох трансформаторів власних потреб типу ТМ-25/10. Коефіцієнт їх завантаження в нормальному режимі складе комфортні 0,66.

4. Захист від перенапруг. Для захисту високовольтної ізоляції трансформаторів та комутаційного обладнання від атмосферних (грозових) і комутаційних перенапруг у схемі передбачено встановлення вентильних розрядників. На стороні вищої напруги (35 кВ) встановлюються розрядники типу РВС-35, а на стороні нижчої напруги (10 кВ) — РВО-10. Від прямих ударів блискавки територію підстанції захищають стрижневі блискавковідводи.

5. Вибір вимірювальних трансформаторів струму (ТС). Трансформатори струму призначені для зменшення первинного струму до значень, безпечних та зручних для підключення вимірювальних приладів і реле захисту. Їх вибір здійснюється за номінальною напругою ($U_{уст} \leq U_{ном}$) та робочим струмом ($I_{роб.макс} \leq I_{ном}$), після чого апарати обов'язково перевіряються на електродинамічну та термічну стійкість до струмів короткого замикання.

Для комерційного обліку електроенергії на сучасному підприємстві вторинні обмотки ТС повинні мати клас точності не гірше 0,5S.

- на стороні 35 кВ: розрахунковий максимальний струм становить близько 200 А. Для встановлення у відкритому розподільчому пристрої (ВРП) обираємо опорні трансформатори струму типу ТФЗМ-35АУ1;

- на стороні 10 кВ: максимальний струм секції становить близько 700 А. Для встановлення в комірках комплектного розподільчого пристрою 10 кВ приймаємо трансформатори струму типу ТЛК-10. Їхні показники термічної та динамічної стійкості повністю задовольняють розрахунковим параметрам КЗ на шинах 10 кВ.

5. Вибір вимірювальних трансформаторів напруги (ТН). Трансформатори напруги знижують високу напругу мережі до стандартних 100 В, необхідних для живлення лічильників, вольтметрів та ланцюгів захисту. Основною умовою їх вибору є відповідність номінальній напрузі мережі та забезпечення необхідного класу точності при заданому навантаженні вторинних кіл.

						Арх.
Змн.	Арх.	№ док.м.	Підпис	Дата		43

На шинах 35 кВ передбачається встановлення трифазної групи антирезонансних трансформаторів напруги типу НАМІ-35. На секціях шин 10 кВ встановлюються вимірювальні трансформатори НАМІ-10. Цей тип обладнання стійкий до ферорезонансних явищ та однофазних замикань на землю, що є характерним для мереж із ізольованою нейтраллю. Для кіл комерційного обліку використовується обмотка з класом точності 0,5.

6. Вибір засобів комерційного обліку електроенергії.

Правильна організація комерційного обліку є запорукою економічної ефективності підприємства. Для фіксації спожитої гранітним кар'єром електроенергії проектом передбачається використання сучасних багатфункціональних лічильників вітчизняного виробництва торгової марки NIK, які повністю сертифіковані в Україні та рекомендовані енергопостачальними компаніями.

Оскільки гранкар'єр є потужним високовольтним споживачем (живлення 35 кВ), облік здійснюється за допомогою лічильників трансформаторного включення. Для встановлення на головній підстанції обираємо електронний трифазний лічильник NIK 2307 ARTT.

Обґрунтування вибору даної моделі:

- трансформаторне підключення: лічильник розрахований на підключення через обрані раніше вимірювальні ТС (з вторинним струмом 5 А) та ТН (100 В);
- комплексний облік: прилад вимірює як активну (клас точності 0,5S), так і реактивну (клас точності 1,0) енергію у двох напрямках, що дозволяє фіксувати генерацію реактивної потужності від синхронних двигунів кар'єру;
- багатотарифність: підтримує програмування багатотарифного розкладу (день/ніч/пік), що дозволить кар'єру суттєво економити кошти, переносючи роботу енергоємних дробарок або насосів на нічні години;
- інтеграція: лічильник оснащений цифровими інтерфейсами (RS-485 / PLC / оптопорт) для легкої інтеграції в автоматизовану систему комерційного обліку електроенергії (АСКОЕ) підприємства.

						Арх.
Змн.	Арх.	№ докум.	Підпис	Дата		44

8. АВТОМАТИЗАЦІЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДНИХ КОМПЛЕКСІВ

8.1. Енергозберігаючі режими функціонування електроприводів

Сучасний етап розвитку промисловості неможливий без впровадження енергоощадних технологій на базі частотно-регульованого електропривода (ЧРЕП). Основу такої системи складає поєднання електричного двигуна та інтелектуального статичного перетворювача (рис.8.1).

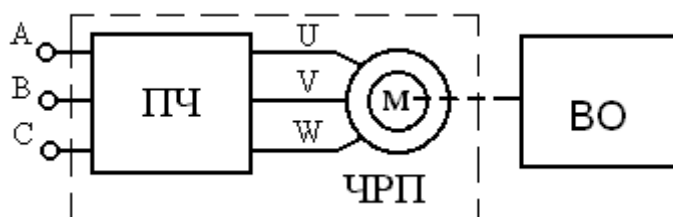


Рис.8.1. Схема частотно-регульованого електроприводу

ПЧ – перетворювач частоти; ВО – виконавчий орган; ЧРЕП – частотно-регульований електропривод

Електрична машина виконує роль силового агрегату, що трансформує енергію мережі в механічну роботу виконавчого механізму. Керування цим процесом здійснює перетворювач частоти, який модулює параметри живлення, змінюючи як амплітуду, так і частоту напруги. Стрімкий розвиток цієї галузі за останні десятиліття став можливим завдяки використанню біполярних транзисторів із ізольованим затвором (IGBT), що прийшли на зміну застарілій елементній базі.

Визначивши ключову роль частотно-регульованого привода в сучасній промисловості, необхідно детальніше зупинитися на специфіці керування саме синхронними машинами. Оскільки об'єкт дослідження – гранітний кар'єр, що включає чотири потужні агрегати по 1250 кВт, особливу увагу слід приділити не лише зміні частоти, а й оптимізації процесів збудження, що є фундаментом для їхнього стабільного та економічного функціонування.

						Арх.
Змн.	Арх.	№ докум.	Підпис	Дата		45

8.2. Стратегії керування та оптимізація збудження синхронних машин

Для об'єкта, що включає чотири синхронні двигуни потужністю 1250 кВт кожен, критично важливим є перехід на цифрові системи автоматичного регулювання збудження (САРЗ).

Методології керування потокозчепленням. В асинхронних та синхронних приводах великої потужності найчастіше обирають між двома основними алгоритмами:

- скалярний метод: передбачає пропорційну зміну напруги та частоти для збереження перевантажувальної здатності (U/f). Це оптимальне рішення для навантажень із вентиляторною характеристикою;
- векторний метод: дозволяє маніпулювати не лише амплітудою, а й фазою струму, забезпечуючи точне позиціонування магнітного потоку відносно ротора. Це гарантує стабільність моменту навіть на низьких частотах.

Застосування цифрових збуджувачів ВТЕ-320.

Для заміни морально застарілих систем пропонується впровадження тиристорних збуджувачів серії ВТЕ. Мікропроцесорне ядро забезпечує точне відстеження кута випередження θ , що гарантує стійкість двигуна при різких накидах навантаження. Комунікаційні можливості – це підтримка протоколів Profibus та RS-485 дозволяє інтегрувати двигуни в єдину мережу АСУ ТП підприємства.

Ефективна реалізація вищезазначених стратегій керування неможлива без глибокого аналізу внутрішніх процесів у електричній машині. Для того, щоб перетворити загальні концепції векторного регулювання в дієві алгоритми для систем ВТЕ-320, необхідно сформувати математичний апарат, який дозволить описати динаміку синхронного двигуна в перехідних та усталених режимах.

						Арх.
						46
Змн.	Арх.	№ докум.	Підпис	Дата		

8.3. Математичне моделювання динамічних процесів

Для аналізу режимів роботи синхронного двигуна (СД) використовується теорія узагальненої електричної машини. Основна складність моделювання полягає в тому, що параметри статора змінюються залежно від положення ротора. Щоб спростити систему диференціальних рівнянь, ми переходимо від нерухомої трифазної системи координат (A, B, C) до двофазної системи (d, q), яка обертається зі швидкістю ротора.

Перехід від фазних величин статора до осей (d, q) за допомогою перетворення Парка-Горєва дозволяє представити двигун змінного струму як модель з незалежним керуванням по двох осях. Вісь d (direct) спрямовується за вектором магнітного потоку ротора, а вісь q (quadrature) випереджає її на 90° . Зв'язок між реальними струмами статора i_A, i_B, i_C та їх проекціями на осі d, q визначається матрицею перетворення, що дозволяє розглядати машину змінного струму як аналог машини постійного струму.

У системі координат d, q стан синхронного двигуна описується наступними рівняннями напруг:

$$U_d = R_s i_d + \frac{d\psi_d}{dt} - \omega \psi_q$$

$$U_q = R_s i_q + \frac{d\psi_q}{dt} + \omega \psi_d$$

де: U_d, U_q - проекції напруги статора на відповідні осі;

ψ_d, ψ_q - потокозчеплення статорних обмоток; ω - кутова швидкість обертання ротора; R_s - активний опір обмотки статора.

Рівняння для електромагнітного моменту двигуна, який приводить у рух ваш виконавчий орган (наприклад, компресор), набуває вигляду:

$$M = \frac{3}{2} p (\psi_d i_q - \psi_q i_d)$$

						Арх.
Змн.	Арх.	№ докум.	Підпис	Дата		47

де p - число пар полюсів статора. Для синхронних машин великої потужності (1250 кВт) це рівняння показує, що моментом можна керувати через поперечну складову струму i_q , що є основою векторного керування.

Оскільки використовується СД, важливо врахувати рівняння для обмотки збудження, що живиться від перетворювача ВТЕ-320:

$$U_f = R_f i_f + \frac{d\psi_f}{dt}$$

Зміна струму збудження i_f безпосередньо впливає на потокозчеплення ψ_d , що дозволяє системі автоматичного регулювання (САР) змінювати коефіцієнт потужності $\cos\varphi$ та компенсувати реактивну потужність у мережі.

Алгоритмічна реалізація векторного керування на базі IGBT-інверторів. Математична модель у координатах d, q дозволяє перетворити складну систему змінного струму на структуру, аналогічну приводу постійного струму з незалежним збудженням. Це досягається шляхом розщеплення повного струму статора на дві ортогональні складові.

Принцип декомпозиції струмів. У мікропроцесорній системі керування інвертора (наприклад, на базі IGBT-модулів) реалізується обчислювальний цикл, який виконує такі кроки:

- вимірювання фазних струмів i_A, i_B та напруги мережі;
- пряме перетворення Кларка та Парка: перехід від фізичних величин до розрахункових проекцій i_d (складова потоку) та i_q (складова моменту);
- регулювання: САР порівнює отримані значення із заданими установками та через ПІ-регулятори формує необхідні вектори напруги.

Сформована математична модель у системі координат (d, q) стає базою для побудови реальних обчислювальних циклів мікропроцесорного керування. Перехід від абстрактних рівнянь напруг до реального керування силовим інвертором здійснюється за допомогою методів широтно-імпульсної модуляції, які дозволяють втілити теоретичні розрахунки у фізичні сигнали керування затворами транзисторів.

Широтно-імпульсна модуляція (ШІМ). Отримані в результаті розрахунків значення напруг U_d та U_q конвертуються назад у трифазну систему для керування ключами інвертора. Використання IGBT-транзисторів дозволяє реалізувати високочастотну ШІМ (2–15 кГц), що забезпечує: формування вихідного струму, максимально наближеного до синусоїдального; мінімізацію пульсацій моменту, що особливо важливо для ваших двигунів 1250 кВт при роботі на низьких швидкостях; зменшення додаткових втрат у сталі та міді двигуна завдяки зниженню вищих гармонік.

Бездатчикове (Sensorless) керування та зворотний зв'язок. Для підвищення надійності приводів великої потужності часто відмовляються від фізичних датчиків положення ротора на користь «спостерігачів» (observers). Програмна модель обчислює положення ротора в реальному часі на основі математичних рівнянь напруг та струмів статора. Для СД 1250 кВт це дозволяє уникнути проблем із механічною крихкістю датчиків у важких умовах експлуатації та точність - сучасні алгоритми забезпечують похибку регулювання швидкості в межах сотих часток відсотка.

У мікропроцесорній системі інвертора на базі IGBT реалізується стратегія орієнтованого за полем керування (Field-Oriented Control).

За допомогою широтно-імпульсної модуляції (ШІМ) формується високочастотна послідовність імпульсів напруги. Висока індуктивність обмоток двигуна 1250 кВт діє як природний фільтр, що забезпечує протікання практично синусоїдального струму (рис.8.2).

						Арх.
						49
Змн.	Арх.	№ докум.	Підпис	Дата		

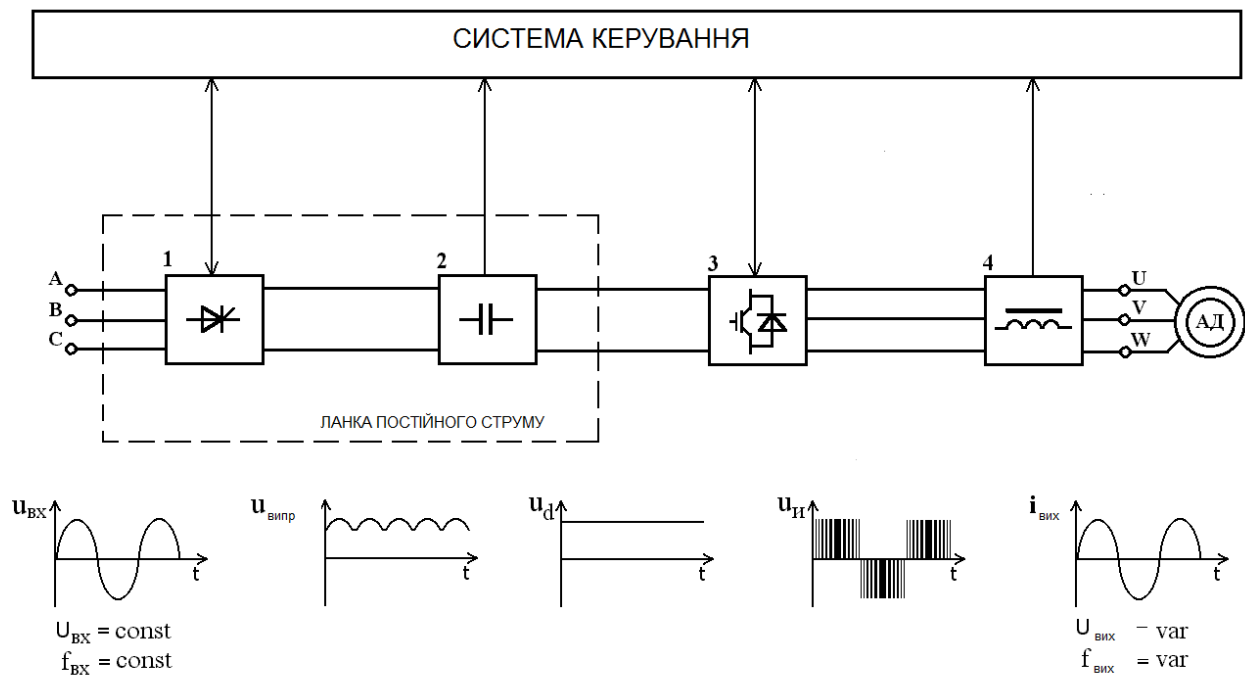


Рис.8.2. Схема низьковольтного перетворювача частоти

Програмні алгоритми векторного керування потребують надійної апаратної платформи для своєї реалізації. Тому логічним продовженням розробки є детальний розгляд схемотехнічної будови силових інверторних комірок. Саме фізичне компонування IGBT-модулів, ланки постійного струму та драйверів визначає здатність системи витримувати високі навантаження, характерні для компресорних установок потужністю 5 МВт.

8.4. Схемотехнічна реалізація силових інверторних комірок

Силова частина сучасних високовольтних перетворювачів базується на архітектурі з явно вираженою ланкою постійного струму (рис.8.3).

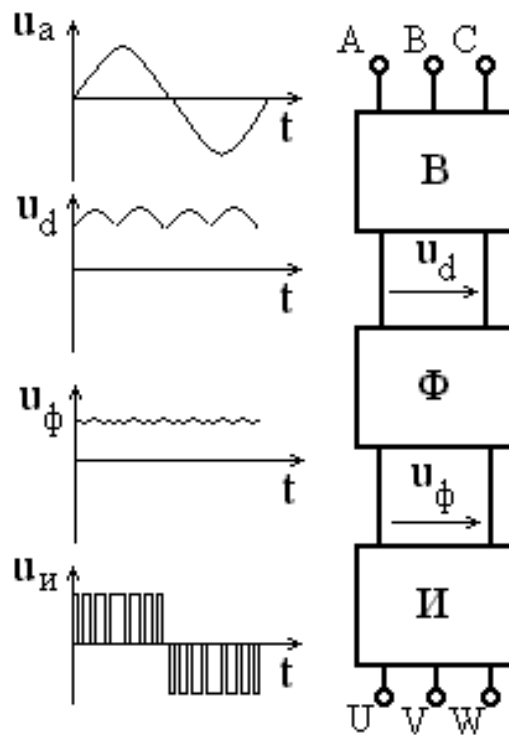


Рис.8.3. Перетворювачі з ланкою постійного струму

Основні вузли схеми:

1. Випрямляч та фільтр: вхідна напруга випрямляється та фільтрується блоком конденсаторів великої ємності, утворюючи енергетичний буфер (ланку постійного струму).
2. Автономний інвертор на IGBT: здійснює зворотне перетворення постійної напруги в імпульсну змінну напругу варіативної амплітуди.
3. Драйвери затворів: забезпечують гальванічну розв'язку та формують потужні імпульси керування транзисторами, контролюючи параметри їх насичення для захисту від короткого замикання.

Для керування синхронними машинами великої потужності (1,25 МВт) застосовуються багаторівневі або паралельні структури інверторів напруги. Основним функціональним вузлом є трифазний мостовий інвертор, побудований на базі високовольтних IGBT-модулів з інтегрованими зворотними діодами.

Структура силової комірки. Силова комірка кожного плеча інвертора складається з двох послідовно з'єднаних транзисторних ключів, що формують

фазний вихід. Для забезпечення надійної роботи при великих струмах (понад 1000 А) модулі монтуються на рідинних або форсованих повітряних охолоджувачах.

Робота комірки в режимі ШІМ (рис.8.4). Процес формування синусоїдального струму відбувається шляхом почергового відкриття верхнього та нижнього ключів у кожній фазі. Коли відкритий верхній транзистор фази "А", вихідний термінал підключається до позитивної шини живлення ($+U_d$). Коли відкритий нижній — до негативної ($-U_d$). "Мертвий час" (Dead time): алгоритм керування обов'язково вносить коротку паузу між закриттям одного транзистора та відкриттям іншого в одному плечі, щоб запобігти наскрізному короткому замиканню.

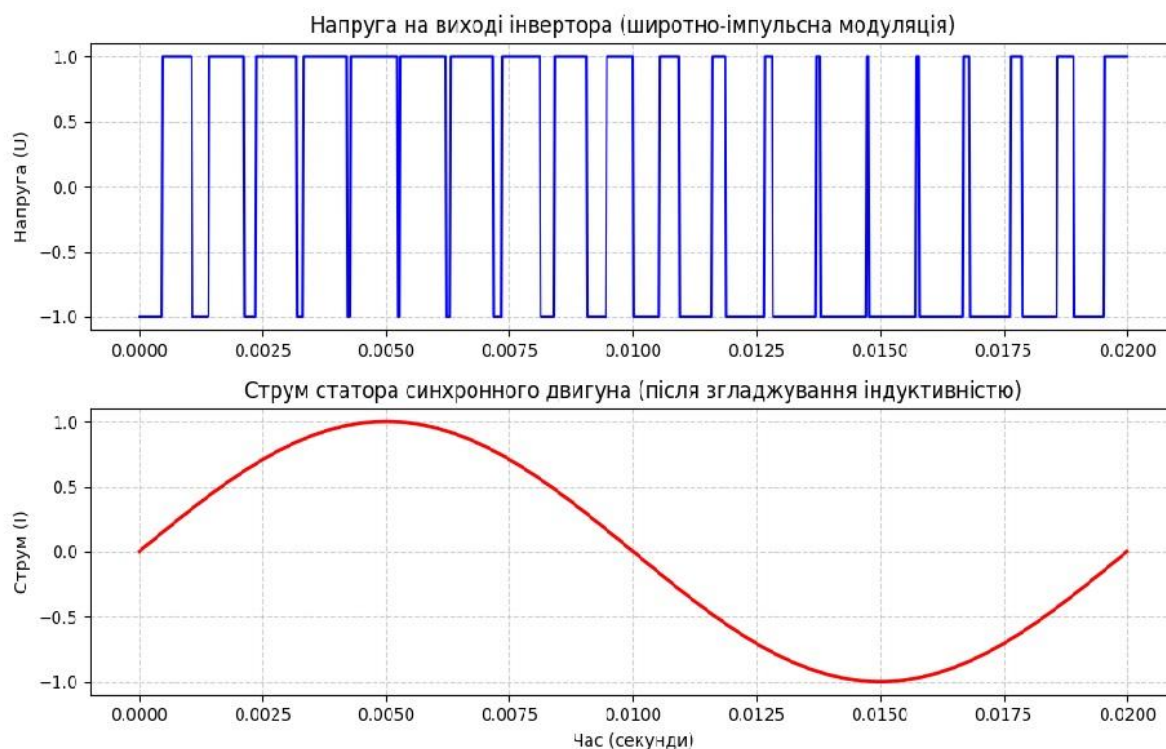


Рис.8.4. Процес перетворення енергії в інверторі на принципі ШІМ

Аналіз діаграм:

- імпульси керування: високочастотна послідовність прямокутних сигналів. Найбільша ширина імпульсу припадає на пік синусоїди, а найменша — на зони переходу через нуль;

- вихідна лінійна напруга ($U_{\text{вих}}$) має вигляд пачок високочастотних імпульсів різної тривалості. Завдяки високій індуктивності обмоток двигуна 1250 кВт, ці імпульси інтегруються, що призводить до протікання практично чистого синусоїдального струму;

- осцилограма струму статора ($I_{\text{вих}}$) має синусоїдальну форму з незначними накладеннями високочастотних пульсацій, що визначаються частотою ШІМ (зазвичай 2-5 кГц для великих потужностей).

Особливості для потужності 1250 кВт. Для таких потужних агрегатів часто використовується багаторівнева топологія (Multi-level Inverter), наприклад, трьохрівневий інвертор із затискними діодами (NPC). Перевага: це дозволяє використовувати транзистори з нижчою номінальною напругою, ніж повна напруга ланки постійного струму, та значно покращує гармонійний склад вихідної напруги. Результат: зменшуються втрати на нагрів у залізі статора двигуна, що продовжує термін експлуатації синхронних двигунів.

Система драйверного керування затворами IGBT.

Драйвер є сполучною ланкою між мікропроцесорною системою керування (МПСУ) та силовими транзисторами. Для двигунів потужністю 1250 кВт використовуються інтелектуальні драйвери, які не лише передають сигнал, а й виконують функції активного захисту (рис.8.5).

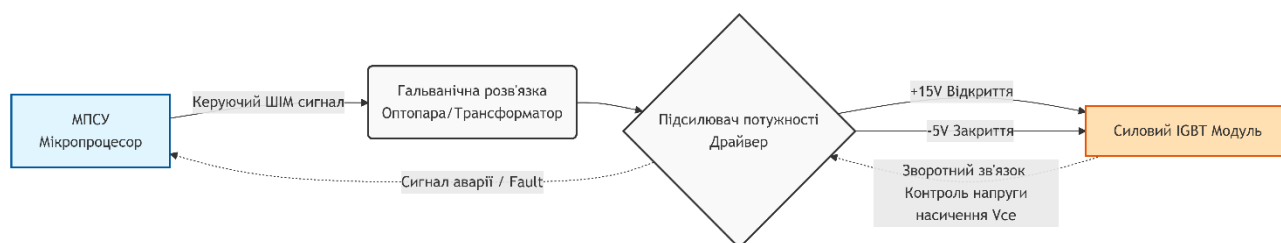


Рис.8.5. Типова блок-схема драйвера IGBT-модуля з гальванічною розв'язкою та системою захисту

Основні вузли схеми драйвера:

- гальванічна розв'язка: здійснюється за допомогою оптопар або імпульсних трансформаторів для захисту контролера від високої напруги силового кола;
- формувач двополярної напруги: для надійного замикання IGBT-транзистора на затвор подається негативна напруга (зазвичай -5В або -15В), що запобігає самовільному відкриттю ключа через ефект Міллера;
- захист за напругою насичення (V_{ce}): драйвер контролює падіння напруги на транзисторі; у разі короткого замикання він миттєво закриває ключ, запобігаючи його руйнуванню.

Часові діаграми ШІМ та осцилограми вихідних величин. Процес перетворення енергії в інверторі базується на принципі широтно-імпульсної модуляції (ШІМ). Система керування формує послідовність імпульсів, тривалість яких змінюється за синусоїдальним законом. Аналіз діаграм: Імпульси керування: Високочастотна послідовність прямокутних сигналів. Найбільша ширина імпульсу припадає на пік синусоїди, а найменша — на зони переходу через нуль. Вихідна лінійна напруга ($U_{вих}$): Має вигляд пачок високочастотних імпульсів різної тривалості. Завдяки високій індуктивності обмоток двигуна 1250 кВт, ці імпульси інтегруються, що призводить до протікання практично чистого синусоїдального струму. Осцилограма струму статора ($I_{вих}$): Має синусоїдальну форму з незначними накладеннями високочастотних пульсацій, що визначаються частотою ШІМ (зазвичай 2-5 кГц для великих потужностей).

Складність апаратної структури та висока енергоємність силових ланцюгів підвищують вимоги до безпеки експлуатації. Враховуючи відповідальність технологічного вузла, силова частина повинна працювати в парі з інтелектуальною системою діагностики. Це дозволяє не лише реалізувати функцію перетворення енергії, а й забезпечити миттєву реакцію на аварійні режими, захищаючи дорогі електричні машини від руйнування.

						Арх.
						54
Змн.	Арх.	№ док.м.	Підпис	Дата		

8.5. Комплексні алгоритми захисту та апаратна діагностика у системах ВТЕ-320

Надійність функціонування потужних синхронних машин (1,25 МВт) безпосередньо залежить від швидкодії та селективності систем протиаварійної автоматики. Сучасний тиристорний збуджувач ВТЕ-320 відрізняється наявністю глибоко інтегрованої та розгалуженої системи захисту, яка аналізує стан машини в режимі реального часу та запобігає розвитку критичних дефектів.

Мікропроцесорна система управління (МПСУ) безперервно зчитує показники напруги, струмів статора та ротора, порівнюючи їх із закладеними математичними моделями допустимих режимів.

Захист від втрати збудження та асинхронного ходу. Зникнення постійного струму в обмотці ротора (через обрив кола, вихід з ладу тиристорів або помилку персоналу) є однією з найважчих аварій для синхронного двигуна. Фізика процесу: при втраті магнітного поля ротора розривається електромагнітний зв'язок зі статором. Двигун переходить в асинхронний режим роботи. Через масивне тіло ротора та заспокійливу (демферну) обмотку починають протікати величезні індуковані струми ковзання, що призводить до стрімкого термічного руйнування ізоляції та механічних вібрацій. Реалізація у ВТЕ-320: МПСУ контролює реактивну складову струму статора та зміну $\cos\phi$. У разі виявлення ознак випадіння із синхронізму, затяжного пуску або переходу в асинхронний хід, алгоритм ініціює відключення агрегату від мережі з максимальним часом спрацьовування до 30 секунд. Це гарантовано рятує двигун від розплавлення демпферних стрижнів.

Теплова модель та захист від струмових перевантажень. Оскільки компресори мають пульсуючий характер навантаження, система захисту повинна бути селективною: не реагувати на короткочасні технологічні поштовхи, але надійно відключати живлення при реальній загрозі. Часо-струмова характеристика - обмеження струму ротора відбувається за обернено залежною часо-струмовою кривою. Це означає, що незначні перевантаження

						Арх.
Змн.	Арх.	№ докум.	Підпис	Дата		55

(наприклад, 110% від номіналу) дозволені протягом кількох хвилин, тоді як значні кидки струму призводять до відключення за лічені секунди. Форсировка - для утримання машини в синхронізмі при глибоких просадках напруги в мережі, збуджувач здатний видавати струм, що в 1,75 раза перевищує номінальний. Проте час такої форсировки суворо обмежується тепловою моделлю, щоб не допустити перегріву обмоток. Захист від коротких замикань - комплекс забезпечує миттєве апаратне блокування імпульсів керування тиристорами у разі внутрішніх пробоїв перетворювача або виникнення зовнішнього короткого замикання на клеммах постійного струму.

Інтегрована система діагностики та "аварійний слід". Відмінною рисою сучасних цифрових комплексів є не лише запобігання аваріям, а й можливість їх ретроспективного аналізу. ВТЕ-320 оснащений вбудованою системою діагностики, яка включає функцію запису так званого "аварійного сліду" (осцилографування). У незалежну енергонезалежну пам'ять мікроконтролера записуються всі ключові параметри (струми, напруги, кут навантаження, дискретні сигнали датчиків) за кілька секунд до моменту спрацьовування захисту та під час самої аварії. Це відіграє функцію "чорної скриньки", дозволяючи інженерам швидко локалізувати причину зупинки компресорної установки, відрізнити технологічне перевантаження від збою в мережі та уникнути повторних інцидентів. Крім того, наявність режиму автоматичного тестування дозволяє перевірити справність усіх вузлів збудника ще до подачі високої напруги на статор.

Забезпечення технічної надійності та високої якості керування створює передумови для досягнення головної мети модернізації — максимальної енергоефективності. Враховуючи безперебійний характер роботи компресорів та актуальні ціни на енергоносії, технічні переваги системи ВТЕ-320 безпосередньо трансформуються в конкретні фінансові показники, розрахунок яких наведено нижче.

						Арх.
						56
Змн.	Арх.	№ док.м.	Підпис	Дата		

8.6. Комплексні режими енергозбереження компресорних установок

Експлуатація масивних електроприводів, на прикладі з чотирьох синхронних двигунів (СД) потужністю по 1250 кВт, відкриває значний потенціал для зниження енерговитрат. Завдяки інтелектуальному регулюванню струму збудження, сучасні системи дозволяють оптимізувати електромагнітні процеси не лише всередині самої машини, а й у живильній мережі підприємства.

Головним критерієм енергоефективності СД є підтримання режиму мінімальних сумарних втрат, який зазвичай фіксується при значенні коефіцієнта потужності ($\cos\varphi$), що наближається до одиниці при незначному відставанні струму. Протягом добового циклу роботи підприємства навантаження на мережу коливається: у години пікового енергоспоживання доцільно переводити двигуни в режим перезбудження (генерація реактивної енергії), тоді як у нічний час (при загальному спаді навантаження) — у режим недозбудження.

Мікропроцесорна система ВТЕ-320 автоматично розраховує та підтримує оптимальний коефіцієнт потужності залежно від поточного механічного навантаження на валу компресора (коефіцієнта завантаження β). Розрахункові значення для стабілізації системи наведено в таблиці 8.1.

Таблиця 8.1. Оптимальні параметри збудження залежно від завантаження двигуна

Коефіцієнт завантаження СД (β)	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
Оптимальний коефіцієнт ($\alpha_{\text{опт}}$)	2,1	1,61	1,28	1,05	0,878	0,74	0,64
Цільовий $\cos\varphi_{\text{опт}}$	0,37	0,54	0,69	0,808	0,88	0,93	0,96

Техніко-економічне обґрунтування модернізації.

Впровадження алгоритмів автоматичного підпорядкованого регулювання дозволяє суттєво зменшити втрати активної потужності, які раніше витрачалися на генерацію реактивної складової.

Для оцінки фінансової доцільності проекту використаємо розрахункову модель зниження втрат для одного агрегату 1250 кВт:

$$\Delta P = P_{\text{ст}} - P_{\text{ст.рег.}} = (0,74 - 0,7) \times 1250 = 50 \text{ кВт}$$

						Арх.
						57
Змн.	Арх.	№ докум.	Підпис	Дата		

де ΔP - диференційна різниця активної потужності після оптимізації режимів збудження.

Річний економічний ефект для одного компресора обчислюється з урахуванням вартості електроенергії для промислових споживачів ($C_0 = 8,65$ грн/кВт·год) та річного фонду робочого часу ($\tau = 4095,17$ годин):

$$S_1 = C_0 \cdot \Delta P \cdot \tau = 8,65 \cdot 50 \cdot 4095,17 = 1771161,025 \text{ грн/рік}$$

Оскільки технологічний комплекс складається з чотирьох ідентичних агрегатів, сумарна річна економія становитиме:

$$S_{\text{заг}} = 4 \cdot 1771161,025 = 7084644,1 \text{ грн/рік}$$

Отримані результати підтверджують, що зменшення втрат активної потужності лише на 50 кВт з кожного двигуна за рахунок оптимізації магнітного потоку забезпечує підприємству економію понад 7 млн грн щороку. Такий високий показник рентабельності гарантує надзвичайно швидку окупність капіталовкладень у придбання та монтаж сучасних мікропроцесорних збуджувачів ВТЕ-320.

						Арх.
						58
Змн.	Арх.	№ докум.	Підпис	Дата		

9. ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі виконано комплексне проектування системи електропостачання гранітного кар'єру, спрямоване на створення надійної, безпечної та економічно ефективної мережі живлення в умовах діючого підприємства гірничодобувної промисловості. За результатами проведених досліджень та інженерних розрахунків сформовано такі висновки.

За допомогою методу впорядкованих діаграм (за коефіцієнтом максимуму) та методу питомої потужності визначено силові й освітлювальні навантаження всіх підрозділів підприємства. З урахуванням потужних високовольтних споживачів загальне розрахункове навантаження гранітного кар'єру складає $P_p = 12,0147$ МВт та $Q_p = 1,78$ Мвар.

Виконано техніко-економічне порівняння двох варіантів трасування живильних ліній від системної підстанції 150/35/10 кВ на відстань 6,5 км. Доведено інженерну перевагу варіанта I (напруга 35 кВ) із використанням дволанцюгової повітряної лінії, виконаної проводом марки АС 120/19 на залізобетонних опорах. Цей варіант забезпечує мінімальні втрати потужності, виключає глибокі падіння напруги та має значний резерв пропускної здатності для подальшого розширення кар'єру.

Розглянуто режими споживання та генерації реактивної енергії. Рационально використано компенсувальну здатність наявних високовольтних синхронних двигунів (4х1250 кВт), які повністю покривають дефіцит реактивної потужності в мережі 10 кВ. Для низьковольтних мереж 0,4 кВ розраховано та прийнято до встановлення автоматизовані конденсаторні установки типу КРМ-0,4, що дозволяє розвантажити цехові трансформатори й підняти коефіцієнт потужності до нормативного рівня.

Проведено розрахунок струмів трифазного короткого замикання для високовольтних вузлів системи електропостачання кар'єру. За умовами термічної стійкості до знайдених аварійних струмів обґрунтовано вибір

						Арх.
						59
Змн.	Арх.	№ докум.	Підпис	Дата		

трижильних кабелів марки ААШв (3х70) для відхідних ліній 10 кВ до цехових КТП.

За параметрами тривалого робочого режиму та перевірки на стійкість до умов КЗ обрано вимірювальні апарати підстанції. На вводах 10 кВ успішно пройшли перевірку та прийняті до встановлення трансформатори струму типу ТЛК 10-У3 з номінальним струмом 800 А. Для систем релейного захисту та комерційного обліку обрано вимірювальні трансформатори напруги серії НАМІ, вторинне навантаження яких повністю задовольняє вимогам класу точності 0,5.

Для надійного захисту високовольтних ліній кар'єру обрано сучасні вакуумні вимикачі ВР35НС-20/1600 (на стороні 35 кВ) та серії ВР1 (на стороні 10 кВ), що мають високий комутаційний ресурс та пожежобезпечність. Організацію комерційного тритарифного обліку реалізовано за допомогою лічильників трансформаторного включення серії NIK 2307 ARTT, інтегрованих в автоматизовану систему АСКОЕ підприємства. Живлення ланцюгів оперативного струму підстанції забезпечено двома трансформаторами власних потреб ТМ-25/10, а захист ізоляції від грозових і комутаційних перенапруг — розрядниками РВС-35 та РВО-10.

У спеціальному розділі роботи виконане обґрунтування та розробка системи автоматизації й оптимізації енергоспоживання компресорного комплексу підприємства. Впровадження цифрових систем збудження ВТЕ-320 та методів векторного керування для групи компресорів потужністю 5 МВт дозволяє: досягти прямої економічної вигоди у розмірі понад 7 млн грн на рік; - мінімізувати негативний вплив на мережу живлення шляхом компенсації реактивної потужності; забезпечити стабільну роботу компресорних агрегатів у перехідних режимах завдяки високій швидкодії мікропроцесорного керування.

Загалом, запроєктована система електропостачання гранітного кар'єру повністю відповідає вимогам Правил улаштування електроустановок (ПУЕ) та концепціям сучасного енергоменеджменту. Вона є гнучкою, безпечною в експлуатації та має необхідний технічний резерв для подальшого розвитку виробничих потужностей підприємства.

						Арх.
						60
Змн.	Арх.	№ докум.	Підпис	Дата		

10. ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Електричне обладнання підстанцій систем електропостачання : навч. посіб. / А. Ю. Орлович, П. Г. Плешков, О. А. Козловський [та ін.] ; М-во освіти і науки України, Центральноукраїн. нац. техн. ун-т. – Кропивницький: Лисенко В.Ф., 2019. – 272 с.
2. Електропостачання: навч. посіб. / Ф.П.Шкрабець; М-во освіти і науки України, Нац. гірн. ун-т. – Д.: НГУ, 2015. – 540 с.
3. Електротехнічні системи електроспоживання : [навч. посіб.] / П. Г. Плешков, В. В. Зінзура, Н. Ю. Гарасьова [та ін.]; за заг. ред. П. Г. Плешкова. - Кропивницький : ЦНТУ, 2021. – 208 с.
4. Правила улаштування електроустановок. Відокремлений підрозділ «Науково-проектний центр розвитку Об'єднаної енергетичної системи України» державного підприємства «Національна енергетична компанія «Укренерго» (НПЦР ОЕС України). Наказ Міністерства енергетики України від 21.07.2017 №476, 2017. – 617 с.
5. ДСТУ ІЕС 60076-7:2015. Трансформатори силові. Частина 7. Настанова щодо навантаження масляних силових трансформаторів. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2016. 54 с.
6. Півняк Г. Г. та ін. Електропостачання гірничих підприємств : підручник. Дніпро : Національний гірничий університет, 2015. 544 с.
7. Комплектні трансформаторні підстанції КТП 10/0,4 кВ. Керівництво з експлуатації та технічний опис. Хмельницький: ТОВ «Хмельницький завод трансформаторних підстанцій», 2021. 42 с.
8. Лічильники електричної енергії багатофункціональні НІК 2307. Паспорт виробу. Київ : ТОВ «НІК-ЕЛЕКТРОНІКА», 2022. 24 с.
9. Кваліфікаційна робота бакалавра : метод. рекомендації до структури та оформлення випускної кваліфікаційної роб. для здобувачів вищої освіти першого (бакалаврського) рівня зі спец. 141 - Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка / [уклад. : П. Г. Плешков, Н. Ю. Гарасьова, А. І. Котиш та ін.]; М-во освіти і науки України, Центральноукраїн. нац. техн. ун-т. – Кропивницький : ЦНТУ, 2023. – 80 с.

						Арх.
Змн.	Арх.	№ докум.	Підпис	Дата		61

ДОДАТКИ

Таблиця А.1.

Добовий графік навантажень Р, Q, %

№	Робочі дні		Вихідні дні	
	Р, %	Q, %	Р, %	Q, %
1	78	50	35	20
2	84	53	35	20
3	75	55	35	20
4	80	53	35	20
5	83	50	35	20
6	85	53	35	20
7	80	53	35	20
8	90	50	20	15
9	91	60	20	15
10	93	80	20	15
11	91	100	20	15
12	90	80	20	15
13	91	60	20	15
14	96	65	20	15
15	90	70	20	15
16	93	70	20	15
17	100	70	20	15
18	98	70	35	20
19	100	70	35	20
20	98	65	35	20
21	96	60	35	20
22	93	60	35	20
23	91	53	35	20
24	83	50	35	20

Таблиця А.2.

Добовий графік навантажень P, Q, S

№	Зимові дні						Літні дні					
	Робочі дні			Вихідні дні			Робочі дні			Вихідні дні		
	P, кВт	Q, кВар	S, кВА	P, кВт	Q, кВар	S, кВА	P, кВт	Q, кВар	S, кВА	P, кВт	Q, кВар	S, кВА
1	9368	2371	9663	4203	948	4309	7962	2016	8213	3573	806	3663
2	10088	2513	10396	4203	948	4309	8575	2136	8837	3573	806	3663
3	9007	2608	9377	4203	948	4309	7656	2217	7971	3573	806	3663
4	9608	2513	9931	4203	948	4309	8167	2136	8442	3573	806	3663
5	9968	2371	10246	4203	948	4309	8473	2016	8710	3573	806	3663
6	10208	2513	10513	4203	948	4309	8677	2136	8936	3573	806	3663
7	9608	2513	9931	4203	948	4309	8167	2136	8442	3573	806	3663
8	10809	2371	11066	2402	711	2505	9187	2016	9406	2042	605	2130
9	10929	2845	11293	2402	711	2505	9289	2419	9599	2042	605	2130
10	11169	3794	11796	2402	711	2505	9494	3225	10027	2042	605	2130
11	10929	4742	11913	2402	711	2505	9289	4031	10126	2042	605	2130
12	10809	3794	11456	2402	711	2505	9187	3225	9737	2042	605	2130
13	10929	2845	11293	2402	711	2505	9289	2419	9599	2042	605	2130
14	11529	3083	11934	2402	711	2505	9800	2620	10144	2042	605	2130
15	10809	3320	11307	2402	711	2505	9187	2822	9611	2042	605	2130
16	11169	3320	11652	2402	711	2505	9494	2822	9905	2042	605	2130
17	12010	3320	12460	2402	711	2505	10208	2822	10591	2042	605	2130
18	11769	3320	12228	4203	948	4309	10004	2822	10394	3573	806	3663
19	12010	3320	12460	4203	948	4309	10208	2822	10591	3573	806	3663

№	Зимові дні						Літні дні					
	Робочі дні			Вихідні дні			Робочі дні			Вихідні дні		
	P, кВт	Q, кВар	S, кВА	P, кВт	Q, кВар	S, кВА	P, кВт	Q, кВар	S, кВА	P, кВт	Q, кВар	S, кВА
20	11769	3083	12166	4203	948	4309	10004	2620	10341	3573	806	3663
21	11529	2845	11875	4203	948	4309	9800	2419	10094	3573	806	3663
22	11169	2845	11526	4203	948	4309	9494	2419	9797	3573	806	3663
23	10929	2513	11214	4203	948	4309	9289	2136	9531	3573	806	3663
24	9968	2371	10246	4203	948	4309	8473	2016	8710	3573	806	3663

Таблиця А.3.

Річний графік за тривалістю P, Q

№	P, кВт	T, днів	T*P	T	№	P, кВт	T, днів	T*P	T
1	12010	147	1765470	147	29	9494	105	996870	3969
2	12010	147	1765470	294	30	9494	105	996870	4074
3	11769	147	1730043	441	31	9494	105	996870	4179
4	11769	147	1730043	588	32	9368	147	1377096	4326
5	11529	147	1694763	735	33	9289	105	975345	4431
6	11529	147	1694763	882	34	9289	105	975345	4536
7	11169	147	1641843	1029	35	9289	105	975345	4641
8	11169	147	1641843	1176	36	9289	105	975345	4746
9	11169	147	1641843	1323	37	9187	105	964635	4851
10	10929	147	1606563	1470	38	9187	105	964635	4956
11	10929	147	1606563	1617	39	9187	105	964635	5061
12	10929	147	1606563	1764	40	9007	147	1324029	5208
13	10929	147	1606563	1911	41	8677	105	911085	5313
14	10809	147	1588923	2058	42	8575	105	900375	5418
15	10809	147	1588923	2205	43	8473	105	889665	5523
16	10809	147	1588923	2352	44	8473	105	889665	5628
17	10208	105	1071840	2457	45	8167	105	857535	5733
18	10208	105	1071840	2562	46	8167	105	857535	5838
19	10208	147	1500576	2709	47	7962	105	836010	5943
20	10088	147	1482936	2856	48	7656	105	803880	6048
21	10004	105	1050420	2961	49	4203	65	273195	6113
22	10004	105	1050420	3066	50	4203	65	273195	6178
23	9968	147	1465296	3213	51	4203	65	273195	6243
24	9968	147	1465296	3360	52	4203	65	273195	6308
25	9800	105	1029000	3465	53	4203	65	273195	6373
26	9800	105	1029000	3570	54	4203	65	273195	6438
27	9608	147	1412376	3717	55	4203	65	273195	6503
28	9608	147	1412376	3864	56	4203	65	273195	6568

продовження таблиці А.3

№	P, кВт	T, днів	T*P	T	№	P, кВт	T, днів	T*P	T
57	4203	65	273195	6633	86	2402	65	156130	8280
58	4203	65	273195	6698	87	2042	48	98016	8328
59	4203	65	273195	6763	88	2042	48	98016	8376
60	4203	65	273195	6828	89	2042	48	98016	8424
61	4203	65	273195	6893	90	2042	48	98016	8472
62	4203	65	273195	6958	91	2042	48	98016	8520
63	3573	48	171504	7006	92	2042	48	98016	8568
64	3573	48	171504	7054	93	2042	48	98016	8616
65	3573	48	171504	7102	94	2042	48	98016	8664
66	3573	48	171504	7150	95	2042	48	98016	8712
67	3573	48	171504	7198	96	2042	48	98016	8760
68	3573	48	171504	7246					
69	3573	48	171504	7294					
70	3573	48	171504	7342					
71	3573	48	171504	7390					
72	3573	48	171504	7438					
73	3573	48	171504	7486					
74	3573	48	171504	7534					
75	3573	48	171504	7582					
76	3573	48	171504	7630					
77	2402	65	156130	7695					
78	2402	65	156130	7760					
79	2402	65	156130	7825					
80	2402	65	156130	7890					
81	2402	65	156130	7955					
82	2402	65	156130	8020					
83	2402	65	156130	8085					
84	2402	65	156130	8150					
85	2402	65	156130	8215					

Таблиця Б.1. Вибір типу та потужності БК при кількості трансформаторів N = 12 шт.

<i>№ КТП</i>	<i>К-сть т-рів</i>	<i>P_p, кВт</i>	<i>Q_p, кВАр</i>	<i>Q_{np}, кВАр</i>	<i>Q_{кп}, кВАр</i>	<i>Кількість та потужність БК, шт.·кВАр</i>	<i>Сума Q_{БК}, кВАр</i>	<i>Q_{кп} - Q_{бк}, кВАр</i>	<i>K_з</i>	<i>S_p, кВА</i>
1,2	3	1965,64	1369,41	739,09	630,32	3·200;	600	30,32	0,7	2110,86
3,4	3	2048,67	1400,92	461,45	939,474	3·250;	750	189,474	0,72	2149,6
5	2	1384,78	863,699	205,86	657,839	2·275;	550	107,839	0,71	1419,87
6	2	1543,78	1153,78	0	1153,78	4·275;	1100	53,7828	0,77	1544,71
7	2	1248,78	762,8	632,9	129,9		0	129,9	0,73	1463,32

Сумарна потужність БК на стороні 0,4 кВ складає 3000 кВАр.

Кількість та потужність БК на стороні 10 кВ: сумарна потужність БК 10 кВ складає 0 кВАр.

Таблиця Б.2. Вибір типу та потужності БК при кількості трансформаторів N = 13 шт.

<i>№ КТП</i>	<i>К-сть т-рів</i>	<i>P_p, кВт</i>	<i>Q_p, кВАр</i>	<i>Q_{np}, кВАр</i>	<i>Q_{кп}, кВАр</i>	<i>Кількість та потужність БК, шт.·кВАр</i>	<i>Сума Q_{БК}, кВАр</i>	<i>Q_{кп} - Q_{бк}, кВАр</i>	<i>K_з</i>	<i>S_p, кВА</i>
1,2	4	1965,64	1369,41	1994,06	0		0	0	0,6	2395,63
3,4	3	2048,67	1400,92	461,45	939,474	4·175;	700	239,474	0,72	2165,26
5	2	1384,78	863,699	205,86	657,839	2·275;	550	107,839	0,71	1419,87
6	2	1543,78	1153,78	0	1153,78	4·275;	1100	53,7828	0,77	1544,71
7	2	1248,78	762,8	632,9	129,9		0	129,9	0,73	1463,32

Сумарна потужність БК на стороні 0,4 кВ складає 2350 кВАр.

Кількість та потужність БК на стороні 10 кВ: сумарна потужність БК 10 кВ складає 0 кВАр.

Таблиця Б.3. Вибір типу та потужності БК при кількості трансформаторів N = 14 шт.

<i>№ КТП</i>	<i>К-сть т-рів</i>	<i>P_p, кВт</i>	<i>Q_p, кВАр</i>	<i>Q_{np}, кВАр</i>	<i>Q_{кп}, кВАр</i>	<i>Кількість та потужність БК, шт.·кВАр</i>	<i>Сума Q_{БК}, кВАр</i>	<i>Q_{кп} - Q_{бк}, кВАр</i>	<i>K_з</i>	<i>S_p, кВА</i>
1,2	4	1965,64	1369,41	1994,06	0		0	0	0,6	2395,63
3,4	4	2048,67	1400,92	1908,65	0		0	0	0,62	2481,87
5	2	1384,78	863,699	205,86	657,839	2·275;	550	107,839	0,71	1419,87
6	2	1543,78	1153,78	0	1153,78	4·275;	1100	53,7828	0,77	1544,71
7	2	1248,78	762,8	632,9	129,9		0	129,9	0,73	1463,32

Сумарна потужність БК на стороні 0,4 кВ складає 1650 кВАр.

Кількість та потужність БК на стороні 10 кВ: сумарна потужність БК 10 кВ складає 0 кВАр.

продовження таблиці Б.4.

1		2	3			4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Всього на шинах 10 кВ ТП5															1400,07	397,14	1455,31
ТП№6																	
силова		44	7,5	0	200	2112	0	0,55	0,73	0,94	1161,6	1087,52	21	1,21	1405,74	1087,52	1777,30
освітлювальна															138,04	66,26	
БК 0,4 кВ																-1100	
Всього на шинах 0,4 кВ ТП6															1543,78	53,78	1544,71
Втрати в трансформаторах															17,32	93,62	
Кількість трансформаторів:	2																
Номінальна потужність, кВА:	1000																
Коефіцієнт завантаження Kз=	0,77																
Всього на шинах 10 кВ ТП6															1561,10	147,40	1568,04
ТП№7																	
силова		96	0,8		95	1650		0,6	0,8	0,7	932,3	651,50	35	1,15	1073,26	651,50	1255,53
освітлювальна															175,51	111,30	
Всього на шинах 0,4 кВ ТП7															1248,78	762,80	1463,32
Втрати в трансформаторах															15,98	86,89	
Кількість трансформаторів:	2																
Номінальна потужність, кВА:	1000																
Коефіцієнт завантаження Kз=	0,73																
Всього на шинах 10 кВ ТП7															1264,75	849,69	1523,67
Всього кар'єру																	
силова		468	0,7	-	250	11155,0		0,57	0,78	0,80	6367,4	5123,0	89	1,09	6926,6	5123,0	8615,3
освітлювальна															834,54	427,63	
Всього															7761,13	5550,62	9541,73
БК 0,4 кВ																-3000	
Втрати в трансформаторах															94,47	514,35	
Всього по гранкар'єру															7855,60	3064,96	8432,35
Високовольтне навантаження																	
Компресорна (10 кВ)		4,0	1250	-	1250	5000,0		0,70	0,90	0,48	3500,0	1695,1			3500,0	-1695,1	3888,9
АД зони відкритих робіт		3,0	315	-	315	945,0		0,70	0,85	0,62	661,5	410,0			661,5	410,0	778,2
Всього на шинах 10 кВ гранкар'єру													tgφ=	0,148	12017,10	1779,80	12148,19

Таблиця В.1. Вибір потужності та місця розташування цехових ТП

№ ТП	Pp	Qp	Sp	Вид ТП	Nтр	Стр	Кз	Категорія за ПБ	Місце розташування	% обмеження споживачів III категорії	Категорія споживачів
ТП№1-2	1965,64	769,41	2110,86	вбуд.	3	х 1000	0,70	Д	Дільниця гірничо-видобувних робіт	0,51	I,II,III
ТП№3-4	2048,67	650,92	2149,60	вбуд.	3	х 1000	0,72	Д	Дробильно-сортувальний комплекс	2,31	I,II,III
ТП№5	1384,78	313,70	1419,87	вбуд.	2	х 1000	0,71	Д	Сервісно-відновлювальний комплекс	1,40	I,II,III
ТП№6	1543,78	53,78	1544,71	вбуд.	2	х 1000	0,77	Д	Каменерізний комплекс	9,37	I,II,III
ТП№7	1248,78	762,80	1463,32	вбуд.	2	х 1000	0,73	Д	Адміністративно-побутовий корпус	4,33	I,II,III

Таблиця Г.1. Вибір кабелів 10 кВ заводської мережі

№ пп	Найменування КЛ	№ тр	Sp, кВА	Ip, А	Fp, мм ²	Fст, мм ²	Fмин Т.У., мм ²	Idоп, А	Iав.р, А	Idоп', А
1	ГЗП-ТП1	2	1443,59	41,72	34,77	50	70	165	83,44	167,06
2	ГЗП-ТП2	1	721,79	41,72	34,77	50	70	165	-	-
3	ГЗП-ТП3	2	1452,31	41,97	34,98	50	70	165	83,95	167,06
4	ГЗП-ТП4	1	726,15	41,97	34,98	50	70	165	-	-
5	ГЗП-ТП5	2	1413,84	40,86	34,05	50	70	165	81,72	167,06
6	ГЗП-ТП6	2	1568,36	45,33	37,77	50	70	165	90,66	167,06
7	ГЗП-ТП7	2	1519,35	43,91	36,59	50	70	165	87,82	167,06
8	ГЗП-СД	4	3888,9	56,20	46,83	50	70	165	112,40	167,06
9	ГЗП-АД	3	778,2	14,99	12,50	25	70	165	29,99	167,06

Таблиця Г.2. Струми КЗ в мережі 10 кВ, приведені до ВН

Точка КЗ	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Ik'',кА	5,477	5,096	1,024	5,113	1,025	5,046	1,023	5,02	1,022
Точка КЗ	10	11	12	13	14	15	16	17	
Ik'',кА	5,163	1,027	5,154	1,026	4,945	1,019	5,032	0,945	

Таблиця Г.3 Вибір вимикачів на ВРП 35 кВ

Умови вибору	Розрахункові дані	Каталожні дані
		ВР35НС
1. $U_{уст} \leq U_{ном}$	$U_{уст}=35$ кВ	$U_{ном}=35$ кВ
2. $I_{раб.макс} \leq I_{ном}$	$I_{раб.макс}=199,25$ А	$I_{ном}=1600$ А
3. $I_{нт} \leq I_{отк.ном}$	$I_{нт}=I''=4,587$ кА	$I_{отк.ном}=20$ кА
4. $\sqrt{2}I_{нт}+i_{ат} \leq \sqrt{2}I_{отк.ном}(1+\beta_n)$	$\sqrt{2}I_{нт}+i_{ат}=\sqrt{2}*4,587+0=$ $=6,48$ кА	$\sqrt{2}I_{отк.ном}(1+0)=\sqrt{2}*20(1+0,4)=$ $=39,5$ кА
5. $I'' \leq I_{пр.с}$	$I''=4,587$ кА	$I_{пр.с}=20$ кА
6. $i_y \leq i_{пр.с}$	$i_y=8,406$ кА	$i_{пр.с}=52$ кА
7. $Bk \leq I_{терм}^2 \cdot t_{терм}$	$Bk=10,16$ кА ² с	$I_{терм}^2 \cdot t_{терм}=20^2 \cdot 3=$ $=1200$ кА ² с

Таблиця Г.4

Вибір роз'єднувачів на ВРП 35 кВ

Умови вибору	Розрахункові дані	Каталожні дані
		РНДЗ-35
1. $U_{уст} \leq U_{ном}$	$U_{уст}=35$ кВ	$U_{ном}=35$ кВ
2. $I_{РАБ.МАКС} \leq I_{ном}$	$I_{РАБ.МАКС}=199,25$ А	$I_{ном}=1000$ А
3. $i_y \leq I_{дин}$	$i_y=8,406$ кА	$I_{дин}=64$ кА
4. $B_k \leq B_T$	$B_k=10,16$ кА ² с	$B_T=1600$ кА ² с
Тип привода		ПРН-110М

Таблиця Г.5

Вибір вимикачів на шинах 10 кВ

Умови вибору	Розрахункові дані	Каталожні дані
		ВР1-20/1000
1. $U_{уст} \leq U_{ном}$	$U_{уст}=10$ кВ	$U_{ном}=10$ кВ
2. $I_{РАБ.МАКС} \leq I_{ном}$	$I_{РАБ.МАКС}=697,36$ А	$I_{ном}=1000$ А
3. $I_{пт} \leq I_{отк.ном}$	$I_{пт}=I''=5,477$ кА	$I_{отк.ном}=20$ кА
4. $\sqrt{2}I_{пт}+i_{ат} \leq \sqrt{2}I_{отк.ном}(1+\beta_n)$	$\sqrt{2}I_{пт}+i_{ат}=\sqrt{2}*5,477+0=7,745$ кА	$\sqrt{2}*20(1+40/100)=39,48$ кА
5. $I'' \leq I_{дин}$	$I''=5,477$ кА	$I_{дин}=20$ кА
6. $i_y \leq i_{дин}$	$i_y=12,37$ кА	$i_{дин}=52$ кА
7. $B_k \leq I_{терм}^2 \cdot t_{терм}$	$B_k=41,52$ кА ² с	$I_{терм}^2 \cdot t_{терм}=20^2 \cdot 3=1200$ кА ² с

$$\text{КТП-6: } I_{РАБ.МАКС} = \frac{S_P}{\sqrt{3} \cdot U_{НОМ}} = \frac{1568,36}{\sqrt{3} \cdot 10} = 90,65 \text{ А}$$

Приймаємо вимикач ВР1-20/630.

$$\text{Секційний вимикач: } I_{РАБ.МАКС} = \frac{S_P}{2\sqrt{3} \cdot U_{НОМ}} = \frac{12064,49}{2\sqrt{3} \cdot 10} = 348,68 \text{ А}$$

Приймаємо вимикач ВР1-20/630.

Таблиця Г.6.

Вибір трансформаторів власних потреб

Електроприймачі	Встановлена потужність, кВт	Кіл-ть	Р, кВт	Q, кВар
1. Електродвигуни обдуву транс-ра	8	2	16	10
2. Обігрів вимикачів	1,2	3	3,6	-
3. Опалення та освітлення приміщення	5,5	1	5,5	-
4. Зовнішнє освітлення	4,5	1	4,5	-
5. Навантаження, яке споживається оперативними ланцюгами	2,0	1	2,0	-
Всього			31,6	10

Таблиця Г.7. Вибір трансформатора струму на 35 кВ

Умова вибору	Розрахункові дані	Каталожні дані ТС типу ТФЗМ-35АУ1
$U_{уст} \leq U_{ном}$	$U_{уст} = 35 \text{ кВ}$	$U_{ном} = 35 \text{ кВ}$
$I_{роб.форс} \leq I_{ном}$	$I_{роб.форс} = 199,25 \text{ А}$	$I_{ном} = 400 \text{ А}$
$i_{yd} \leq i_{дин}$	$i_{yd} = 8,406 \text{ кА}$	$i_{дин.ст} = 84 \text{ кА}$
$B_k \leq I_{TH}^2 \cdot t_{TH}$	$B_k = 10,16 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$	$I_{TH}^2 \cdot t_{TH} = 15^2 \cdot 3 = 675 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$
$Z_2 \leq Z_{2ном}$	$Z_2 = 1,294 \text{ Ом}$	$Z_{2ном} = 2,0 \text{ Ом}$

Таблиця Г.8. Перевірка трансформатора струму на вводах 10 кВ

Умови вибору	Розрахункові дані	Каталожні дані
		ТЛК 10-УЗ
1. $U_{уст} \leq U_{ном}$	$U_{уст} = 10 \text{ кВ}$	$U_{ном} = 10 \text{ кВ}$
2. $I_{РАБ.МАКС} \leq I_{ном}$	$I_{РАБ.МАКС} = 697,37 \text{ А}$	$I_{ном} = 800 \text{ А}$
3. $i_y \leq i_{дин}$	$i_y = 12,37 \text{ кА}$	$i_{дин} = 81 \text{ кА}$
4. $B_k \leq I_{терм}^2 \cdot t_{терм}$	$B_k = 41,52 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$	$I_{терм}^2 \cdot t_{терм} = 31,5^2 \cdot 3 = 2976,7 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$
5. $Z_2 \leq Z_{2Н}$	$Z_2 = 0,266 \text{ Ом}$	$Z_{2Н} = 0,4 \text{ Ом}$

Таблиця Г.9. Вибір трансформатора струму 10 кВ на відходящих лініях (КТП-6)

Умова вибору	Розрахункові дані	Каталожні дані ТС типу ТЛК-10-100УЗ
$U_{уст} \leq U_{ном}$	$U_{уст} = 10 \text{ кВ}$	$U_{ном} = 10 \text{ кВ}$
$I_{роб.форс} \leq I_{ном}$	$I_{роб.форс} = 90,65 \text{ А}$	$I_{ном} = 100 \text{ А}$
$i_{yd} \leq i_{дин}$	$i_{yd} = 11,66 \text{ кА}$	$i_{дин.ст} = 52 \text{ кА}$
$B_k \leq I_{TH}^2 \cdot t_{TH}$	$B_k = 36,9 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$	$I_{TH}^2 \cdot t_{TH} = 20^2 \cdot 1 = 400 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$
$Z_2 \leq Z_{2ном}$	$Z_2 = 0,182 \text{ Ом}$	$Z_{2ном} = 0,4 \text{ Ом}$

Таблиця Г.10. Розрахунок вторинного навантаження трансформаторів струму

Прилад	Клас точності	Навантаження фази, ВА		
		А	В	С
Лічильник NIK 2307 ARTT	1	0,05	-	0,05
Амперметр Е335	1,0	0,5	-	-
Всього		0,55	-	0,5

Таблиця Г.11. Розрахунок вторинного навантаження трансформаторів напруги

Прилад	Тип	Кіл-ть	S, ВА	Загальна потужність	
				ΣP , Вт	ΣQ , вар
Вольтметр (шини 10кВ)	Е335	1	2	2	-
Багатофункціональний електронний лічильник	ЕА05RALP2BN3W	1	3,6	3,3	1,4
Електронний лічильник	NIK 2307 ARTT	11	108,84	22	106,6
Всього:				27,3	108